Данный файл представлен исключительно в ознакомительных целях.

Уважаемый читатель!
Если вы скопируете данный файл,
Вы должны незамедлительно удалить его сразу после ознакомления с содержанием.
Копируя и сохраняя его Вы принимаете на себя всю ответственность, согласно действующему международному законодательству .
Все авторские права на данный файл сохраняются за правообладателем.
Любое коммерческое и иное использование кроме предварительного ознакомления запрещено.

Публикация данного документа не преследует никакой коммерческой выгоды. Но такие документы способствуют быстрейшему профессиональному и духовному росту читателей и являются рекламой бумажных изданий таких документов.

Посвящается 100-летию
со дня рождения акад. АН СССР
Георгия Александровича Николаева

СВАРКА. РЕЗКА. КОНТРОЛЬ

справочник

СВАРКА. РЕЗКА. КОНТРОЛЬ

Справочник в двух томах

Авторы:

Алешин Н.П., Чернышев Г.Г., Акулов А.И.,
Братчук С.Д., Гаврилюк В.С., Гарбуль А.Ф.,
Гирш В.И., Гладков Э.А., Грачева К.А.,
Григорьянц А.Г., Гриненко В.И., Зубченко А.С.,
Исаев А.П., Каганский Б.А., Киселев С.Н.,
Коновалов А.В., Копаев Б.В., Куркин А.С.,
Лукин В.И., Малолетков А.В., Макаров Э.Л.,
Маслов Б.Г., Неровный В.М., Никифоров Н.И.,
Полевой Г.В., Рымкевич А.И., Семенов В.Н.,
Смирнов В.В., Стеклов О.И., Сухинин Г.К.,
Терехин А.С., Хаванов В.А., Шашин Д.М.,
Шиганов И.Н., Щавелев Л.Н., Якушин Б.Ф.

СВАРКА. РЕЗКА. КОНТРОЛЬ

Справочник

Том 1

Под редакцией
Н.П. Алешина, чл.-кор. РАН,
Г.Г. Чернышева, д-ра техн. наук

Москва «Машиностроение» 2004

УДК 621.791(031)
ББК 30.616
С24

Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов, опубликованных в справочнике «Сварка. Резка. Контроль», допускаются только с разрешения издательства и со ссылкой на источник информации.

Сварка. Резка. Контроль: Справочник. В 2-х томах / Под общ. ред.
С 24 Н.П. Алешина, Г.Г. Чернышова. – М.: Машиностроение, 2004.
Т. 1 / Н.П. Алешин, Г.Г. Чернышов, Э.А. Гладков и др. – 624 с.: ил.

В первом томе приведены теоретические основы сварки, виды сварных соединений, технологические основы проектирования сварных конструкций, сущность процессов, оборудование, сварочные материалы, выбор режимов сварки: дуговой, электрошлаковой, электрической, контактной, концентрированными источниками питания, давлением, газовой и т.д. Изложены сведения по газовой сварке и резке, а также гидро- и гидроабразивной резке; их способы, оборудование и области применения.

Для инженерно-технических работников всех отраслей промышленности, а также рекомендуется как учебное пособие для студентов, обучающихся по направлению 651400 – «Машиностроительные технологии и оборудование» по специальности 120500 – «Оборудование и технология сварочного производства». Справочник может быть полезен высококвалифицированным рабочим.

ISBN 5-217-03263-4 (Т. 1)

ISBN 5-217-03262-6

© Н.П. Алешин, Г.Г. Чернышов, Э.А. Гладков и др., 2004

© Издательство «Машиностроение», 2004

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ (*Н.П. Алешин, Г.Г. Чернышов*) 11

Глава 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СВАРКИ (*науч. ред. д-р техн. наук, проф. Э.Л. Макаров*) 12

1.1. Физические основы и классификация процессов сварки (*А.В. Коновалов*) 12

1.2. Тепловые процессы при сварке (*А.В. Коновалов*) 14

1.3. Металлургические процессы при сварке (*Б.Ф. Якушин*) ... 31

1.3.1. Прогнозирование физико-химических реакций при сварке плавлением 31

1.3.2. Расчет массы продуктов реакций 36

1.3.3. Расчет взаимодействия элементов в сплавах и выбор раскислителя 37

1.3.4. Расчет необходимого количества раскислителя 38

1.3.5. Скорость физико-химических реакций 38

1.3.6. Формирование химического состава сварочной ванны 39

1.3.7. Взаимодействие металла с газовой фазой в зоне сваривания 40

1.3.8. Газовые защитные среды при сварке 43

1.3.9. Взаимодействие металла с флюсом при сварке 45

1.3.10. Газошлаковая защита металла при сварке 47

1.4. Сварочные деформации и напряжения (*А.С. Куркин*) 49

1.4.1. Виды деформаций и напряжений 49

1.4.2. Механизм возникновения напряжений, деформаций и перемещений 50

1.4.3. Виды искажений формы и размеров при сварке, их влияние на качество сварных конструкций 52

1.4.4. Методы определения напряжений, деформаций и перемещений 53

1.4.5. Уменьшение сварочных деформаций, напряжений и перемещений 59

1.5. Свариваемость материалов (*Э.Л. Макаров*) 61

1.5.1. Понятие «свариваемость» 61

1.5.2. Показатели свариваемости 62

1.5.3. Сопротивляемость образованию ГТ 62

1.5.4. Методы и критерии оценки сопротивляемости ГТ 64

1.5.5. Сопротивляемость образованию ХТ 67

1.5.6. Методы и критерии оценки сопротивляемости «ламелярным трещинам» ... 74

1.5.7. Оценка сопротивляемости хрупкому разрушению 75

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 78

Глава 2. ВИДЫ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ (*С.Н. Киселев*) 79

2.1. Общие положения. Классификация. Обозначения на чертежах 79

2.2. Ручная дуговая сварка 82

2.3. Сварка под флюсом 84

2.4. Сварка в защитных газах ... 86

2.5. Другие сварные соединения 89
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 92
Глава 3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ (*С.Н. Киселев*) 93
3.1. Общие положения 93
3.2. Классификация основных видов сварных конструкций ... 96
3.3. Рациональное проектирование и технологичность сварных конструкций 96
3.3.1. Основные направления работ на стадии проектирования 96
3.3.2. Технология изготовления и автоматизация производства сварных конструкций 99
3.4. Технологическое обеспечение сборочно-сварочных операций 101
3.4.1. Приемы выполнения операций и приспособления сварочного производства 101
3.4.2. Применение роботов в сварочном производстве 102
3.5. Оптимизация параметров проектируемой конструкции .. 104
3.6. Системы автоматизированного проектирования (САПР) в сварочном производстве 105
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 106
Глава 4. ДУГОВАЯ И ЭЛЕКТРОШЛАКОВАЯ СВАРКА 107
4.1. Ручная дуговая сварка (*Г.Г. Чернышов*) 107
4.1.1. Сущность процесса ... 107
4.1.2. Методы повышения производительности ручной сварки покрытыми электродами 108
4.1.3. Выбор режимов при РДС 110
4.1.4. Способы выполнения швов 111
4.1.5. Особенности сварки в различных пространственных положениях 113
4.2. Механизированная дуговая сварка под флюсом (*Г.Г. Чернышов*) 114
4.2.1. Особенности процесса сварки под флюсом 114
4.2.2. Подготовка деталей под сварку 117
4.2.3. Режимы сварки под флюсом 118
4.2.4. Техника сварки под флюсом швов различных типов 120
4.3. Дуговая сварка в защитных газах (*Г.Г. Чернышов*) 124
4.3.1. Особенности сварки в защитных газах 124
4.3.2. Сварка неплавящимся электродом в инертных газах 125
4.3.3. Разновидности сварки неплавящимся электродом .. 127
4.3.4. Сварка плавящимся электродом в инертном газе 128
4.3.5. Сварка в углекислом газе 129
4.3.6. Разновидности механизированной сварки плавящимся электродом 132
4.4. Электрошлаковая сварка (*А.И. Рымкевич*) 133
4.4.1. Разновидности процессов ЭШС 133
4.4.2. Энергетические и тепловые процессы при ЭШС ... 136
4.4.3. Техника выполнения ЭШС 139
4.4.4. Режимы ЭШС 142
4.4.5. Требования к оборудованию для ЭШС 143
4.4.6. Деформации и перемещения при ЭШС 147
4.4.7. Металлургические процессы при ЭШС 148
4.4.8. Особенности сварки сталей, цветных металлов и сплавов, сварочные материалы и свойства сварных соединений 151

4.4.9. Дефекты сварных соединений и методы их устранения 155
4.4.10. Сварные конструкции, изготовляемые с применением ЭШС 157
4.5. Оборудование для дуговой и электрошлаковой сварки (*науч. ред. д-р техн. наук, проф. Э.А. Гладков*) 158
4.5.1. Автоматы для сварки неплавящимся электродом в защитном газе (*Л.Н. Щавелев, В.И. Гриненко, В.А. Хаванов*) 158
4.5.2. Оборудование для дуговой сварки плавящимся электродом (*В.В. Смирнов, А.Ф. Гарбуль, Б.А. Каганский*) 179
4.5.3. Оборудование для ЭШС (*А.И. Рымкевич*) 196
4.5.4. Источники питания для дуговой сварки плавящимся электродом (*Б.А. Каганский, Э.А. Гладков, А.В. Малолетков*) 219
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 277
Глава 5. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ КОНТАКТНАЯ СВАРКА (*науч. ред. канд. техн. наук, доц. Д.М. Шашин*) 279
5.1. Определения и краткая классификация способов контактной сварки (*Б.В. Копаев*) .. 279
5.2. Конструктивные элементы сварных соединений контактной сварки, их графическое изображение и условное обозначение (*Б.В. Копаев*) 280
5.3. Формирование соединения при точечной и шовной сварке (*Б.В. Копаев*) 283
5.4. Формирование соединения при стыковых способах сварки (*Б.В. Копаев*) 286
5.4.1. Стыковая сварка оплавлением 286
5.4.2. Стыковая сварка сопротивлением 289
5.5. Формирование соединения при рельефной сварке (*Б.В. Копаев*) 290
5.6. Основы технологии контактной стыковой сварки (*Б.В. Копаев*) 292
5.6.1. Применение контактной стыковой сварки 292
5.6.2. Конструирование и подготовка деталей к сварке 292
5.6.3. Параметры режима и техника стыковой сварки сопротивлением 294
5.6.4. Параметры режима и техника стыковой сварки непрерывным оплавлением 299
5.6.5. Дефекты и контроль качества стыковой контактной сварки 302
5.6.6. Методы интенсификации нагрева при стыковой сварке оплавлением 304
5.7. Технология точечной сварки (*А.П. Исаев*) 307
5.7.1. Применение точечной сварки 307
5.7.2. Конструирование и подготовка деталей к сварке 310
5.7.3. Параметры режима и техника точечной сварки 317
5.8. Технология рельефной сварки (*А.П. Исаев*) 333
5.9. Технология шовной сварки (*А.П. Исаев*) 340
5.10. Состав, основные параметры, классификация и обозначения контактных машин (*Д.М. Шашин*) 344
5.11. Источники питания (источники сварочного тока) и энергетические характеристики контактных машин (*Д.М. Шашин*) 347
5.12. Контакторы. Аппаратура управления и контроля контактных машин. Прерыватели (*Д.М. Шашин*) 354
5.13. Электроды контактных машин (*Д.М. Шашин*) 362

5.14. Машины точечной сварки (*Д.М. Шашин*) 356
5.15. Машины рельефной сварки (*Д.М. Шашин*) 384
5.16. Машины шовной сварки (*Д.М. Шашин*) 386
5.17. Машины стыковой сварки (*Д.М. Шашин*) 394
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 404

Глава 6. СВАРКА КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ПИТАНИЯ 406
6.1. Плазменная сварка (*В.М. Неровный*) 406
6.1.1. Сущность плазменной сварки 406
6.1.2. Основные области применения 407
6.1.3. Основные параметры режима 408
6.1.4. Разновидности плазменной сварки и способы повышения ее эффективности ... 412
6.2. Электронно-лучевая сварка (*В.М. Неровный*) 414
6.2.1. Сущность метода и основные области применения 414
6.2.2. Основные параметры режима 416
6.2.3. Техника сварки 416
6.2.4. Специфические дефекты в сварных швах ЭЛС 417
6.2.5. Технологические приемы сварки 418
6.3. Лазерная сварка (*А.Г. Григорьянц*) 420
6.3.1. Формирование сварного соединения 420
6.3.2. Сварка деталей малых толщин 424
6.3.3. Сварка металлов с глубоким проплавлением ... 426
6.3.4. Технологические особенности лазерной сварки различных конструкционных материалов 430
6.4. Оборудование для электронно-лучевой и лазерной сварки 436
6.4.1. Оборудование для лазерной сварки (*А.Г. Григорьянц*) 436
6.4.2. Электронно-лучевое сварочное оборудование (*С.Д. Братчук*) 440
6.4.3. Оборудование для плазменной сварки (*В.М. Неровный*) 450
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 454

Глава 7. ПАЙКА МАТЕРИАЛОВ (*В.Н. Семенов*) 455
7.1. Основы физико-химического взаимодействия в процессе пайки 455
7.2. Разновидности способов пайки 455
7.3. Припои для пайки и прочность паяных соединений 456
7.4. Защитные среды в процессе пайки конструкций 459
7.4.1. Подготовка поверхностей под пайку 460
7.4.2. Способы обеспечения защиты паяемых поверхностей от окисления 461
7.5. Совместимость паяемых материалов с припоями 462
7.5.1. Состояние вопроса 465
7.5.2. Методология исследований совместимости материалов с припоями 465
7.5.3. Методика определения напряжений в паяемой паре 467
7.5.4. Методика определения снижения прочности материалов с трещиной 470
7.5.5. Методика определения одновременного влияния трех факторов на механические свойства металла при воздействии расплава припоя 471
7.6. Термообработка материалов и паяных конструкций 474
7.6.1. Обеспечение прочностных свойств сталей мартенситного класса в паяных конструкциях 475

7.7. Технология пайки 476
7.7.1. Пайка углеродистых и низколегированных сталей .. 476
7.7.2. Пайка конструкционных сталей 476
7.7.3. Пайка жаропрочных сплавов 477
7.7.4. Пайка чугуна 477
7.7.5. Пайка инструментальных сталей и твердых сплавов 478
7.7.6. Пайка титана 478
7.7.7. Пайка тугоплавких металлов со сталью 478
7.7.8. Пайка вольфрама 479
7.7.9. Пайка пористого вольфрама (или молибдена) с медным сплавом 479
7.7.10. Пайка разнородных металлов 480
7.8. Оценка качества паяных соединений 482
7.8.1. Контроль качества металла 482
7.8.2. Контроль качества поверхностей и покрытий 483
7.8.3. Контроль качества пайки 484
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 485
Глава 8. СВАРКА ДАВЛЕНИЕМ (*В.М. Неровный, В.И. Гирш*) 487
8.1. Холодная сварка 487
8.1.1. Сущность метода и основные области применения 487
8.1.2. Технологические схемы сварки 488
8.1.3. Технологические возможности 488
8.1.4. Технология сварки 490
8.1.5. Оборудование для холодной сварки 491
8.2. Сварка взрывом 491
8.2.1. Сущность метода и основные области применения 491
8.2.2. Технологические схемы сварки 493
8.2.3. Технологические возможности метода 494
8.2.4. Технология сварки 494
8.2.5. Оборудование 495
8.3. Магнитно-импульсная сварка 495
8.3.1. Сущность метода и основные области применения 495
8.3.2. Технологические возможности 496
8.3.3. Технология сварки 497
8.3.4. Технологические схемы сварки 497
8.3.5. Оборудование 497
8.4. Сварка прокаткой 497
8.4.1. Сущность метода и основные области применения 497
8.4.2. Выбор основных параметров режима 499
8.4.3. Технологические схемы сварки 499
8.4.4. Оборудование 500
8.5. Клинопрессовая сварка 500
8.6. Сварка трением 502
8.6.1. Сущность метода и основные области применения 502
8.6.2. Технологические схемы сварки трением 502
8.6.3. Технологические возможности сварки трением ... 504
8.6.4. Технология сварки 505
8.6.5. Оборудование 506
8.7. Ультразвуковая сварка 507
8.7.1. Сущность метода и основные области применения 507
8.7.2. Технологические возможности метода 508
8.7.3. Технология сварки 509
8.7.4. Технологические схемы сварки 510
8.7.5. Оборудование для ультразвуковой сварки 510
8.8. Диффузионная сварка 511

8.8.1. Сущность метода и основные области применения 511
8.8.2. Основные параметры режима 512
8.8.3. Рекомендации по выбору режима 513
8.8.4. Технологические возможности процесса 514
8.8.5. Разновидности способов сварки 514
8.8.6. Оборудование 515
8.9. Высокочастотная сварка ... 515
8.9.1. Сущность метода и основные области применения 515
8.9.2. Основные параметры режима 517
8.9.3. Разновидности способов высокочастотной сварки 517
8.9.4. Технологические возможности 518
8.9.5. Технология 519
8.9.6. Оборудование для высокочастотной сварки 521
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 521
Глава 9. ГАЗОВАЯ СВАРКА И РЕЗКА. ГИДРОРЕЗКА 523
9.1. Оборудование для сварки и резки (*Н.И. Никифоров, Г.К. Сухинин*) 523
9.1.1. Ручная аппаратура для газовой сварки и резки 523
9.1.2. Резаки для воздушно-дуговой резки 539
9.1.3. Газовые коммуникации и оборудование рабочих постов 541
9.1.4. Машины для термической резки 551
9.2. Технология газовой сварки, пайки и резки (*Г.В. Полевой*) 579
9.2.1. Способы газовой сварки 579
9.2.2. Пайка металлов 594
9.2.3. Термическая резка металлов и сплавов 596
9.3. Гидрорезка. Гидроабразивная резка (*Н.И. Никифоров*) 608
9.3.1. Оборудование для гидроабразивной резки 608
9.3.2. Области применения и технические характеристики оборудования для гидроабразивной резки 610
ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ 612

ПРЕДИСЛОВИЕ

Издание справочника «Сварка. Резка. Контроль» в двух томах сейчас крайне необходимо и актуально, так как оборудование и технология сварки постоянно прогрессируют как в научном, так и в прикладном плане. Особенно заметные изменения произошли в последние годы.

С развитием техники требуется совершенствовать технологию сварки деталей разных толщин из различных материалов, в связи с чем постоянно расширяется набор применяемых видов и способов сварки. В настоящее время сваривают детали толщиной от нескольких микрометров до нескольких метров, изготовленные не только из конструкционных сталей, но и из специальных сплавов на основе цветных и тугоплавких металлов, а также из композиционных материалов. Существенные изменения произошли в источниках питания для сварки, которые создаются теперь с использованием микропроцессорной техники и инверторных блоков и значительно расширяют технологические возможности процессов сварки.

Постоянно растет применение автоматической и механизированной сварки, а также комплексной механизации, охватывающей все виды работ, связанных с изготовлением сварных конструкций.

Одновременно в промышленном секторе экономики России наблюдаются существенные структурные изменения и появляется множество мелких и средних производств, доля выпуска сварных конструкций которыми в сравнении с крупными предприятиями постоянно возрастает. Это потребовало улучшения контроля за качеством продукции и профессиональной подготовки персонала.

С 15 января 2000 г. постановлением Госгортехнадзора России в стране введены новые Правила аттестации сварщиков и специалистов сварочного производства, которые унифицированы в соответствии с международными требованиями по уровням профессиональной подготовки и системе аттестации персонала в области сварочного производства. Специалисты, выполняющие работы по сварке ответственных конструкций, должны периодически подтверждать свою квалификацию.

В связи с этим читателю предлагается справочник «Сварка. Резка. Контроль». В нем в отличие от предыдущих многочисленных изданий сконцентрированы необходимые сведения об основных способах сварки, резки, а также методах контроля. В справочнике излагаются базовые элементы теории сварочных процессов, но в основном рассматриваются практические вопросы выбора технологии, оборудования, сварочных материалов и методов контроля. Отдельные главы второго тома посвящены организации, экономике сварочного производства, техническому нормированию, безопасности работ и стандартизации.

Справочник предназначен для инженеров, техников и рабочих различных предприятий по производству сварных конструкций. Он может быть рекомендован для преподавателей и студентов в качестве учебного пособия по изучению техники и технологии сварочного производства.

Чл.-кор. РАН ***Н.П. Алешин***,
д-р техн. наук, проф. ***Г.Г. Чернышов***

Глава 1

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СВАРКИ

1.1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И КЛАССИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ СВАРКИ

Сварка – получение неразъемных соединений посредством установления атомных связей между соединяемыми частями при их нагревании и (или) пластическом деформировании.

Элементарные связи удерживают каждый атом внутри кристалла симметрично направленными силами. На свободной поверхности тела атом неуравновешен вследствие отсутствия или ослабления связей с внешней стороны (рис. 1.1). Это увеличивает потенциальную энергию поверхностного слоя, поэтому при соединении тел требуется введение извне механической или тепловой энергии для преодоления энергетического барьера (рис. 1.2).

Внешняя механическая энергия деформации будет затрачена на преодоление сил отталкивания, возникающих между поверхностными атомами сближаемых тел. Когда расстояния между ними становятся близкими к межатомным, в решетке кристаллов возникают квантовые процессы взаимодействия электронных оболочек атомов.

Тепловая энергия, сообщенная поверхностным атомам при повышении температуры, увеличивает флуктуационную вероятность развития процессов электронного взаимодействия и облегчает соединение.

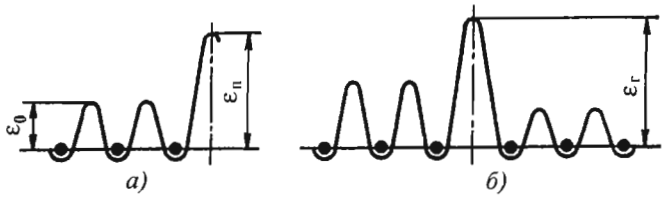


Рис. 1.1. Энергетический барьер потенциальной энергии $\varepsilon_п$ системы атомов у поверхности кристалла (*а*) и на границе твердой и жидкой фаз $\varepsilon_г$ в начальный период их контактирования (*б*):
ε_0 – энергия связи атомов внутри кристалла

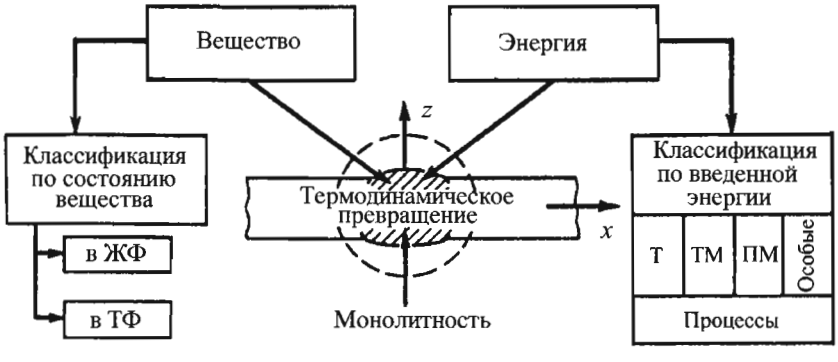


Рис. 1.2. Схема-модель, поясняющая термодинамическое определение, и классификация процессов сварки:
Т, ТМ, ПМ – термические, термомеханические и прессово-механические процессы;
ЖФ и ТФ – жидкая и твердая фазы соответственно

Практическое получение монолитных соединений осложнено двумя факторами:

– свариваемые поверхности имеют микронеровности, поэтому при совмещении поверхностей контактирование возможно лишь в отдельных точках;

– свариваемые поверхности загрязнены, так как на любой поверхности твердого тела адсорбируют атомы внешней среды.

Для качественного соединения изделий необходимо обеспечить контакт по большей части стыкуемых поверхностей и активацию их.

Активация поверхностей состоит в том, что поверхностным атомам твердого тела для перевода их в активное состояние сообщается некоторая энергия, необходимая для обрыва связей между атомами тела и атомами внешней среды, насыщающими их свободные связи. Такая энергия активации может в общем случае быть сообщена в виде теплоты (термическая активация), упругопластической деформации (механическая активация), электронного облучения и других видов воздействия (табл. 1.1).

Термические процессы. Для всех термических процессов сварки независимо от вида носителя энергии (инструмента) она вводится, в конечном итоге, всегда через расплавленный материал. Энергия хаотически движущихся частиц расплавленного материала носит в термодинамике название «термическая», чем обосновано наименование этих процессов. Дуга, луч, газовое пламя – внешние носители энергии, от которых энергия передается в изделие тем или иным способом. При термической сварке разогрев происходит за счет внутреннего источника в результате преобразования в теплоту химической энергии, выделяемой при реакции горения термита.

Термомеханические и механические процессы. В термомеханических и механических процессах преобладают внутренние носители энергии, в которых она преобразуется в теплоту главным образом вблизи контакта соединяемых изделий – стыка.

К термомеханическим процессам относятся процессы, идущие с введением теплоты и механической энергии сил давления при осадке. Теплота выделяется при протекании электрического тока, газопламенном или индукционном нагреве, введении в зону сварки горячего инструмента и т.п. Сварка может вестись как с плавлением металла (частичным или по всему соединению), так и без плавления.

В основе всех механических процессов лежит пластическая деформация, создаваемая тем или иным способом в зоне сварного соединения. Давление в механических сварочных процессах может осуществляться как при помощи мощных пневмогидравлических устройств, так и за счет энергии взрыва (сварка взрывом).

В ряде случаев свариваемые изделия нагреваются в результате преобразования первичной механической энергии в тепловую (сварка трением, ультразвуковая сварка).

Для пластичных материалов возможна деформация в холодном состоянии (холодная сварка); при увеличении свариваемых сечений и повышении прочности свариваемого материала для уменьшения усилий деформирования и повышения пластичности материала его обычно предварительно подогревают.

1.1. Классификация методов сварки металлов по физическим признакам

Сварка без давления плавлением	Сварка с давлением	
Термические процессы	Термомеханические процессы	Механические процессы
Газовая	Высокочастотная	Взрывом
Дуговая	Газопрессовая	Магнитно-импульсная
Лазерная	Диффузионная	Трением
Плазменная	Контактная	Ультразвуковая
Термитная	Кузнечная	Холодная
Электронно-лучевая	Печная	
Электрошлаковая		

Требования к источникам энергии для сварки. Классификация сварочных процессов (см. табл. 1.1) показывает, что каждая их группа может быть реализована с помощью определенного источника энергии.

Для выполнения высококачественной сварки этот источник должен отвечать требованиям технологической и конструктивной целесообразности применения, экономичности преобразования энергии, ограничения вредных побочных эффектов при сварке и т.п.

Источники энергии для термических процессов сварки плавлением (луч, дуга, пламя и др.) должны обеспечивать концентрацию тепловой энергии и температуру в зоне сварки или пятне нагрева заданных размеров, достаточные для плавления материала и провара его на требуемую глубину, но без интенсивного испарения.

Источники энергии для термомеханических и механических процессов сварки давлением (контактная, холодная и другие виды сварки) должны обеспечивать концентрацию тепловой или механической энергии в зоне сварки, а также давление, достаточные для создания физического контакта, активации и химического взаимодействия атомов соединяемых поверхностей.

Должны также обеспечиваться физическая или физико-химическая защита зоны сварки от окружающего воздуха и другие технологические условия, специфические для каждого метода сварки.

1.2. ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ СВАРКЕ

Реализация большинства сварочных технологических процессов связана с нагревом обрабатываемого материала различными видами сварочных источников теплоты, а эффективность использования того или иного сварочного процесса определяется условиями нагрева и охлаждения изделия и присадочного материала. Так, характер протекания тепловых процессов определяет производительность плавления основного и присадочного металлов, направление и полноту протекания металлургических процессов в сварочной ванне или полости реза, условия формирования структуры металла шва и зоны термического влияния. Условия нагрева и охлаждения во многом определяют характер и уровень внутренних напряжений и деформацию изделия. Поэтому в инженерной практике часто возникает необходимость расчетного определения температурно-временных параметров сварочных термических циклов в различных зонах изделия: размеров зон нагрева; скоростей нагрева и охлаждения и т.п. Наряду с современными численными методами подобных расчетов, не рассматриваемыми в данном справочнике, для решения таких задач широко используют упрощенные аналитические подходы, лежащие в основе классической теории распространения теплоты при сварке и позволяющие оперативно получать численные оценки с приемлемой для практических целей точностью.

Теплофизические величины и понятия. В расчетах тепловых процессов обычно используют следующие основные понятия и величины.

Температура характеризует степень нагретости тела. В шкале Кельвина нижней границей температурного промежутка служит точка абсолютного нуля, поэтому абсолютные температуры выражают в кельвинах (К). В шкале Цельсия за нуль принята точка таяния льда, что соответствует 273,16 К. Приращения температур в обеих шкалах одинаковы (1 К = 1 °С).

Температурное поле есть распределение температур в теле в определенный момент времени. Если температурное поле не изменяется во времени, оно называется стационарным: $T = T(x, y, z)$, в противном случае – нестационарным: $T = T(x, y, z, t)$. Для наглядности температурные поля часто представляют в виде наборов изотермических поверхностей или линий.

Изотермическая поверхность – это совокупность точек тела, имеющих одинаковую температуру.

Изотерма – линия на поверхности или в сечении тела, соединяющая точки с одинаковой температурой.

Теплоемкость – свойство материала поглощать теплоту при нагревании. За единицу теплоемкости принимают теплоту, необходимую для нагрева единицы массы [массовая теплоемкость c, Дж/(г · К)] или единицы объема [объемная теплоемкость $c\rho$, Дж/(см^3 · К)] вещества на 1°.

Теплопроводность – способность материалов проводить теплоту. Она характеризуется коэффициентом теплопроводности λ, Вт/(см · К), который связывает удельный тепловой поток q

с градиентом температуры в уравнении теплопроводности Фурье: $q = -\lambda \operatorname{grad}(T)$. В инженерных расчетах обычно пользуются усредненными в характерных температурных интервалах значениями величин теплофизических свойств (табл. 1.2).

Коэффициент температуропроводности представляет собой отношение коэффициента теплопроводности к объемной теплоемкости $a = \lambda / c\rho$ и имеет размерность 1/см^2. Эта величина участвует в дифференциальном уравнении теплопроводности.

Основные допущения и упрощения, принятые в классической теории распространения теплоты при сварке. В общем случае теплофизические свойства материалов не являются постоянными, а зависят от структуры материала, температуры и других факторов. Кроме того, теплопроводящие среды могут состоять из нескольких материалов с различными свойствами, иметь анизотропию свойств и т.п. В этом случае распространение теплоты в материале описывается дифференциальным уравнением теплопроводности, которое имеет вид

$$c\rho\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial z}\right) + q(x,y,z,t),$$

где $\lambda = \lambda(x, y, z, T)$ – функция распределения теплопроводности среды; $c\rho = c\rho(x, y, z, T)$ – функция распределения объемной теплоемкости среды; $q = q(x, y, z, T)$ – функция распределения источников (стоков) теплоты.

На современном уровне развития математики аналитическое решение уравнения теплопроводности в общем виде еще не найдено, однако при введении некоторых допущений и упрощений можно получить пригодные для практического использования решения. Если допустить, что материал изотропен, имеет постоянные, не зависящие от температуры теплофизические свойства, и пренебречь скрытыми теплотами фазовых и структурных превращений, то уравнение теплопроводности приобретет вид линейного дифференциального уравнения в частных производных с постоянными коэффициентами:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right).$$

К решениям такого уравнения применим принцип суперпозиции (наложения): суммарное приращение температуры в точке от нескольких источников теплоты равно сумме приращений температур от каждого источника. Эта особенность широко используется в классической теории распространения теплоты при сварке.

Схемы нагреваемого тела. В зависимости от формы и размеров изделия, а также от длительности распространения теплоты выбирают одну из следующих схем.

1.2. Типовые величины теплофизических свойств некоторых материалов

Материал	Плотность ρ, г/см^3	Коэффициент теплопроводности λ, Вт/(см · К)	Объемная теплоемкость $c\rho$, Дж/(см^3 · К)	Коэффициент температуропроводности a, 1/см^2
Низкоуглеродистые и низколегированные стали	7,8	0,38…0,42	4,9…5,2	0,08…0,1
Коррозионно-стойкие аустенитные стали		0,25…0,33	4,7…4,8	0,053…0,07
Медь	8,9	3,7…3,8	3,85…4,0	0,95…0,96
Латунь	8,7	1,17	3,45	0,34
Алюминий	2,7	2,7	2,7	1,0
Технический титан	4,5	0,17	2,8	0,06

1. *Полубесконечное тело* представляет собой массивное тело с одной ограничивающей плоскостью: $z = 0$ (рис. 1.3, *б*). Остальные поверхности находятся на значительном удалении от нее и практически не влияют на распространение теплоты. Поток теплоты в этом случае пространственный. Ошибка от пренебрежения ограниченностью размеров области распространения теплоты тем меньше, чем больше размеры тела, чем короче расчетная продолжительность процесса распространения теплоты (т.е. суммарная длительность нагрева и охлаждения), чем ближе к источнику теплоты зона расчетных температур и чем ниже коэффициент температуропроводности материала.

2. *Плоский слой* – это тело, ограниченное двумя параллельными плоскостями: $z = 0$ и $z = \delta$ (см. рис. 1.3, *д*), в котором температуры распределяются по толщине неравномерно. Поток теплоты при этом пространственный, как и в случае массивного тела. Эту схему применяют в тех случаях, когда толщина изделия не настолько велика, чтобы можно было пренебречь влиянием ограничивающей плоскости $z = \delta$ и считать тело полубесконечным.

3. *Бесконечная пластина* представляет собой тело, ограниченное двумя параллельными плоскостями: $z = 0$ и $z = \delta$ (см. рис. 1.3, *в*). При использовании этой схемы всегда предполагают, что температура по толщине изделия распределена равномерно. Поток теплоты в этом случае плоский. Ошибка от такого предположения тем меньше, чем меньше толщина изделия, чем больше продолжительность процесса, чем меньше коэффициент температуропроводности материала, чем дальше от источника теплоты находится зона расчетных температур и чем меньше коэффициент поверхностной теплоотдачи.

4. *Стержень* – это тело с прямо- или криволинейной осью; температура в пределах поперечного сечения стержня равномерна (см. рис. 1.3, *е*). Поток теплоты в этом случае линейный вдоль оси стержня. Ошибка от замены реального изделия с трехмерным тепловым потоком схемой стержня тем меньше, чем меньше поперечные размеры стержня, чем дольше длительность процесса и больше коэффициент температуропроводности металла и чем меньше коэффициент поверхностной теплоотдачи.

Сварочная дуга как источник теплоты. Превращая электрическую энергию в тепловую, сварочная дуга сосредоточивает теплоту в небольшом объеме и развивает весьма высокую температуру, которая в центре столба дуги

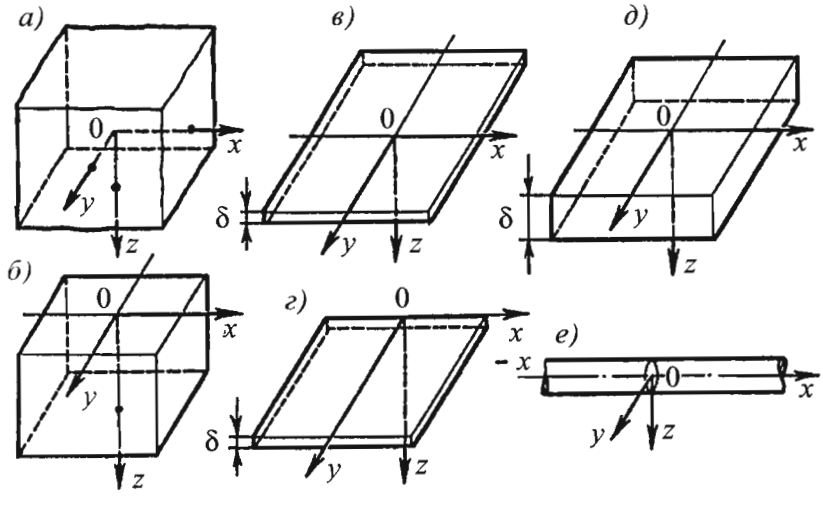


Рис. 1.3. Расчетные схемы тел:
а – бесконечного тела; *б* – полубесконечного тела; *в* – бесконечной пластины; *г* – полубесконечной пластины; *д* – плоского слоя; *е* – бесконечного стержня

достигает 5000…6000 °С. Температура анодного пятна дуги обычно приближается к температуре испарения материала электрода. Однако не вся выделяемая дугой теплота используется при сварке для нагрева изделия. Часть этой теплоты затрачивается на нагрев нерасплавляющейся части электрода и теряется в окружающее пространство из-за конвекции и излучения. При сварке плавящимся электродом значительная часть тепловой энергии переносится на изделие с каплями перегретого электродного металла и шлака.

Распределение плотности теплового потока по пятну нагрева неравномерно и зависит от многих факторов. Однако в большинстве случаев с достаточной точностью оно может быть описано законом нормального распределения (рис. 1.4):

$$q_2(r) = q_{2\text{т}} \exp(-kr^2),$$

где $q_{2\text{т}}$ – максимальная плотность теплового потока в центре пятна нагрева, Вт/см^2; k – коэффициент сосредоточенности источника, 1/см^2; r – радиальное расстояние от центра пятна нагрева, см.

Источник с таким характером распределения плотности теплового потока носит название «нормально-круговой».

Диаметр условного пятна нагрева, за пределами которого плотность теплового потока не превышает $0{,}05q_{2\text{т}}$, определяется выражением

$$d = \frac{3{,}46}{\sqrt{k}}.$$

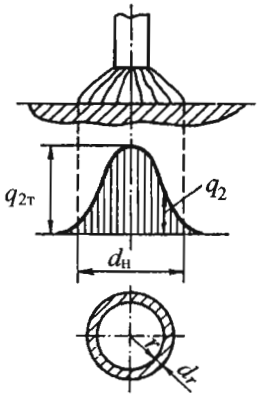


Рис. 1.4. Схема нормально-кругового источника теплоты

АВТОНОМНАЯ НЕКОММЕРЧЕСКАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ «Головной аттестационный центр Алтайского региона Национальной Ассоциации Контроля и Сварки» (АНО «ГАЦ АР НАКС») 656038, г.Барнаул, пр-т Ленина,46

Максимальная плотность теплового потока может быть определена из соотношения

$$q_{2\text{т}} = \left(\frac{k}{\pi}\right) q,$$

где q – эффективная тепловая мощность сварочной дуги, определяемая выражением

$$q = \eta U_{\text{д}} I_{\text{св}},$$

где $I_{\text{св}}$ – сварочный ток, А; $U_{\text{д}}$ – напряжение на дуге, В; η – эффективный КПД нагрева изделия дугой.

Эффективность ввода теплоты в изделие сварочной дугой определяется видом и режимом сварки, а также условиями ее выполнения. При сварке открытыми дугами потери возрастают за счет излучения в окружающую среду, разбрызгивания и испарения металла. Поэтому эффективный КПД при сварке под флюсом, как правило, выше, чем при сварке открытой дугой, в среде защитных газов и покрытыми электродами, что будет показано ниже. Увеличение напряжения на дуге однозначно ведет к снижению эффективного КПД. При сварке втавр или в глубокую разделку эффективный КПД на 5…10 % выше, чем при наплавке на плоскую поверхность, что объясняется лучшим использованием излучения столба дуги и теплоты газов, омывающих поверхность изделия.

Значения эффективного КПД нагрева изделий при сварке и наплавке

Электрическая дуговая сварка и наплавка:	
графитовым электродом …	0,5…0,6
покрытым электродом на постоянном токе ……	0,75…0,85
то же, на переменном токе	0,65…0,75
в углекислом газе ……	0,72…0,92
в аргоне вольфрамовым электродом ……..	0,65…0,75
в аргоне плавящимся электродом ……..	0,70…0,80
порошковой проволокой (открытая дуга) ……...	0,80…0,90
под слоем флюса ……	0,80…0,95
лентой под флюсом ……	0,88…0,93
лентой открытой дугой и в газе ……..	0,68…0,75
Вибродуговая наплавка ……...	0,60…0,75
Нагрев:	
плазменно-дуговой ……	0,60…0,75

плазменной струей	0,10...0,50
газовым пламенем	0,30...0,80
Электрошлаковая сварка листов толщиной, мм:	
50	0,55
100	0,8
200	0,9
Электрошлаковая сварка с гранулированной присадкой листов толщиной, мм:	
50	0,75...0,80
100	0,9
Электрошлаковая наплавка	0,75...0,95
Электронно-лучевой нагрев	0,70...0,90
Нагрев лучом лазера	0,02...0,20

При близких значениях тока и напряжения коэффициенты сосредоточенности открытых дуг близки по значению и находятся в пределах 1,0...1,3, однако максимальная плотность теплового потока при сварке плавящимся электродом на 60...70 % больше, чем неплавящимся.

При сварке под слоем флюса вследствие уменьшения потерь теплоты и ограничения газошлаковым пузырем пятна нагрева коэффициент сосредоточенности k = 6...7, а максимальная плотность теплового потока в центре пятна нагрева в 2 – 3 раза выше, чем при аналогичных условиях нагрева открытой дугой.

С увеличением сварочного тока максимальная плотность теплового потока возрастает, а коэффициент сосредоточенности несколько уменьшается. Увеличение напряжения на дуге влечет за собой снижение как $q_{2т}$, так и коэффициента сосредоточенности.

Сжатые сварочные дуги. При обработке материалов плазменно-дуговыми методами эффективность нагрева во многом определяется особенностями формирования плазменной струи. При использовании плазменной дуги прямого действия, когда анодом является изделие, эффективность нагрева последнего, как правило, оказывается выше, чем в случае использования плазменной дуги косвенного действия (плазменной струи), когда анодом является сопло плазмотрона. Это различие определяется тем, что в первом случае мощность, выделяемая в анодном пятне и прианодной области, идет на нагрев изделия, тогда как во втором бесполезно теряется на нагрев сопла плазмотрона.

Эффективный КПД плазменно-дугового нагрева изделия включает КПД плазмотрона $\eta_п$ и КПД струи $\eta_с$:

$$\eta = \eta_п \eta_с .$$

КПД плазмотрона зависит от его конструкции и режима работы и особенно сильно влияет на η при обработке плазменной дугой косвенного действия.

КПД плазменной струи снижается с увеличением расстояния от среза сопла плазмотрона до изделия вследствие увеличения потерь на теплообмен струи с окружающей средой. Эти потери резко возрастают при переходе от ламинарного режима течения струи к турбулентному. Потери увеличиваются также с увеличением расхода плазмообразующего газа, так как возрастают потери в окружающую среду и снижается температура струи.

Газокислородное пламя. При газопламенной обработке изделие нагревается за счет конвективного и лучистого теплообмена между продуктами сгорания и нагреваемой поверхностью. При этом вклад лучистого теплообмена невелик и составляет 10...15 % общего теплового потока.

Эффективная мощность газокислородного пламени определяется выражением

$$q = \frac{\eta Q V}{3600},$$

где η – эффективный КПД нагрева изделия газовым пламенем; Q – низшая теплотворная способность горючего, кДж/м^3 (табл. 1.3); V – объемный расход горючего, м^3/ч.

Эффективность нагрева изделия газовым пламенем зависит от разности температур пламени и металла, а также от скорости перемещения газового потока относительно поверхности нагрева. Чем больше разница температур и относительная скорость перемещения потока, тем выше эффективная мощность.

С увеличением мощности пламени его эффективная тепловая мощность возрастает при некотором снижении КПД, связанном с уменьшением полноты сгорания горючего.

С повышением скорости перемещения горелки, увеличением толщины нагреваемого материала и его коэффициента температуропроводности снижается температура нагреваемой поверхности, в связи с чем эффективность ввода теплоты в изделие возрастает. Угол наклона горелки также существенно влияет на эффективную тепловую мощность.

1.3. Характеристики горючих для газопламенной обработки металлов

Горючее	Низшая теплотворная способность, кДж/м^3	Температура пламени в смеси с кислородом, °С	Коэффициент регулировки пламени
Ацетилен	52 800	3050…3150	1…1,3
Водород	10 100	2100	0,25…0,4
Природный газ	35 600	2000…2200	1,5…1,6
Городской газ	17 200…21 000	2000…2300	1,5…1,6
Технический пропан	87 200	2700…3000	3,0…3,5
Пропан-бутановая смесь	93 000	2600…2900	3,0…3,5
Коксовый газ	14 700…17 600	2000	0,75…0,8
Нефтяной газ	41 000…56 000	2300	1,5…1,6
Пиролизный газ	21 400…23 500	2300	1,2…1,5
Керосин	42 000…42 700	2400…2500	–

Шлаковая ванна. При электрошлаковой сварке теплота выделяется во время прохождения тока через расплавленный шлак. Полная мощность, выделяемая в шлаковой ванне, может быть определена как

$$q_0 = I_{св}^2 R_ш ,$$

где $R_ш$ – сопротивление шлаковой ванны, Ом.

Тепловые потери при электрошлаковом процессе прежде всего связаны с отбором теплоты формирующими устройствами и излучением с открытой поверхности сварочной ванны. Эффективность нагрева изделия возрастает с увеличением толщины свариваемого металла, его температуропроводности и скорости сварки, так как теплоотвод в изделие при этом увеличивается.

Электронно-лучевой нагрев. Электронно-лучевая обработка материалов основывается на превращении в тепловую энергию кинетической энергии электронов при их торможении в поверхностных слоях твердого тела. Эффективная тепловая мощность при электронно-лучевой обработке определяется как

$$q = \eta UI ,$$

где I – ток луча, мА; U – ускоряющее напряжение, кВ; η – эффективный КПД нагрева изделия лучом.

Потери энергии при электронно-лучевой обработке в основном связаны с отражением электронов от поверхности изделия и зависят главным образом от свойств обрабатываемого металла (его атомного номера и атомной массы). Потери ориентировочно составляют 8…10 % мощности луча для алюминия и 30…40 % для вольфрама. Кроме того, часть мощности луча расходуется на термоэлектронную и вторичную эмиссии, тормозное рентгеновское излучение и испарение из ванны. Вместе эти потери составляют несколько процентов.

Эффективный КПД увеличивается с повышением тока луча, что связано с уменьшением потерь с отраженными электронами. Электронно-лучевой нагрев отличается очень высокими значениями максимальной плотности теплового потока ($q_{2т}$ = 10^4...10^6 Вт/см^2) и локальностью (коэффициент сосредоточенности может достигать $8 \cdot 10^4$ 1/см^2).

Фотонно-лучевые источники. При лазерной обработке материалов изделие нагревается когерентным излучением. Лазерное излучение при попадании на поверхность твердого тела частично отражается. Интенсивность отражения энергии определяется значением коэффициента отражения, который зависит от рода материала и длины волны излучения.

В современной лазерной технологии используют плотности мощности 10^4…10^8 Вт/см^2. Эффективность передачи энергии лазерного излучения обрабатываемому материалу определяется значением эффективного коэффициента поглощения, который фактически характеризует КПД процесса лазерной сварки и зависит от многих факторов: состояния и формы поверхности, температуры изделия, удельной

электропроводности материала, скорости сварки, вида защитной среды и т.п.

Схематизация источников теплоты. Разнообразие применяемых источников теплоты также обусловило необходимость их схематизации. Учет реального пространственного распределения тепловой мощности источника позволяет с достаточной точностью описывать процессы, происходящие в непосредственной близости от места действия источника, однако существенно усложняет расчеты. Расчеты упрощаются в случае применения схем предельно сосредоточенных источников, основывающихся на использовании принципа местного влияния. Сущность принципа сформулирована Н.Н. Рыкалиным применительно к сварочному нагреву следующим образом: характер распределения источников теплоты существенным образом сказывается на температурном поле лишь на расстояниях одного порядка с размерами области ввода теплоты. Температурное поле в области, удаленной от источника, практически не изменится, если заменить произвольно распределенный источник теплоты приложенным в центре его тяжести сосредоточенным источником равной мощности. В соответствии с принципом местного влияния сварочные источники по степени их распределенности подразделяются на точечные, линейные, плоские и объемные.

При принятии схемы *точечного источника* полагают, что вводимая в изделие мощность сосредоточена в бесконечно малом объеме (точке). Обычно данная схема применяется в сочетании с расчетной схемой массивного тела или плоского слоя.

В случае принятия схемы *линейного источника* считают, что мощность распределена по отрезку линии, длина которого чаще всего равна толщине пластины. Линейные источники обычно применяют для расчетных схем пластин либо в виде линейного источника ограниченной ширины в полубесконечном теле или плоском слое.

Плоский источник предполагает равномерное распределение вводимой мощности по сечению стержня, такая схема используется, например, при контактной стыковой сварке стержней.

Применение схем предельно сосредоточенных источников допустимо при расчете температур точек, удаленных на расстояние $\geq 0{,}7d$ от центра пятна нагрева реального источника.

По длительности выделения теплоты источники подразделяются на *мгновенные* (время действия стремится к нулю) и *непрерывно действующие*. Последние могут быть *неподвижными*, *подвижными* и *быстродвижущимися*. Последний вид источников применяют тогда, когда можно пренебречь тепловыми потоками вдоль оси движения источника, что значительно упрощает расчет. В этом случае обычно пользуются понятием «погонная энергия сварки» – количеством теплоты, вводимой на единицу длины шва:

$$q_{\text{п}} = q / \text{v},$$

где v – скорость сварки.

Если режим сварки неизвестен, но задано поперечное сечение наплавляемого за проход металла шва (стыкового или углового), погонную энергию можно получить из уравнения

$$q_{\text{п}} = Q_{\text{v}} F_{\text{ш}},$$

где $F_{\text{ш}}$ – площадь поперечного сечения наплавленного металла шва, мм^2; Q_{v} – коэффициент, определяемый по табл. 1.4.

1.4. Значения Q_{v} для различных способов сварки

Способ сварки	Сварочные материалы	Q_{v}, Дж/мм^3
Ручная электродуговая	Электроды:	
	УОНИ-13/45	65
	ЭА-395/9,ЭА-606/10, ЭА-400/10	42
	ЭА-606/11,48Н-1, ЭА-981/15	48
Механизированная в CO_2	Проволока Св-08ГС	38
Механизированная под флюсом	Проволока Св-08А, флюс ОСЦ-45	65
То же	Проволока Св-10ГСМТ, флюс АН-42	71

При сварке угловых соединений (тавровых, нахлесточных) часть погонной энергии, вводимая в свариваемый элемент, определяется в зависимости от соотношения толщин элементов. Так, в случае приварки угловым швом к пластине толщиной δ конструктивного элемента толщиной $\delta_к$ погонная энергия, вводимая в пластину – $q_{п.п}$, и в конструктивный элемент (ребро, стенку, накладку) – $q_{п.к}$, может быть вычислена по формулам

$$q_{п.п} = q_п \frac{2\delta}{2\delta + \delta_к};$$

$$q_{п.к} = q_п \frac{\delta_к}{2\delta + \delta_к}.$$

Эффективная тепловая мощность в этих случаях определяется по аналогичным формулам, которые дают наиболее точные результаты при соотношении $\delta / \delta_к \le 1{,}7$ и справедливы для низкоуглеродистых, низколегированных и аустенитных сталей, а также для титановых и алюминиевых сплавов толщиной до ~16 мм.

Учет ограниченности размеров тел. В практике инженерных расчетов обычно рассматриваются границы и соответствующие им граничные условия трех типов.

Граничное условие первого рода состоит в явном задании распределения температур на границе. Частным случаем такой границы является изотермическая граница, когда поверхность тела обладает постоянной температурой в течение всего процесса распространения теплоты. В расчетах тепловых процессов при сварке условие первого рода встречается сравнительно редко. Учет такой границы может быть проведен введением фиктивного стока теплоты (источник отрицательной мощности), расположенного симметрично реальному источнику относительно границы (рис. 1.5, *а*).

Граничное условие второго рода заключается в явном задании плотности теплового потока через границу. Частным случаем такой границы является адиабатическая граница, когда тепловой поток через нее равен 0. В технических расчетах сварочных процессов границу можно считать адиабатической, если тепловой поток через нее мал в сравнении с потоками внутри тела.

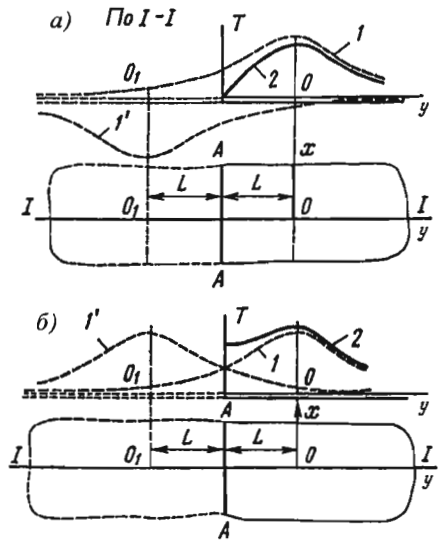


Рис. 1.5. Выполнение граничных условий:
а – изотермического путем использования стока теплоты; *б* – адиабатического путем использования дополнительного источника теплоты

Выполнить условие адиабатической границы можно, воспользовавшись методом отражения. Суть его в том, что для имитации теплового потока, отраженного от адиабатической границы, в расчет вводят фиктивный источник теплоты, равный по мощности и расположенный симметрично реальному источнику относительно границы (рис. 1.5, *б*). Распределение температур с учетом границы (кривая *2*) определяется суперпозицией температур от реального и фиктивного источников (кривые *1* и *1'*).

Граничное условие третьего рода обычно характеризует закон конвективного теплообмена между поверхностью тела и окружающей средой:

$$\lambda \operatorname{grad}(T) = \alpha (T - T_0).$$

Из граничного условия третьего рода как частный случай могут быть получены изотермические ($\alpha = \infty$) и адиабатические ($\alpha = 0$) условия.

Учет теплоотдачи с поверхности. Одним из простейших случаев использования граничного условия третьего рода является учет свободного охлаждения тонкой пластины толщиной δ и объемной теплоемкостью $c\rho$, нагретой до начальной температуры $T_н$. Закон

охлаждения такой пластины описывается выражением

$$T - T_0 = (T_н - T_0)\,e^{-bt},$$

где b – коэффициент температуроотдачи, 1/с;

$$b = \frac{2\alpha}{c\rho\delta}.$$

Цифра «2» в числителе правой части выражения указывает на то, что теплоотдача осуществляется с двух поверхностей. Если пластина имеет одну теплоотдающую поверхность, $b = \alpha/(c\rho\delta)$.

Для стержня в выражение коэффициента температуроотдачи входят периметр p и площадь F сечения:

$$b = \alpha p/(c\rho F).$$

Периоды теплонасыщения и выравнивания температур. В начальный период действия источника нагрева (например, после зажигания дуги) температуры точек тела монотонно возрастают от начальных значений до температур предельного (стационарного или квазистационарного) состояния, которое теоретически устанавливается при бесконечно большом времени. В действительности этот период конечен и носит название «период теплонасыщения». Температуру в этот период можно рассчитывать по формулам предельного состояния для принятой расчетной схемы, но с обязательным учетом поправочного коэффициента теплонасыщения:

$$T(t) = \Psi T_{пр},$$

где $T(t)$ – температура на стадии теплонасыщения; $T_{пр}$ – температура предельного состояния; Ψ – коэффициент теплонасыщения; t – время от момента начала сварки.

Коэффициент теплонасыщения для точечного источника в полубесконечном теле определяется в зависимости от критерия Пекле $\rho_3 = vR/(2a)$ и критерия $\tau_3 = v^2 t/(4a)$ по номограмме (рис. 1.6, *а*).

Для линейного источника коэффициент теплонасыщения может быть определен по номограмме (см. рис. 1.6, *б*) в зависимости от следующих критериев:

$$\rho_2 = \frac{vr}{2a}\sqrt{1 + \frac{4ba}{v^2}};$$

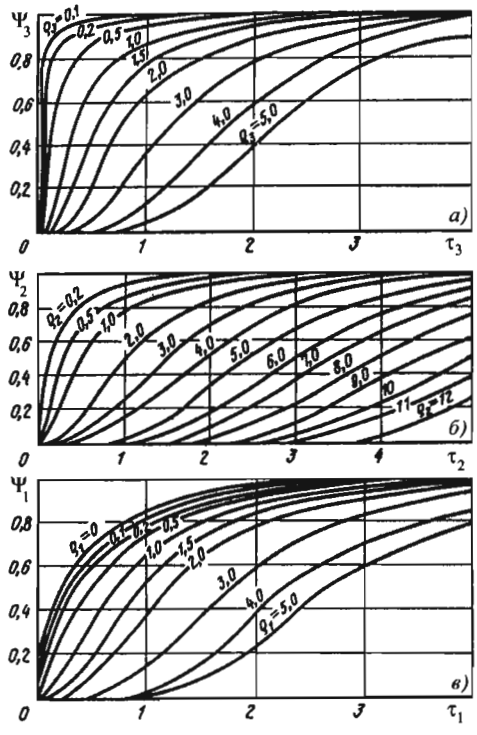


Рис. 1.6. Номограммы для определения коэффициентов Ψ_3 (*а*), Ψ_2 (*б*) и Ψ_1 (*в*)

$$\tau_2 = \frac{v^2 t}{4a}\left(1 + \frac{4ba}{v^2}\right).$$

Коэффициент теплонасыщения для бесконечного стержня может быть определен по номограмме (см. рис. 1.6, *в*) в зависимости от критериев:

$$\rho_1 = \frac{v|x|}{2a}\sqrt{1 + \frac{4ba}{v^2}};$$

$$\tau_1 = \frac{v^2 t}{4a}\left(1 + \frac{4ba}{v^2}\right).$$

Следует иметь в виду, что расстояние от источника до точки (R, r или x), входящее в критерий Пекле ρ, определяется в подвижной системе координат с учетом заданных координат точки и времени, прошедшего после начала сварки:

$$x = x_0 - vt,$$

где x – координата точки в подвижной системе координат; x_0 – координата точки в неподвижной системе (обычно расстояние от места начала сварки); t – время, прошедшее после начала сварки.

Из номограмм (см. рис. 1.6) следует, что чем больше значение критерия Пекле, тем позже достигается предельное состояние процесса, чем более стеснен поток теплоты, тем медленнее идет теплонасыщение.

После прекращения действия источника теплоты наступает *период выравнивания температур*. Теплота, введенная ранее, продолжает распространяться в теле и отводиться в окружающую среду. Температуры в этот период рассчитываются с помощью приема, предусматривающего введение в расчетную схему фиктивного источника теплоты и связанного с ним фиктивного стока той же мощности, компенсирующего действие фиктивного источника (рис. 1.7). Благодаря этому задача о прекращении действия источника превращается в задачу о начале действия стока, которая решается с использованием подходов периода теплонасыщения. Температура после окончания сварки может быть рассчитана по формуле

$$T(t-t_0)=T_{\text{пр}}[\Psi(t)-\Psi(t-t_0)],$$

где $T(t-t_0)$ – температура на стадии выравнивания температур; t_0 – время окончания сварки (время действия источника).

В тех случаях, когда время действия реального источника достаточно велико и можно полагать, что к моменту прекращения нагрева было достигнуто предельное состояние $[\Psi(t)=1]$, расчетное выражение упрощается:

$$T(t-t_0)=T_{\text{пр}}[1-\Psi(t-t_0)].$$

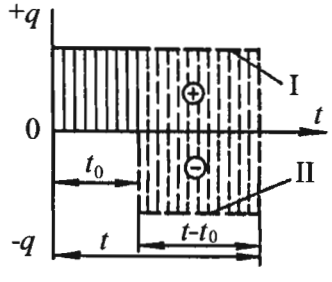


Рис. 1.7. Схема действия фиктивного источника *I* и фиктивного стока теплоты *II* для определения выравнивания температуры

Расчет температурного поля при однопроходной сварке и наплавке. При сварке деталей с полным (или близким к полному) проплавлением применяют расчетную схему подвижного линейного источника в пластине. В подвижной системе координат, связанной с источником, температура в точке на расстоянии r от источника равна

$$\Delta T=\frac{q}{2\pi\lambda\delta}\mathrm{e}^{-\frac{\nu x}{2a}}K_0\left(\frac{\nu r}{2a}\sqrt{1+\frac{4ba}{\nu^2}}\right),$$

где q – эффективная тепловая мощность источника; λ, a и b – коэффициенты соответственно теплопроводности, температуропроводности и поверхностной температуроотдачи; $K_0(u)$ – функция Бесселя второго рода нулевого порядка; x – расстояние вдоль оси OX от источника до точки (берется со знаком «+», если точка находится впереди источника, и со знаком «–» в противном случае).

Для ручной наплавки или сварки углового шва на массивной детали применяется расчетная схема подвижного точечного источника на поверхности полубесконечного тела или плоского слоя. Для схемы полубесконечного тела

$$\Delta T=\frac{q}{2\pi\lambda R}\mathrm{e}^{-\frac{\nu}{2a}(R+x)},$$

где q – часть эффективной мощности, вводимая в деталь; R – расстояние от источника до точки, в которой определяется температура $(R^2=x^2+y^2+z^2)$.

Для схемы плоского слоя температуру определяют по формуле

$$\Delta T=m\frac{q}{2\pi\lambda\delta}\mathrm{e}^{-\frac{\nu x}{2a}}K_0\left(\frac{\nu r}{2a}\right),$$

где m – коэффициент, учитывающий отражение теплоты от поверхностей слоя, который определяется по номограмме (рис. 1.8). Данная номограмма приведена для точек, лежащих на поверхности плоского слоя.

Температуру точек бесконечного стержня сечением F от подвижного плоского источника теплоты мощностью q, перемещающегося вдоль стержня со скоростью ν, определяют по формуле

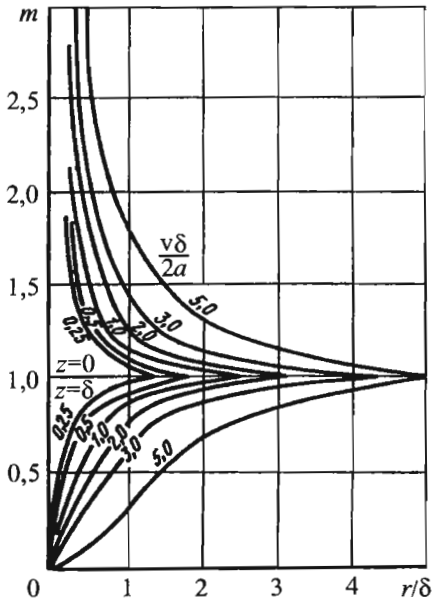


Рис. 1.8. Номограмма для определения коэффициента *m*

$$\Delta T = \frac{q}{c\rho v F\sqrt{1+\frac{4ba}{v^2}}} \times$$

$$\times \exp\left(-\frac{vx}{2a} - \frac{v|x|}{2a}\sqrt{1+\frac{4ba}{v^2}}\right),$$

где x – расстояние от движущегося источника до точки, в которой определяется температура; начало координат движется вместе с источником.

По представленным формулам вычисляют температуры точек установившегося поля предельного состояния.

Для расчета температур при механизированных способах сварки служат модели мощных быстродвижущихся источников теплоты. Например, при механизированной сварке листов с полным (или близким к полному) проплавлением используют модель мощного быстродвижущегося линейного источника в пластине. Температуру в точке на расстоянии y от оси шва определяют по формуле

$$\Delta T = \frac{q}{v\delta\sqrt{4\pi\lambda c\rho t}} e^{-\frac{y^2}{4at} - bt},$$

где t – время, отсчитываемое от момента, когда источник теплоты пересек перпендикулярную к оси OX плоскость, в которой расположена рассматриваемая точка.

Для механизированной наплавки или сварки углового шва на массивной детали применяется расчетная схема мощного быстродвижущегося точечного источника на поверхности полубесконечного тела или плоского слоя. В случае полубесконечного тела

$$\Delta T = \frac{q}{2\pi\lambda v t} e^{-\frac{(y^2+z^2)}{4at}}.$$

При использовании расчетной схемы плоского слоя

$$\Delta T = \frac{q}{vc\rho\delta} F(z,t) \frac{1}{\sqrt{4at}} e^{-\frac{y^2}{4at} - bt},$$

где $F(z, t)$ – функция, учитывающая отражение теплоты поверхностей плоского слоя, численное значение которой определяется по номограмме (рис. 1.9) в зависимости от отношения z/δ и безразмерного времени $\tau = at / \delta^2$. При $\tau > 0{,}5$ значение функции $F(z, t)$ принимают равным 1.

Во всех случаях расчетов температур с использованием моделей мощных быстродвижущихся источников время следует отсчитывать от момента, когда источник теплоты пересек перпендикулярную к оси его движения плоскость, в которой расположена рассматриваемая точка.

Основные параметры сварочного термического цикла. Термический цикл сварки (СТЦ, рис. 1.10) во многом определяет свойства различных зон сварного соединения, поэтому расчет его основных параметров (максимальная температура СТЦ, скорости нагрева и охлаждения при заданных температурах, время пребывания материала выше заданной температуры) представляет значительный практический интерес. Так, например, при сварке сталей при температурах > 1000 °С растет аустенитное зерно, что приводит к охрупчиванию стали. Степень роста зерна зависит от максимальной температуры СТЦ и времени пребывания стали при температурах > 1000 °С. Структурное состояние стали (степень закалки) определяется скоростью охлаждения в интервале температур минимальной устойчивости аустенита.

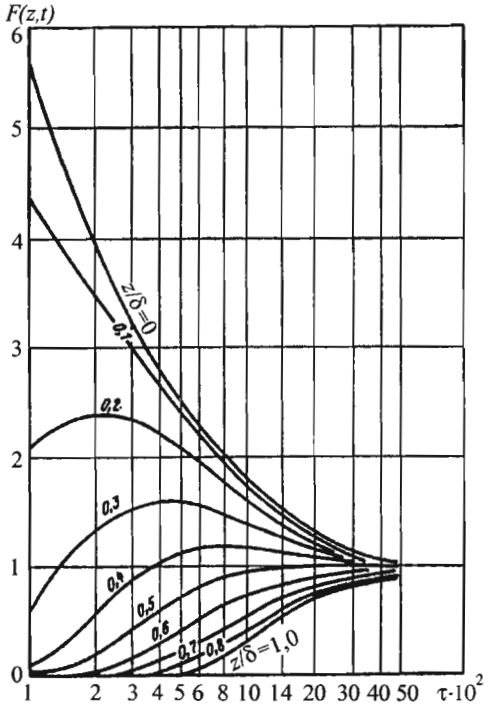


Рис. 1.9. Номограмма для определения $F(z, t)$

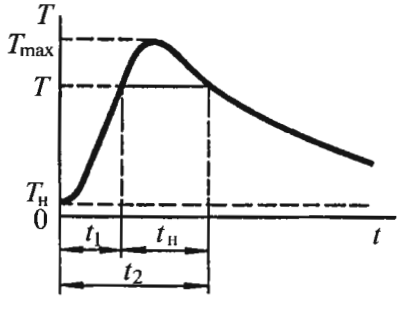


Рис. 1.10. Схема термического цикла при однопроходной сварке

Максимальные температуры. Если известна зависимость температуры от времени (СТЦ) или от расстояния (температурное поле), то достижение максимальной температуры соответствует нулю первой производной $\partial T/\partial t = 0$ или $\partial T/\partial x = 0$. Для точечного источника на поверхности полубесконечного тела

$$T_{max} - T_н = \frac{2q}{\pi e v c \rho r^2}.$$

Для линейного источника в пластине

$$T_{max} - T_н = \frac{q}{\sqrt{2\pi e}\cdot v c \rho \delta y}\left(1 - \frac{by^2}{2a}\right).$$

В этих формулах $T_н$ – начальная температура изделия или температура подогрева, радиус-вектор r определяет расстояние от рассматриваемой точки до оси движения источника теплоты: $r^2 = y^2 + z^2$.

Расчет мгновенных скоростей охлаждения. Мгновенная скорость охлаждения w при данной температуре является производной от функции температуры по времени: $w = \partial T/\partial t$. Скорость охлаждения зависит от формы изделия, уменьшается при увеличении погонной энергии и температуры подогрева $T_н$, а также при уменьшении толщины листа δ. Для расчета скоростей охлаждения обычно используют формулы, относящиеся к точкам, лежащим на оси движения мощного быстродвижущегося источника, полагая, что в прилегающих к шву зонах скорости охлаждения отличаются незначительно.

При дуговой наплавке валика на массивное тело

$$w(T) = -2\pi\lambda\frac{(T - T_н)^2}{q/v}.$$

При сварке листов встык или наплавке валика на лист малой толщины

$$w(T) = -2\pi\lambda c\rho\frac{(T - T_н)^3}{(q/v\delta)^2}.$$

В случае расчетной схемы точечного источника на поверхности плоского слоя

$$w(T) = -2\pi\lambda\omega\frac{(T - T_н)^2}{q/v},$$

где ω – поправочный коэффициент, определяемый по номограмме (рис. 1.11) в зависимости от величины критерия;

$$\frac{1}{\theta} = \frac{2q/v}{\pi\delta^2 c\rho(T - T_н)}.$$

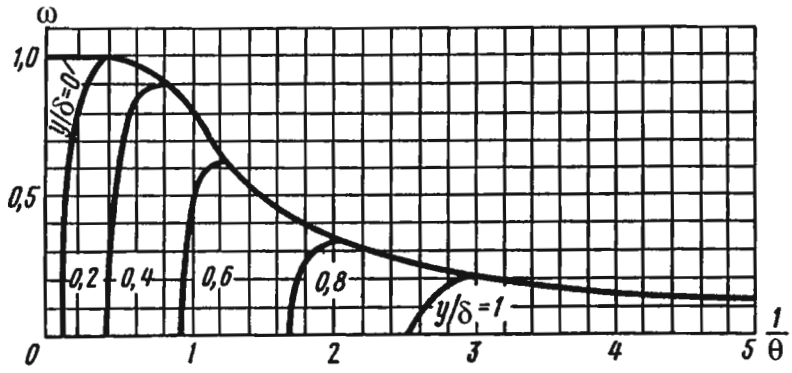


Рис. 1.11. Номограмма для определения поправочного коэффициента ω

Расчет времени пребывания выше заданной температуры. Длительность пребывания металла выше некоторой температуры T рассчитывается по следующим формулам.

В случае трехмерного температурного поля при наплавке на массивное тело

$$t_{3н} = k_1 \frac{2q/v}{\lambda(T_{max} - T_н)}.$$

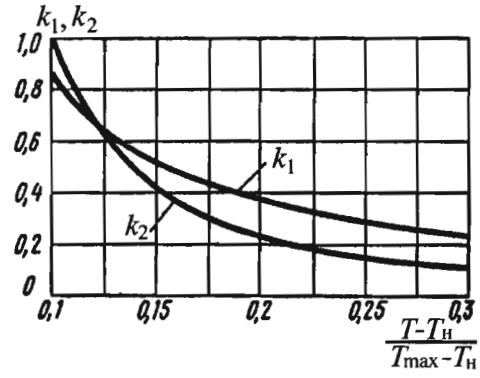
При двухмерном температурном поле при однопроходной сварке листов

$$t_{2н} = k_2 \frac{8}{\lambda c \rho}\left[\frac{q/v}{\delta(T_{max} - T_н)}\right]^2.$$

Коэффициенты k_1 и k_2 определяются по номограмме (рис. 1.12) в зависимости от безразмерного критерия $(T - T_н)/(T_{max} - T_н)$, где T_{max} – максимальная температура СТЦ в рассматриваемой точке изделия.

Регулирование термического цикла многослойной сварки. Термический цикл при многослойной сварке зависит от длины очередного слоя (участка шва). При сварке длинными участками (0,5 ... 1 м) наибольшую скорость охлаждения испытывает металл первого слоя. Последующие слои укладываются, как правило, на металл, подогретый предыдущими слоями.

Для расчета скорости охлаждения первого слоя при сварке соединений различного типа (рис. 1.13) применяется схема наплавки валика на плоский слой. При этом в качестве погонной энергии и толщины слоя подставляются величины $(q/v)_{расч}$ и $\delta_{расч}$ (рис. 1.13). Скорость



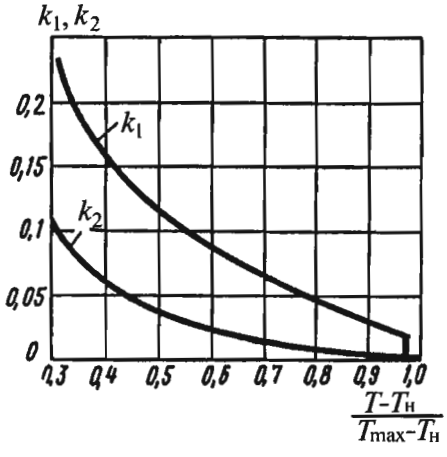


Рис. 1.12. Номограммы для определения k_1 и k_2 при однопроходной сварке

охлаждения первого слоя уменьшается с ростом погонной энергии и особенно эффективно с увеличением температуры подогрева.

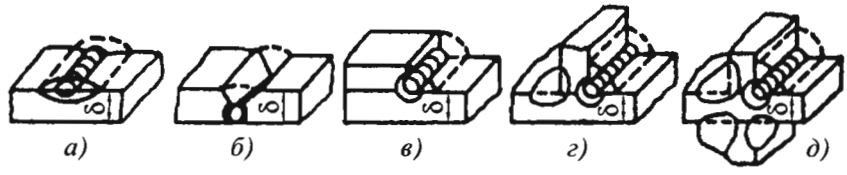


Рис. 1.13. Значения расчетной толщины $\delta_{расч}$ и расчетной погонной энергии $(q/v)_{расч}$ для разных типов соединений:
а – наплавка валика на массивное тело; *б* – корневой шов многослойного соединения; *в* – нахлесточное соединение; *г* – тавровое соединение; *д* – крестовое соединение

При многослойной сварке короткими участками (40...400 мм) термический цикл должен обеспечить пребывание металла выше заданной температуры, а также умеренную скорость охлаждения ниже этой температуры. Режим сварки короткими участками и длину данных участков обычно выбирают из условия, чтобы температура шва и околошовной зоны к моменту укладки второго слоя не опускалась ниже допустимой, которую назначают в зависимости от марки основного металла. Например, для перлитных сталей за допустимую обычно принимают температуру на 50 К выше температуры начала мартенситного превращения для предотвращения закалки.

Длительность охлаждения первого слоя до температуры $T_в$ равна

$$t_в = \frac{q^2}{4\pi\lambda c\rho\delta^2 v^2 (T_в - T_н)^2}.$$

К моменту времени $t_в$ должен быть уложен следующий слой. С учетом времени чистого горения дуги $t_г = l / v$ и времени перерывов между укладками отдельных слоев длина свариваемого участка составляет

$$l = \frac{K_3^2 K_г q^2}{4\pi\lambda c\rho\delta^2 v (T_в - T_н)^2},$$

где $K_г = t_г / (t_г + t_п)$ – коэффициент чистого горения дуги ($K_г$ = 1 для механизированной многодуговой сварки и $K_г$ = 0,6...0,8 для ручной многослойной сварки); K_3 – поправочный коэффициент, учитывающий тип сварного соединения (K_3 = 1,5 для соединения встык; K_3 = 0,9 для соединения втавр и внахлестку; K_3 = 0,8 для крестового соединения).

Расчет ширины зоны нагрева. Для оценки термического влияния на свариваемый металл бывает необходимо определить ширину $2l$ зоны, приращение температуры в которой превышало заданное ΔT_l (рис. 1.14). Для этого обычно используют формулы, полученные из выражений для расчета максимальных температур. После несложных преобразований для быстродвижущегося точечного источника на поверхности массивного тела получаем

$$2l = \sqrt{\frac{8q}{\pi e v c\rho \Delta T_l}}.$$

Для мощного быстродвижущегося линейного источника в пластине без учета теплоотдачи с поверхности имеем выражение

$$2l = \frac{q\sqrt{\frac{2}{\pi e}}}{vc\rho\delta\Delta T_l}.$$

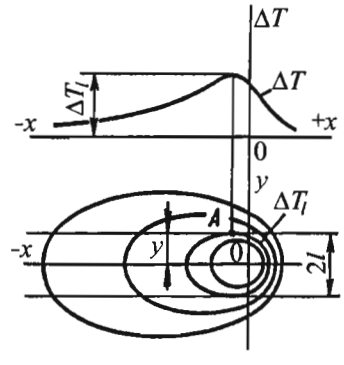


Рис. 1.14. Схема определения ширины $2l$ зоны, приращение температуры в которой превосходило ΔT_l

Расчет размеров зоны проплавления. Геометрические размеры сварочной ванны и валика шва характеризуются рядом параметров (рис. 1.15), среди которых: L – длина ванны; B – ширина ванны; H – глубина проплавления; A – величина выпуклости шва; $F_{пр}$ – площадь проплавления; $F_н$ – площадь наплавки.

Форму зоны проплавления оценивают относительной глубиной проплавления H / B или коэффициентом формы провара $\Psi_{пр} = H / B$, а также коэффициентом полноты проплавления $\mu_{пр} = F_{пр} / (HB)$. Величина $\mu_{пр}$ изменяется в пределах 0,6...0,8. Для дуговых видов сварки максимальные отношения H / B достигают значений порядка 3 (сварка под флюсом). Очертания зоны наплавки характеризуются коэффициентом формы валика $\Psi_в = B / A$ и коэффициентом полноты валика $\mu_в = F_в / (AB)$.

Теоретически очертание ванны расплавленного металла соответствует очертанию изотермической поверхности температуры плавления $T_{пл}$. Однако известные расчетные схемы не учитывают распределенность источника нагрева, скрытую теплоту плавления, переменность значений теплофизических свойств и др. Вследствие этого расчет позволяет оценить размеры ванны весьма приближенно.

Длина хвостовой части ванны при наплавке валика на массивное тело

$$L = \frac{q}{2\pi\lambda(T_{пл} - T_н)}.$$

Площадь проплавления основного металла при наплавке валика на массивное тело может быть оценена как

$$F_{пр} = \frac{q}{ev c\rho(T_{пл} - T_н)}.$$

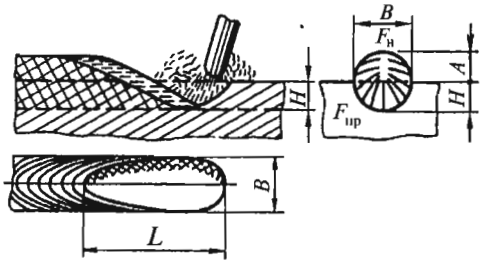


Рис. 1.15. Форма сварочной ванны

Экспериментально получены поправочные коэффициенты для более точного определения размеров ванны.

Тепловая эффективность процесса проплавления. Ее оценивают термическим η_t или полным тепловым $\eta_{пр}$ КПД процесса проплавления основного металла:

$$\eta_t = \frac{v F_{пр} \rho S_{пл}}{q};$$

$$\eta_{пр} = \frac{v F_{пр} \rho S_{пл}}{UI_{св}},$$

где $S_{пл}$ – теплосодержание единицы массы расплавленного металла, включающее скрытую теплоту плавления.

При расплавлении металла массивного тела точечным источником термический КПД η_t выше у мощных дуг, перемещающихся с большой скоростью, и может достигать предельного значения 0,368.

В случае мощного быстродвижущегося линейного источника теплоты в пластине предельное значение η_t достигает 0,484.

При сварке швов, образуемых преимущественно наплавленным металлом, тепловую эффективность процесса наплавки характеризуют его полным тепловым КПД:

$$\eta_{нап} = \frac{v F_н \rho S_{пл}}{UI_{св}}.$$

Производительность процесса сварки оценивают суммой масс проплавленного в единицу времени основного металла $g_{пр}$ и наплавленного присадочного металла $g_{нап}$:

$$g_{пр} = \rho v F_{пр}; \qquad g_{нап} = \rho v F_н.$$

Производительность наплавки зависит от производительности расплавления электродной проволоки $g_р$:

$$g_{нап} = g_р(1 - K_п),$$

где $K_п$ – коэффициент потерь металла на угар и разбрызгивание (при сварке открытой дугой $K_п$ = 0,05...0,2; при сварке под флюсом $K_п$ = 0,01...0,02).

Удельная производительность наплавки характеризуется коэффициентом наплавки

$$\alpha_{н} = \frac{g_{нап}}{I_{св}}.$$

Особенности протекания тепловых процессов при различных видах сварки.

Контактная сварка стержней. Нагрев стержней при контактной стыковой сварке осуществляется проходящим током плотностью j. Температуру нагрева ΔT можно представить (рис. 1.16) как сумму

$$\Delta T = \Delta T_1 + \Delta T_2,$$

где ΔT_1 – равномерная составляющая, вызванная работой тока на удельном сопротивлении металла ρ_r; ΔT_2 – неравномерная составляющая, вызванная контактным сопротивлением R.

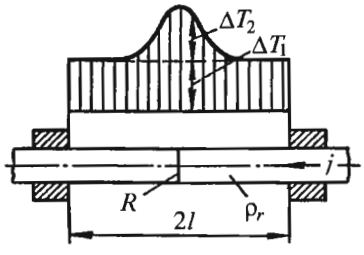


Рис. 1.16. Распределение приращений температуры по длине свариваемых стержней в процессе их нагрева током

Равномерная составляющая

$$\Delta T_1 = (1/\beta)(\mathbf{e}^{\beta\omega t} - 1),$$

где $\omega = (\rho_r / c\rho) j^2$.

Значения $(\rho_r / c\rho)$ и коэффициента β приведены в табл. 1.5.

Неравномерная составляющая ΔT_2 рассчитывается по-разному – в зависимости от способа контактной сварки.

Контактная сварка сопротивлением. На стадии нагрева

$$\Delta T_2 = \frac{Q_2}{c\rho\sqrt{4\pi at}} \mathbf{e}^{-\frac{x^2}{4at}+\beta\omega t},$$

где x – расстояние от стыка до сечения, в котором определяется температура.

Удельное количество теплоты, выделяющейся в стыке

$$Q_2 = k / j,$$

где k – коэффициент, зависящий от свойств металла и удельного давления (см. табл. 1.5). При большем удельном давлении коэффициент k меньше.

Температура сваривания металла (для стали 1520…1620 К) в стыке достигается при определенной продолжительности нагрева $t_н$. Значения произведений $j^2 t_н$ приведены в табл. 1.5.

1.5. Численные значения коэффициентов для расчета нагрева стержней

Материал	$(\rho_r / c\rho)\ 10^2$, мм^4 · град/(А^2 · с)	$\beta \cdot 10^3$, 1/град	$(j^2 t_н)\ 10^{-3}$, А^2 · с/мм^4	$k \cdot 10^{-1}$, Дж · А/мм^4
Сталь 10	3,6	3,8	8,9…9,3	8…10
Сталь 45	5,25	3,0	7,2…7,5	7…9
Сталь 25Н3	5,6	2,23	7,5…7,8	9…10
Сталь Р18	12	0,64	12,4	7,5…9
Сталь коррозионно-стойкая (18-8)	16,7	0,28	6,2	3,8…5
Алюминий	1,35	2,33	25	7…7,5
Медь	0,53	2,8	85…88	5…5,5

На стадии выравнивания температур после окончания нагрева при $t > t_н$

$$\Delta T_1 = \frac{\Delta T_{1н}}{2}\left\{\Phi\left[\frac{x+l}{\sqrt{4a(t-t_н)}}\right] - \Phi\left[\frac{x-l}{\sqrt{4a(t-t_н)}}\right]\right\},$$

где $\Delta T_{1н}$ – температура ΔT_1 в момент окончания нагрева; Ф – функция интеграла вероятности (берется по таблице в зависимости от величины аргумента в квадратных скобках). Отсчет времени ведется с момента начала нагрева.

Контактная сварка с прерывистым подогревом и последующим оплавлением. Прерывистый подогрев рассматривают как непрерывный в течение времени током меньшей плотности:

$$j_{эф} = j\sqrt{\frac{\sum t_в}{t_н}},$$

где $\sum t_в$ – суммарная длительность периодов включения тока плотностью j.

Неравномерная составляющая вычисляется как

$$\Delta T_2 = \frac{q_2}{c\rho\sqrt{4\pi a}}\int_0^{t_н} e^{-\frac{x^2}{4at}+\beta\omega t}\frac{dt}{\sqrt{t}},$$

где $q_2 = U_к j_{эф}$ – мощность плоского источника теплоты.

Параметр $U_к$ = 0,4...0,6 В (его более высокие значения соответствуют малым скоростям перемещения захватов машины и большим сечениям стержней).

Контактная сварка с непрерывным оплавлением. При оплавлении с непрерывно возрастающей скоростью температура в околоконтактной области вычисляется как

$$\Delta T = T_{пл}\exp[-0{,}92(s/a^2)^{1/3}x],$$

где s – ускорение движения захвата.

Максимально допустимое ускорение

$$s_{max} = 1{,}3(a^2/l_д^3)[\ln(T_{пл}/T_д)]^3,$$

где $T_д$ – температура пластического деформирования (для стали 770...970 К); $l_д$ – околоконтактная зона стержня, прогретая выше температуры $T_д$.

Температура стыка после выключения тока определяется по формуле

$$\Delta T = T_{пл}\exp(mt)\,\mathrm{erfc}(\sqrt{mt}),$$

где t – время после выключения тока.

Параметр m может быть рассчитан как

$$m = 0{,}85(s^2/a)^{1/3}.$$

Точечная контактная сварка листов. Температурное поле вокруг сварной точки в листах толщиной δ после выключения тока и размыкания электродов машины описывается схемой мгновенного нормально-кругового источника в тонкой пластине с теплоотдачей (рис. 1.17)

$$\Delta T = \frac{Q}{8\pi\lambda\delta(t_0+t)}\exp\left[-\frac{r^2}{4a(t_0+t)} - \frac{\alpha t}{c\rho\delta}\right],$$

где Q – количество теплоты, введенное в металл; r – расстояние от центра сварной точки; t – время, прошедшее с момента разведения электродов; t_0 – фиктивное время, характеризующее распределенность теплоты по радиусу в пластине в момент выключения тока (можно принять равным времени сварки).

Введенная в металл теплота условно разделяется на две составляющие:

$$Q = Q_1 + Q_2,$$

где Q_1 – теплота, затраченная на расплавление объема металла свариваемых листов толщиной 2δ между электродами диаметром $d_э$; Q_2 – теплота, затраченная на нагрев кольца металла шириной $x = 4\sqrt{at}$, окружающего расплавленный металл.

Условно принимают среднюю температуру металла в кольце $0{,}25T_{пл}$.

С учетом теплосодержания металла:

$$Q_1 = 0{,}5\pi d^2\delta c\rho T_{пл};$$

$$Q_2 = 0{,}5k_1\pi x(d+x)\delta c\rho T_{пл},$$

где k_1 = 0,8 – коэффициент, учитывающий неравномерность нагрева кольца.

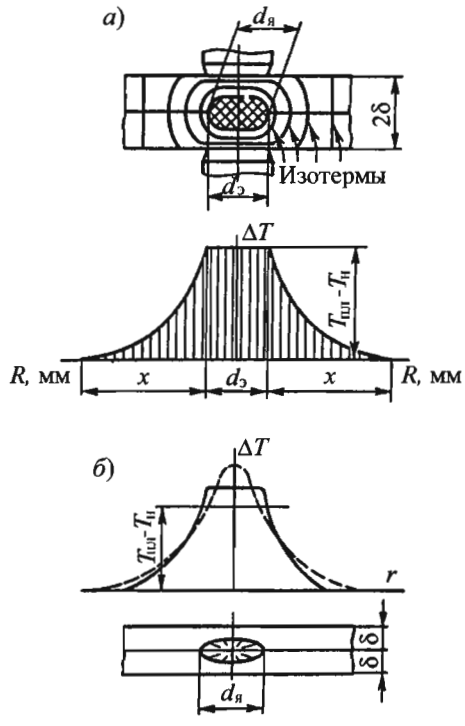


Рис. 1.17. Распределение приращений температуры при точечной сварке:
а – в момент выключения тока для определения выравнивания температур; *б* – действительное и расчетное для определения T

Мгновенная скорость охлаждения центральной точки при $T < 0{,}5T_{пл}$ может быть определена как

$$\omega = (8\pi\lambda\delta / Q)(T - T_н)^2,$$

где $T_н$ – начальная температура свариваемых листов.

Скорость охлаждения возрастает при использовании жестких режимов сварки.

1.3. МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ СВАРКЕ

Сварочные операции являются завершающими в маршрутной технологии производства металлоконструкций. При сварке должно быть сохранено высокое качество металла, достигнутое при плавке, прокатке, термообработке сталей и сплавов.

При всех способах сварки плавлением возможно попадание в зону сваривания воздуха, содержащего 78 % N_2, 21 % O_2, 1 % CO_2 и паров воды, чему способствуют несовершенство газовой струйной защиты, наличие примесей воздуха в защитных газах и флюсах, кислорода и водорода, выделяющихся при термической диссоциации влаги, CO_2, оксидов металла и сварочных флюсов. Это приводит к растворению в жидком металле азота, водорода, окислению основы и легирующих элементов, что ухудшает его механические свойства, К тому же результату приводит увеличение концентрации углерода, серы и фосфора, переходящих в шов из электродных покрытий, газов и флюсов, а также потеря легирующих элементов при испарении.

Современные сварочные процессы имеют значительное число средств, позволяющих не только сохранить, но и повысить качество металла в зоне соединения.

1.3.1. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ ПРИ СВАРКЕ ПЛАВЛЕНИЕМ

Для создания эффективных технологических процессов сварки плавлением необходимо прогнозировать ход физико-химических реакций и применять способы управления, препятствующие их развитию в неблагоприятном направлении.

В целях прогнозирования хода физико-химических реакций используют методы термодинамического анализа, допуская при этом, что, несмотря на кратковременность процесса сварки, высокие температуры нагрева металла и большая удельная поверхность его контакта со средой обеспечивают практическое достижение термодинамического равновесия в системе, представляющей собой зону сваривания.

В условиях термодинамического равновесия для анализа развития физико-химических реакций следует определить изобарно-изотермный потенциал Гиббса. Существует ряд методов расчета этого потенциала (Темкина – Шварцмана, Владимирова и др.), отличающихся по точности, простоте и универсальности. Для экспертной инженерной оценки вполне применим метод Улиха, опирающийся на наличие большого количества справочных данных о термодинамических свойствах различных веществ: теплоемкости, энтальпии, энтропии.

Теплоемкость C_p – количество теплоты, необходимое для нагрева единицы вещества на 1 К при постоянном давлении. В качестве единицы вещества принимают 1 моль, т.е. число граммов, равное молекулярной массе вещества. Такая теплоемкость называется молярной.

Энтальпия H – теплосодержание вещества или системы в конкретных условиях (температуры, давления, концентрации). Она определяет количество теплоты, которое требуется передать веществу или системе, т.е. группе веществ, участвующих в физико-химической реакции, чтобы привести ее в данное состояние. Принято измерять приращение энтальпии ΔH^0 по отношению к ее величине в стандартных условиях (p = 1 ат = 10^5 Па, T = 25 °С = = 289 К).

Для экзотермических реакций, идущих с выделением теплоты, энтальпия убывает, т.е. она обратна тепловому эффекту реакции по знаку. Приращение энтальпии вещества $\Delta H^0_т$ в пределах одного агрегатного состояния пропорционально температуре (ΔT) и его теплоемкости ($C_р$):

$$\Delta H^0_т = C_р \Delta T . \qquad (1.3.1)$$

$C_р$ = const в приближенных расчетах. При переходе из одного фазового или агрегатного состояния вещества в другое энтальпия изменяется на $\Delta H_{пр}$ – энтальпия плавления, испарения и т.д.

Вторая составляющая изменения внутренней энергии системы – энтропия ΔS. Это энергия, расходуемая на изменение внутреннего строения вещества, степени беспорядка его атомно-кристаллического строения. Она также зависит от температуры, давления p и концентрации $N_с$ элементов в сплавах. При p и $N_с$ = const $\Delta S = \Delta Q / \Delta T$, где ΔQ – приращение энергии вещества или системы при нагреве на 1 К.

Суммируя ΔH и ΔS, определяют приращение термодинамического потенциала Гиббса (ΔG) для конкретной температуры по отношению к стандартной. Для простых веществ, не претерпевающих превращений,

$$\Delta G^0_т = \Delta H^0_т - \Delta S^0 T . \qquad (1.3.2)$$

Однако при определении ΔH^0 следует иметь в виду, что $C_р$ зависит от температуры.

Приближенный расчет $\Delta G^0_т$, учитывающий эту зависимость, проводят по формуле Улиха:

$$\Delta G^0_т = \Delta H^0 - \Delta S^0 T - \Delta C^0_р M_0 T . \qquad (1.3.3)$$

В этой формуле ΔH^0, ΔS^0 и $\Delta C^0_р$ – приращение энтальпии, энтропии и теплоемкости реагирующих веществ при стандартных условиях. Их значения содержатся в табл. 1.6. Погрешность, создаваемая допущением постоянства $\Delta C^т_р = \Delta C^0_р$ при 298 К, компенсируется табличным коэффициентом M_0, который изменяется от 0 до 2,5 при нагреве от 298 до 8000 К (табл. 1.7).

1.6. Термодинамические свойства некоторых простых веществ и химических соединений при стандартных условиях

Вещество	Состояние	ΔH^0_{298}, кДж/моль	ΔS^0_{298}, Дж/(моль · К)	$\Delta C^0_{р\,298}$, Дж/(моль · К)
Al	Кристаллическая фаза	0	28,31	24,34
$AlCl_3$	Газовая фаза	–299,2	327,2	75,7
Al_2O_3	Кристаллическая фаза	–1675,0	50,94	79,00
B		0	5,87	11,96
BaO		–556,6	70,3	47,23
B_2O_3		–1264,0	53,85	62,97
$BaCO_3$		–1202,0	112,10	85,35
BeO		–598,7	14,1	25,4
C		0	5,74	8,53
CO	Газовая фаза	–110,5	197,4	29,15
CO_2		–393,51	213,60	37,13

Продолжение табл. 1.6

Вещество	Состояние	ΔH^0_{298}, кДж/моль	ΔS^0_{298}, Дж/(моль · К)	$\Delta C^0_{p\,298}$, Дж/(моль · К)
Ca	Кристаллическая фаза	0	41,62	26,28
$CaCO_3$		–1206,0	29,90	81,85
CaF_2		–1214,0	68,87	67,03
CaO		–635,1	39,70	42,80
$Ca_3(PO_4)_2$		–4125,0	240,9	231,6
CaS		–478,3	56,5	47,40
Cr		0	23,76	23,35
Cr_2O_3		–1141,0	81,10	104,60
Cu		0	33,30	24,51
CuO		–165,3	42,64	44,78
Cu_2O		–167,36	93,93	63,64
F	Газовая фаза	79,51	158,64	22,74
F_2		0	202,90	31,32
Fe	Кристаллическая фаза	0	27,15	25,23
$FeCO_3$		–747,68	92,68	82,13
FeO		–263,68	58,79	48,12
Fe_2O_3		–821,32	89,96	103,70
Fe_3O_4		–1117,71	151,46	143,40
FeS		95,4	67,36	50,54
H	Газовая фаза	217,9	114,60	20,79
H_2		0	130,60	28,83
HF		–268,61	173,51	29,16
H_2O		–241,84	188,74	33,56
Mg	Кристаллическая фаза	0	32,55	24,80
$MgCO_3$		–1096,21	65,69	75,52
MgO		–601,24	26,94	37,41
Mn		0	31,76	26,32
MnS		–205	78,23	50
MnO		–384,93	60,25	44,83
MnO_2		–519,65	53,14	54,02
Mn_2O_3		–959,81	110,46	107,70
Mn_3O_4		–1386,58	148,53	139,70
$MnCO_3$		–894	85,77	81,5
Mo		0	28,58	23,75
MoO_3		–755,00	78,21	73,65
Li_2CO_3		–125,87	90,37	97,40
Na_2CO_3		–1129,0	136,00	110,00
N	Газовая фаза	474,6	153,20	20,79
N_2		0	191,50	29,10
N_2O		81,55	220	38,71

Окончание табл. 1.6

Вещество	Состояние	ΔH^0_{298}, кДж/моль	ΔS^0_{298}, Дж/(моль · К)	$\Delta C^0_{p\,298}$, Дж/(моль · К)
NiS	Кристаллическая фаза	–92,88	67,36	54,68
Ni		0	29,86	26,05
NiO		–239,7	38,07	44,27
NO_2	Газовая фаза	33,87	240,45	37,11
NO		90,37	210,62	29,83
N_2O_4		9,37	304,3	78,99
Nb	Кристаллическая фаза	0	36,61	16,92
NbO		–399,57	48,12	26,47
Nb_2O_3		–1903,72	137,23	126,86
O	Газовая фаза	249,18	160,95	21,90
O_2		0	205,03	29,36
OH		38,96	183,64	29,89
Si	Кристаллическая фаза	0	18,72	19,80
SiF_4	Газовая фаза	–1548,0	281,60	73,37
SiO_2	Кристаллическая фаза	–859,3	42,09	44,48
Ti		0	30,66	25,00
TiO_2		–943,9	50,23	56,44
Zn		0	38,90	25,15
ZnS		–201	57,7	46,02
ZnO_2		–1094,0	50,32	56,04
$ZnCO_3$		–810,7	82,4	80,18
V		0	29,29	24,49
V_2O_3		–1230,10	98,32	103,96
V_2O_5		–1561,7	131,05	129,80
VC		–104,6	24,9	–
W		0	32,76	24,80
WC		–44,0	35,0	–
WO_2		–562,75	62,76	54,36
W_2C		–29,0	81,6	–
WO_3		–836,80	83,26	81,56
ZrO_2		–1094	50,32	56,04
ZrC		–206,7	33,3	–
TaC		–141,8	42,3	–
UO_2		–1084,5	77,95	63,76

1.7. Значение функции M_0 в формуле Улиха*

T, К	M_0	T, К	M_0	T, К	M_0
298	0,000	1200	0,6409	3500	1,5481
350	0,0122	1400	0,7596	4000	1,6710
400	0,0392	1600	0,8665	4500	1,7805
500	0,1133	1800	0,9636	5000	1,8792
600	0,1962	1900	1,0089	5500	1,9691
700	0,2794	2000	1,0524	6000	2,0561
800	0,3597	2100	1,0941	6500	2,1278
900	0,4361	2200	1,1341	7000	2,1987
1000	0,5083	2500	1,2457	7500	2,2648
1100	0,5765	3000	1,4082	8000	2,3269

* $M_0 = \ln\frac{T}{298{,}15} + \frac{298{,}15}{T} - 1$.

Для подсчета ΔG реакции в целом применяют условие ее записи: справа указывают продукты реакции, а слева – исходные вещества, например

$$2Fe + SiO_2 \leftrightarrow Si + 2FeO. \qquad (1.3.4)$$

Подсчет ΔH^0, ΔS^0 и ΔC_p^0 для реакции проводят, принимая их значения для продуктов реакции со знаком «+», а для исходных веществ – со знаком «–». Так, согласно данным табл. 1.6,

$$\Delta H^0 = \Delta H^0\,Si + 2\Delta H^0\,FeO - 2\Delta H^0\,Fe - \Delta H^0\,SiO_2 = 331\,840 \text{ Дж/моль}. \qquad (1.3.5)$$

Аналогично рассчитывают ΔS^0 = 39,91 Дж и ΔC_p^0 = 21,1 Дж при стандартных условиях. Затем определяют $\Delta G_т^0$, последовательно задавая в формуле (1.3.3) определенную температуру. Если полученное значение $\Delta G_т^0 < 0$, то реакция при данной температуре идет в прямом направлении, и наоборот. При $\Delta G_т^0 = 0$ реакция находится в состоянии термодинамического равновесия, т.е. периодически отклоняется от него в прямом и обратном направлениях.

Графически ход реакции (1.3.4) при различных температурах изображен на рис. 1.18, где по горизонтали отложены значения температуры, а по вертикали – значения $\Delta G_т^0$, подсчитанные по данным табл. 1.7 и 1.8:

$$\Delta G_т^0 = 331\,840 - 39{,}91T - 21{,}1M_0T. \qquad (1.3.6)$$

$\Delta G_т^0$ при 1000 К составляет $2{,}82 \cdot 10^5$ Дж, а при 5000 К равно $-0{,}68 \cdot 10^5$ Дж.

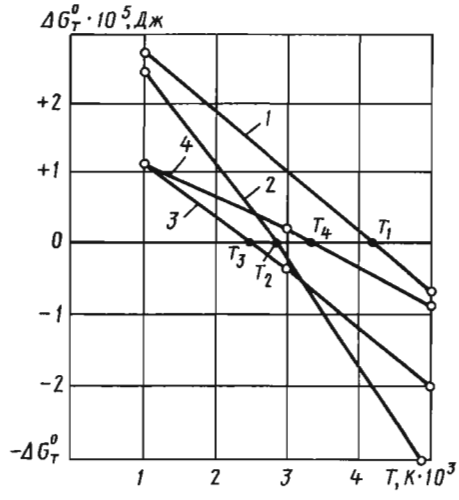


Рис. 1.18. Изменение направления хода реакций при различных температурах сварочного процесса (стадия капли и ванны):
1 – для реакции $SiO_2 + 2Fe \rightarrow 2FeO + Si$;
2 – для реакции $Mn_3O_4 + 4Fe \rightarrow 4FeO + 3Mn$;
3 – для реакции $3Fe + Mn_2O_3 \rightarrow 3FeO + 2Mn$;
4 – для реакции $Fe + TiO_2 \rightarrow FeO + TiO$

Для реакции

$$Mn_3O_4 + 4Fe = 4FeO + 3Mn. \qquad (1.3.7)$$

$\Delta G_т^0 = 98\,000 - 17T - 17{,}5M_0T;$

$\Delta G_т^0\,(1000) = 72\,500$ Дж;

$\Delta G_т^0\,(5000) = -151\,002$ Дж.

Из графика (рис. 1.18) следует, что при температурах $> T_1$, т.е. на стадии капли, реакция идет в прямом направлении, окисляя железо и восстанавливая кремний (кремниевосстановительный процесс, имеющий место при сварке под флюсом, содержащим свободный оксид SiO_2). При температурах $< T_1$ идет обратная реакция, т.е. раскисление железа (стадия ванны).

$$2FeO + Si = SiO_2 + 2Fe. \qquad (1.3.8)$$

При графическом сравнении хода нескольких реакций (см. рис. 1.18) считают, что более интенсивно идет реакция (1.3.7), где более отрицательные значения $\Delta G_т^0$.

1.3.2. РАСЧЕТ МАССЫ ПРОДУКТОВ РЕАКЦИЙ

Для реакций с участием газовой фазы, например

$$CaCO_3 = CaO + CO_2, \qquad (1.3.9)$$

степень хода реакции определяют по температурной зависимости константы равновесия $K_р$:

$$K_р = (p_{CaO} \cdot p_{CO_2})/(p_{CaCO_3}) = p_{CO_2}. \qquad (1.3.10)$$

В числителе представлено произведение парциальных давлений продуктов реакции (с учетом стехиометрических коэффициентов), а в знаменателе – исходных веществ. Поскольку CaO и $CaCO_3$ – твердые конденсированные вещества, их парциальные давления принимают за 1.

Константа равновесия $K_р$ является функцией температуры. Она растет при протекании реакции в прямом направлении.

Подсчет $K_р$ проводят по уравнению Вант-Гоффа:

$$\ln K_р = \frac{-\Delta G_т^0}{RT}, \qquad (1.3.11)$$

где $\Delta G_т^0$ – потенциал Гиббса для данной температуры; R – газовая постоянная, численно равная работе расширения 1 моля газа при нагреве на 1 К, а T – температура.

Зависимость парциального давления CO_2 от температуры будет определяться константой равновесия (рис. 1.19). Для реакции $2CO_2 = 2CO + O_2$ степень диссоциации подсчитывают, исходя из того, что из двух молекул CO_2 получают две молекулы CO и одну молекулу O_2.

Соответственно, из n_0 исходных молекул при степени диссоциации α получают αn_0 молекул CO, $\alpha n_0 / 2$ молекул O_2, и остается $n_0(1 - \alpha)$ молекул CO_2.

Применив законы термодинамического равновесия, запишем выражение константы равновесия:

$$K_р = (p_{CO})2 \cdot p_{O_2} /(p_{CO_2})2. \qquad (1.3.12)$$

Выразив по закону Дальтона парциальные давления компонентов смеси

$$p_{O_2} = \frac{\alpha\, p_{вн}}{2\left(1+\frac{\alpha}{2}\right)}; \quad p_{CO} = \frac{\alpha\, p_{вн}}{1+\frac{\alpha}{2}};$$

$$p_{CO_2} = \frac{(1-\alpha)\, p_{вн}}{1+\frac{\alpha}{2}}$$

и подставив их в уравнение (1.3.12), окончательно получим

$$(K_р - 1)\alpha^3 - 3\alpha K_р + 2K_р = 0. \qquad (1.3.13)$$

Определив $K_р$ по зависимости (1.3.11), находят α и парциальные давления газов смеси.

Решение этого уравнения в графическом виде представлено на рис. 1.20.

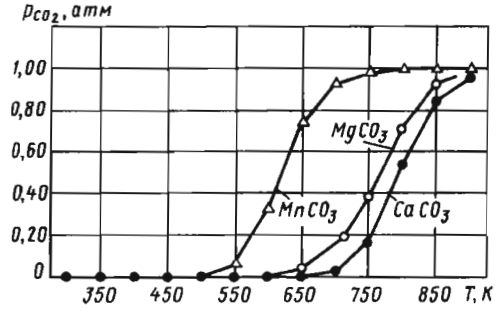


Рис. 1.19. Влияние температуры на парциальное давление p_{CO_2} при диссоциации карбонатов $CaCO_3$; $MgCO_3$; $MnCO_3$

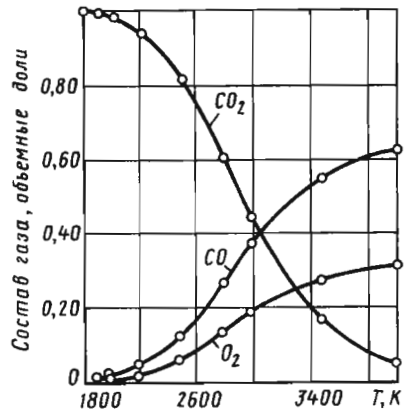


Рис. 1.20. Влияние температуры на степень диссоциации CO_2 и парциальное давление продуктов диссоциации

1.3.3. РАСЧЕТ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕМЕНТОВ В СПЛАВАХ И ВЫБОР РАСКИСЛИТЕЛЯ

При воздействии на сплав окислителя или восстановителя необходимо прогнозировать, какой компонент сплава вступит во взаимодействие.

Первым фактором является степень химического сродства элементов к кислороду.

Для температур до 1000 К это сродство усиливается в такой последовательности: медь, никель, кобальт, железо, вольфрам, молибден, хром, марганец, ванадий, кремний, титан, цирконий, алюминий.

Химическое сродство рассчитывают для определенной температуры, находя упругость диссоциации оксидов, т.е. парциальное давление кислорода p_{O_2}, выделяющегося при диссоциации оксида (MeO). Например, при 1000 К парциальное давление кислорода, выделяющегося из MnO, меньше, чем парциальное давление кислорода, выделяющегося из FeO (рис. 1.21). Следовательно, химическое сродство к кислороду у железа меньше, чем у марганца. При 1000 К и равных молярных концентрациях марганец может быть раскислителем для железа. Еще одним фактором служит молярная концентрация элемента в сплаве. Пересчет массовой концентрации в молярную и обратно выполняют по формулам

$$[\mathrm{Me}] = q_i\,\% \cdot A_i \Big/ \left(\sum^{k} q_i\,\% \cdot A_i \right);$$

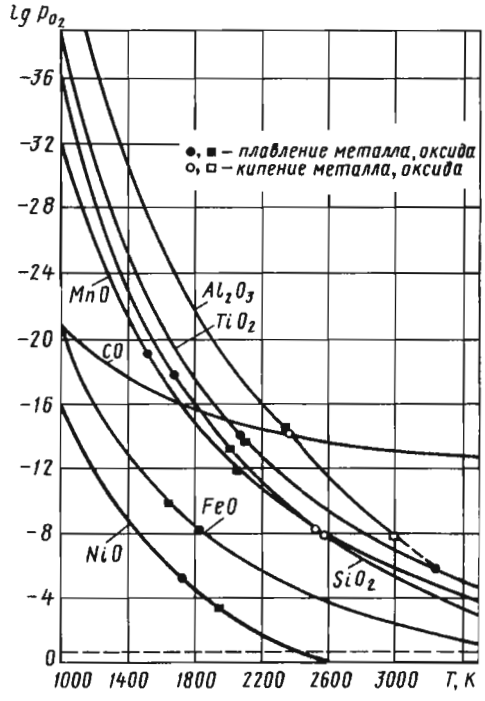


Рис. 1.21. Сравнение упругости диссоциации различных оксидов при разных температурах

$$q_{i\,\mathrm{Me}} = \left([\mathrm{Me}]_i \cdot A_i \Big/ \sum^{k} q_i\,\% \cdot A_i \right) 100, \quad (1.3.14)$$

где [Me] – молярная концентрация элемента в составе ([Me] < 1); q_i – массовая доля элемента в сплаве; A_i – атомная масса элемента; k – число элементов в составе сплава.

Совместный учет первого и второго факторов проводится путем определения химического потенциала элементов в составе сплава, т.е. приращения энергии Гиббса при изменении количества вещества i-го компонента раствора. Рассчитывают химический потенциал μ по уравнениям:

$$\left.\begin{aligned} \mu_i &= \mu_{i0} + RT \cdot \lg p_i \text{ для газовых смесей;} \\ \mu_i &= \mu_{i0} + RT \cdot \lg N_i \text{ для расплавов (растворов),} \end{aligned}\right\} \quad (1.3.15)$$

где μ_{i0} – энергия Гиббса компонента в чистом виде (для $p_i = 1$ $N_i = 1$) в стандартных условиях, т.е. $\mu_{i0} = \Delta G^0$; p_i – парциальное давление

i-го газа; N_i – молярная доля i-го компонента раствора.

Процесс равновесия соответствует равенству μ_i в фазах системы.

Самопроизвольно компонент переходит из фазы, где μ_i больше, в фазу, где μ_i меньше. Наиболее вероятна реакция, при которой приращение $\Delta\mu$ минимально. Так, при окислении сварочной ванны 08Г2С наиболее вероятно окисление кремния, несмотря на наличие компонента с большим сродством к кислороду (углерод).

1.3.4. РАСЧЕТ НЕОБХОДИМОГО КОЛИЧЕСТВА РАСКИСЛИТЕЛЯ

Для защиты какой-либо составляющей сплава, подвергающейся преимущественному окислению, необходимо ввести в определенном количестве элемент, имеющий большее сродство к кислороду. Для этого сравнивают при определенной температуре упругость диссоциации их оксидов с учетом молярной концентрации элементов в составе сплава.

В частности, для подавления реакции выгорания углерода из сварочной ванны необходимо ввести в шов ≥ 0,28 % Si. Это значение определено для ванны, содержащей 0,14 % C, 0,08 % Si (при полном отсутствии марганца), путем сравнения упругости диссоциации при 1900 К. В чистом виде упругость диссоциации оксидов, рассчитанная по формуле (1.3.11),

$$\lg p_{O_2}^{CO} = -16{,}0184; \quad \lg p_{O_2}^{SiO_2} = -13{,}8914 .$$

Следовательно, при равных молярных концентрациях в первую очередь окисляется углерод. Упругость диссоциации оксидов CO и SiO_2 с учетом молярной концентрации углерода и кремния рассчитывается по формуле

$$p_{O_2}^{C} = p_{O_2}^{O}[Me], \qquad (1.3.16)$$

где $p_{O_2}^{C}$ и $p_{O_2}^{O}$ – упругость диссоциации оксида металла, находящегося в сплаве и в свободном состоянии соответственно.

В равновесных условиях

$$p_{O_2}^{C(SiO_2)} = p_{O_2}^{C(CO)} .$$

Следовательно, имеет место соотношение

$$[C]^2 / Si = p_{O_2}^{CO} \Big/ p_{O_2}^{(SiO_2)}, \qquad (1.3.17)$$

откуда $[Si] = [C]^2 p_{O_2}(SiO_2) / p_{O_2}(CO) =$ = 0,0056 моля = 0,28 %.

Для подавления реакции выгорания углерода в указанных выше условиях в ванне должно быть ≥ 0,28 % Si. В сварочной проволоке содержание кремния должно быть больше с учетом перемешивания с основным металлом и коэффициентом перехода кремния из электрода в металл шва.

1.3.5. СКОРОСТЬ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ

Скорость физико-химической реакции пропорциональна изменению концентрации реагирующих веществ в единицу времени. Если реакция идет в прямом направлении, то концентрация исходных веществ снижается, а продуктов реакции растет, пока не будет достигнуто для данной температуры термодинамическое равновесие.

При постоянной температуре скорость v гомогенных реакций прямо пропорциональна произведению концентрации реагирующих веществ с учетом стехиометрических коэффициентов. Для реакции $2NO + H_2 = N_2O + H_2O$ скорость

$$v = K \cdot C_{NO}^2 \cdot C_{H_2}, \qquad (1.3.18)$$

где K – константа скорости реакции ($K = 1$ при единичных концентрациях веществ); C_{NO} и C_{H_2} – концентрации NO и H_2.

При повышении равновесной температуры скорость физико-химических реакций возрастает. Требуется некоторая энергия активации для инициирования реакции.

В гетерогенных системах, состоящих из нескольких фаз (газ, флюс, жидкий, твердый металлы), каждый компонент стремится распределиться в системе так, чтобы его химический потенциал в каждой фазе был одинаков. Это осуществляется диффузионным путем и химическим взаимодействием.

В частности, скорость диффузии в газовой фазе, контактирующей с флюсом, растворяющим газ, протекает по закону Фика со скоростью v_g:

$$v_g = DF\Delta C / \delta, \qquad (1.3.19)$$

где D – коэффициент диффузии; F – площадь поперечного сечения диффузионного потока; δ – толщина диффузионного слоя; ΔC – разность концентраций на расстоянии δ.

В турбулентном потоке газ интенсивно перемешивается и его состав выравнивается по объему, за исключением поверхностного слоя δ, где протекает диффузионный процесс.

Толщина этого слоя прямо пропорциональна вязкости газа и обратно пропорциональна скорости его движения. Следовательно, скорость гетерогенного процесса зависит от совокупности диффузии и химического взаимодействия при доминировании самого медленного звена.

1.3.6. ФОРМИРОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА СВАРОЧНОЙ ВАННЫ

При сварке плавлением химический состав ванны слагается из долей участия основного, электродного или присадочного металла с учетом коэффициентов перехода легирующих элементов, т.е. отношения их доли в шве к содержанию в основном металле или электроде. Указанные доли участия, приведенные в табл. 1.8, весьма различны, так как зависят от технологических условий сварки (разделки кромок, вида раскладки слоев в многослойном шве, режимов сварки и теплофизических свойств материалов).

Коэффициенты перехода легирующих элементов приведены в табл. 1.9 для некоторых технологических процессов сварки. Ряд легирующих элементов (углерод, титан), входящих в состав стали, в этом процессе наполовину переходят в шлаковую ванну. Для их сохранения требуется ввод специальных раскислителей. В частности, выгорание углерода предотвращают вводом кремния. Другие легирующие элементы защищают от окисления марганцем или другими, более эффективными раскислителями (церием, иттрием, кальцием). Формулы для ориентировочного расчета химического состава шва известны.

1.8. Доли участия в шве металла перлитной и аустенитной сталей в зависимости от типа соединения и метода сварки

Тип соединения	Структурный класс свариваемой стали	Доля участия основного металла в металле шва (в %) для сварки			
		ручной дуговой	автоматической под флюсом	наплавки ленточным электродом	электрошлаковой
Наплавка валика	Перлитная	15…40	25…50	8…20	–
	Аустенитная	25…50	35…60	15…25	
Однослойные стыковые соединения	Перлитная	20…40	25…50	–	20…40
	Аустенитная	30…50	40…60		30…50
Корни швов многослойных стыковых и тавровых соединений	Перлитная	25…50	35…60		–
	Аустенитная	35…50	40…70		

1.9. Коэффициенты перехода некоторых элементов при различных способах дуговой сварки

Вид дуговой сварки	Коэффициенты перехода элементов			
	углерода	марганца	кремния	хрома
Сварка в атмосфере без защиты:				
– проволока марки Св-08А	0,3…0,4	0,39…0,56	–	–
– то же, марки Св-18ХГСА	0,29…0,34	0,63…0,69	0,5…0,87	0,9…0,95
Сварка в CO_2:				
– проволока марки Св-12Х19Н9Т	–	0,78		0,94
– то же, марки Св-18ХГСА	0,8		0,81	
Сварка в Ar + 5 % O_2:				
– проволока марки Св-18ХГСА	0,6	0,69	0,71	0,92
– то же, марки Св-10ГС	0,59	0,41	0,32	–
Сварка электродами марки УОНИ-13/45	–	0,45…0,55	0,14…0,27	–

1.3.7. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МЕТАЛЛА С ГАЗОВОЙ ФАЗОЙ В ЗОНЕ СВАРИВАНИЯ

В зоне высоких температур в газовой фазе протекают реакции диссоциации и термической ионизации ее компонентов, реакции взаимодействия в газах, между газами и металлом, а также реакции сублимации и испарения.

Реакции диссоциации газов имеют следующий характер:

$$H_2 \leftrightarrow 2H, \quad O_2 \leftrightarrow 2O, \quad N_2 \leftrightarrow 2N, \qquad (1.3.20)$$

$$CO_2 \leftrightarrow CO + O, \quad H_2O \leftrightarrow H + OH.$$

Сводный график степени диссоциации этих газов, представленный на рис. 1.22, показывает, что диссоциация водорода активно развивается при $T = (2...4) \cdot 10^3$ К, а кислорода – при более высокой температуре. Менее всего диссоциирует азот, который при дуговой сварке существует преимущественно в молекулярной форме.

Диссоциация газов резко увеличивает их растворимость в твердом и жидком металлах, которая описывается законами Генри и Сивертса.

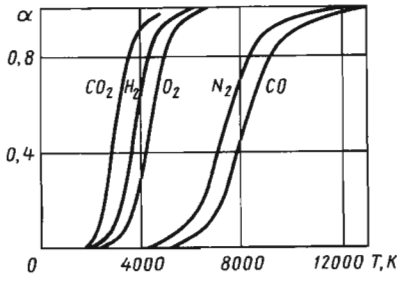


Рис. 1.22. Влияние температуры на степень диссоциации α различных газов

Для одноатомных газов

$$[Г] = Kp \text{ (закон Генри)}, \qquad (1.3.21)$$

где [Г] – содержание газов в металле; p – парциальное давление; K – коэффициент растворимости. Для двухатомных газов

$$[Г] = K\sqrt{p} \text{ (закон Сивертса)}. \qquad (1.3.22)$$

При дуговом нагреве одноатомные газы и пары подвергаются также термической ионизации, образуя плазму из заряженных ионов и электронов, что облегчает стабильное горение дуги. Потенциалы ионизации ряда газов и паров приведены в табл. 1.10. Для щелочных металлов (калий, натрий, кальций), ряда газов и паров потенциал ионизации составляет 4...6 эВ. От них резко отличаются аргон, гелий, потенциал ионизации которых достигает 15...24 эВ соответственно. При смешивании газов этот потенциал существенно снижается.

Второе следствие ионизации – усиление растворимости. В частности, водород в виде иона с положительным зарядом притягивается к катоду, увеличивая насыщение жидкого металла. Этот эффект называют электростатической растворимостью.

Содержание газов в металле измеряют в $см^3/100$ г либо в массовых долях, %.

Графики равновесных концентраций водорода и азота в стали, алюминии, никеле и меди при различных температурах, приведенные на рис. 1.23, *а*, *б*, показывают, что в жидком металле равновесные концентрации отдельных газов весьма значительны, а при переходе в твердое состояние резко падают, несмотря на его высокую температуру. Это создает риск образования пор при ускоренной кристаллизации. Особенно велик перепад растворимости для водорода в твердом и жидком

1.10. Атомный вес A_i, номер N_i и потенциал ионизации веществ U_i

Вещество	A_i	N_i	U_i, эВ	Вещество	A_i	N_i	U_i, эВ
Водород (H)	1,0079	1	13,59	Никель (Ni)	58,71	28	7,63
Азот (N)	14,0001	7	14,54	Калий (K)	19,102	19	4,34
Кислород (O)	15,99	8	13,61	Вольфрам (W)	183,85	74	7,93
Алюминий (Al)	26,9815	13	5,98	Кальций (Ca)	40,08	20	6,11
Аргон (Ar)	39,948	18	15,76	Натрий (Na)	22,98	11	5,14
Гелий (He)	4,0026	2	24,58	Магний (Mg)	24,305	12	7,64
Железо (Fe)	55,847	26	7,90	Углерод (C)	12,01	6	11,26
Фтор (F)	19,99	9	16,9	Кислород (O_2)	–	8	13,5
Азот (N_2)	14,0	7	15,8	Вода (H_2O)		–	13,0
Водород (H_2)	1,00	1	15,4	NO			9,3
CO_2	–	–	14,4	Кремний (Si)	28,08	14	7,94
Медь (Cu)	63,5	29	7,7	Марганец (Mn)	54,9	25	7,4
Титан (Ti)	47,9	22	6,8	Литий (Li)	6,94	3	5,4

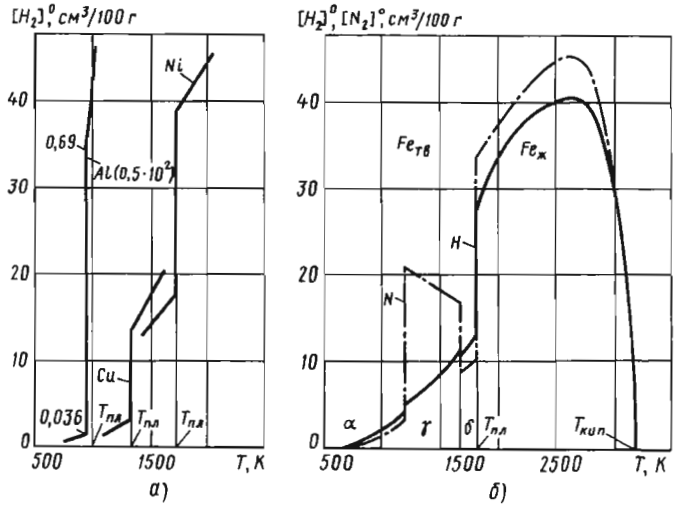


Рис. 1.23. Изменение растворимости водорода и азота в металлах при различных температурах в равновесных условиях:

$T_{кип}$ и $T_{пл}$ – температуры кипения и плавления соответственно;

α, γ, δ – структуры низколегированных сталей (α – феррит; γ – аустенит; δ – дельта-феррит)

алюминии (см. рис.1.23, *а*), что объясняет его повышенную склонность к образованию пор в условиях дуговой сварки. Растворимость водорода зависит также от структуры стали, что приводит к скачкообразному изменению растворимости при (α→γ→δ)-превращений и переходу от объемно-центрированной кристаллической решетки в гранецентрированную кристаллическую (см. рис. 1.23, *б*).

Водород, оставшийся в металле после кристаллизации, образует пересыщенный твердый раствор внедрения. Имея весьма малый размер атома, он энергично диффундирует из шва в зону термического влияния (ЗТВ), где меньше его концентрация, а также к поверхности металла. Попадая в дефектные места кристаллической решетки, атомы водорода рекомбинируют, т.е. образуют молекулы, не способные к диффузии. Такими местами являются границы зерен, неметаллические включения и поры. Водород постепенно накапливается в этих местах, называемых ловушками, и создает значительные напряжения, приводящие к микронадрывам – флокенам. Скорость диффузии атомарного водорода в низколегированной стали значительно выше, чем в высоколегированной, из-за больших искажений кристаллической решетки в последней.

Снижение содержания водорода в стали в процессе изотермической выдержки при 20 °С, приведенное в табл. 1.11, свидетельствует о том, что через 2…3 сут. после сварки диффузионный водород из низколегированной стали практически выходит, а молекулярный остается в ней. Повышенные концентрации водорода в жидком металле ванны могут вызвать дефекты типа пор, а для закаливающихся сталей, углеродный эквивалент которых $C_{экв} > 0{,}45$ %, – холодные трещины в ЗТВ. Водород, диффундируя в вершины микронадрывов, способствует их развитию.

1.11. Кинетика удаления водорода при 20 °С из металла сварного шва

Тип металла шва	Содержание водорода в металле шва, см³/100 г						
	сразу же после сварки	после сварки через, ч					
		5	20	45	75	120	840
Ферритный на стали Ст3	6,2	5,4	4,3	3,4	1,1	1,8	–
Чисто аустенитный на стали Х23Н18	7,6	–	7,6	7,4	–	8,7	6,8

Азот, согласно рис. 1.22, в зоне дуги практически не диссоциирует. Однако его концентрация в швах значительна (до 0,1 %). Предполагают, что в зоне дуги азот и кислород образуют оксид азота, который, контактируя с металлом ванны, охлаждается и распадается, насыщая жидкий металл хорошо растворяющимися атомарными азотом и кислородом. Указанное предположение подтверждено косвенно тем, что швы, полученные в защитной среде азота, менее насыщены азотом, чем в смеси азота и кислорода. При кристаллизации металла азот, как и водород, может образовывать поры в швах. Азот образует с металлом после кристаллизации твердый раствор внедрения, степень пересыщения которого возрастает по мере охлаждения. Диффузия азота затруднена большими размерами его атома. При охлаждении до температур 700...800 К азот образует нитриды железа (Fe_2N, Fe_4N), карбонитриды (CN), нитриды титана, молибдена и других элементов, содержащихся в стали. Указанные нитриды образуются в объеме зерен, увеличивают прочность, но резко снижают пластичность, ударную вязкость и коррозионную стойкость стали.

Кислород, попадая в жидкую сталь, образует оксиды железа и легирующих элементов, создающих после кристаллизации неметаллические включения – шлаки, которые снижают все прочностные, особенно пластические, свойства и ударную вязкость, повышая температуру перехода металла в хрупкое состояние. Наличие в стали кислорода в виде оксидов FeO уменьшает температуру солидуса и увеличивает риск образования горячих трещин. Кроме того, кислород в ванне окисляет углерод, образуя CO, который может привести к пористости. Повышенное количество паров H_2O и газа CO_2 в зоне дуги также увеличивает парциальное давление кислорода, образующегося при их диссоциации.

Для предупреждения рассмотренных взаимодействий металла шва с газами в зоне дуги применяют защитные газовые, шлаковые, газошлаковые и вакуумные среды (рис. 1.24).

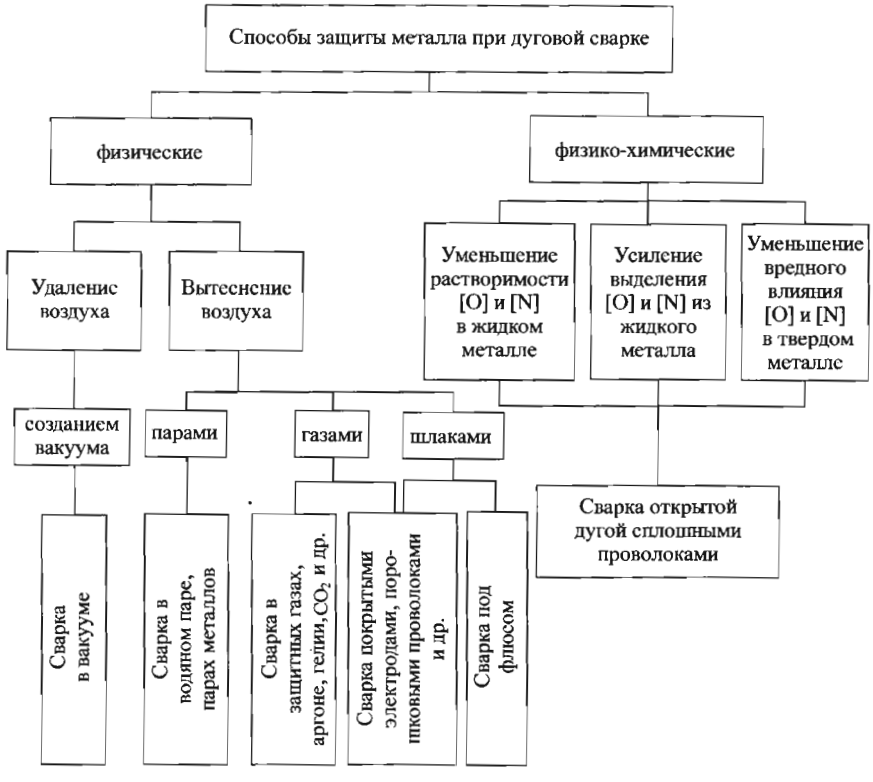


Рис. 1.24. Способы защиты металла от вредного влияния воздуха при дуговой сварке

1.3.8. ГАЗОВЫЕ ЗАЩИТНЫЕ СРЕДЫ ПРИ СВАРКЕ

Газовая защита может быть струйной или камерной, когда сварка проводится в камере с контролируемой средой. Схема струйной газовой защиты приведена на рис. 1.25. Она состоит из паров и газов, генерируемых дугой, а также из защитного газа, поступающего из сопла горелки.

Высокая температура в зоне дуги, достигающая (6…8) 10^3 К, приводит к нагреву газа и его расширению более чем в 10 раз, а также к его диссоциации (см. рис. 1.20 и 1.22). Расширение газа способствует оттеснению воздуха и является самозащитным действием дуги. В том же направлении действуют пары металла в зоне анодного и катодного пятен, которые составляют до 10 % объема газов в зоне дуги. Наибольшее количество защитных газов создают электродные покрытия фтористо-кальциевого и рутилового типов.

Струйная газовая защита имеет вид конусной прямолинейной, вихревой, кольцевой и комбинированной (двухслойной) струй.

Выходящая из сопла сплошная струя защитного газа смешивается с окружающим его воздухом, что сужает струю чистого защитного газа в виде конуса. Защитные свойства струи зависят и от плотности газа, что препятствует ее деформации при воздействии внешних потоков воздуха. Для прямолинейных газовых струй возможно ламинарное и турбулентное истечение газа. Режим движения газа оценивается числом Рейнольдса

$$\mathrm{Re} = Dv / \nu, \qquad (1.3.23)$$

где D – диаметр сопла, м; v – скорость истечения газа, м/с; ν – коэффициент кинематической вязкости газа, $м^2/с$.

При $\mathrm{Re} > 3000$ газовый поток переходит в турбулентный режим. Обычно применяемые скорости истечения обеспечивают заведомо ламинарный режим (за исключением аргона).

Однако сужение сопла за счет налипания брызг увеличивает скорость истечения и создает опасность перехода к турбулентному режиму. Наибольшее влияние на защиту от воздуха оказывают технологические факторы: длина дуги и расход газа. При струйной защите возможен подсос воздуха через зазор между кромками газами, поднимающимися от металла вследствие нагрева. Это исключается сваркой на подкладках, а также подачей газа через подкладки с каналами. Наряду с технологическими весьма эффективны и физико-химические способы защиты, заключающиеся в уменьшении растворимости газа в ванне путем снижения ее температуры и усиления выделения газов до начала кристаллизации либо в ослаблении их вредного влияния на свойства соединений.

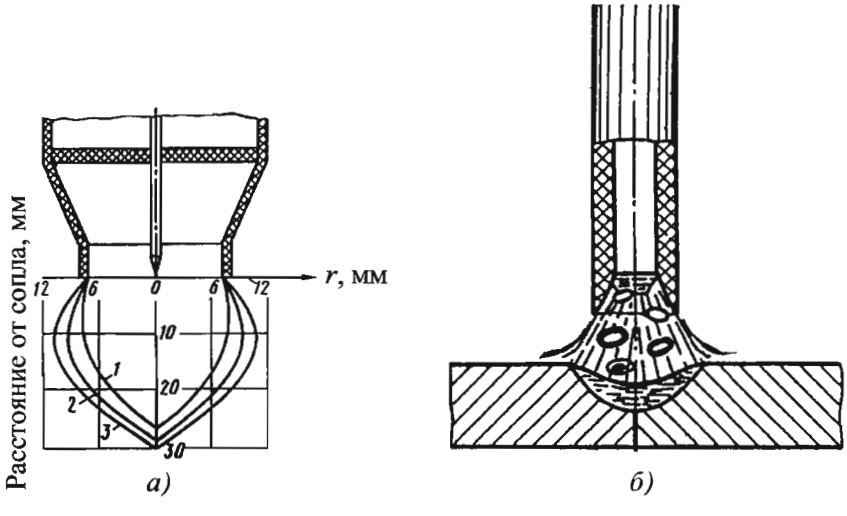


Рис. 1.25. Схемы струйной газовой защиты металла при дуговой сварке в газах (*а*) и электродом с покрытием (*б*):
r – радиусы струи и сопла

Защитные газы, охлаждая дуговой разряд, снижают его стабильность, что особенно заметно при сварке в CO_2. Другой вид воздействия на дуговой разряд – это влияние газов на характер переноса металла электрода (размер капель, степень разбрызгивания). Размер капель уменьшается с увеличением силы сварочного тока, повышением содержания углерода, уменьшением диаметра электродной проволоки и поверхностного натяжения в металле капли. В этом плане весьма эффективно добавление к аргону CO_2 или кислорода, поскольку окисление поверхности капли снижает поверхностное натяжение.

При сварке в аргоне каждому диаметру электродной проволоки соответствует определенный критический ток, выше которого капельный перенос с сильным разбрызгиванием переходит к более благоприятному струйному.

При сварке тонколистового металла, когда увеличение тока недопустимо, добавка к аргону 20 % CO_2 или 2…5 % O_2, а также нанесение активаторов на электрод уменьшают критический ток и улучшают перенос металла.

Однако это увеличивает окислительную способность газов. Степень окисления металла пропорциональна температуре, поверхности и времени контактирования металла с газом. При радиусе капли 0,5 мм, имеющей температуру ~3000 К, относительная удельная поверхность капель больше поверхности ванны в 20 раз.

Выбор защитного газа в решающей степени зависит от физико-химических свойств основного и электродного металлов и его взаимодействия с газами, что определяет возможность получения плотного металла шва.

Из инертных одноатомных газов используют аргон и в меньшем объеме гелий, а также их смеси преимущественно при сварке неплавящимся вольфрамовым электродом цветных, активных и тугоплавких металлов (медь, алюминий, титан, молибден), а также высоколегированных сталей.

Применяют аргон трех сортов (высший, № 1 и 2) по ГОСТ 10157–73, а также гелий трех-четырех сортов (особой чистоты, высокой чистоты, технический) по ТУ 51-689–75.

Смесь аргона с гелием состоит из 65 % Ar и 35 % He. Такая смесь обеспечивает преимущества обоих газов: глубокое проплавление и хорошее формирование шва.

При сварке плавящимся электродом в инертных газах для получения мелкокапельного переноса и предотвращения пор применяют добавки окислительных газов в смесях (в процентах): 80 Ar + 20 CO_2; 80 Ar + 20 O_2; 75 Ar + 22 CO_2 + 3 O_2.

При сварке низкоуглеродистых и низколегированных сталей применяют преимущественно в качестве защитного газа CO_2 (ГОСТ 8050–76). Сварка в CO_2 среди механизированных способов стоит на первом месте по применению. В результате диссоциации (см. рис. 1.20) он обладает окислительным действием, а состав газов существенно различен вдоль зоны сваривания. Наибольшее окисление претерпевает металл при наиболее высоких температурах (стадия капли), что приводит к выгоранию углерода, несмотря на наличие раскислителей: кремния и марганца. Однако на стадии ванны, когда температура приближается к «кристаллизационной», окисление металла нейтрализуется раскислителями, которые могут быть введены в зону сваривания лишь в составе сварочной проволоки. Для сварки в CO_2 низкоуглеродистых сталей рекомендованы проволоки по ГОСТ 2246–70. Состав этих проволок приведен в табл. 1.12.

Для сварки в CO_2 низколегированных сталей лучшими оказались проволоки Св-10ХГ2СМА, Св-08Х3Г2СМ, Св-08Х14ГТ и др.

Для уменьшения разбрызгивания при сварке в CO_2 применяют активированные проволоки и смеси защитных газов Ar + 20 % CO_2. Сварка в защитных газах обеспечивает минимальное количество оксидных включений в швах по сравнению с другими способами дуговой сварки (рис. 1.26).

1.12. Состав проволок для сварки в CO_2 низкоуглеродистых сталей (ГОСТ 2246–70), мас. %

Марка проволок	Углерод	Кремний	Марганец	Тип раскисления
Св-08ГС	До 0,1	0,6…0,85	1,4…1,7	Среднераскисленный
Св-08Г2С	0,05…0,11	0,7…0,95	1,8…2,1	Высокораскисленный

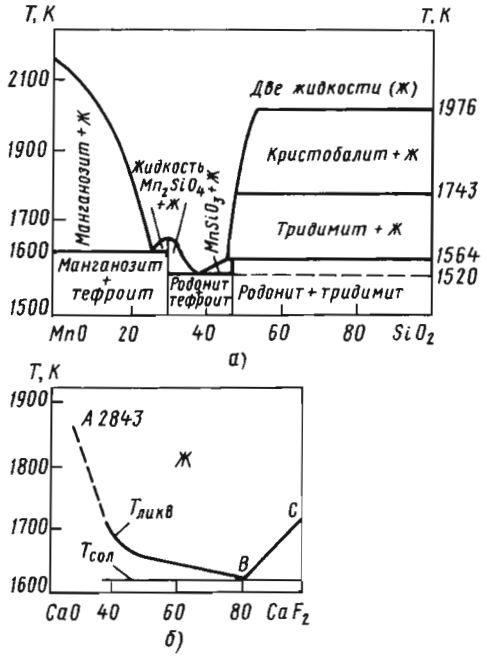


Рис. 1.26. Псевдобинарные диаграммы плавкости $MnO-SiO_2$ и $CaO-CaF_2$ (соответственно *а* и *б*)

1.3.9. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МЕТАЛЛА С ФЛЮСОМ ПРИ СВАРКЕ

Сварочные флюсы предназначены для защиты металла от атмосферных газов; проведения реакций раскисления, модифицирования, легирования и рафинирования; обеспечения стабильного горения дуги и высококачественного формирования шва.

Для выполнения этих требований флюсы должны иметь меньшую, чем у металла, температуру плавления $T_{пл}$, хорошую отделимость шлаковой корки, образующейся после взаимодействия флюса с металлом. Флюсы состоят из различных оксидов, фторидов, хлоридов, нерастворимых в свариваемом металле. Различают кислотные, основные, нейтральные и амфотерные оксиды. Последние (Al_2O_3, Cr_2O_3) выступают как основные при их недостатке или как кислые при избытке в шлаке основных. К кислым относят SiO_2 ($T_{пл}$ = 1983 К), TiO_2 ($T_{пл}$ = 2123 К), P_2O_5, а к основным – CaO ($T_{пл}$ = 2843 К), MnO ($T_{пл}$ = 1873 К), FeO ($T_{пл}$ = 1643 К), MgO, Na_2O, K_2O. Нейтральные – это оксиды, не содержащие O_2 (CaF_2 , NaCl, KCl и др.). Кислые и основные оксиды способны образовывать комплексы ($CaO \cdot SiO_2$ и др.), имеющие нейтральные свойства и малую температуру плавления.

Химические свойства флюсов оценивают по степени их кислотности или основности и активности. Кислотность определяют по отношению суммарного количества кислых оксидов $(MeO)_к$ к основным $(MeO)_о$. Если $\sum MeO_к / \sum MeO_о > 1$, флюс считают кислым. Составы основных и кислых флюсов приведены в табл. 1.13, а их назначения – в табл. 1.14.

Главнейший кислый оксид SiO_2 и основный MnO, составляющие основу кремнемарганцовых флюсов, являются химически активными по отношению к стали в связи с развитием кремнемарганцового восстановительного процесса и окисления свариваемого металла. Ход этих реакций [см. формулы (1.3.4)] при различных температурах представлен на рис. 1.3.1. Для углеродистых сталей этот процесс имеет положительное значение, так как ввод марганца и кремния в каплю, а затем и в сварочную ванну препятствует выгоранию углерода и связанному с этим образованию пор по реакции $FeO + C \rightarrow Fe + CO$.

Для легированных сталей, содержащих легирующие элементы с бóльшим сродством к кислороду, чем марганец и кремний, применение кремнемарганцового флюса приведет к окислению хрома, титана, ниобия и других элементов. В этом случае применимы основные флюсы, где в качестве главного компонента взят CaO, не диссоциирующий при сварочных температурах. Другие компоненты флюсов выбирают для снижения температуры плавления до значения ниже температуры плавления металла, а также для обеспечения других физических и химических свойств. Наиболее часто к CaO добавляют CaF_2 (плавиковый шпат или флюорит кальция). Псевдобинарные диаграммы плавкости некоторых флюсов, приведенные на рис. 1.26, свидетельствуют о резком снижении температур плавления комплексов $CaO - CaF_2$, $CaO - Al_2O_3$, $MnO - SiO_2$ и др. В состав флюсов входит SiO_2, необходимый для обеспечения отделимости шлака и других технологических свойств. Однако его количество во флюсах для сварки легированных сталей должно быть таким, чтобы он был полностью связан в комплексы. Расчет допустимого количества SiO_2 приведен в работе Б.Н. Бадьянова.

1.13. Составы флюсов

Марка флюса	Массовая доля, %											
	TiO_2	FeO	SiO_2	MnO	MgO	CaF_2	CaO	Al_2O_3	Fe_2O_3	S	P	других компонентов
АН-348-А	–	–	41…44	34…38	5…7,5	4…5,5	<6,5	<4,5	<2	<0,15	<0,12	Нет
ОСЦ-45			38…44	38…44	<2,5	6…9		<5			<0,15	
ТА.st.10*	5…8	<1,5	37…43	–	11…15	8…12	14…18	9…12	–	<0,1	<0,1	
FSM-37*	1…2	<2	41…44	35…39	2…4	2…4	4…8	<2		<0,15	<0,15	
ФВТ-1	–	–	33	9	MgO + CaO = 25	CaF_2 + NaF = 12	–	20	<1	<0,05	<0,05	K_2O, Na_2O < 25
АН-42			30…34	14…19	–	14…20	12…16	13…18		<0,06	<0,1	Нет
FB 10	Al_2O_3 + MnO = 60; SiO_2 + TiO_2 = 25; CaO + MgO = 5					5	–	–	–	–	–	
Pil 12 UPS*	–	<1	37…42	9…14	4…9	15…20	14…17	<5		<0,1	<0,1	
АНК-44	15	–	20	5	2	5	5	30			–	
ФИМС-20П	13		23	–	15	24		24	<1	<0,05	<0,05	
АН-26С	–		29…33	2,5…4	15…18	20…24	4…8	19…23	<1,5	<0,1	<0,1	C < 0,05
ФЦ-19			23		23	20	<6	21	2	<0,03	<0,03	Cr_2O_3 = 4,5
НФ-18М	4…10		17…21	2…5	6…11	16…23	14…20	21…28	2…4,5		<0,02	Нет
F-624	–		44…49	8…11	16…19	3…6	10…14	7	<2	<0,08	<0,08	Cr_2O_3 = 1,5…3,0
ФЦК		<0,2	<2	–	–	77	–	10	–	<0,02	<0,02	NaF = 5, KCl = 8
АН-60		–	42,5…46,5	37…41	0,5…3	5…8	3…11	<5	<0,9	<0,09	<0,1	Нет
ОФ-6			<4	–	<3	45…60	16…23	20…27	–	<0,05	<0,04	
АНФ-5			<2		–	75…80	–	–			<0,02	NaF = 17…25
ЖМ-1			–			8		–		–	–	$CaCO_3$ = 28; $Na_2B_4O_6$ × × MgO = 3,5; $K_2Al_2Si_6O_{16}$ = = 57,6; C = 2,2; Al = 0,8
К-13МВТУ	–	–	8…10			20		20				$CaCO_3$ = 15; $MgCO_3$; Al = 3…5; $Na_2B_4O_7$ = 15…19
АНТ-1			–	–	–	79,5	–	–	–			$BaCl_2 \cdot 2H_2O$ = 19; NaF = 1,5
АНТ-3						85,5				–	–	То же
АН-А1			–			–		–				KCl = 40…50; NaCl = = 15…30; Na_3AlF = 30
УФОК-А1												То же
МАТИ-10												KCl = 30; $BaCl_2$ = 68; Na_3AlF = 2
ЖА-64			3									KCl = 38; NaCl = 15; Na_3AlF_6 = 44

* Флюсы иностранного производства.

1.14. Назначение флюсов для сварки различных сталей и сплавов

Материал	Марка флюса
Низкоуглеродистые стали	АН-348-А, АНК-35, ОСЦ-45, ФЦ-6, АН-60, АН-1, ТА.st.10*, FSM-37*, F-102
Низколегированные стали	ФЦ-22, ФВТ-1, АН-42, АНК-44, FB 10*, P : 1 12 UPS*
Высоколегированные стали	ФИМС-20П, АН-26С, ФЦ-19, НФ-18М, ОФ-6, ФЦК, АНК-45, F-624*
Никель и его сплавы	ОСЦ-45, АН-348-А, АН-60, Н-1, АНФ-5, ФЦК, ОФ-6
Медь и ее сплавы	ОСЦ-45, АН-348-А, АН-60, ФЦ-10, АНМ-2, ЖМ-1, К-13МВТУ
Титан и его сплавы	АНТ-1, АНТ-5, АНТ-7
Алюминий и его сплавы	АН-Al, УФОК-Al, МАТИ-10, ЖА-64

* Флюсы иностранного производства.

Окислительная способность основных флюсов ограничена высокой химической стойкостью основного оксида CaO. Основным окислителем является кислород, выделяющийся при диссоциации паров воды, входящей в состав флюса и влаги. Поэтому при сварке под основными флюсами необходимы реакции раскисления, модифицирования, легирования и рафинирования за счет ввода специальных добавок в сварочную проволоку или во флюс в виде ферросплавов FeTi, FeMo, FeSi, FeMn. Наибольшую возможность в этом плане имеют неплавленые керамические флюсы. Рафинированию способствует наличие в шлаке свободного оксида CaO, т.е. не связанного кислыми оксидами в комплексы $CaO \cdot SiO_2$ и $CaO \cdot TiO_2$. Это обеспечивает протекание реакций

$$\left.\begin{aligned} &CaO + FeS = CaS + FeO; \\ &4CaO + P_2O_5 = (CaO_4 \cdot P_2O_5). \end{aligned}\right\} \quad (1.3.24)$$

Получаемые при этом продукты реакции нерастворимы в металле и переходят в шлак.

При сварке с использованием кислых флюсов кремнемарганцового типа рафинирование по сере и фосфору осуществляют марганцем и MnO аналогично реакциям (1.3.24). Однако этот процесс менее эффективен по сравнению с рафинированием основными флюсами.

Для сварки высоколегированных сталей применяют основные флюсы (табл. 1.13), способные защитить от окисления хром, титан и другие легирующие элементы. Такие флюсы выполняют только защитные функции и относятся к пассивным. Для сварки титана и его сплавов применяют нейтральные бескислородные флюсы, на 80 % состоящие из CaF_2 (см. табл. 1.13 и 1.14).

1.3.10. ГАЗОШЛАКОВАЯ ЗАЩИТА МЕТАЛЛА ПРИ СВАРКЕ

При сварке штучными электродами с защитно-легирующим покрытием и порошковыми самозащитными проволоками осуществляется комбинированная газовая и шлаковая защита металла шва. Для ее реализации в состав покрытия входят различные газо- и шлакообразующие компоненты. Наибольшее применение получили покрытия рудно-кислого (А), рутилового (Р), основного (Б) и целлюлозного типов (Ц), а также их комбинации (АР, РБ и пр.). Составы указанных покрытий приведены в табл. 1.15. Схема процесса струйной газовой защиты представлена на рис. 1.25. Покрытие, удаленное от оси электрода и дуги, плавится так, что образует конусную втулку, направляющую струю защитного газа и препятствующую проникновению воздуха в зону формирования капель и к сварочной ванне.

Одновременное плавление электрода и покрытия приводит к образованию на каплях жидкого шлака, поступающего в сварочную ванну и защищающего металл от взаимодействия с атмосферным воздухом. Несмотря на комбинированную защиту, металл шва подвергается окислению, что связано с воздействием выделяющегося защитного газа CO_2 либо с окислением специальными добавками из покрытия, введенными для связывания водорода, который выделяется из органических газообразующих (мука, крахмал, селитра, декстрин).

1.15. Составы электродных покрытий, %

Компонент	Вид покрытия и марка электрода			
	А, МЭЗ-04	Б, УОНИ-13/55	Р, ЦМ-9	Ц, ЦЦ-1
Кварцевый песок SiO_2	15	9	–	–
Марганцовая руда MnO_2	24,5	–		
Титаномагнетитовая руда	30			
Ферромарганец FeMn	21,5	5	15	20
Крахмал	4	–	–	–
Калиевая селитра	5			
Мрамор $CaCO_3$	–	54		
Плавиковый шпат CaF_2		15		
Ферросилиций FeSi		5		
Ферротитан FeTi		12		
Рутил TiO_2		–	48	25
Магнезит $MgCO_3$			5	–
Полевой шпат ($SiO_2 + Al_2O_3$ и др.)			30	
Декстрин (газообразующий)			2	
Оксицеллюлоза			–	45
Тальк (пластификатор)				10
Связующие (жидкое стекло, т.е. силикат калия и натрия 1 : 1)	25…30			

Алгоритм процессов, проходящих при сварке электродами с покрытием, представлен в виде схемы на рис. 1.27. Так, при сварке электродами с покрытием А создается газовая защита из CO и H_2 при распаде крахмала. Кроме того, в результате распада при нагревании гематита Fe_2O_3 выделяется кислород, связывающий водород в нерастворимое соединение OH. Кислород также окисляет металл. Для его раскисления введен FeMn в количестве 25…30 %. Одновременно с раскислением идет процесс рафинирования марганцем, происходят ошлаковка продуктов раскисления и их вытеснение из шва.

При сварке электродами с покрытием Р газовая защита образуется из CO_2 при распаде магнезита, а также клея (декстрина). Окислителями выступают CO_2, рутил и полевой шпат, состоящий преимущественно из SiO_2, а раскислителем – FeSi.

Во время сварки электродами с покрытиями Ц газообразующими являются целлюлоза или мука, окислителем служит TiO_2 (TiO_2 = = TiO + O), а раскислителем – FeMn.

В ходе сварки электродами с покрытием Б газообразующим является $CaCO_3$, окислителями – CO_2 и SiO_2, раскислителями – FeTi и FeSi, а рафинирующим элементом – CaO. Одновременно CaO и SiO_2 создают шлак, связывающий продукты раскисления в шлаке.

Из сравнения количества H_2, N_2, O_2 в наплавленном металле следует (табл. 1.16), что главным критерием качества газовой защиты путем оттеснения воздуха является наличие азота в шве, содержание которого для всех электродов практически одинаково: в 5 раз больше, чем в соответствующем электродном стержне. Однако в основном покрытии из-за наличия CaF_2 и SiO_2 выделяются фтор и SiF_4, которые связывают водород в нерастворимое соединение HF. Благодаря этому химическому процессу содержание водорода в 7 – 9 раз меньше в наплавках по сравнению с другими электродами. Электроды с покрытием Б получили название «низководородистые».

Еще одно преимущество покрытия Б – малое количество окислителей, что позволяет применять его для сварки всех высоколегиро-

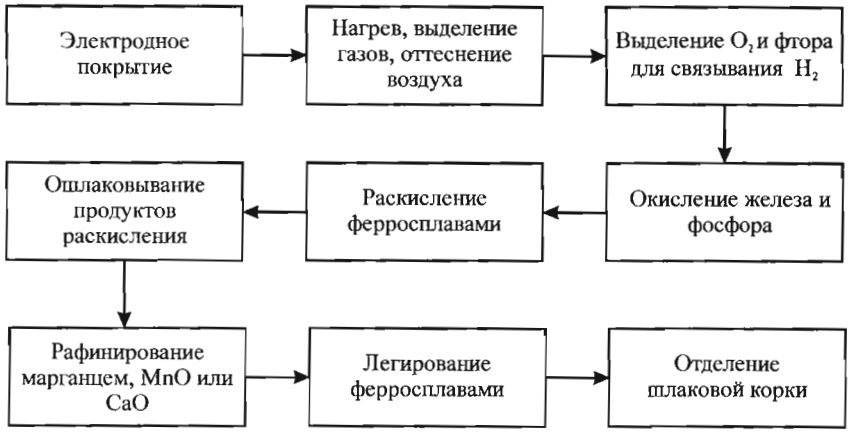


Рис. 1.27. Алгоритм процессов при сварке электродами с покрытиями

1.16. Массовые доли газов в металле, наплавленном электродами с различными покрытиями

Тип покрытия	$[O_2]$	$[N_2]$	$[H_2]\ 10^5$	Неметаллические включения
Кислые А	0,09…0,12	0,01…0,025	15…20	0,10…0,20
Основные Б	0,03…0,05	0,007…0,012	До 4	До 0,10
Рутиловые Р	0,08…0,09	0,016…0,025	До 30	0,06…0,10
Целлюлозные Ц	0,04…0,10	0,010…0,025	20…35	0,10…0,16

ванных сталей, содержащих хром, титан и другие активно окисляющиеся элементы. К недостаткам этого покрытия следует отнести возможность науглероживания шва при сварке коррозионно-стойких сталей, содержащих углерод как вредную примесь на пределе его растворимости (0,02…0,03 %). Другим недостатком покрытий Б является чувствительность к влаге, ржавчине, вызывающей поры, а также непригодность к сварке переменным током из-за деионизирующего влияния фтора.

Более технологичны электроды с рутиловым покрытием. Однако они ограничены по назначению: пригодны лишь для сварки низколегированных сталей, для которых временное высокое содержание водорода не опасно из-за отсутствия зон с закаленными структурами.

Электроды с целлюлозным покрытием также имеют в наплавленном металле высокий уровень водорода. Они предназначены для сварки в монтажных условиях неповоротных стыков труб из низкоуглеродистых и низколегированных сталей. Наплавленный металл соответствует типам Э42 и Э46.

Исходя из рис. 1.28, минимум включений достигнут при сварке электродами УОНИ-13/55, а также при сварке в CO_2, что подтверждает перспективность последнего.

1.4. СВАРОЧНЫЕ ДЕФОРМАЦИИ И НАПРЯЖЕНИЯ

1.4.1. ВИДЫ ДЕФОРМАЦИЙ И НАПРЯЖЕНИЙ

При сварке в детали возникают температурные деформации ε_α, а также деформации ε_c, вызванные силовым взаимодействием неравномерно расширяющихся частей детали. При отсутствии внешних нагрузок, приложенных к детали, деформации ε_c могут быть названы собственными, или внутренними:

$$\varepsilon_c = \varepsilon - \varepsilon_\alpha,$$

где ε – наблюдаемые деформации, характеризующие изменения размеров детали.

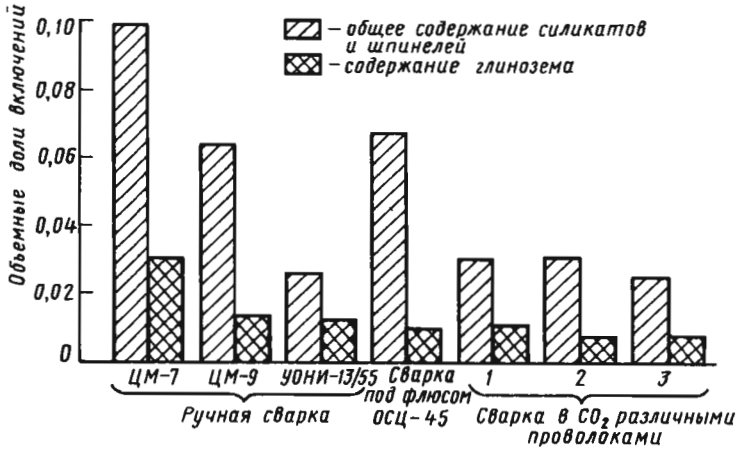


Рис. 1.28. Содержание оксидных включений в металле многослойных швов, выполненных различными способами дуговой сварки

Деформации, изменяющиеся в процессе сварки, называются временными, а остающиеся после остывания детали и устойчиво сохраняющиеся – остаточными. Последние представляют наибольший интерес, так как влияют на качество готовой конструкции. Временные деформации важны в тех случаях, когда они могут нарушить процесс сварки за счет взаимного смещения свариваемых кромок, а также вызвать дефекты в шве.

Собственные деформации состоят из упругих $\varepsilon_{упр}$, пластических $\varepsilon_{пл}$ и начальных ε_0 деформаций:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_{упр} + \varepsilon_{пл} + \varepsilon_0.$$

Начальными называются собственные деформации, имевшиеся в детали до сварки. При протекании в металле структурных и фазовых превращений вызванные ими деформации входят в ε_α.

Упругие деформации связаны с собственными напряжениями σ, которые также бывают временными и остаточными.

$$\varepsilon_{x\,упр} = (\sigma_x - \mu\sigma_y - \mu\sigma_z)/E;$$

$$\varepsilon_{y\,упр} = (\sigma_y - \mu\sigma_z - \mu\sigma_x)/E;$$

$$\varepsilon_{z\,упр} = (\sigma_z - \mu\sigma_x - \mu\sigma_y)/E;$$

$$\varepsilon_{xy\,упр} = \sigma_{xy}/2G; \quad \varepsilon_{yz\,упр} = \sigma_{yz}/2G;$$

$$\varepsilon_{zx\,упр} = \sigma_{zx}/2G; \quad G = E/(2+2\mu),$$

где E – модуль упругости; μ – коэффициент Пуассона.

По объему, в котором они уравновешены, различают собственные напряжения первого – третьего родов. Напряжения первого рода всегда уравновешены в пределах любого сечения, полностью пересекающего деталь. Напряжения второго и третьего родов уравновешены в микрообъемах (в пределах зерна и атомной решетки). Напряжения могут быть одноосными (линейными), двухосными (плоскостными) и трехосными (объемными).

В теории сварочных деформаций и напряжений принято использовать расположение осей координат, показанное на рис. 1.29, *а*. Ось OX направлена вдоль шва, ось OY – поперек шва в плоскости пластины, ось OZ – поперек шва в направлении толщины. Соответственно обозначают компоненты деформаций и напряжений. Перемещения точек свариваемых деталей по оси OX обозначают U, по оси OY – V, по оси OZ – W.

1.4.2. МЕХАНИЗМ ВОЗНИКНОВЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ, ДЕФОРМАЦИЙ И ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

В процессе сварки шов и околошовная зона разогреваются до высоких температур, что вызывает их расширение. Менее нагретые части свариваемых деталей препятствуют свободному расширению, в результате возникают временные напряжения, приводящие к упругим, а затем пластическим деформациям металла. Высокотемпературная зона составляет

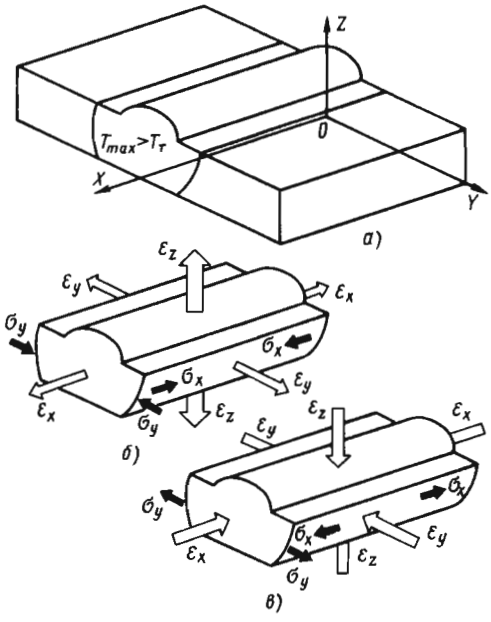


Рис. 1.29. Схема образования временных и остаточных сварочных деформаций и напряжений

небольшую часть от поперечного сечения детали, и предел текучести материала этой зоны при нагреве снижается. Поэтому пластические деформации возникают главным образом в пределах этой зоны. Обычно она включает в себя кроме шва окружающий металл, температура нагрева которого превысила некоторый уровень $T_т$, зависящий от свойств металла ($T_т$ повышается с ростом предела текучести) и от жесткости свариваемых деталей ($T_т$ снижается с ростом жесткости). При сварке пластин из малоуглеродистой стали $T_т = 200...250$ °С.

В процессе остывания часть возникших при нагреве пластических деформаций сохраняется, что приводит к искажению формы и размеров сварного соединения и к остаточным напряжениям в сваренных деталях.

Для объяснения механизма образования основных видов сварочных деформаций и напряжений представим схематично сварное соединение состоящим из двух зон: активной («сварочного слитка», включающего в себя весь металл, нагревшийся при сварке до температуры выше $T_т$) и пассивной, препятствующей сначала расширению, а потом сокращению активной части (см. рис. 1.29, *а*). Рассмотрим случай сварки двух одинаковых по толщине и ширине пластин.

При нагреве металл слитка расширяется (см. рис. 1.29, *б*), одновременно размягчаясь от нагрева. Расширение происходит в трех направлениях: вдоль осей *OX*, *OY* и *OZ* (светлые стрелки на рис. 1.29, *б*). Степень расширения по трем осям неодинакова.

Расширению вдоль оси шва *OX* препятствуют скрепленные со слитком более холодные пассивные части. Расширению в поперечном направлении *OY* мешают закрепление свариваемых деталей в сварочных приспособлениях, прихватки, ранее наложенные швы и остывающий, уже заваренный участок данного шва. Возникающие при этом продольные и поперечные силы, действующие на активную часть со стороны пассивной, показаны темными стрелками на рис. 1.29, *б*. Под действием этих сил в металле слитка возникают временные напряжения сжатия по этим двум осям. В пассивной части детали при этом наблюдаются временные напряжения растяжения в продольном направлении *OX* и сжатия в поперечном *OY*.

Наиболее свободно слиток расширяется в направлении толщины деталей *OZ*. В результате даже при сварке без присадки образуется характерная выпуклость сварного шва.

Значительные пластические деформации, сопровождающие такое неравноосное расширение, возможны потому, что в нагретом металле слитка понижен предел текучести.

При остывании слиток возвращается к своему первоначальному объему, одновременно восстанавливается исходный уровень предела текучести материала слитка. Поэтому, несмотря на сопротивление пассивных частей сварного соединения, сокращение слитка идет более равномерно по всем трем направлениям (рис. 1.29, *в*).

В результате после сварки слиток, а вместе с ним и пассивные части сварного соединения становятся короче в направлении вдоль оси шва. Это явление называется продольной усадкой. В продольном направлении действуют остаточные сварочные напряжения: растягивающие в слитке и сжимающие в пассивной зоне.

Слиток и сварное соединение в целом испытывают в результате сварки также сокращение в поперечном направлении (поперечную усадку).

Продольная и поперечная усадки сопровождаются увеличением толщины слитка (образованием выпуклости шва). Поскольку рас-

ширение и сокращение металла в толщину происходят достаточно свободно, значительные напряжения σ_z возникают только при большой толщине свариваемых деталей и слабо влияют на искажения формы и размеров сварных конструкций. Все искажения связаны главным образом с продольной и поперечной усадками шва и ОШЗ.

1.4.3. ВИДЫ ИСКАЖЕНИЙ ФОРМЫ И РАЗМЕРОВ ПРИ СВАРКЕ, ИХ ВЛИЯНИЕ НА КАЧЕСТВО СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

При сварке в зоне сварного шва возникают два основных вида локальных перемещений:

А – продольная усадка $\Delta_{пр}$;

Б – поперечная усадка $\Delta_{поп}$.

Следствием этих двух основных перемещений являются еще два вида локальных перемещений:

В – перемещения из плоскости свариваемой детали W;

Г – накопление в процессе сварки продольного Δ_x и поперечного Δ_y взаимных смещений кромок шва.

Механизм образования и методы расчетной оценки локальных перемещений рассмотрены в разд. 1.4.2 и 1.4.4.

Локальные перемещения и деформации в зоне сварных соединений являются причиной общих перемещений элементов конструкций. Наиболее существенны в практическом отношении следующие виды перемещений:

Д – изгиб и укорочение балок от продольных и поперечных швов;

Е – скручивание балок относительно продольной оси;

Ж – искривление поверхностей, образованных листовыми элементами, вследствие угловых перемещений β;

З – потеря устойчивости листовых элементов в результате действия сжимающих остаточных напряжений;

И – перемещения в оболочках.

Примеры различных перемещений сварных конструкций показаны на рис. 1.30. Существуют также многочисленные другие виды искажений формы и размеров сварных конструкций. Влияние сварочных деформаций на качество конструкций, как правило, негативное и связано с тремя основными факторами, рассматриваемыми далее.

1. **Изменение размеров разделки кромок при сварке.** Перемещения кромок свариваемых деталей в направлении поперек шва происходят за счет местного расширения металла вблизи сварочного источника и поперечной усадки уже заваренного и остывающего участка шва. При сварке длинных швов перемещения кромок могут привести к прекращению процесса сварки либо вследствие увеличения зазора и вытекания сварочной ванны, либо из-за полного закрывания зазора и невозможности подачи присадочной проволоки. В тех случаях, когда не происходит полной остановки сварочного процесса, возможно существенное изменение качества сварки, так как при изменении сварочного зазора изменяются состав и свойства шва за счет изменения долей основного и присадочного металла в сварочной ванне.

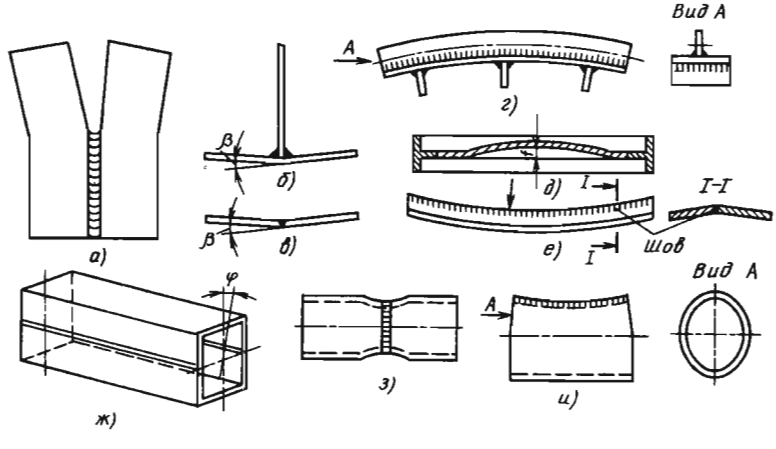


Рис. 1.30. Виды сварочных деформаций и перемещений

При дуговой сварке могут появиться также непровары и натеки металла в корне шва. Продольная усадка часто вызывает искривление свариваемых пластин в плоскости (серповидность) и потерю устойчивости. При этом взаимные перемещения кромок в плоскости свариваемых пластин и в направлении толщины суммируются с погрешностями формы свариваемых кромок и погрешностями при сборке и могут приводить к невозможности сварки и снижению качества сварного шва. Значительные перемещения кромок в направлении толщины пластин наблюдаются при сварке тонколистовых конструкций малой жесткости.

2. **Изменение формы и размеров конструкции.** Искажения, вызванные наложением сварных швов, ухудшают внешний вид, а иногда снижают работоспособность конструкции.

3. **Временные и остаточные напряжения.** Временные напряжения могут вызвать разрушение сварного соединения в процессе сварки или образование в нем технологических дефектов (см. в разд. 1.5). Остаточные растягивающие напряжения создают в металле запас энергии, который может способствовать разрушению металла. Они также вызывают ускорение коррозионных процессов. Связанные с ними пластические деформации приводят к уменьшению пластичности соединения. Суммируясь с рабочими напряжениями, остаточные напряжения ухудшают работоспособность конструкции: сжатые элементы могут потерять устойчивость; в элементах, функционирующих при переменных нагрузках, снижается предел выносливости; в элементах, работающих на изгиб, уменьшается жесткость сечения за счет перехода его части в пластическое состояние.

Остаточные напряжения существенно влияют на точность и стабильность размеров сварных деталей. При механической обработке за счет перераспределения остаточных напряжений изменяются форма и размеры детали. Под действием остаточных напряжений возникают деформации ползучести, особенно при повышенных температурах. При первом приложении рабочей нагрузки рабочие напряжения, суммируясь с остаточными, могут в отдельных местах превысить предел текучести и вызвать пластические деформации.

1.4.4. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ, ДЕФОРМАЦИЙ И ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

Экспериментальные методы. Существует много экспериментальных методов определения сварочных напряжений, деформаций и перемещений. Проще всего измерить перемещения на внешних поверхностях конструкций. Существуют также датчики для измерения деформаций (наиболее распространены тензодатчики, наклеиваемые на поверхность детали). Напряжения, как правило, рассчитывают на основе измерений перемещений, деформаций или других физических параметров, изменяющихся при появлении в металле напряжений (рентгеновские, магнитные и ультразвуковые методы).

Для определения остаточных напряжений наиболее применим механический метод, заключающийся в измерении перемещений и деформаций, возникающих при устранении остаточных напряжений. Напряжения устраняют в пластинах путем их разрезки на узкие полосы или клетки, в круглых телах снятием слоев поверхности на токарном станке, а в массивных фрезерованием, сверлением или протачиванием канавок. Процедура включает в себя начальное измерение, устранение напряжений и повторное измерение перемещений или деформаций в тех же точках. Напряжения рассчитывают по разности результатов измерений. Чем сложнее напряженное состояние, тем больше должно быть точек измерения. Метод обеспечивает расчет одно- и двухосных напряжений на поверхности конструкции.

Расчетные методы. Наиболее современным и точным способом определения напряженно-деформированного состояния как на поверхности, так и в глубине деталей является моделирование сварочных процессов на компьютере методом конечных элементов. Существует множество авторских и профессиональных программных комплексов для больших и персональных компьютеров, различающихся по сложности конструкций, доступных для моделирования, и по полноте охвата процессов, протекающих при различных способах сварки.

Расчет сварочных деформаций и напряжений состоит в определении:

– температурных полей при сварке;

– температурных деформаций, деформаций от структурных превращений и механических свойств материала, зависящих от температуры;

– собственных деформаций, напряжений и перемещений.

В результате моделирования определяют вначале временные, а затем остаточные напряжения, деформации и перемещения. Процесс

моделирования может быть распространен на стадию эксплуатации сварной конструкции, что позволяет выявить характер взаимодействия остаточных напряжений с рабочими напряжениями от эксплуатационных нагрузок. Для расчета кроме информации о форме и размерах конструкции необходимы следующие исходные данные.

1. Характеристики сварочного источника нагрева (мощность и ее распределение по пятну нагрева, скорость сварки, порядок наложения швов), условия теплоотвода и теплофизические свойства материалов (коэффициенты теплоемкости $c\rho$, теплопроводности λ, теплоотдачи с поверхности $\alpha_т$). Справочные данные и методы расчета температурных полей приведены в разд. 1.2.

2. Характеристики температурного расширения (дилатограммы) материалов, образующих сварное соединение. В случае сварки разнородных материалов или применения присадочного материала, отличающегося от основного, эти характеристики для разных зон соединения могут не совпадать. Для приближенных расчетов может быть использована усредненная дилатограмма, соответствующая уравнению прямой: $\Delta\varepsilon_\alpha = \alpha\Delta T$. Точное определение дилатограммы требует проведения испытаний в условиях, близких к реальному сварочному циклу.

3. Для расчета деформаций и напряжений в низкотемпературной зоне, где не возникает пластическая деформация, механические свойства материала могут быть представлены модулем упругости E и коэффициентом Пуассона μ. Более точные методы, учитывающие пластические деформации, упрочнение и ползучесть, требуют для каждого материала проведения испытаний при различных напряжениях, температурах и скоростях деформации. Получаемые из серии таких испытаний характеристики можно использовать при расчете сварочных деформаций и напряжений. Существует также метод пластических приближений. На основе приближенного расчета сварочных деформаций по упрощенной модели поведения материала проводят испытания, имитирующие условия в различных точках свариваемой детали по температуре и деформации (термодеформационный цикл). Полученные из этих испытаний напряжения используют в расчете как характеристику материала, отражающую его реальное поведение с учетом релаксации и упрочнения.

Инженерные методы расчета. Приводимые ниже методы и расчетные формулы не обладают высокой точностью, но позволяют оценить ожидаемые искажения формы и размеров сварного соединения и несложной сварной конструкции. Они основаны на выражении результата наложения каждого шва в виде сил и перемещений, которые затем можно использовать для расчета формы и размеров конструкции методами сопротивления материалов. В период, предшествовавший распространению компьютеров, были разработаны методики инженерного расчета и для весьма сложных конструкций, однако они не могут быть рекомендованы для широкого применения, так как требуют весьма высокой квалификации расчетчика. Наиболее универсальными и достоверными в настоящее время следует признать экспериментальные методы и численное моделирование процессов, описанные выше. Далее будут приведены формулы расчета сварочных деформаций и напряжений (см. разд. 1.4.3), рекомендуемые для применения в инженерной практике.

А. Продольные деформации и перемещения (продольная усадка). В поперечном сечении сварного шва после сварки образуется распределение продольных напряжений, схематично представленное на рис. 1.31. Механизм их образования описан в разд. 1.4.2. Из рис. 1.31 видно, что распределение напряжений связано с распределением температур при прохождении сварочного источника. Часть сечения шириной $2b_{пл}$, нагревшаяся выше некоторой температуры $T_т$ и испытавшая при нагреве пластические деформации укорочения, растянута до напряжения, близкого к пределу текучести материала $\sigma_т$. Остальная часть сечения сжата. Эпюра напряжений $\sigma_{ост}$ уравновешена по сечению.

На рис. 1.32 даны примеры экспериментально полученных эпюр продольных остаточных напряжений в однородных сварных соединениях из металлов, не испытывающих влияния структурных превращений. Структурные превращения, сопровождающиеся изменением объема, а также сварка присадочным металлом, отличающимся от основного, приводит к более сложной картине с чередованием ряда растянутых и сжатых зон (рис. 1.33).

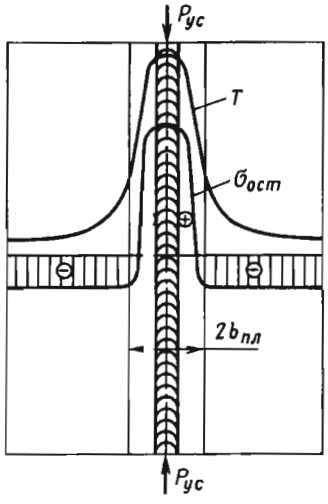


Рис. 1.31. Схема действия усадочной силы $P_{ус}$

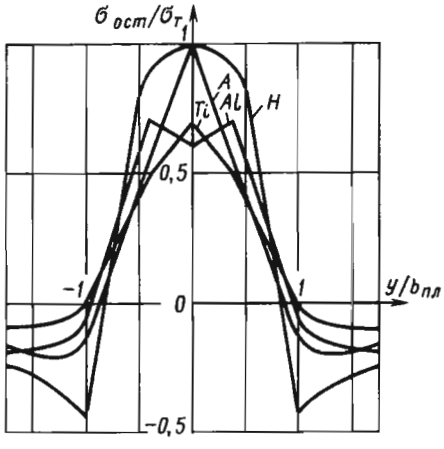


Рис. 1.32. Распределение по ширине пластины продольных остаточных напряжений в сварных соединениях из различных сплавов:
H, A – низкоуглеродистые и аустенитные стали;
Al, Ti – алюминиевые и титановые сплавы

Перемещения, возникающие в сварной конструкции в результате сварки, такие же, как при приложении по концам шва двух сжимающих сил (см. рис. 1.31). Приложение этих фиктивных сил, называемых усадочными, является наиболее простым инженерным методом расчета перемещений конструкции под действием продольной усадки швов. Значение усадочной силы $P_{ус}$ (в ньютонах) зависит от уровня растягивающих напряжений (от предела текучести материала) и от площади части

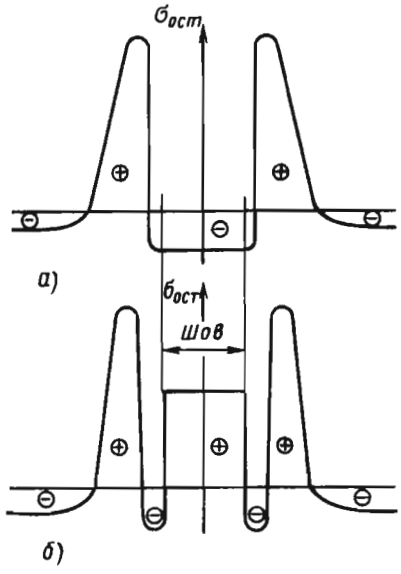


Рис. 1.33. Распределение продольных остаточных напряжений в пластинах из мартенситной стали:
а – присадочный металл – мартенситная сталь;
б – присадочный металл – аустенитная сталь

сечения с растягивающими напряжениями (от количества теплоты, введенной на единицу длины шва, т.е. от погонной энергии сварки). При сварке напроход весьма жесткой сварной конструкции

$$P_{ус.ж} = B\frac{q}{v_{св}}, \qquad (1.4.1)$$

где q – часть мощности (в ваттах) сварочного источника, попадающая в элемент конструкции, для которого рассчитывается усадка (см. разд. 1.2); $v_{св}$ – скорость сварки, мм/с.

В случае ограниченной жесткости вносится поправка, увеличивающая значение $P_{ус}$ по сравнению с $P_{ус.ж}$ (см. разд. 1.4.4, п. В). Формула (1.4.1) пригодна также для определения $P_{ус}$ от газовой резки. Коэффициент B определяют экспериментально путем сварки и обмера образцов. При сварке алюминиевых сплавов B = 140...150 для стыковых швов и 160...170 для тавровых с одним угловым швом. Для конструкционных сталей установлена зависимость B от погонной энергии:

$$B = 36\left(\frac{q_0 + q_1}{q_0 + q_2}\right),$$

где $q_0 = \frac{q}{v_{св} s}$; $q_1 = 768 \frac{Дж}{мм^2}$; $q_2 = 126 \frac{Дж}{мм^2}$;

здесь s – толщина свариваемых пластин (средняя толщина при сварке пластин разной толщины).

При многопроходной сварке зоны пластических деформаций от следующих проходов частично перекрывают предыдущие, поэтому каждый проход дает дополнительную силу $P_{ус}$ порядка 15 % от возникающей после первого прохода. Для прерывистого шва $P_{ус}$ пропорциональна отношению длины участка шва к шагу прерывистого шва. При сварке «от середины» $P_{ус}$ на 15…20 % меньше, чем при сварке напроход. Усадочная сила от однорядного точечного соединения $P_{ус} = 75{,}2 \frac{s}{t} r_{150}^2$,

где s – суммарная толщина свариваемых пластин; t – шаг точек; r_{150} – радиус зоны, прогретой при сварке до 150 °С, найденный экспериментально или из тепловых расчетов (размеры в миллиметрах, сила в ньютонах).

Б. Поперечные деформации и перемещения (поперечная усадка). При однопроходной сварке пластин происходит их взаимное перемещение навстречу друг другу на величину поперечной усадки:

$$\Delta_{поп} = A \frac{\alpha}{c\rho} q_0, \qquad (1.4.2)$$

где A – безразмерный коэффициент, учитывающий влияние глубины проплавления на $\Delta_{поп}$ (при дуговой стыковой сварке с полным проплавлением A = 1...1,2, при неполном проплавлении A < 1); α – коэффициент температурного расширения; $c\rho$ – объемная теплоемкость.

При расчете поперечной усадки от таврового или нахлесточного сварного соединения необходимо учитывать только ту часть мощности q, которая попадает в рассчитываемый элемент (см. разд. 1.2).

Поперечные остаточные напряжения зависят от жесткости закрепления свариваемых деталей. При сварке свободных от закрепления деталей они невелики, при заварке последнего шва в жестком контуре могут достигать предела текучести металла. При сварке больших толщин и заварке дефектов возникают трехосные растягивающие напряжения и их компоненты могут существенно превосходить предел текучести. При многопроходной сварке, если происходит взаимный поворот свариваемых деталей, имеют место растягивающие напряжения в корне шва (эпюра С на рис. 1.34). В случае предотвращения углового перемещения в корне шва появляются напряжения сжатия (эпюра З).

В. Перемещения из плоскости детали W. Угловые перемещения β. Смещения кромок Δ_z. Главной причиной этих видов деформации являются продольная и поперечная усадки.

Угловое перемещение чаще всего вызвано неравномерностью поперечной усадки по толщине пластины. Если пластина прогрета при сварке с лицевой стороны сильнее, чем с обратной, то и усадка на лицевой стороне больше. В результате возникают взаимный поворот свариваемых пластин вокруг оси шва на угол β (см. рис. 1.30, *в*) и перемещение из плоскости свариваемой детали W. Угол β тем больше, чем сильнее асимметрия сечения шва относительно середины толщины пластины. Наибольшие угловые перемещения наблюдаются при наплавке и при сварке угловыми швами (см. рис. 1.30, *б*). Для приближенных расчетов рекомендуется формула

$$\beta = 3 \left(\frac{К}{s} - 0{,}1 \right)^{\circ},$$

где К – катет шва; s – толщина пластины.

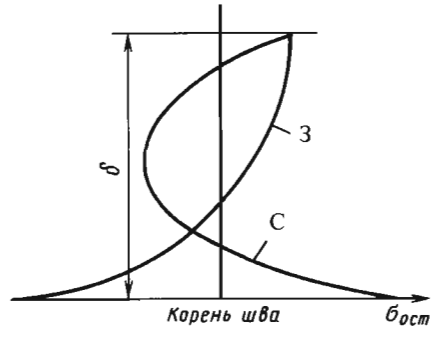


Рис. 1.34. Распределение по толщине пластины δ поперечных остаточных напряжений в многослойном шве:
С – при сварке свободных (незакрепленных) пластин;
З – при сварке с закреплением от угловых перемещений

Перемещения W в виде волнистости пластин возникают в результате потери устойчивости под действием сжимающих продольных или поперечных остаточных напряжений (см. рис. 1.30, *д*, *е*). Условием потери устойчивости является превышение критического уровня сжимающих напряжений в пластине. Критическое напряжение пропорционально квадрату отношения толщины пластины к меньшему из двух остальных размеров и зависит от условий закрепления ее контура. Расчетные формулы для различных плоских и прямоугольных пластин можно найти в справочниках по расчету пластин и оболочек. Расчет перемещений в конструкции после потери устойчивости – весьма сложная задача, которую рекомендуется решать с помощью компьютерных программ.

При сварке встык тонких листов возможна потеря устойчивости от поперечных сжимающих напряжений на стадии нагрева. В результате сварка фиксирует взаимный поворот соединяемых деталей или поперечное смещение кромок. Можно рассчитать максимальное расстояние между прижимными планками, при котором сжимающее напряжение еще не превысит критического значения.

Перемещение в направлении толщины детали W возникает при продольной и поперечной усадках, если пластины неплоские (при сварке цилиндрических, сферических и других оболочек). Это связано с тем, что при изменении длины кольцевого шва (при продольной усадке) меняется и радиус кольца (радиус оболочки в месте наложения швов) (см. рис. 1.30, *з*).

В справочниках по теории упругости оболочек имеются формулы для расчета радиального перемещения стенки цилиндрической оболочки под действием кольцевой распределенной нагрузки Q. Эти формулы аналогичны уравнениям изогнутой оси упругой балки. Продольная усадочная сила в кольцевом шве радиуса r приводится к эквивалентной кольцевой нагрузке по формуле $Q = \dfrac{P_{\text{ус}}}{r}$.

При неодинаковом продольном расширении кромок свариваемых цилиндрических деталей возникающее перемещение W может быть причиной углового или поперечного взаимного смещения кромок кольцевого шва. Эти смещения могут нарушить процесс сварки, а также фиксируются сваркой в виде искажений формы и размеров сварного соединения.

Г. Накопление в процессе сварки взаимного продольного Δ_x и поперечного Δ_y смещений кромок шва. При сварке идет расширение, а затем сокращение металла шва и прилежащих частей свариваемых деталей. При этом происходит взаимное смещение свариваемых кромок. Соединение смещенных кромок сваркой приводит к накоплению этих смещений, которое может оказаться значительным при большой длине шва (см. рис. 1.30, *а*).

Смещение кромок в поперечном направлении возникает от двух основных причин:

– взаимного поворота свариваемых деталей в плоскости XOY, вызванного поперечным расширением и сокращением металла в зоне шва;

– изгиба длинных и узких свариваемых пластин, вызванного их неравномерным продольным расширением вблизи сварочного источника.

В результате кромки могут разойтись или сойтись настолько, что продолжать сварку становится невозможно. От расхождения кромок могут также появиться продольные трещины в остывающем шве.

Смещение деталей вдоль оси шва Δ_x связано с их неодинаковым удлинением при нагреве. Например, при сварке тавровых соединений, даже при одинаковой толщине свариваемых пластин, удлинение стенки в ~1,5 раза больше, так как полоса нагрева в полке расположена в середине пластины, а в стенке – на краю. Это смещение обычно не препятствует сварке, но сказывается на остаточных перемещениях элементов конструкции, например может вызвать закручивание балок коробчатого сечения (см. разд. 1.4.5).

Определение величины смещений Δ_x и Δ_y является весьма сложной задачей, которую рекомендуется решать экспериментально или с помощью компьютерных программ.

Д. Изгиб и укорочение балок от усадки продольных и поперечных швов (см. рис. 1.30, *г*). Продольный шов (рис. 1.35) создает усадочную силу $P_{\text{ус}}$, которая вызывает изгиб и укорочение балки. Максимальный прогиб $f = \dfrac{P_{\text{ус}} e l^2}{8EI}$, угловой поворот концов $\Theta = \dfrac{P_{\text{ус}} e l}{8EI}$, продольное укорочение $\Delta_{\text{пр}} = \dfrac{P_{\text{ус}} l}{ES}$, где l – длина балки; S – площадь ее поперечного сечения; I – момент инерции сечения относительно центральной оси.

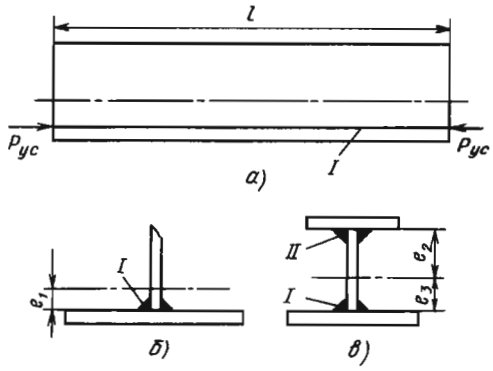


Рис. 1.35. Сварная балка таврового профиля под действием усадочной силы, вызывающей ее изгиб и укорочение

От этой же оси отсчитывают эксцентриситет e силы $P_{ус}$. Для учета ограниченной жесткости балки вносят поправку

$$P_{ус} = \frac{P_{ус.ж}}{1 - \frac{P_{ус.ж}}{\sigma_т}\left(\frac{1}{S} + \frac{e_x^2}{I_x} + \frac{e_y^2}{I_y}\right)}$$

в значение $P_{ус.ж}$, найденное по формуле (1.4.1) (I_x, I_y – моменты инерции сечения относительно двух главных центральных осей; e_x, e_y – эксцентриситеты приложения усадочной силы относительно тех же осей; S – площадь сечения; $\sigma_т$ – предел текучести материала). Если знаменатель дроби в формуле < 0,5, то он принимается равным 0,5. Формула справедлива, когда площадь зоны пластических деформаций, равная ~ $P_{ус.ж}$ / $\sigma_т$, не превышает 25...30 % от всей площади поперечного сечения F.

При укладке следующих продольных швов, например для присоединения еще одной полки к тавру с целью образования двутавра *II* (см. рис. 1.35, *в*), прогибы и укорочения от каждого шва определяют отдельно, находя новые эксцентриситеты e, моменты инерции сечения I и площадь поперечного сечения балки S, с учетом изменения сечения по мере приварки новых деталей. Затем прогибы суммируют, принимая во внимание их знак. Если балка вначале собрана на прихватках, а затем сваривается швами, то при вычислении прогибов и укорочений предполагают, что прихватки обеспечивают достаточно жесткую связь между элементами, и в расчет вводят моменты инерции и площадь всего окончательного поперечного сечения, а также эксцентриситеты относительно центральных осей этого сечения.

Формулы пригодны также для расчета укорочения и изгиба длинных труб и обечаек при сварке продольных швов. При сварке коротких обечаек происходит изгиб не всей обечайки, а только образующих вблизи шва (см. рис. 1.30, *е*). Существуют формулы для определения той части сечения, которая работает на изгиб под действием усадочной силы (в зависимости от соотношения длины и диаметра обечайки).

Поперечные швы, расположенные перпендикулярно к продольной оси балки и присоединяющие к ней различные элементы, вызывают ее укорочение, а если они смещены относительно центра поперечного сечения балки, то и ее изгиб. Для определения перемещений балки вначале необходимо определить усадку $\Delta_{поп}$ в зоне уложенного шва по формуле (1.4.2) с учетом доли теплоты, внесенной в балку. На рис. 1.36, *а* показан простейший пример приварки полосы угловыми швами *1* и *2*. От шва *1* усадку в направлении $x - x$ испытывает верхний пояс, имеющий поперечное сечение площадью $S_п$. Продольное укорочение балки от одного шва пропорционально доле площади пояса в площади сечения балки:

$$\Delta_{пр} = \Delta_{поп}\frac{S_п}{S}.$$

Продольные укорочения балки от отдельных швов суммируются.

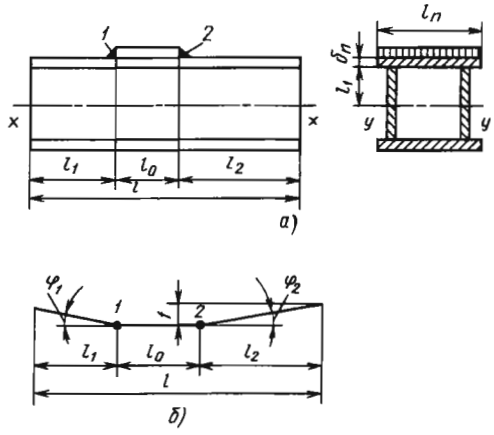


Рис. 1.36. Схема изгиба сварной балки вследствие усадки поперечных швов

Для определения прогиба балки от поперечных швов необходимо найти угол поворота двух частей балки относительно друг друга от каждого шва в отдельности (рис. 1.36, *б*) по формуле

$$\varphi = \Delta_{\text{поп}} \frac{S_{\text{п}} e}{I},$$

где φ – угол поворота, рад; e – эксцентриситет центра сечения полки относительно центра всего сечения балки; I – центральный момент инерции всего сечения балки.

На рис. 1.36, *в* показаны угол φ_1 от шва *1* и угол φ_2 от шва *2*. Зная углы и расстояния между швами, можно вычислить прогиб f.

Е. Скручивание балок. При сварке балок с тонкостенными открытыми профилями, таких как двутавровые, скручивание возникает вследствие неодновременной поперечной усадки углового шва по его длине (см. рис. 1.37, *а*). Например, шов *1* на рис. 1.37, *а* по мере его заварки и усадки закручивает верхний пояс, а шов *2* – нижний. Швы *3* и *4* не могут компенсировать перемещений ввиду жесткости швов *1* и *2*. Сборка на прихватках или в кондукторах позволяет избежать закручивания данного вида. Возможна крутильная форма потери устойчивости. Например, крестообразная балка на рис. 1.37, *б* вследствие действия усадочной силы и появления сжатия в листовых элементах закручивается в результате потери устойчивости.

Балки коробчатого профиля, собранные на прихватках (см. рис. 1.30, *ж*, *и*; 1.37, *в*), закручиваются после сварки за счет продольного смещения Δ_x при выполнении замыкающего продольного шва. Угол закручивания балки

$$\varphi = \frac{\Delta_x l}{S_{\text{к}}},$$

где $S_{\text{к}}$ – площадь сечения внутренней полости замкнутого профиля балки.

Ж – И. Другие деформации сварных конструкций. Расчет более сложных видов перемещений, перечисленных в разд. 1.4.3, является весьма сложной задачей, которую рекомендуется решать с помощью компьютерных программ.

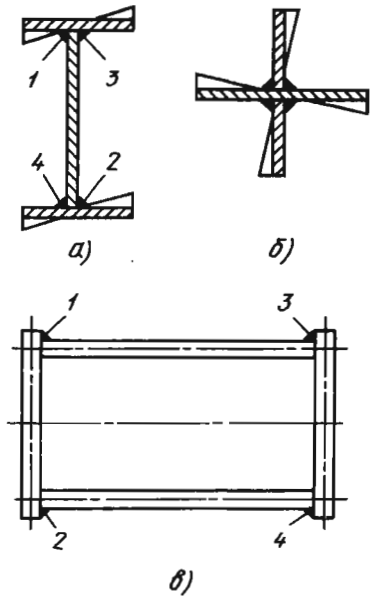


Рис. 1.37. Закручивание сварных балок

1.4.5. УМЕНЬШЕНИЕ СВАРОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ, НАПРЯЖЕНИЙ И ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

1. **Рациональные конструирование.** За счет выбора размеров и расположения сварных швов можно добиться существенного уменьшения коробления конструкции. Для этого следует назначать минимальные, найденные из расчета на прочность катеты угловых швов; обеспечивать максимальную жесткость конструкции к моменту сварки швов; располагать швы симметрично для взаимной компенсации перемещений от отдельных швов.

Некоторые из перечисленных приемов могут приводить к росту напряжений (сварка в жестком контуре) или снижать качество металла шва (сварка с минимальным катетом шва).

В ряде случаев можно компенсировать перемещения при сварке путем корректировки размеров заготовок с учетом последующей усадки или создания предварительных искажений формы деталей противоположного знака. В случае неизбежности перемещений при сварке в конструкции должен быть обеспечен доступ для последующей правки (см. разд. 1.4.5, п. 3, 4).

2. **Рациональная технология сборки и сварки.** Существенное уменьшение остаточных перемещений может быть достигнуто за счет: сборки в жестком приспособлении или на

прихватках перед началом сварки; рациональной последовательности наложения швов, а также выбора способа и режима сварки с минимальной погонной энергией. При многопроходной сварке погонная энергия существенно ниже, чем при однопроходной сварке такого же шва, а при контактной, лазерной и электронно-лучевой – ниже, чем при дуговой.

Предварительный и сопутствующий подогревы при сварке позволяют уменьшить пластические деформации и напряжения вследствие:

– уменьшения разности температур между отдельными точками тела;

– меньшего вложения теплоты при сварке;

– снижения предела текучести металла;

– изменения скорости охлаждения и характера структурных превращений.

3. **Пластическое деформирование после сварки.** Этот прием применяется в основном для правки конструкции. Чаще всего деформация осуществляется за счет сжатия шва и околошовной зоны в направлении толщины сваренных пластин. При этом уменьшается усадка шва, образовавшаяся после сварки. Одновременно снижаются продольные остаточные напряжения в шве. Применяются различные способы деформирования: прокатка роликами, проковка, обработка взрывом. Обработка может быть осуществлена как после полного остывания, так и сразу после сварки (например, роликом, движущимся вслед за дугой, или сварочным электродом при точечной контактной сварке).

Недостатком всех указанных методов является снижение пластичности деформируемой зоны.

Сила, которую необходимо приложить к роликам для снижения до нуля остаточных растягивающих напряжений, близких к пределу текучести, определяется по формуле

$$P = b\sqrt{\frac{10{,}1ds\sigma_т^3}{E}},$$

где b, d – ширина и диаметр рабочей поверхности ролика; $\sigma_т$, E, s – предел текучести, модуль упругости и толщина прокатываемого материала.

В случае невозможности прокатать шов и околошовную зону за один проход ролика, прокатку осуществляют более узким роликом, начиная со шва, с переходом на околошовную зону (рис. 1.38). Если шов или часть околошовной зоны недоступны для прокатки, то можно добиться устранения усадки шва за счет увеличения силы прокатки доступной части. При этом в прокатанной части создаются напряжения сжатия, а в непрокатанной сохраняются растягивающие напряжения.

Применяются также растяжение вдоль оси шва, изгиб (для балок) и другие схемы деформирования. Уменьшить напряжения можно вибрационной обработкой сварного изделия.

4. **Создание неравномерных нагревов или охлаждений.** Этот метод широко используют для перераспределения остаточных напряжений. Для уменьшения напряжений растяжения необходимо создавать нагрев вблизи зоны с напряжениями растяжения (рис. 1.39, *а*) или охлаждение в самой этой зоне (рис. 1.39, *б*). В любом случае в зоне с напряжениями растяжения возникают дополнительные напряжения

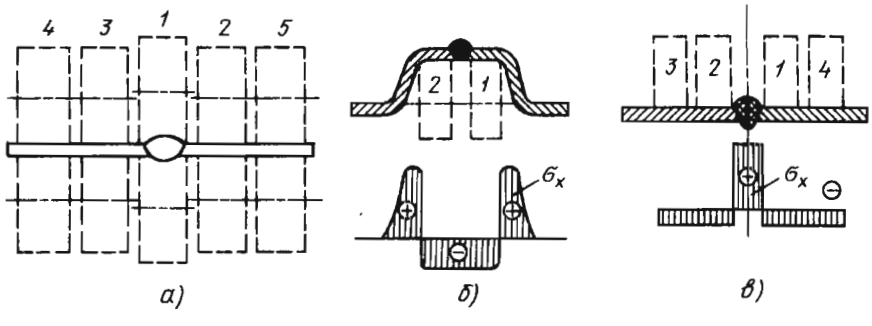


Рис. 1.38. Схема прокатки роликами:
а – прокатка всей зоны пластических деформаций поочередно;
б – перекат средней части зоны пластических деформаций; *в* – шов не прокатан;
1 – 5 – последовательные операции прокатки роликами

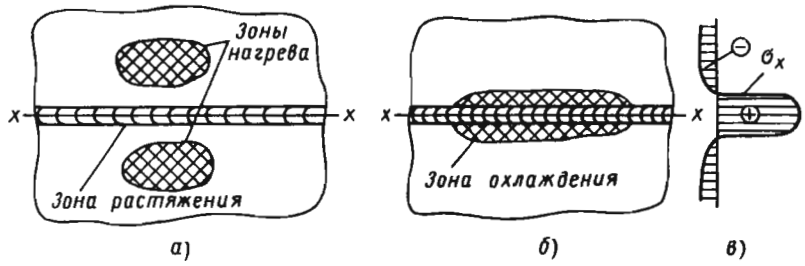


Рис. 1.39. Схема расположения зон нагрева (*а*) и охлаждения (*б*) для уменьшения растягивающих напряжений (*в*)

растяжения, которые, суммируясь с остаточными напряжениями растяжения, вызывают пластические деформации металла и после выравнивания температур напряжения снижаются. Для уменьшения напряжений сжатия необходимо греть зоны с такими напряжениями или охлаждать окружающие зоны. Эффект от местного нагрева определяется его концентрацией и перепадом температур, поэтому следует создавать небольшие пятна нагрева и охлаждения. При потере устойчивости листовых элементов местный нагрев сжатых участков позволяет вызвать их пластическое укорочение после остывания и исправление деформаций.

5. **Термическая обработка (отпуск или отжиг).** Достоинством отпуска является снижение напряжений во всех точках тела, независимо от сложности его формы, без снижения пластичности металла.

Термический цикл отпуска состоит из нагрева, выравнивания температур, выдержки при заданной температуре и охлаждения. Большая часть снижения напряжений происходит уже на стадии нагрева (рис. 1.40) и определяется температурой отпуска. Чем выше температура отпуска, тем полнее устраняются напряжения, однако при этом снижается прочность металла.

Температуры отпуска (в градусах Цельсия), обеспечивающие существенное снижение остаточных напряжений, для углеродистых сталей 580...680, для аустенитных сталей 850...1050, для сплавов магния и алюминия 250...300, для титановых сплавов 1100...1200. Если отпуск или отжиг детали осуществляется в зажимном приспособлении, то одновременно со снятием напряжений выполняется правка.

Важно ограничить скорость охлаждения после отпуска (остывание в печи), так как при быстром охлаждении возможно возникновение новых остаточных напряжений.

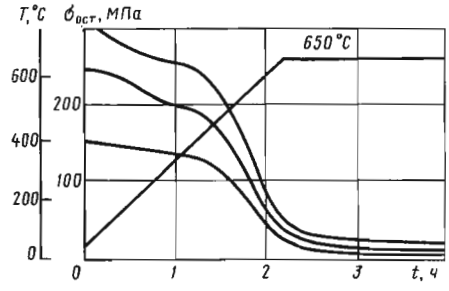


Рис. 1.40. Снижение напряжений от различного начального уровня в процессе отпуска

1.5. СВАРИВАЕМОСТЬ МАТЕРИАЛОВ

1.5.1. ПОНЯТИЕ «СВАРИВАЕМОСТЬ»

В сварочной практике понятие «свариваемость» имеет несколько аспектов. Первоначально использовали понятия «физическая и технологическая свариваемость». Первое характеризовало принципиальную возможность получения монолитных сварных соединений и главным образом относилось к разнородным материалам. Второе рассматривалось как свойство материалов, характеризующее их реакцию на сварочный термодеформационный цикл. Степень этой реакции оценивалась по отношению отдельных механических свойств металла сварных соединений к одноименным свойствам основного металла (например, твердости, ударной вязкости и др.). По этому признаку традиционно принято различать качественную степень свариваемости. Их несколько: хорошая, удовлетворительная, ограниченная и плохая.

Такая оценка свариваемости часто используется в лабораторной практике при сравнительной оценке существующих и разработке новых материалов без их прямой привязки к конкретному виду сварных изделий.

В настоящее время получил широкое применение прикладной аспект понятия «свариваемость материалов», учитывающий назначение изготовленных из них сварных конструкций. Соответствующее определение этого понятия свариваемости дано в ГОСТ 2601–84: «Свариваемость – свойство металлов или сочетания металлов образовывать при установленной технологии сварки соединение, отвечающее требованиям, обусловленным конструкцией и эксплуатацией изделия».

Исходя из приведенного определения, свариваемость зависит, с одной стороны, от материала, технологии сварки, конструктивного оформления соединения, а с другой, – от необходимых эксплуатационных свойств сварной конструкции. Последние зависят, в свою очередь, от предъявляемых к ним технических требований. Это может быть одно свойство или комплекс свойств в зависимости от назначения конструкции.

1.5.2. ПОКАЗАТЕЛИ СВАРИВАЕМОСТИ

В практике исследований свариваемости, как правило, применяются специальной конструкции сварные образцы или образцы с имитацией сварочных термических или термодеформационных циклов. В результате испытаний таких образцов определяются условия появления дефектов, характеристики структуры, механические и специальные свойства сварных соединений или зон имитации, абсолютные или относительные значения которых принимаются за количественные показатели свариваемости. Наряду с экспериментальными используются расчетные методы определения показателей свариваемости, учитывающие химический состав, тип соединения, способ и режимы сварки и другие факторы.

В лабораторной практике при сопоставлении материалов и технологий показатели свариваемости служат непосредственно в качестве критериев сравнения. В случае прикладного использования сведений о свариваемости по отдельным показателям или их сочетаниям судят о поведении сварного соединения при эксплуатации. В принципе число и вид показателей, соответствующих эксплуатационным требованиям, определяют работоспособность сварных соединений. Практически пользуются набором основных показателей, типовых для каждого вида материалов и условий эксплуатации изготовленных из них сварных конструкций. Основные показатели выбираются в каждом конкретном случае с учетом того, какие свойства и характеристики связаны с наиболее частыми отказами сварных соединений при эксплуатации.

Например, для сварных соединений углеродистых и легированных сталей принимают следующие показатели свариваемости:

– сопротивляемость образованию горячих трещин (ГТ);

– то же, холодных трещин (ХТ);

– значение основных механических свойств шва и зоны термического влияния (ЗТВ);

– сопротивляемость хрупкому разрушению;

– стойкость против развития трещиноподобных дефектов;

– другие показатели в соответствии с особенностями рабочих нагрузок и условий эксплуатации (выносливость при циклических нагрузках, хладостойкость при эксплуатации в условиях отрицательных температур и т.п.).

Достаточными показателями свариваемости материала считаются те, которые равны или выше нормативных значений требуемых свойств согласно техническим условиям на эксплуатацию данного типа сварных конструкций. Если все показатели сваримости являются достаточными, т.е. все требования к эксплуатационным свойствам сварных соединений с принятыми допущениями удовлетворяются, то свариваемость материалов считается *достаточной*. Если не обеспечивается минимально приемлемый уровень хотя бы одного из показателей свариваемости, то свариваемость материала классифицируется как *недостаточная*. Следует отметить, что при таком подходе свариваемость одного и того же материала может быть по-разному оценена в зависимости от назначения изделия.

1.5.3. СОПРОТИВЛЯЕМОСТЬ ОБРАЗОВАНИЮ ГТ

Горячие трещины при сварке – хрупкие межкристаллитные разрушения металла шва и ЗТВ, возникающие в твердожидком состоянии при завершении кристаллизации, а также в твердом состоянии при высоких температурах на этапе преимущественного развития межзеренной деформации (рис. 1.41). Потенциальную склонность к ГТ имеют все конструкционные сплавы при любых видах сварки плавлением, а также при некоторых видах сварки давлением, сопровождающихся нагревом металла до подсолидусных температур.

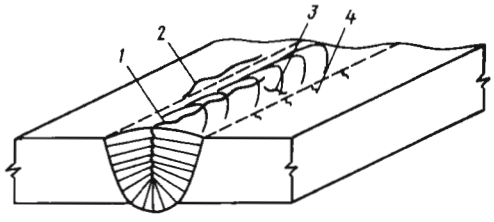


Рис. 1.41. Виды ГТ:
1, 2 – продольные в шве и ОШЗ;
3, 4 – поперечные в шве и ОШЗ

Согласно теоретическим представлениям, ГТ образуются при критическом сочетании значений следующих факторов (рис. 1.42):

– температурного интервала хрупкости (ТИХ) в период кристаллизации металла шва;

– минимальной пластичности в ТИХ δ_{min};

– темпа высокотемпературной сварочной деформации α.

Сплавы в процессе кристаллизации имеют интервал температур, названный ТИХ, в котором значения прочности и пластичности весьма малы, а разрушение носит хрупкий характер и происходит по зонам срастания кристаллитов или по границам зерен.

Из схемы (см. рис. 1.42) следует, что при температурах, прилегающих к ликвидусу, – $T_л$ значение δ велико и определяется высокой способностью металла в жидкотвердом состоянии к релаксации сдвиговых напряжений.

В начальный период кристаллизации появление твердой фазы не снижает деформационную способность сплава, так как металл деформируется за счет относительного перемещения участков твердой фазы и циркуляции жидкой фазы между ними. По мере дальнейшего охлаждения сплавов непрерывно снижается объем жидкой фазы и металл переходит в твердожидкое состояние, что приводит к соприкосновению кристаллитов при деформировании. Это ограничивает циркуляцию жидкой фазы и резко снижает деформационную способность сплава – до минимума (δ_{min}). Температура, соответствующая этому состоянию, называется верхней границей ТИХ – $T_{в.г}$. При деформации такого металла кристаллиты воспринимают в местах контакта напряжения, что способствует появлению определенного уровня сопротивления деформированию. Нижняя граница ТИХ – $T_{н.г}$ соответствует неравновесному солидусу $T_{с.н}$. Ниже $T_{н.г}$ деформационная способность резко возрастает и достигает максимума, так как в деформации участвует весь объем полностью затвердевшего металла.

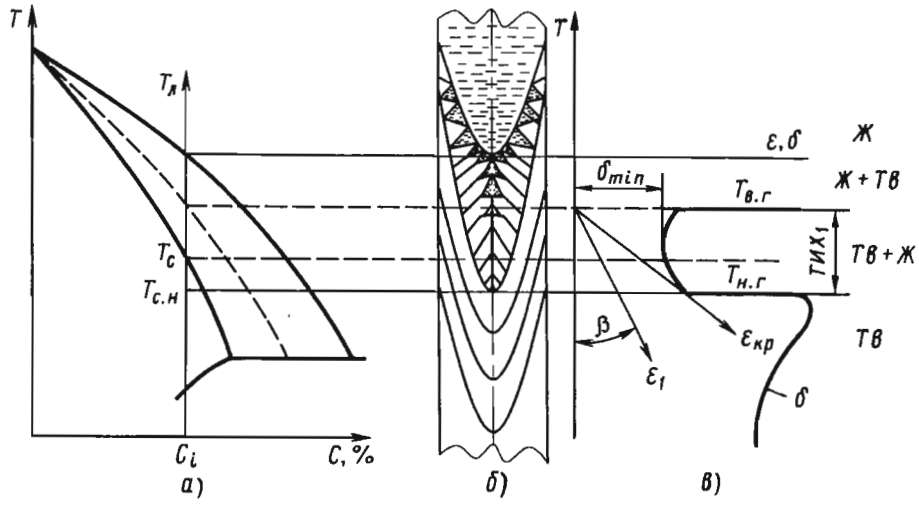


Рис. 1.42. Схема процесса образования ГТ в сварных швах:
а – диаграмма состояния сплава; C_i – состав сплава; $T_л$, $T_с$ и $T_{с.н}$ – температуры соответственно ликвидуса, равновесного и неравновесного солидусов; *б* – процесс кристаллизации сварного шва; *в* – распределение пластичности δ; интенсивность сварочных деформаций ε

Начало роста высокотемпературной сварочной деформации ε_i соответствует появлению сопротивления двухфазного твердожидкого металла деформирования. Интенсивность этих деформаций количественно определяется величиной темпа деформации:

$$\alpha = \Delta\varepsilon / \Delta T = \mathrm{tg}\ \beta,$$

где $\Delta\varepsilon$ – приращение высокотемпературной деформации за время охлаждения на ΔT.

Вероятность разрушения определяется соотношением между темпом деформации металла шва и его деформационной способностью. Количественно последнюю можно оценить критическим темпом деформации $\alpha_{кр}$:

$$\alpha_{кр} = \frac{\delta_{min}}{\text{ТИХ}} = \mathrm{tg}\ \beta_{кр}.$$

Превышение α действительного $\alpha_{кр}$ исчерпывает упруго-пластические свойства металла в ТИХ и приводит к образованию ГТ.

Величина $\alpha_{кр}$ принимается за показатель сопротивляемости сварных швов образованию ГТ.

ГТ в ТИХ_1 образуются по жидким прослойкам в период завершения кристаллизации шва, а также в околошовной зоне (ОШЗ) по оплавленным границам в период нагрева. ГТ этого типа называются кристаллизационными или ликвационными в шве и ОШЗ соответственно. Эти трещины характерны для всех типов сплавов.

Помимо ТИХ_1 в некоторых сплавах возможно существование еще одного температурного интервала хрупкости – ТИХ_2 или ТИХ_3 при температурах ниже температуры неравновесного солидуса в твердофазном состоянии металла. ГТ в ТИХ_2 образуются в закристаллизовавшихся шве и ОШЗ в период интенсивного развития процессов самодиффузии атомов основы сплава и миграции границ зерен. В результате этих процессов происходит межзеренное проскальзывание, приводящее к зарождению горячих микротрещин. ГТ такого типа называются подсолидусными. Они характерны для однофазных аустенитных и никелевых сплавов.

ГТ в ТИХ_3 образуются вследствие охрупчивания, обусловленного распадом твердого раствора с выпадением мелкодисперсных интерметаллидных и карбонитридных фаз (например γ'-фазы в высоконикелевых сплавах).

Дисперсионное упрочнение объема зерен приводит к локализации пластических деформаций по приграничным участкам, относительному проскальзыванию зерен и зарождению горячих микротрещин. Такие ГТ называются трещинами дисперсионного твердения. ГТ этого типа характерны для высоколегированных гетерогенных жаропрочных аустенитных и никелевых сплавов.

1.5.4. МЕТОДЫ И КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ СОПРОТИВЛЯЕМОСТИ ГТ

Расчетные методы оценки склонности сталей к образованию ГТ. Для оценки сопротивляемости металла сварных соединений ГТ применяют расчетный и экспериментальный методы. Расчетно-статистический метод основан на использовании параметрических уравнений, составленных с помощью регрессионного анализа, и применим только для тех сплавов, которые входят в концентрационные пределы изученных композиций.

Одно из параметрических уравнений (по Итамуре) применительно к низколегированным сварным швам имеет вид

$$\mathrm{HCS} = \frac{\mathrm{C}(\mathrm{S} + \mathrm{P} + \mathrm{Si}/25 + \mathrm{Ni}/100)1000}{3\ \mathrm{Mn} + \mathrm{Cr} + \mathrm{Mo} + \mathrm{V}},$$

где H(T)CS (high temperature cracking sensitivity) – параметр, оценивающий склонность сварных швов к кристаллизационным ГТ, %; C, S и др. – химические элементы, %.

Если HCS > 4, то сварные швы потенциально склонны к ГТ. Это означает, что в условиях высокого темпа сварочной деформации в ТИХ_1, который зависит от типа и жесткости сварного соединения, способа и режима сварки, возможно образование ГТ.

Европейский стандарт EN 1011-2 : 2001 «Рекомендации по сварке металлических материалов. Дуговая сварка ферритных (углеродистых и низколегированных) сталей» рекомендует оценивать опасность образования ГТ в сварных швах по соотношению:

$$\mathrm{UCS} = 230\ \mathrm{C} + 190\ \mathrm{S} + 75\ \mathrm{P} + 45\ \mathrm{Nb} - 12{,}3\ \mathrm{Si} - 5{,}4\ \mathrm{Mn} - 1,$$

где UCS (units of crack susceptibility) – единицы склонности к ГТ; C, S и др. – химические элементы, %.

Значения UCS < 10 соответствуют высокой сопротивляемости образованию ГТ, > 30 – низкой сопротивляемости ГТ.

Применительно к хромоникелевым аустенитным сварным швам используют параметр, оценивающий степень их аустенитности:

$$\frac{Cr_э}{Ni_э} = \frac{Cr + 1{,}37\ Mo + 1{,}5\ Si + 2\ Nb + 3\ Ti}{Ni + 22\ C + 0{,}31\ Mn + 14{,}2\ N_2 + Cu},$$

где Cr, Ni и др. – химические элементы, % [(S + P) < 0,035 %].

Если $(Cr_э / Ni_э) < 1{,}5$, то сварные швы потенциально склонны к кристаллизационным ГТ.

Недостаток этого метода – невозможность учета влияния всех примесей, не входящих в параметрические уравнения, а также аномалии по технологическим параметрам сварки, выходящим за исследованные пределы. Поэтому расчетно-статистический метод рекомендуется для приближенных экспресс-оценок.

Экспериментальная оценка склонности сварных швов к образованию ГТ с помощью технологических проб. При испытаниях с помощью проб на металл сварного шва воздействуют деформации от усадки шва и формоизменения свариваемых образцов. Специальная конструкция и технология сварки образцов обусловливают повышенные темпы высокотемпературной деформации. Некоторые схемы технологических проб согласно ГОСТ 26389–84 (2000) приведены на рис. 1.43.

Образец с круговым швом (см. рис. 1.43, *а*) изготовляют из листового металла в виде квадратной пластины с отверстием. При толщине листов >25 мм применяют составную пластину из четырех пластин, соединенных монтажным швом, с проточкой под круговой шов. Испытуемым является круговой шов или наплавка в круговую канавку.

Тавровый образец (см. рис. 1.43, *б*) изготовляют из двух пластин: 150 × 300 и 75 × 300 мм толщиной 15…30 мм, соединяемых под прямым углом с помощью трех косынок и монтажных швов. Испытуемый шов сваривают в положение втавр или в лодочку.

Образцы с переменной шириной (см. рис. 1.43, *в*) применяют в виде комплекта из серий, отличающихся по ширине b в пределах 40…200 мм для дуговой сварки и 10…40 мм для лучевой независимо от толщины. Особенность сварки образцов заключается в том, чтобы закрепление входных и выходных планок не препятствовало раскрытию зазора. Сварка начинается с образцов большей ширины и заканчивается на образцах, в швах которых образуются ГТ.

Образец с канавками (см. рис. 1.43, *г*) изготовляют из пластин толщиной >40 мм. При толщине <60 мм он приваривается к жесткой плите по флангам швом с катетом 20 мм. Канавки выполняют с шагом 100 мм, при толщине образца >70 мм – с двух сторон. Они могут иметь V- и U-образную форму пазов.

При наличии ГТ металл сварного соединения считают склонным к образованию трещин. Относительную степень склонности к ГТ (см. рис. 1.43, *а*, *б*) оценивают суммарной длиной трещин по длине шва или в трех сечениях шва. При испытании образцов с переменной шириной (см. рис. 1.43, *в*) склонность к ГТ определяют по максимальной ширине образцов b_{max}, в которых образуются трещины. При испытании пробы с канавками (рис. 1.43, *г*) за критерий склонности к ГТ принимают максимальную скорость сварки, при которой в швах начинают образовываться трещины.

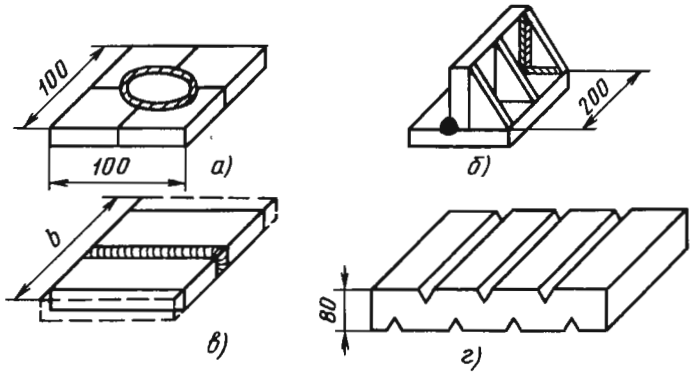


Рис. 1.43. Схемы конструкции образцов технологических проб:
а – с круговым швом; *б* – таврового; *в* – с переменной шириной пластин; *г* – со швом в канавку

Машинные методы предусматривают испытание свариваемых образцов на растяжение, изгиб, а также испытание образцов с имитацией сварочного цикла на растяжение (рис. 1.44). Испытания проводят по ГОСТ 26389–84 (2000) с помощью специализированных испытательных машин.

Процедура машинных испытаний предусматривает поочередно сварку серии образцов и деформирование швов в процессе их кристаллизации с дискретной варьируемой скоростью растяжения ($v_д$). Скорость деформации и, соответственно, относительное перемещение свариваемых кромок повышают до появления ГТ. Сварку стыковых образцов без разделки кромок выполняют на режимах, исходя из условия получения полного провара и обратного валика заданной ширины, а стыковых образцов с разделкой кромок – из условия получения заданных ширины и высоты шва.

Идентификацию трещин в образцах после испытания проводят по виду излома, а при невозможности излома – другими неразрушающими методами контроля.

В результате испытания 10 – 15 образцов с дискретным изменением скорости растяжения находят критическую скорость растяжения (среднее арифметическое из трех минимальных скоростей, при которых образовались трещины) и принимают ее за сравнительный показатель сопротивляемости металла образованию ГТ ($v_{кр}$, мм/мин) при заданном режиме (термическом цикле) сварки. Чтобы сравнить сопротивляемость ГТ при различных термических циклах сварки, применяют показатель – критический темп деформации $\alpha'_{кр}$ (мм/°С). Он вычисляется по формуле

$$\alpha'_{кр} = v_{кр} / \omega_0 ,$$

где ω_0 – скорость охлаждения металла шва в ТИХ.

Испытания образцов с имитацией сварочного термического цикла проводят на стержневых или пластинчатых образцах, подвергнутых электроконтактному или индукционному нагреву. Рабочая зона таких образцов может иметь структуру основного металла или сварного шва. Главная особенность таких испытаний – назначение температуры максимального нагрева. Она должна соответствовать минимальной температуре, при которой достигается оплавление границ зерен по их периметру ($T_{max} > T_{сол}$).

Испытания образцов в ТИХ проводят с целью определения верхней и нижней температурных границ ТИХ и минимальной пластичности в ТИХ (δ_{min} в мм или %).

По результатам испытаний рассчитывают критический темп деформации $\alpha_{кр} = \delta_{min}$ / ТИХ (мм/° или %/°С).

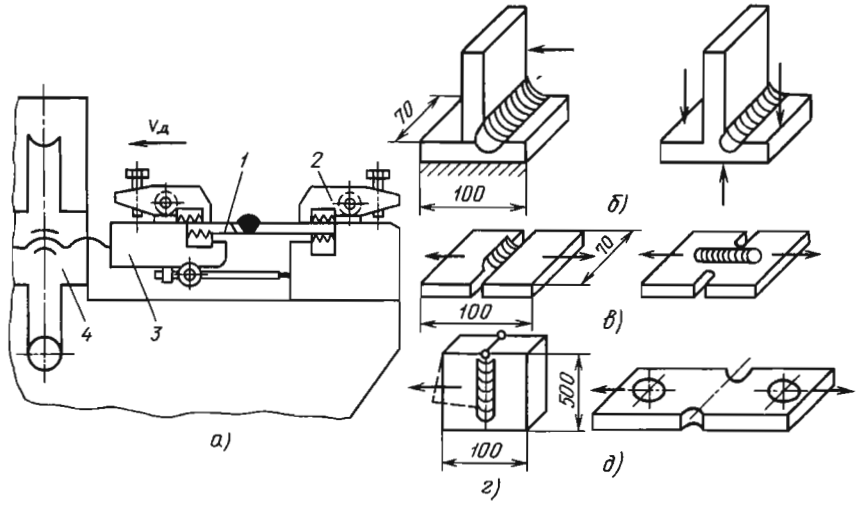


Рис. 1.44. Устройство испытательной машины МИС-1 и схемы испытания свариваемых образцов:
а – схема машины МИС-1 (*1* – свариваемый образец; *2* и *3* – неподвижный и подвижный захваты соответственно; *4* – механический привод); *б* – испытание изгибом; *в* – испытание растяжением; *г* – испытание образца для ЭШС; *д* – испытание в процессе имитации термодеформационного сварочного цикла образца основного металла

1.5.5. СОПРОТИВЛЯЕМОСТЬ ОБРАЗОВАНИЮ ХТ

К категории ХТ относятся такие трещины в сварных соединениях, формальными признаками которых являются образование визуально наблюдаемых трещин практически после охлаждения соединения, блестящий кристаллический излом их без следов высокотемпературного окисления. ХТ – локальные хрупкие разрушения материала сварного соединения, возникающие под действием остаточных сварочных напряжений. Размеры ХТ соизмеримы с размерами зон сварного соединения. Локальность разрушения объясняется частичным снятием напряжений при образовании трещин, а также ограниченностью зон сварного соединения, в которых возможно развитие трещин без дополнительного притока энергии от внешних нагрузок.

Для большинства случаев возникновения ХТ характерны:

– наличие инкубационного периода до образования очага трещин;

– образование трещин при значениях напряжений, составляющих <0,9 кратковременной прочности материалов в состоянии после сварки.

Эти особенности позволяют отнести ХТ к замедленному разрушению свежезакаленного материала.

К образованию ХТ при сварке склонны углеродистые и легированные стали, некоторые титановые и алюминиевые сплавы.

При сварке углеродистых и легированных сталей ХТ могут образоваться, если стали претерпевают частичную или полную закалку. Трещины возникают в процессе охлаждения после сварки ниже температуры 150 °С или в течение последующих нескольких суток. ХТ могут образовываться во всех зонах сварного соединения и иметь параллельное или перпендикулярное расположение по отношению к оси шва. Место образования и направление трещин зависят от состава основного металла и шва, соотношения компонент сварочных напряжений и некоторых других обстоятельств. В практике ХТ в соответствии с геометрическими признаками и характером излома получили определенные названия: «откол» – продольные в ЗТВ, «отрыв» – продольные в зоне сплавления со стороны шва (аустенитного), «частокол» – поперечные ЗТВ и др. (рис. 1.45). Наиболее частыми являются ХТ вида «откол».

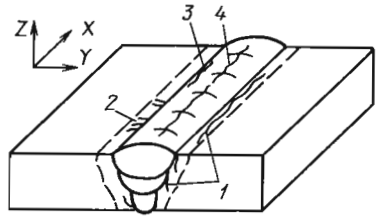


Рис. 1.45. Вид ХТ в сварных соединениях легированных сталей:
1 – откол; *2* – частокол;
3 – отрыв; *4* – продольные в шве

Образование ХТ начинается с возникновения очага разрушения, как правило, на границах аустенитных зерен на околошовном участке ЗТВ, примыкающих к линии сплавления ЛС (рис. 1.46). Протяженность очагов трещин составляет несколько диаметров аустенитных зерен. При этом разрушение не сопровождается заметной пластической деформацией и наблюдается как практически хрупкое. Это позволяет отнести ХТ к межкристаллитному хрупкому разрушению. Дальнейшее развитие очага в микро- и макротрещину может носить смешанный или внутризеренный характер.

Роль структуры связывают с развитием микропластической деформации (МПД) в приграничных зонах зерен. МПД обусловлена наличием в структуре свежезакаленной стали незакрепленных, способных к скольжению краевых дислокаций при действии сравнительно невысоких напряжений ($\sigma << \sigma_{0,2}$). Особенно высока плотность дислокаций в мартенсите непосредственно после сварочного термического цикла. МПД является термически активируемым процессом, т.е. ее скорость зависит от температуры и величины приложенных напряжений. При длительном нагружении по границам зерен развивается локальная МПД, которая приводит к относительному проскальзыванию и повороту зерен по границам. В результате этого происходит межзеренное

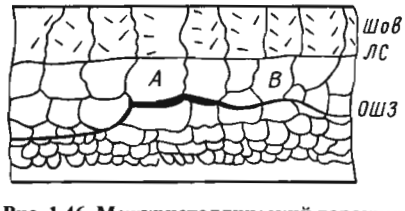


Рис. 1.46. Межкристаллический характер разрушения на участке очага ХТ (*A*) и смешанный на участке ее развития (*B*)

разрушение на стыке границ зерен. После «отдыха» способность закаленной стали к МПД исчезает. Конечные высокая твердость и предел текучести закаленной стали – результат старения, при котором происходит закрепление дислокаций атомами углерода. Особенности развития МПД достаточно хорошо объясняют приведенные ранее закономерности замедленного разрушения.

Действие диффузионного водорода при образовании ХТ наиболее соответствует одному из механизмов обратимой водородной хрупкости. Ее особенность заключается в том, что в условиях медленного нагружения источники водородной хрупкости образуются вследствие диффузионного перераспределения водорода и исчезают через некоторое время после снятия нагрузки. При этом важная роль отводится взаимодействию водорода с дислокациями и облегченному перемещению их комплексов. В металле сварных соединений диффузионный водород $H_д$ концентрируется на границах крупных аустенитных зерен, которые характеризуются повышенной плотностью дефектов кристаллической решетки.

Влияние водородного охрупчивания на процесс разрушения описывают различными механизмами: молекулярного давления, адсорбционным, максимальных трехосных напряжений др.

Основными факторами, обусловливающими образование ХТ в сварном соединении углеродстых и легированных сталей, являются:

– структурное состояние металла сварного соединения, характеризуемое наличием составляющих мартенситного и бейнитного типов ($S_д$, %); размером действительного аустенитного зерна ($d_з$, мкм);

– концентрация диффузионного водорода в зоне зарождения очага трещины ($H_д$, $см^3/100$ г);

– уровень растягивающих сварочных напряжений первого рода $\sigma_{св}$, МПа.

Критическое сочетание этих факторов приводит к образованию ХТ.

Причины и механизм образования трещин в титановых сплавах менее исследованы, чем для сварки легированных сталей. Установлено, что они имеют характер замедленного разрушения. При этом период до разрушения значительно больший, чем у сталей, и может достигать нескольких десятков суток. Образование трещин связывают с метастабильным состоянием металла шва и зоны термического влияния после сварки, обусловливающим их пониженную пластичность.

Склонность технического титана и малолегированных α-сплавов к ХТ связывают с интенсивным ростом зерна при сварке и насыщением газами (H_2, O_2, N_2) свыше допустимой концентрации. Водород, имеющий пониженную растворимость в α-фазе (до 0,001 %), способен образовывать хрупкий гидрид титана. Последний образуется со значительным положительным объемным эффектом (15,5 %) и наряду с охрупчиванием металла может привести к повышению уровня микронапряжений второго рода. Водород также способен адсорбироваться на границах зерен, снижая их когезионную прочность. Отмечено, что действие водорода усиливается при одновременном насыщении металла сварного соединения кислородом и азотом.

Склонность к ХТ наблюдается у (α + β)-сплавов титана, легированных главным образом эвтектоиднообразующими β-стабилизирующими элементами (железо, хром, марганец и др.). Образование трещин связывают с выделением в процессе фазовых превращений хрупких фаз на границах зерен, что ведет к снижению пластичности и способствует склонности к образованию ХТ.

Склонность к ХТ наблюдается при сварке некоторых высоколегированных термоупрочняемых алюминиевых сплавов систем Al – Mn – Zn и Al – Zn – Mg – Cu. Природа и механизм образования трещин еще недостаточно исследованы. Их возникновение связывают с выделением хрупких интерметаллидных фаз в процессе старения при охлаждении во время сварки и в послесварочный период. В результате дисперсионного твердения имеет место относительное упрочнение тела зерна по отношению к приграничным зонам. В ходе релаксации сварочных напряжений происходят локальное накопление пластических деформаций на границах зерен, их перенапряжение и замедленное разрушение.

Расчетные методы оценки склонности сталей к образованию ХТ. Широко применяют параметрические уравнения, полученные статистической обработкой экспериментальных данных. Они связывают выходные параметры (показатель склонности к трещинам) с входными (химическим составом, режимом сварки и др.) без анализа физических процес-

сов в металлах при сварке, обусловливающих образование трещин. Поэтому их применение ограничено областью, в пределах которой изменялись входные параметры при экспериментах. При этом часто не учитывается все многообразие факторов, влияющих на образование трещин, в том числе и существенно значимых.

В настоящее время применительно к низколегированным сталям используются следующие параметрические уравнения.

Расчет значения эквивалента углерода $C_{экв}$ (согласно ГОСТ 27772–88):

$$C_{экв} = C + Mn/6 + Si/24 + Cr/5 + Ni/40 + \\ + Mo/4 + V/14 + Cu/13 + P/2,$$

где C, Mn и др. – символы элементов и их содержание, %.

Стали, у которых $C_{экв} \geq 0{,}35$ %, считаются потенциально склонными к образованию трещин. $C_{экв}$ является обобщенным параметром состава стали, характеризующим ее прокаливаемость. При $C_{экв} \geq 0{,}40$ % при сварке становится возможным образование закалочных структур в металле сварного соединения, что при условии насыщения металла водородом и высоких сварочных напряжений может привести к образованию ХТ. Значение $C_{экв}$ вне связи с этими условиями не может служить показателем сопротивляемости сварного соединения трещинам.

Расчет параметра трещинообразования P_w (по Ито – Бессио), %:

$$P_w = P_{см} + H_{гл}/60 + K/(40 \cdot 10^4),$$

$$P_{см} = C + Si/30 + (Mn + Cr + Cu)/20 + \\ + Ni/60 + (Mo + V)/15 + 5B,$$

где $H_{гл}$ – концентрация диффузионного водорода в металле шва, установленного глицериновым методом, мл/100 г, $H_{гл} = 0{,}64\, H_{МИС} - 0{,}93$ ($H_{МИС}$ – концентрация водорода, установленная с помощью ртутного метода МИС или хроматографическим методом); $K \approx 685\delta$ – коэффициент интенсивности жесткости сварного соединения применительно к технологической сварочной пробе «Тэккен», Н/мм^2 (δ – толщина металла, мм) (см. рис. 1.49).

Параметр P_w применим для низколегированных сталей с содержанием углерода 0,07…0,22 %, пределом текучести 500…700 МПа, погонной энергией сварки $q / V = 15…20$ кДж/см.

Если $P_w \geq 0{,}286$ %, то сварные соединения потенциально склонны к образованию ХТ.

Расчет стойкости сварных соединений углеродистых и легированных сталей может быть выполнен с использованием инженерного программного комплекса «Свариваемость легированных сталей», разработанного в МГТУ им. Н.Э. Баумана. С помощью этого комплекса анализируют физические процессы в металлах при сварке, обусловливающие образование трещин. В этом случае используются концептуальные физические модели процесса разрушения при образовании трещин, аналитические зависимости законов металлофизики, регрессионные уравнения, описывающие характеристики и константы материалов на основе статистической обработки опытных данных. Такой расчетный метод имеет более универсальный характер, чем параметрические уравнения, и позволяют учитывать достаточно широкий ряд металлургических, технологических и геометрических факторов. Расчеты выполняют с помощью компьютерной техники.

Алгоритм инженерного программного комплекса представлен на рис. 1.47.

Сопоставлением действительных сварочных и критических напряжений, при которых происходит образование ХТ, оценивают стойкость сварных соединений против трещин ($\sigma_{св} < \sigma_{кр}$). Если условие стойкости против трещин не обеспечивается, то определяют значение конструктивно-технологических параметров (КТП) сварки, которые обеспечивают отсутствие ХТ. Регулируемыми КТП являются геометрия сварного соединения, «жесткость» закрепления сварных элементов, способ и режимы сварки, состав сварочных материалов, исходная концентрация диффузионного водорода в сварном шве, температура подогрева и режим послесварочного нагрева.

Экспериментальная оценка склонности сталей к ХТ с помощью сварочных технологических проб. Технологические пробы по характеру использования получаемых результатов можно разделить на пробы лабораторного и отраслевого назначения. Первые дают сравнительную оценку материалам или технологическим вариантам безотносительно к определенному виду сварных конструкций. Они служат для рассортировки материалов и исследования влияния различных факторов на склонность к трещинам. Пробы отраслевого назначения – натурные образцы сварных конструкций соответствующей отрасли (судостроение,

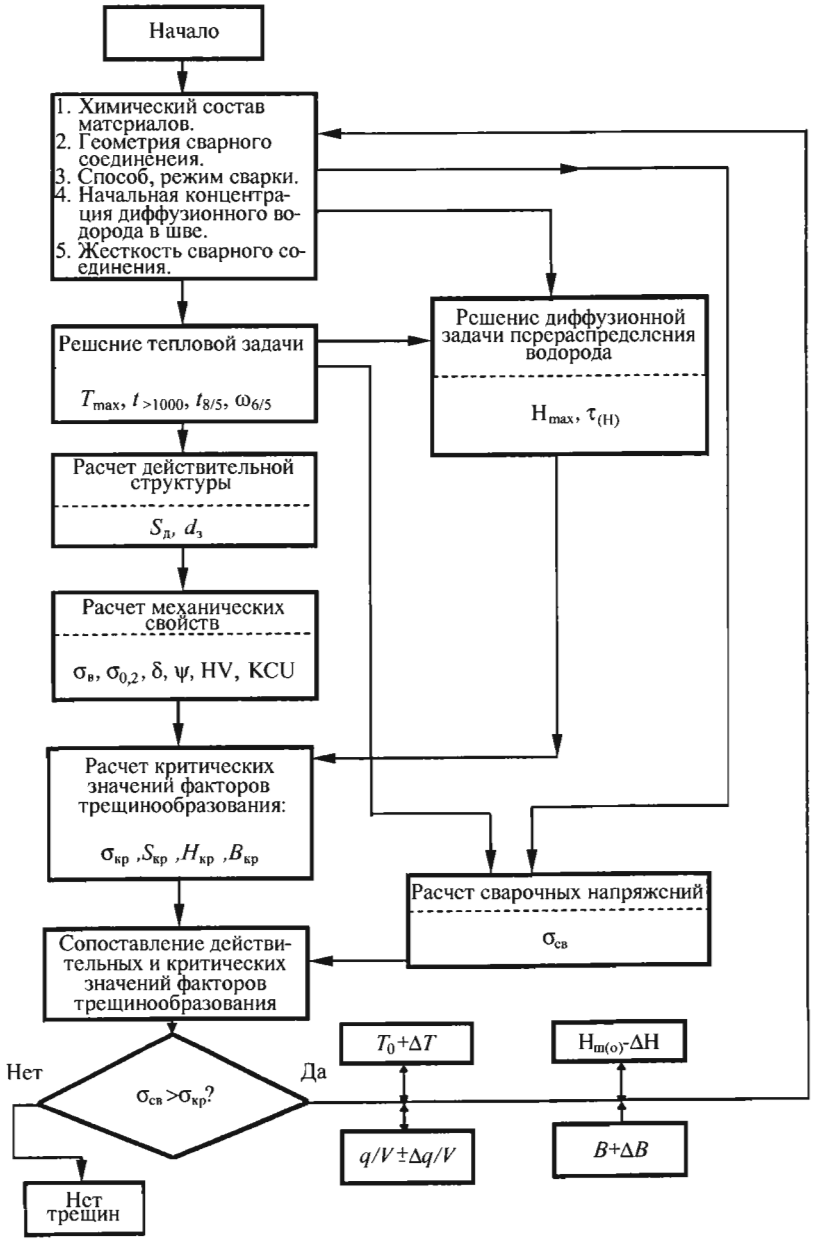


Рис. 1.47. Алгоритм инженерного программного комплекса «Свариваемость легированных сталей» МГТУ им. Н.Э. Баумана:

T_{max}, $t_{>1000}$, $t_{8/5}$, $\omega_{6/5}$ – максимальная температура нагрева, время пребывания > 1000 °С, время охлаждения от 800 до 500 °С и скорость охлаждения в диапазоне 600…500 °С в анализируемой точке сварного соединения соответственно; $S_д$, $d_э$ – действительная структура, средний условный диаметр аустенитного зерна; H_{max}, τ(H) – максимальная концентрация диффузионного водорода, время достижения H_{max} соответственно; $\sigma_{кр}$, $S_{кр}$, $H_{кр}$, $B_{кр}$ – критические значения факторов трещинообразования (разрушающее напряжение, структура, водород и жесткость сварного соединения); $\sigma_{св}$ – действительные сварочные напряжения; $H_{ш.0}$ – исходная концентрация диффузионного водорода в металле сварного шва

бронетехника и т.п.), они позволяют получать прикладную оценку свариваемости материалов в условиях, максимально приближенных к конструктивным, технологическим и климатическим условиям изготовления сварных конструкций определенного вида. С их помощью выбирают материалы и технологию, обеспечивающие стойкость сварных соединений против трещин.

Сварочная технологическая проба переменной жесткости [ГОСТ 26388–84 (2000)] представляет собой набор из трех плоских прямоугольных составных образцов толщиной 12…40 мм с различной шириной свариваемых элементов (100, 150 и 300 мм), жестко закрепленных по концам (рис. 1.48). Для закрепления образцов к ним предварительно привариваются специальные концевики. Перед сваркой образцы закрепляются в зажимном приспособлении, представляющем массивную плиту с прорезями, в которые помещаются концевики, где фиксируются прижимными болтами. Сварка пробы выполняется однопроходным швом одновременно всех трех образцов. После сварки проба выдерживается в закрепленном состоянии в течение 20 ч. После освобождения пробы из приспособления во всех образцах выявляются ХТ различными видами контроля, в том числе травлением поверхности и корня шва и зоны термического влияния 5%-ным водным раствором азотной кислоты. Просушенные образцы разрушают. Протравленные части излома, выявленные визуальным осмотром с помощью лупы с увеличением 3$^{\times}$, принимают за образовавшиеся при испытании трещины.

За количественный показатель склонности к ХТ принимают максимальную ширину свариваемых элементов, в которых образовались трещины. Показатель устанавливают по двум одинаковым результатам испытаний трех проб.

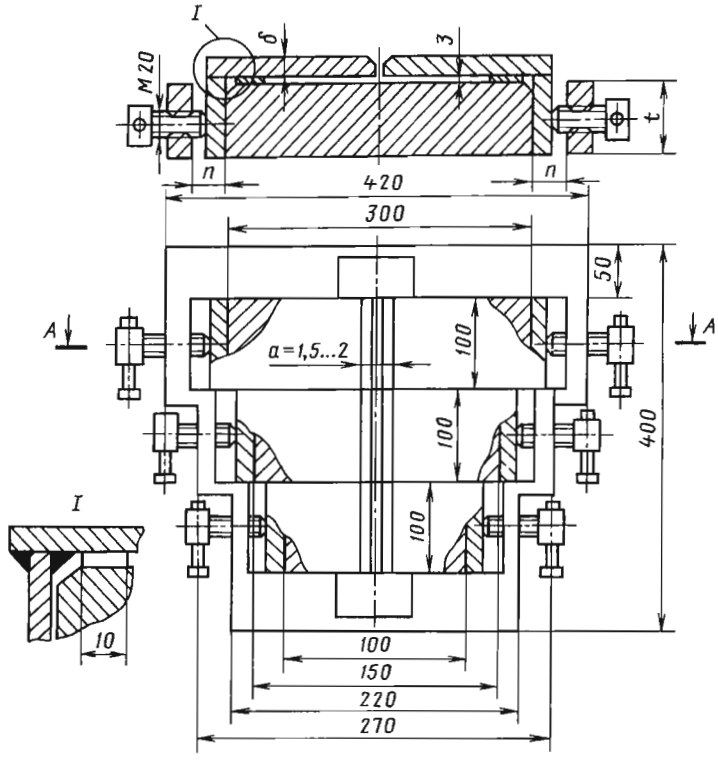


Рис. 1.48. Технологическая сварочная проба для испытаний на образование ХТ:

Толщина стали δ, мм	Толщина плиты *t*, мм	Ширина паза *n*, мм
12…20	60	35
22…40	100	50

Проба «Тэккен» [ГОСТ 26388–84 (2000)] – плоский прямоугольный образец толщиной δ 12…40 мм с продольной прорезью в центре, оформленной в виде У-образной разделки (рис. 1.49). Образец сваривается в свободном состоянии и выдерживается после сварки 20 ч. Применение пробы, как правило, ограничивается ручной сваркой покрытыми электродами и в защитных газах. Трещины образуются в корневой части сварного соединения под действием высоких усадочных напряжений. Обязательное условие работы пробы – непровар в корне шва, который служит концентратором напряжений. Наличие трещин выявляется различными методами контроля, в том числе и протравливанием раствором азотной кислоты с последующим изломом образца.

При образовании трещин в качестве дополнительного сравнительно-количественного показателя склонности к ХТ принимают процентное отношение суммарной длины трещины к длине шва или относительной площади трещины к площади продольного сечения шва. За количественный показатель стойкости против трещин принимают температуру подогрева, при которой уже не образуется трещин.

Методы специализированных машинных испытаний сварных образцов основаны на доведении металла ЗТВ или металла шва до образования ХТ под действием напряжений от внешней длительно действующей постоянной нагрузки. При испытаниях серию образцов нагружают различными по величине постоянными нагрузками непосредственно после окончания сварки и выдерживают их под нагрузкой в течение 20 ч. За сравнительный количественный показатель сопротивляемости металла сварных соединений трещинам принимают минимальное растягивающее напряжение от внешней нагрузки $\sigma_{p\,min}$, при которой начинают образовываться трещины.

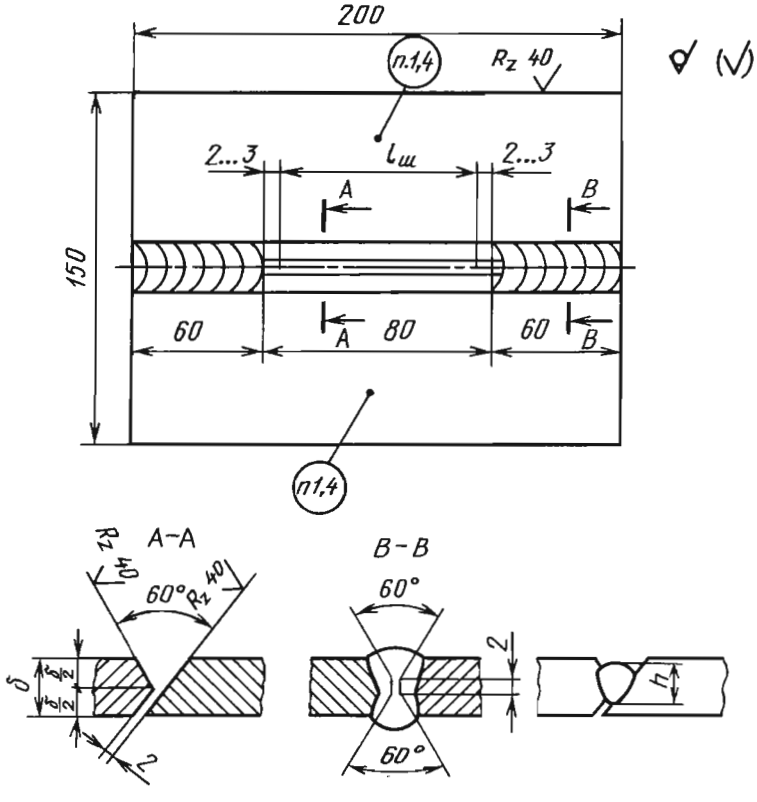


Рис. 1.49. Проба «Тэккен»
(при толщине стали δ = 12; 16; 20 мм высота сварочного валика *h* = 6 мм; при δ = 30; 40 мм *h* = 8 мм)

Показатели сопротивляемости трещинам, получаемые с помощью машинных испытаний, оценивают только сопротивляемость металла сварных соединений ХТ. Эти показатели затем можно использовать для сравнения материалов и технологических вариантов сварки, однако они неприменимы непосредственно для оценки стойкости против трещин сварных соединений конструкций, так как для этого необходим учет величины действующих в конструкции сварочных напряжений.

Метод ЛТП2 [ГОСТ 26388–84 (2000)] предусматривает испытание нескольких типов сварных образцов: плоских круглых толщиной 1…3 мм с диаметральным швом по схеме изгиба, жестко заделанной по контуру пластинки распределенной нагрузкой; плоских прямоугольных толщиной 8…20 мм с поперечным или продольным швом по схеме четырехточечного изгиба; тавровых толщиной 8…20 мм по схеме консольного изгиба (рис. 1.50). Разрушающие напряжения определяют приближенно расчетом по соотношениям теории упругости.

Метод «Имплант» [ГОСТ 26388–84 (2000)] предусматривает испытание цилиндрического образца – вставки (импланта) с винтовым надрезом, который вводится в отверстие пластины и частично переплавляется наплавленным на пластину сварочным валиком (рис. 1.51). Сварочный термический цикл регулируют, изменяя погонную энергию сварки. За стандартный принят цикл, характеризуемый временем охлаждения от 800 до 500 °С ($t_{8/5}$), равным 10 с. В процессе охлаждения в диапазоне 150…100 °С образцы нагружают растягивающей силой. Испытывают серию образцов различными по величине постоянными нагрузками в течение 20 ч. Разрушающие напряжения рассчитывают приближенно относительно поперечного сечения образца в надрезе без учета концентрации напряжений.

Метод ЛТП3 предусматривает моделирование (имитацию) сварочных термических и термодеформационных циклов в образцах основного металла, последующее их наводороживание и испытание на замедленное разрушение. Испытываются плоские образцы 1,5 × 10 × 100 мм с боковым надрезом 0,2 × 3 мм путем четырехточечного изгиба постоянным длительно действующим моментом (рис. 1.52). Под нагрузкой

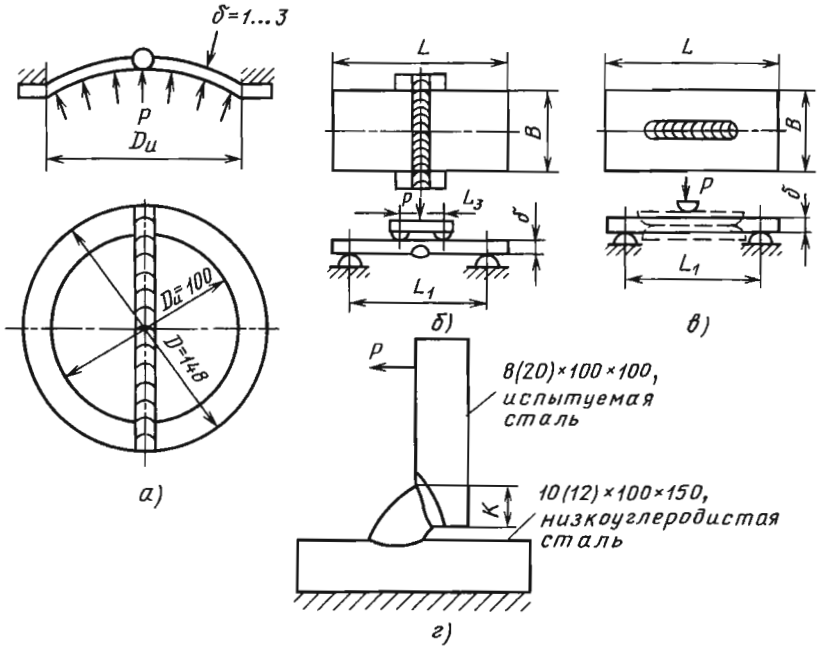


Рис. 1.50. Образцы и схема нагружения при испытании по методу ЛТП2:
а – толщины 1…3 мм, изгиб распределенной нагрузкой;
б, в – толщины 8…20 мм, четырехточечный изгиб вдоль и поперек шва соответственно;
г – толщины 8…20 мм, консольный изгиб

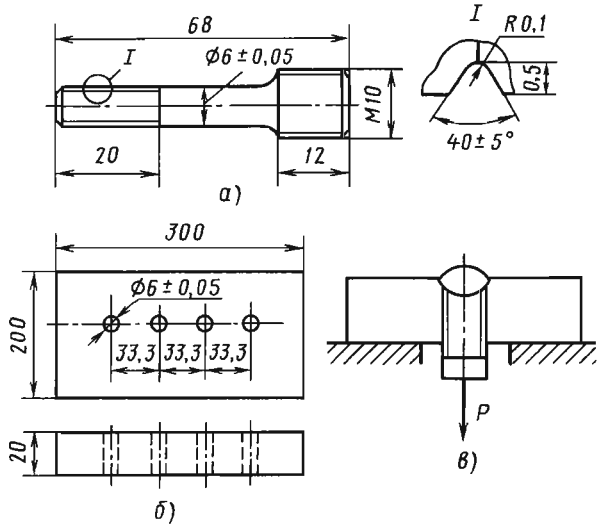


Рис. 1.51. Образец-вставка (*а*), пластина под сварку (*б*) и схема нагружения образца (*в*) по методу «Имплант»

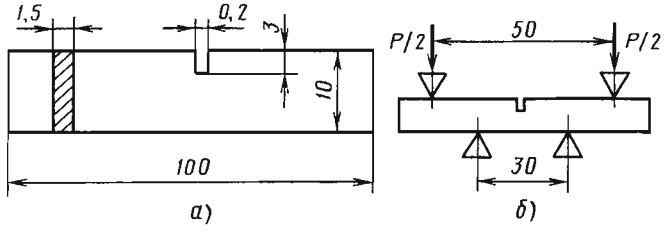


Рис. 1.52. Образец (*а*) и схема нагружения (*б*) при испытании на замедленное разрушение по методу ЛТПЗ

образцы выдерживаются 20 ч. Имитация сварочных циклов проводится проходящим электрическим током, наводороживание – электролитическим способом, надрез после наводороживания – тонким наждачным кругом. За количественный показатель сопротивляемости замедленному разрушению принимают минимальное среднее напряжение, приводящее к образованию трещины в сечении с надрезом $\sigma_{p\,min}$. Расчет разрушающего напряжения выполняется приближенно по соотношению для упругого нагружения бруса по схеме чистого изгиба. Показатель $\sigma_{p\,min}$ используется для оценки влияния исследуемых факторов (состава, структуры, концентрации водорода и др.) на сопротивляемость замедленному разрушению, а следовательно, и их влиянию на сопротивляемость ХТ.

1.5.6. МЕТОДЫ И КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ СОПРОТИВЛЯЕМОСТИ «ЛАМЕЛЯРНЫМ ТРЕЩИНАМ»

Ламелярные трещины – трещины в ЗТВ, образующиеся параллельно поверхности свариваемых листов, имеющие ступенчатый (каскадный) характер. Они наблюдаются визуально после окончания сварки и завершения охлаждения. Излом трещин хрупкий, без следов окисления, большую часть которого составляют плоские древовидные участки (имеющие вид расщепленного дерева). Эти участки совпадают со слоистостью металла, образующейся в результате прокатки, и по этой причине трещины получили название ламелярных (слоистых трещин, или слоистого растрескивания). Такие трещины образуются, как правило, в угловых и тавровых соединениях низколегированных сталей мартеновской и конвертерной

выплавки под действием сварочных напряжений, направленных по толщине свариваемых листов. По многим внешним признакам они напоминают ХТ, поэтому часто рассматриваются как е. При этом по мере увеличения содер. углерода в стали становится возможным одновременное образование ламелярных и холодных трещин, а при содержании C > 0,30 % преимущественно образуются ХТ. В последнем случае сопротивляемость ХТ существенно ниже, чем ламелярным.

Исследованиями многих авторов установлено, что образование ламелярных трещин связано с наличием в металле вытянутых плоских неметаллических включений типа сульфидов и силикатов. Существует ряд предположений о механизме разрушения при возникновении ламелярных трещин: механическое отделение неметаллических включений от металлической матрицы вследствие слабого их сцепления, в результате различной величины термического расширения и сокращения металла и включений, из-за охрупчивающего действия водорода, концентрирующегося на межфазной поверхности, и др. При этом важную роль играют концентрация напряжений у заостренных концов включений, их длина в отношении к критической для дальнейшего распространения трещин, подкалка и охрупчивание водородом металлической матрицы в ЗТВ.

Поскольку отмечено сходство ламелярных и холодных трещин по ряду внешних признаков и зависимости от одних и тех же основных факторов (подкалка ЗТВ, водород, сварочные напряжения первого рода), то и многие способы оценки склонности к ламелярным трещинам подобны применяемым в отношении ХТ. При этом учитывается специфика их расположения параллельно поверхности свариваемых листов, а также то, что наибольшая плотность неметаллических включений имеет место в срединной части листов. Для оценки склонности к ламелярным трещинам применяют сварочные технологические пробы, машинные испытания тавровых сварных образцов (ЛТП2-3).

Склонность к ламелярным трещинам оценивают по результатам механических испытаний листового металла, при котором растягивающие силы прикладываются вдоль толщины листа (*метод* «*Веритас*»). Образцы изготовляют из заготовок, получаемых путем приварки перпендикулярно к поверхностям листа пластин-концевиков. При этом используют сварку трением, контактную, ручную дуговую. Заготовки разрезают на части, из которых механическим путем изготовляют образцы с круглым или квадратным сечением (диаметр или сторона квадрата около 0,6 толщины листа) (рис. 1.53). Испытывают шесть образцов, вырезанных из одного участка пластины.

В результате испытаний определяют среднее относительное поперечное сужение ψ. Потенциальная склонность к трещинам при сварке проявляется при $\psi \le 20$ %. Однако эти показатели позволяют только косвенно судить об образовании трещин в конкретных сварных соединениях.

1.5.7. ОЦЕНКА СОПРОТИВЛЯЕМОСТИ ХРУПКОМУ РАЗРУШЕНИЮ

Хрупкое разрушение характеризуется тем, что оно не сопровождается заметной пластической макродеформацией и, как правило, наблюдается при действии средних напряжений, не превышающих предел текучести. Траектория разрушения близка к прямолинейной, излом нормален к поверхности и имеет кристаллический характер. Хрупкое разрушение, как правило, является внутрикристаллическим. Разрушение в большинстве случаев происходит под действием нормальных напряжений и распространяется вдоль наименее упакованной кристаллографической плоскости, называемой плоскостью скола (отрыва). Однако при некоторых условиях эксплуатации (водородное насыщение, коррозия и др.) хрупкое разрушение может быть межкристаллитным (межзеренным). Хрупкое разрушение часто происходит внезапно и распространяется с большой скоростью при малых затратах энергии. В ряде случаев оно приводит к катастрофическим разрушениям сварных конструкций в процессе эксплуатации.

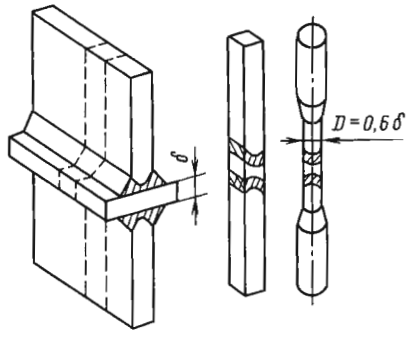


Рис. 1.53. Образцы для испытаний по методу «Веритас»

Металлы и сплавы с объемно-центрированной кубической решеткой разрушаются вязко или хрупко в зависимости от состава и условий эксплуатации. Примеси и легирующие элементы, блокирующие подвижность дислокаций, повышают склонность к хрупкому разрушению. Переход от вязкого к хрупкому разрушению может произойти при снижении температуры, увеличении объемности напряженного состояния (большие толщины, острые надрезы и трещиноподобные дефекты), повышении скорости деформирования.

Процесс хрупкого разрушения в зависимости от характера нагружения (статическое, циклическое) может включать три этапа: возникновение трещин, медленное (стабильное) их развитие и лавинообразное (нестабильное) распространение разрушения. Отдельные конструкции допускают к эксплуатации с трещиной или трещиноподобным дефектом при условии, что рабочие нагрузки относительно малы и не приводят к страгиванию трещин, или в случае непрерывного контроля за их медленным развитием и своевременного предупреждения лавинообразного разрушения.

В сварных соединениях низкоуглеродистых сталей наиболее склонны к хрупкому разрушению участки ЗТВ, нагреваемые до 200...500 °С. Их охрупчивание связано с деформационным старением.

В соединениях легированных сталей наибольшую степень охрупчивания получают участки ОШЗ на расстоянии ~0,1 мм от линии сплавления вследствие укрупнения зерна и образования твердых и малопластичных составляющих структуры в результате превращения аустенита (так называемое «трансформационное» охрупчивание). Одной из причин охрупчивания может быть сегрегация примесей на границах зерен, обусловливающая межкристаллитное (межзеренное) хрупкое разрушение. Эта причина характерна для многослойных сварных соединений некоторых легированных сталей, подверженных отпускному охрупчиванию.

Наиболее распространенным способом оценки склонности к хрупкому разрушению являются испытания серии образцов с V-образным надрезом на ударный изгиб при различных температурах (KCV^T). Критерий оценки – критическая температура перехода от вязкого к хрупкому разрушению $T_{кр}$, или порог хладноломкости. $T_{кр}$ соответствует температуре достижения определенной минимальной ударной вязкости, например равной 200 кДж/м^2. Чем выше $T_{кр}$, тем больше склонность металла к хрупкому разрушению. $T_{кр}$ служит для сравнительной оценки материалов, отличающихся составом и структурой. Применительно к испытанию сварных соединений V-образный надрез наносится в исследуемой зоне соединения: по оси сварного шва, зонам сплавления или термического влияния.

Сопротивление нестабильному распространению трещины, или трещиностойкость металла при статическом растяжении, оценивают по одному или нескольким критериям (ГОСТ 25.506–85):

– силовому – критическому коэффициенту интенсивности напряжений K_{I_c};

– деформационному – критическому раскрытию в вершине трещины δ_c;

– энергетическому – критическому значению J-интеграла J_{I_c} (работы пластической деформации и разрушения).

Для экспериментального определения критериев трещиностойкости применяют несколько типов образцов (рис. 1.54): с надрезами и наведенной в них трещиной.

Испытания выполняют статическим нагружением, в процессе которого регистрируют диаграмму $P - v$ или $P - f$, где v – смещение берегов надреза, фиксируемое специальными датчиками; f – прогиб в точке приложения P. В результате обработки диаграммы по специальной методике определяют критерий K_{I_c}, МПа $\sqrt{м}$.

Применительно к образцам со сварными соединениями рассмотренный выше метод испытаний используется для оценки трещиностойкости отдельных зон соединения, в которых наносится надрез и наводится усталостная трещина. Однако при испытаниях зоны сплавления и ЗТВ затруднительно точное изготовление надреза и возможен увод усталостной трещины из нужной зоны. Наиболее подходящими в этом случае являются образцы с К-образным сварным соединением, в которых надрез изготовляется со стороны вертикальной кромки.

Хрупкое разрушение сварных соединений с трещиноподобными дефектами, металл которых находится в хрупком состоянии (например, закаленная ЗТВ), становится возможным, если действительный коэффициент интенсивности напряжений у острия трещины K_I превысит критерий K_{I_c}. K_I может быть рассчитан по формулам линейной механики разрушения вида (рис. 1.55)

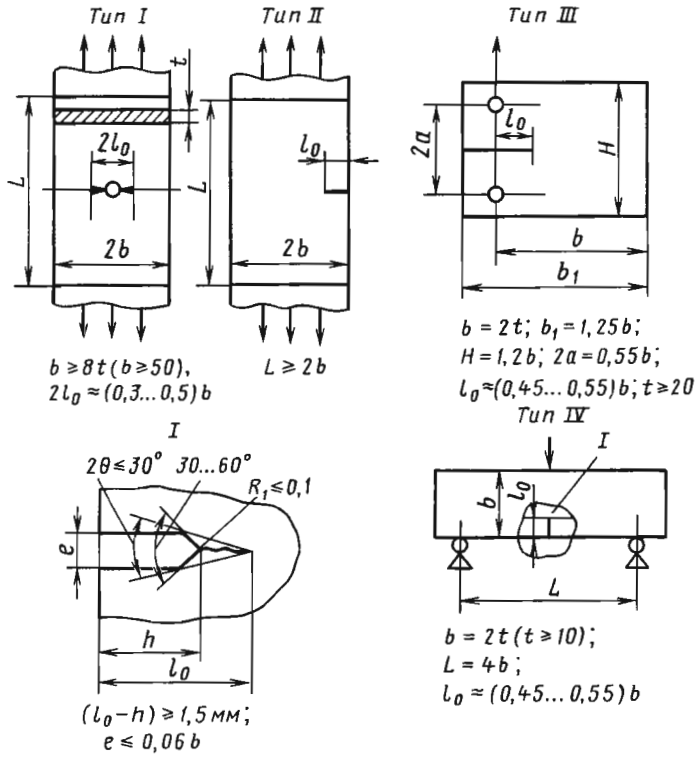


Рис. 1.54. Образцы для определения критериев трещиностойкости:
тип I – с центральным надрезом для осевого растяжения;
тип II – с боковым надрезом для осевого растяжения;
тип III – с боковым надрезом для внецентренного растяжения;
тип IV – с боковым надрезом для трехточечного изгиба

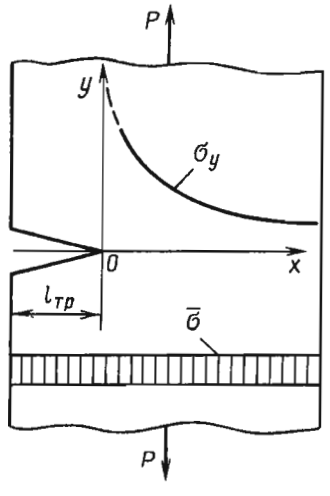


Рис. 1.55. Схема распределения напряжений σ_y около острия трещин

$$\sigma_{y(x>0)} = K_I\sqrt{(2\pi x)}$$

(K_I характеризует интенсивность нарастания локальных напряжений при приближении к острию трещины);

$$K_{I(x>0)} = Y_i\bar{\sigma}\sqrt{l_{тр}},$$

где Y_i – функция, учитывающая расположение и отношение длины трещиноподобного дефекта к толщине ($l_{тр}/\delta$) (табл. 1.17); $\bar{\sigma}$ – среднее напряжение по сечению от рабочей нагрузки.

1.17. Значения функции Y_i

Параметр	Y_i			
$l_{тр}/\delta$	0,1	0,2	0,3	0,4
Поверхностный дефект	2,11	2,43	2,65	2,76
Внутренний дефект	1,255	1,288	1,328	1,392

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бадьянов Б.Н.** Термодинамический метод расчета при разработке сварочных флюсов // Сварочное производство. 1997. № 11. С. 30 – 33.

2. **Винокуров В.А., Григорьянц А.Г.** Теория сварочных деформаций и напряжений. М.: Машиностроение, 1984. 280 с.

3. **Ерохин А.А.** Основы сварки плавлением. М.: Машиностроение, 1973. 447 с.

4. **Кох Б.А.** Основы термодинамики металлургических процессов. Л.: Судостроение, 1975. 232 с.

5. **Краткий** справочник физико-химических величин / Под ред. К.П. Мищенко и А.А. Равделя. Л.: Химия, 1967. 184 с.

6. **Макаров Э.Л.** Холодные трещины при сварке легированных сталей. М.: Машиностроение, 1981. 247 с.

7. **Компьютерное** проектирование и подготовка производства сварных конструкций: Учеб. пособие для вузов / Под ред. С.А. Куркина, В.М. Ховова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 464 с.: ил.

8. **Новожилов Н.М.** Основы металлургии дуговой сварки в газах. М.: Машиностроение, 1979. 231 с.

9. **Рыкалин Н.Н.** Расчеты тепловых процессов при сварке. М.: Машгиз, 1951. 296 с.

10. **Сварка** и свариваемые материалы: В 3-х т. Т. 1. Свариваемость материалов: Справ. изд. / Под ред. Э.Л. Макарова. М.: Металлургия, 1991. 528 с.

11. **Сварочные** материалы для дуговой сварки. В 2-х т. Т. 1. Защитные газы и сварочные флюсы / Под ред. Н.Н. Потапова. М.: Машиностроение, 1993. 768 с.

12. **Сварочные** материалы для дуговой сварки. В 2-х т. Т. 2. Сварочные проволоки и электроды / Под ред. Н.Н. Потапова. М.: Машиностроение, 1993. 768 с.

Глава 2

ВИДЫ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

2.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ. КЛАССИФИКАЦИЯ. ОБОЗНАЧЕНИЯ НА ЧЕРТЕЖАХ

Сварные конструкции изготовляются из различных материалов, свариваемых разнообразными способами. В зависимости от вида сварного соединения, марки и толщины конструкционного материала, способа сварки кромкам деталей, входящих в состав сварной конструкции, перед сваркой придают определенную форму (скос, отбортовка и пр.). Размеры конструктивных элементов (КЭ), подготовленных кромок и сварных швов в значительной мере определяют технологические свойства сварного соединения, его качественные показатели, производительность сварочных работ, расход сварочных материалов и электроэнергии.

Типы сварных швов, размеры КЭ подготовленных кромок и швов устанавливаются комплексом государственных стандартов. Эти стандарты охватывают сварные соединения из углеродистых и легированных конструкционных сталей, алюминия и алюминиевых сплавов, меди и медно-никелевых сплавов, свариваемых наиболее распространенными в промышленности способами сварки: ручной дуговой; автоматической и полуавтоматической (механизированной) под флюсом и в защитных газах; электрошлаковой и контактной (ГОСТ 2601–84).

Стандарты на типы сварных швов устанавливают рациональную номенклатуру типов сварных швов, оптимальные размеры КЭ подготовленных кромок и швов, что позволяет существенно уменьшить количество наплавленного металла, снизить трудоемкость сварочных работ, сократить расход технологических сварочных материалов и электроэнергии.

Классификация сварных соединений может быть выполнена по нескольким признакам.

Надо различать следующие виды сварных соединений, выполненных различными способами с учетом свойств материалов:

– автоматической и механизированной сваркой под флюсом (ГОСТ 8713–79);

– ручной дуговой сваркой – РДС (ГОСТ 5264–80*);

– электрошлаковой сваркой (ГОСТ 15164–78*);

– дуговой сваркой в защитном газе (ГОСТ 14771–76*);

– соединения алюминия и алюминиевых сплавов, выполняемые дуговой сваркой (ГОСТ 14806–80*);

– швы сварных соединений из коррозионно-стойких двухслойных сталей (ГОСТ 16098–80*), сварные соединения, выполняемые контактной сваркой (ГОСТ 15878–79*);

– сварные электрозаклепочные соединения (ГОСТ 14776–79);

– паяные соединения (ГОСТ 19249–73*);

– сварные соединения, сварные арматуры железобетонных изделий и конструкций (ГОСТ 14098–91).

По конструктивному оформлению сварные соединения разделяют на стыковые, угловые, тавровые и нахлесточные.

По форме подготовки кромок различают следующие виды сварных соединений:

– со скосом и без скоса кромок;

– с одно- и двусторонним скосом кромок;

– с прямолинейным скосом кромок;

– с криволинейным скосом кромок;

– с ломаным скосом кромок;

– с комбинированным скосом кромок;

– с симметричным и несимметричным скосом кромок;

– с остающейся или съемной подкладкой;

– замковое соединение;

– с отбортовкой кромок.

Вид сварного соединения и форма подготовки кромок определяются характером сварной конструкции, степенью ее ответственности и технологией изготовления. В качестве примера на рис. 2.1 приведена конструкция стыка

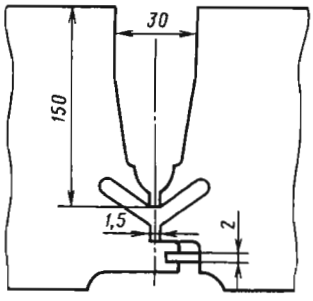


Рис. 2.1. Замковое соединение

кольцевого соединения вала ротора турбины с замковым соединением. Посадочная ступенька у собираемых деталей и упорное кольцо из малоуглеродистой стали толщиной 2 мм обеспечивают высокую точность сборки и необходимую податливость стыка при сварке. Это весьма важно для предупреждения образования трещин в соединении. Притупление разделки шва выбрано, исходя из условия получения полного провара корня шва. Специальные наклонные каналы уменьшают жесткость кромок при выполнении валика в корне шва и тем самым предотвращают образование в нем трещин, а также обеспечивают лучшие условия для ультразвукового контроля сварного соединения.

Сварные швы в различных сварных соединениях отличаются не только формой их поперечного сечения, но и расположением по отношению к направлению действующей силы, характером наружной поверхности, размерами и расположением по длине свариваемой кромки. Так, швы, выполненные вдоль действующей силы, называются продольными, а поперек – поперечными. Швы, находящиеся под углом к направлению действующей силы, именуются косыми. В соединениях внахлестку продольные швы называются боковыми или фланговыми, а поперечные – лобовыми. По характеру наружной поверхности швы могут быть выпуклые и плоские, а угловые швы кроме того и вогнутые.

Выбор способа подготовки кромок обусловливается также толщиной материала, требованиями к качеству шва и экономическими соображениями.

Для сварки соединений малых толщин разделка кромок обычно не делается. Повышение мощности дуги за счет увеличения силы сварочного тока при сварке как плавящимся, так и неплавящимся электродом позволяет значительно расширить границы диапазона толщин материала, свариваемых без разделки кромок.

Сварка встык без разделки кромок обладает рядом преимуществ, например при этом требуется меньшее количество присадочной проволоки, ускоряется процесс сварки, уменьшаются деформации. При автоматической и механизированной сварке плавящимся электродом к качеству подготовки кромок предъявляются повышенные требования. При сварке встык материала разной толщины более толстые кромки должны скашиваться до толщины другой кромки в целях обеспечения более равномерного нагрева и получения высококачественного сварного соединения.

Подготовку кромок под сварку выполняют механической обработкой (на строгальном или токарном станке, фрезеровкой, рубкой пневматическим или ручным зубилом, крейцмейселем и т.п.). Подготовку кромок деталей, изготовленных из малоуглеродистых сталей, например марок Ст1, Ст2, Ст3, разрешается проводить также газовой резкой с последующей механической зачисткой поверхности реза до получения чистого металла.

При подготовке кромок газовой резкой на деталях из сталей, содержащих > 0,3 % С (марки Ст5 и др.), поверхность реза должна быть механически обработана на глубину ≥ 3 мм. Правильность подготовки кромок под сварку можно контролировать шаблоном.

К качеству подготовки кромок для стыковых соединений предъявляются более жесткие требования, чем к качеству подготовки кромок для других видов соединений. Те или иные типы сварных соединений и размеры КЭ для подготовки кромок должны выбираться в зависимости от условий, в которых будут работать сварная конструкция и отдельные сварные соединения в ней, и от технологических возможностей выполнения требований к сварным швам, выдвигаемых при изготовлении конструкции. Определяя форму скоса кромок, особенно для сварных элементов большой толщины, одновременно следует удовлетворить требование получения минимального количества наплавленного металла, а также возможности перемещения сварочной горелки на нужную глубину по высоте сварного шва и придания ей необходимого угла наклона для прогрева свариваемых кромок.

Изображение швов сварных соединений на чертежах (*ГОСТ 2.312–72*). Швы сварного соединения независимо от способа сварки ус-

ловно изображают следующим образом: видимый – сплошной основной линией; невидимый – штриховой линией.

Видимую одиночную сварную точку безотносительно к способу сварки условно помечают знаком «+», который выполняют сплошными основными линиями. Невидимые одиночные точки не изображают.

От изображения шва или одиночной точки проводят линию-выноску, заканчивающуюся односторонней стрелкой. Линию-выноску предпочтительно вести от изображения видимого шва. При условном обозначении шва вспомогательные знаки выполняют сплошными тонкими линиями.

Вспомогательные знаки должны быть одинаковой высоты с цифрами, входящими в обозначение шва. Структура условного обозначения стандартного шва или одиночной сварной точки приведена на рис. 2.2.

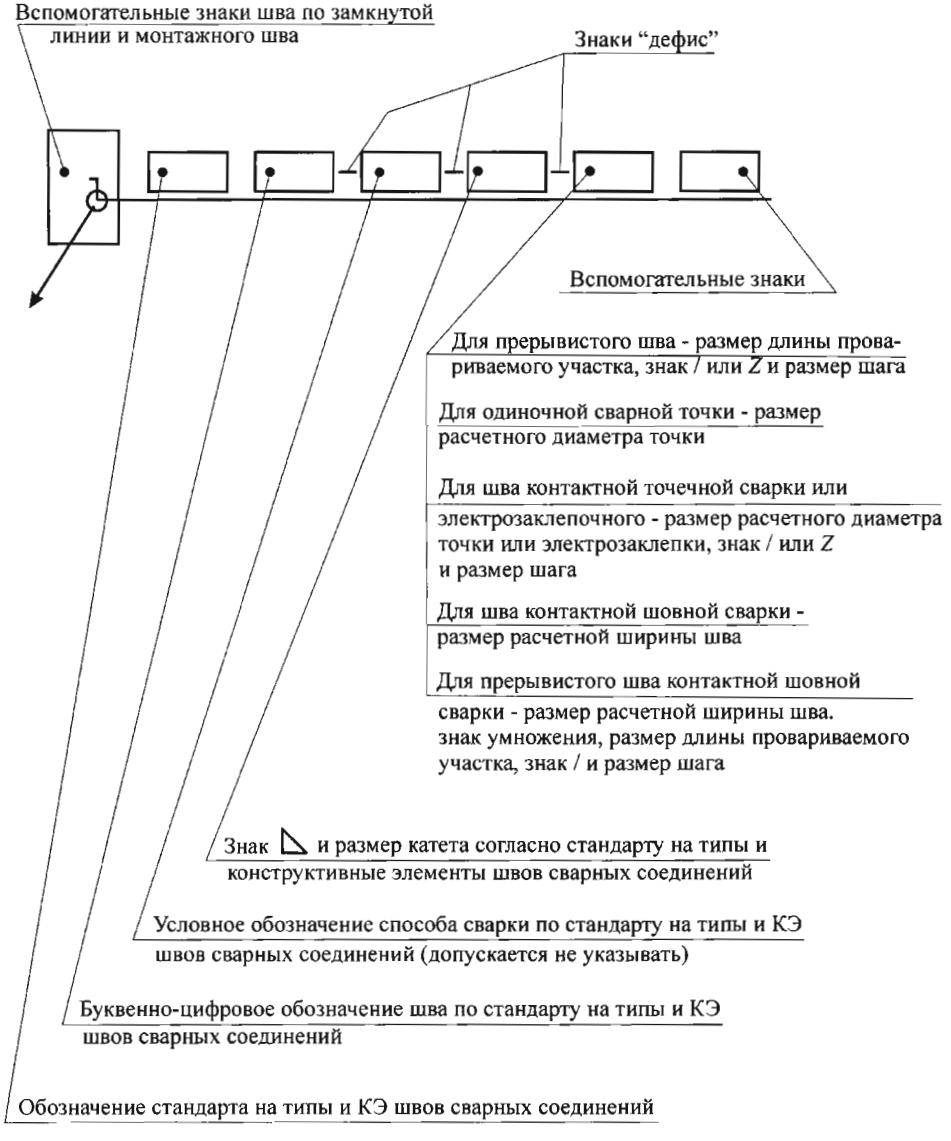


Рис. 2.2. Схема обозначения сварных швов

2.2. РУЧНАЯ ДУГОВАЯ СВАРКА

Основные типы и КЭ сварных соединений, выполняемых РДС, регламентированы в ГОСТ 5264–80.

Этот стандарт распространяется на швы сварных соединений из углеродистых и низколегированных сталей, а также сплавов на железоникелевой и никелевой основе, выполняемых РДС металлическим плавящимся электродом во всех пространственных положениях, и устанавливает КЭ их основных типов.

Стандарт не распространяется на швы сварных соединений труб и швы, образуемые методом сварки глубокого проплавления.

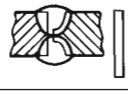
Классификация сварных соединений по конструктивному оформлению и форме подготовки кромок в государственном стандарте соответствует приведенной в разд. 2.1. Каждый тип сварного соединения имеет свое условное обозначение: стыковое – С, угловое – У, тавровое – Т, нахлесточное – Н. Для РДС имеются 32 основных типа стыковых сварных соединений, 9 угловых, 8 тавровых и 2 типа нахлесточных соединений. При обозначении шва на чертеже указывается соответствующий индекс шва, полностью определяющий его конструкцию и форму подготовки кромок. Для каждого типа шва и формы скоса кромок даются рекомендации по диапазону толщин свариваемых деталей.

Наиболее характерно для сварки соединение встык, которое может выполняться с применением различных форм подготовки свариваемых кромок, при различных формах поперечного сечения сварного шва.

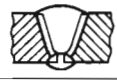
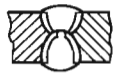
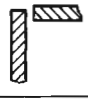
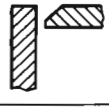
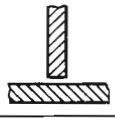
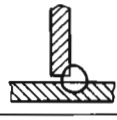
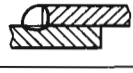
При тонких листах (1 – 4 мм) применяется соединение встык с отбортовкой кромок (С1 в табл. 2.1) или одностороннее соединение встык без скоса кромок (С2). При небольших толщинах свариваемых листов могут применяться односторонние стыковые швы без скоса кромок, но с подкладкой (С5) или двусторонние стыковые швы (С13, С26). Для обеспечения полного провара прибегают к скосу одной или двух кромок. По форме поперечного сечения стыковые швы могут быть: У-, Х- или К-образные. При этом скос кромок может быть как прямо-, так и криволинейный, а Х- и К-образные швы могут быть как симметричные (С26), так и несимметричные.

Некоторые типы сварных швов приведены в табл. 2.1.

2.1. Некоторые виды сварных соединений для РДС

Подготовка кромок	Вид сварного шва	Условное обозначение	Рекомендуемые толщины, мм
		С1	1…4
		С2	
		С5	
		С7	2…5
		С9	3…60
		С11	
		С13	15…100
		С16	30…120

Окончание табл. 2.1

Подготовка кромок	Вид сварного шва	Условное обозначение	Рекомендуемые толщины, мм
		С23	15…100
		С24	
		С26	30…175
		У1	1…4
		У4	1…6
		У7	3…60
		Т1	2…40
		Т3	
		Т5	30…120
		Н1	2…60
		Н2	

В сварных конструкциях могут возникать трещины, вызванные угловыми деформациями, возникающими при сварке стыковых швов большой толщины. При сварке У-образных швов большой толщины вследствие необходимости применять многослойные швы каждый слой будет вызывать в корне шва напряжения растяжения. Эти напряжения, суммируясь, накапливаются, если же металл шва оказывается недостаточно пластичным, а ширина шва в корне мала, то при значительной толщине свариваемых плит в корне шва может возникнуть трещина. Для предотвращения появления подобных трещин целесообразно применять Х-образные швы либо проводить промежуточный отпуск после выполнения части полной

толщины шва. Условия могут ухудшиться, если применять остающиеся стальные подкладки. В этом случае появляются трещины типа «усов».

Остающиеся подкладки (С5) и замковые соединения (С6) удобны для формирования корня шва, однако при этом возникает опасность щелевой коррозии и образования трещин в зоне подкладки или замка.

Односторонний скос кромок в ряде случаев выполняют при сварке соединений из разнородных металлов. При этом должны приниматься технологические меры для обеспечения прогрева вертикальной кромки, чтобы избежать несплавления с кромкой.

Криволинейный (С23) или ломаный (С24) скос кромок обычно применяется для сварки деталей большой толщины для уменьшения количества наплавляемого металла. Выполнение криволинейного скоса более трудоемко.

Величина притупления скоса кромок при РДС 1...3 мм для обеспечения полного проплавления.

Угловые швы в конструкциях во многих случаях являются соединительными, т.е. не предназначены для передачи сил, так как из-за высокой концентрации напряжений в корне таких швов быстро развиваются трещины, особенно при циклическом нагружении. Эти швы также могут быть одно- и двусторонними, с предварительным скосом кромок и без него (У7, У4).

В ГОСТ 11534–75* устанавливаются основные типы, КЭ и размеры сварных соединений конструкций из углеродистых и низколегированных сталей, выполняемых РДС плавящимся электродом во всех пространственных положениях при толщине свариваемого металла до 60 мм включительно с расположением свариваемых деталей под острыми и тупыми углами. Стандарт не относится к сварным соединениям трубопроводов и сварным швам, выполняемым сваркой с глубоким проплавлением.

Тавровые соединения широко применяются в сварных конструкциях. Они могут выполняться без разделки кромок (Т1, Т3) и с предварительным скосом их. Для ответственных конструкций при большой толщине соединяемых элементов разделка кромок обязательна, так как позволяет получить проплавление по всему поперечному сечению (Т5).

Нахлесточные соединения обычно осуществляют без скоса кромок. Они, как правило, выполняются двусторонними (Н2), так как односторонние (Н1) отличаются низкой работоспособностью в эксплуатации.

Для каждого типа сварного соединения в действующем стандарте приводятся все размеры скоса кромок и основные габаритные размеры сварного шва. На рис. 2.3 в качестве примера показаны размеры для стыкового шва С26. Размеры задаются в зависимости от толщины свариваемых деталей. Так, при толщине $S = S_1 = 50...54$ мм размер $e = 29$ мм, а размер $g = 0{,}5$ мм при допустимом отклонении +2...–0,5 мм.

2.3. СВАРКА ПОД ФЛЮСОМ

Основные типы и КЭ швов сварных соединений из углеродистых и низколегированных сталей, а также сплавов на железоникелевой и никелевой основах, выполняемых сваркой под флюсом, устанавливает ГОСТ 8713–79.

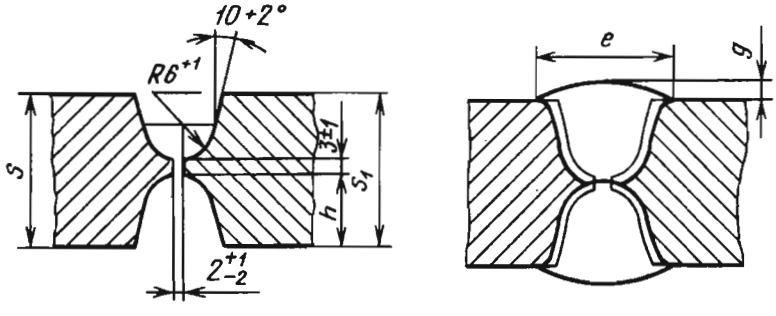


Рис. 2.3. Размеры стыкового шва С26

Устанавливаются следующие обозначения способов сварки:

АФ – автоматическая под флюсом на весу, без применения подкладок, подушек и подварочного шва;

АФф – автоматическая под флюсом на флюсовой подушке;

АФм – автоматическая под флюсом на флюсомедной подкладке;

АФо – автоматическая на остающейся подкладке;

АФп – автоматическая на медном ползуне;

АФш – автоматическая с предварительным наложением подварочного шва;

АФк – автоматическая с предварительной подваркой корня шва;

МФ – механизированная на весу;

МФо – механизированная на остающейся подкладке;

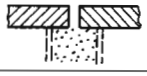
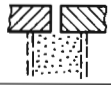
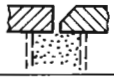
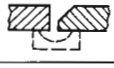
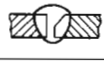
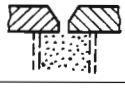
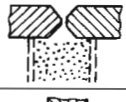
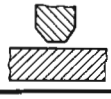
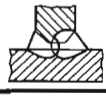
МФш – механизированная с предварительным наложением подварочного шва;

МФк – механизированная с предварительной подваркой корня шва.

Основные типы швов сварных соединений соответствуют указанным в разд. 2.2 для ручной дуговой сварки. Большинство положений, рассмотренных в разд. 2.2, относится и к сварным соединениям, выполняемым автоматической и механизированной сваркой под флюсом. Обозначения основных типов сварных соединений здесь те же. Однако число соединений каждого типа отличается от приведенных в разд. 2.2. Так, стыковых соединений здесь имеется 31 тип, угловых 4, тавровых 7, нахлесточных 2 типа. Кроме того, указывается, какие швы рекомендуется выполнять автоматической и механизированной сваркой, на флюсовой подушке, на съемной или остающейся подкладке.

Некоторые типы сварных швов, выполняемых сваркой под флюсом, отличающиеся от указанных в разд. 2.2 для РДС, приведены в табл. 2.2.

2.2. Некоторые виды сварных соединений при сварке под флюсом

Подготовка кромок	Вид шва	Обозначение способа сварки	Обозначение шва	Рекомендуемые толщины, мм
		АФф	С4	2…10
		АФм		3…12
		АФф	С29	2…32
		АФф	С9	8…20
		АФм		
		АФф	С33	14…30
		АФо	С35	16…50
		АФф	С38	18…60
		АФ, МФ	Т8	16…40

Следует отметить, что форма швов соединений встык при автоматической сварке остается примерно той же, что и при ручной, но размеры КЭ подготовки кромок несколько изменяются. Сопоставление приведенных выше данных свидетельствует о том, что при автоматической сварке увеличивается размер притупления на кромках со скосом. Это связано с тем, что сварка под флюсом проводится при значительно большей тепловой мощности, в результате чего достигается проплавление свариваемых деталей на значительно бóльшую глубину.

Так, использование большой тепловой мощности при сварке под флюсом может вызвать прожоги в шве и нарушить его формирование. Поэтому применение флюсовых подушек и съемных или остающихся подкладок, приведенных для стыковых швов в табл. 2.3, позволяет исключить прожоги при обеспечении гарантированного равномерного проплавления в корне шва. В то же время применение мощного источника теплоты позволяет выполнять швы с глубоким проплавлением при значительной толщине свариваемых элементов, например тавровые соединения типа Т8 (см. табл. 2.2.).

Для каждого типа сварного соединения в ГОСТ 8713–79 даны все размеры скоса кромок и основные габаритные размеры сварного шва.

В ГОСТ 1153–75* указаны основные типы, КЭ и размеры соединений конструкций из углеродистых и низколегированных сталей, выполняемых автоматической и механизированной дуговой сваркой под флюсом с расположением свариваемых деталей под острыми и тупыми углами, приведены требования для соединения разнотолщинных элементов.

2.4. СВАРКА В ЗАЩИТНЫХ ГАЗАХ

Сварка в защитных газах применяется для конструкций как из цветных металлов и сплавов, так и из сталей и сплавов различных классов. ГОСТ 14771–76* устанавливает основные типы и размеры сварных соединений из сталей, а также сплавов на железоникелевой и никелевой основах, выполняемых дуговой сваркой в защитных газах.

Согласно ГОСТ 14771–76, принято следующее обозначение способов сварки:

ИН – в инертных газах неплавящимся электродом без присадочного металла;

ИНп – то же, с присадочным металлом;

ИП – в инертных газах и их смесях с углекислым газом и кислородом плавящимся электродом;

УП – в углекислом газе и его смеси с кислородом плавящимся электродом.

По этому стандарту основные виды сварных соединений аналогичны приведенным выше для РДС и автоматической сварки под флюсом, поэтому графическое представление различных типов сварных соединений для данного способа сварки нами не рассматривается. Здесь используются 28 типов стыковых соединений, 9 угловых, 6 тавровых и 2 нахлесточных. В ГОСТ 14771–76* указаны основные конструктивные размеры и предельные отклонения всех типов сварных соединений. В приложениях к нему даны рекомендуемые значения катетов угловых швов в зависимости от толщины более толстого из свариваемых элементов и предела текучести свариваемой стали.

Виды сварных соединений конструкций из алюминия и алюминиевых деформируемых термически неупрочняемых сплавов при толщине кромок свариваемых деталей 0,8… 60,0 мм включительно см. в ГОСТ 14806–80*.

При этом принимаются следующие обозначения сварки:

ручная в защитных газах неплавящимся металлическим электродом – однофазная, обозначается Рн-З;

автоматическая в защитных газах неплавящимся металлическим электродом – однофазная, обозначается Ан-З;

автоматическая в защитных газах неплавящимся электродом – трехфазная, обозначается Ан-Зтф;

автоматическая в защитных газах плавящимся электродом – однодуговая, обозначается А-З;

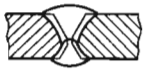
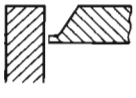
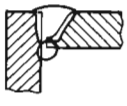
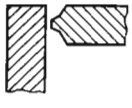
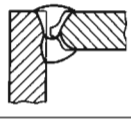
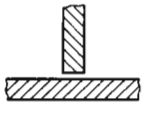
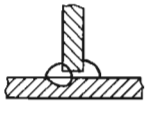
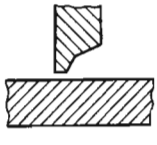
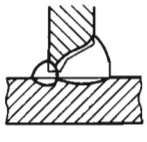
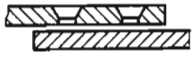
полуавтоматическая (механизированная) в защитных газах плавящимся электродом, обозначается П-З;

автоматическая по флюсу нерасщепленным электродом или двухэлектродная, обозначается А-Ф.

Так же, как и для других способов сварки, здесь различают стыковые, угловые, тавровые и нахлесточные соединения. Стыковых 27 типов соединений, угловых 14, тавровых 12 и нахлесточных 5. В большинстве случаев форма подготовки кромок под сварку всех видов швов

аналогична приведенным выше для РДС и сварки под флюсом. Некоторое различие имеется в форме разделки кромок. Если при сварке стальных элементов конструкций углы разделки находятся в пределах 13…50°, то для алюминиевых конструкций – в пределах от 30…35 до 60°, что обусловлено различными теплофизическими свойствами материалов. Некоторые специфические виды сварных соединений алюминиевых сплавов приведены в табл. 2.3.

2.3. Некоторые характерные виды сварных соединений алюминиевых сплавов

Подготовка кромок	Вид шва	Обозначение способа сварки	Обозначение шва	Рекомендуемые толщины, мм
		Рн-З	С1	0,8…2,0
		А-З, П-З	С4	4,0…12,0
		Ан-З	С5	0,8…16,0
		А-З		4,0…8,0
		Ан-З	С6	0,8…16,0
		А-З		4,0…8,0
		Рн-З, П-З	С9	5,0…20,0
		Рн-З	С25	12…30
		Ан-З		12…60
		Ан-Зтф		32…60
		Рн-З, Ан-З, А-З	У8	16…30
		Рн-З, П-З	У-14	32…60
		Рн-З	Т5	1,5…20,0
		П-З		4,0…20,0
		Рн-З, П-З	Т9	16…30
		Рн-З, П-З	Н4	5,0…20,0

Тонкостенные элементы конструкций из алюминиевых сплавов достаточно часто выполняют с одно- или двусторонней отбортовкой кромок (С1, С2), так как при этом значительно снижается вероятность получения прожога и, как правило, не требуется применение специальных сборочных приспособлений. В связи с высокой жидкотекучестью алюминиевых сплавов и низкой температурой плавления при сварке всегда имеется опасность прожога или неравномерного формирования корня шва, что важно не допустить, поэтому часто используются остающиеся (С4 , С5, С9) или съемные (С6) подкладки. При двусторонней сварке с симметричным или несимметричным (С25) скосом кромок тщательно контролируется обеспечение провара корня шва.

Это же требование относится к угловым швам (У8, У14), в которых предусматривается либо разделка корня шва после первого прохода с последующей подваркой корня, либо двусторонняя разделка и заварка шва.

Тавровые соединения могут быть одно- и двусторонними, без предварительного скоса кромок, с прямолинейным по ломаной линии (Т9) или криволинейным скосом кромок. Для уменьшения деформаций возможно применение двусторонних шахматных швов (Т5). При выполнении проплавных соединений в отверстиях следует предусматривать зенковку для получения надежного провара (Н4).

Надо отметить, что, хотя в ГОСТ 14806–80 предусмотрены максимальные толщины свариваемых элементов 60 мм, на практике известны случаи сварки деталей толщиной ≥ 400 мм. В этих случаях подготовка кромок проводится по специальным отраслевым стандартам.

Так же, как и для других способов сварки, для сварки в защитных газах в ГОСТ 14806–80* для каждого типа сварного шва указаны все основные размеры скоса кромок и размеры шва. В некоторых видах швов односторонних стыковых соединений, выполняемых на весу, а также угловых, тавровых и нахлесточных соединений, приведенных в этом стандарте, допускается непровар корня шва.

Кромки свариваемых деталей должны быть обработаны механическим путем. Значение параметра Rz – шероховатости обработанных кромок – не должно быть > 40 мкм по ГОСТ 2789–73*. При сварке швов на съемной подкладке с канавкой для формирования корня шва размеры съемной подкладки устанавливаются при проектировании, но ≥ 6 мм для толщины и ≥ 30 мм для ширины.

Для обеспечения направленности подачи присадочной проволоки в сварочную ванну при сварке в защитных газах неплавящимся электродом при выполнении стыковых соединений без скоса кромок допускается снятие фаски размером 1 × 45 или 1,5 × 45° с верхних кромок обеих деталей.

При сварке швов стыковых соединений деталей неодинаковой толщины, когда разность не превышает величин, указанных в табл. 2.4, подготовка кромок под сварку проводится так же, как и для деталей одинаковой толщины. В этом случае КЭ подготовки кромок и размеры выполненного шва назначаются по меньшей толщине свариваемых деталей.

Если разность толщин свариваемых кромок превышает указанные величины, то на детали большей толщины должен быть сделан скос с одной или с двух сторон до толщины более тонкого листа длиной L (соответственно рис. 2.4, *а* и *б*).

2.4. Допускаемая разность толщин свариваемых кромок

Толщина наиболее тонкой детали, мм	Допускаемая наибольшая разность толщин свариваемых кромок, мм
0,8…4	0,5
5…10	1,2
12…25	2,0
26…54	3,0

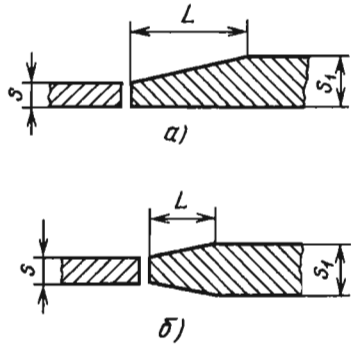


Рис. 2.4. Подготовка кромок разнотолщинных элементов

Длина L определяется для одностороннего превышения кромок по формуле

$$L = 5(s_1 - s)^{+6}$$

и для двустороннего превышения кромок по формуле

$$L = 2{,}5(s_1 - s)^{+3}.$$

При двухэлектродной автоматической сварке по флюсу ширина шва стыкового соединения увеличивается на величину расщепления электродов. При сварке двусторонних швов необходимо удаление корня шва ранее выполненных проходов до чистого металла механическим путем. Во всех случаях допускается удаление проплавов сварных швов механическим путем заподлицо с основным материалом; врезание в основной материал при этом не допускается.

Предельные отклонения по размеру выпуклости швов даны только для нижнего положения шва; при ином положении шва предельные отклонения могут быть увеличены на 2 мм для толщин до 25 мм и на 3 мм для толщин 26...60 мм.

Величина катета для расчетных швов тавровых и нахлесточных соединений устанавливается конструктором при проектировании и должна указываться на чертеже. При сварке швов тавровых и нахлесточных соединений в нижнем положении величина приращения катета по горизонтальному размеру не должна превышать величины допуска на катет шва.

При определении катета шва, имеющего выпуклую форму, за катет шва принимается меньший катет треугольника, вписанного в сечение шва. В этом случае выпуклость шва допускается:

для швов, выполняемых в нижнем положении, до 2 мм;

для швов, осуществляемых в прочих положениях, до 3 мм.

При определении катета шва, имеющего вогнутую форму, за катет шва принимается катет вписанного равнобедренного треугольника. В этом случае приращение катета допускается при любом положении шва до 3 мм.

2.5. ДРУГИЕ СВАРНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

Рассмотренные в разд. 2.2 – 2.4 виды сварных соединений наиболее широко применяются в различных конструкциях. Однако в ряде отраслей машиностроения и строительстве имеются специфические КЭ и применяются особые материалы, при сварке которых необходима особая геометрия сварных соединений. Это относится к некоторым конструкциям авиационной и космической техники, конструкциям химического и транспортного машиностроения, ядерным установкам, строительным конструкциям и ряду других. Во многих случаях специфика сварных соединений отражается в отраслевой технической документации. Рассмотрим некоторые виды сварных соединений, имеющих межотраслевое применение и нормированных государственными стандартами.

Швы сварных соединений из двухслойных коррозионно-стойких сталей. Конструкция этих сварных соединений отличается большей сложностью, чем указанные выше. Как правило, эти соединения относятся к категории высокоответственных. Основные типы и КЭ швов сварных соединений из двухслойной коррозионно-стойкой стали по ГОСТ 10885–85*, выполняемых дуговой и электрошлаковой сваркой, указаны в ГОСТ 16098–80*, не распространяющемся на швы сварных соединений из трехслойной стали, других видов двухслойной стали (износостойкой и др.), а также соединений двухслойной коррозионно-стойкой стали с углеродистой, низко- или высоколегированной сталью.

Приняты следующие условные обозначения способов сварки:

Р – ручная дуговая сварка металлическим покрытым электродом;

АФ – автоматическая дуговая сварка под флюсом без применения подкладок;

АФф – автоматическая дуговая сварка под флюсом на флюсовой подушке;

З – дуговая сварка в защитных газах;

Ш – электрошлаковая сварка.

Обозначение способа сварки представлено в виде дроби, числитель которой соответствует способу сварки основного слоя, а знаменатель – плакирующего.

В ГОСТ 16098–80 рассмотрены 24 типа стыковых сварных соединений, 11 угловых и 5 тавровых соединений. Нахлесточные соединения здесь не рекомендуются. На рис. 2.5 – 2.7 приведены примеры стыкового, углового и таврового соединений элементов конструкций из двухслойных сталей.

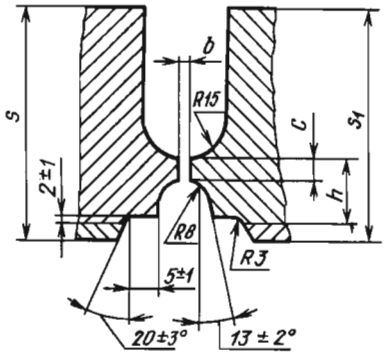


Рис. 2.5. Разделка кромок стыкового сварного соединения двухслойной стали (С21)

При стыковой сварке допускается смещение кромок относительно друг друга на величину до 10 % от толщины листа, но ≤ 3 мм со стороны основного слоя и не более половины толщины плакирующего. При стыковой сварке листов неодинаковой толщины разность толщин листов не должна превышать величины 1…4 мм в зависимости от толщины деталей. Подготовка кромок под сварку должна проводиться так же, как для листов одинаковой толщины; КЭ подготовленных кромок и размеры выполненного шва сварного соединения выбирают по большей толщине. Листы должны выравниваться по границе основного и плакирующего слоев или по наружной поверхности плакирующего слоя.

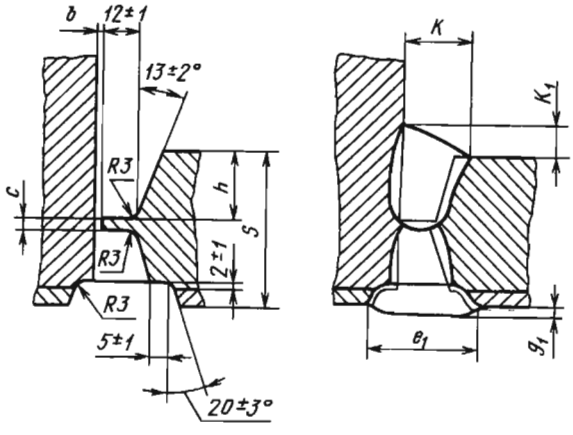


Рис. 2.6. Разделка кромок и сварное угловое соединение двухслойной стали (У6)

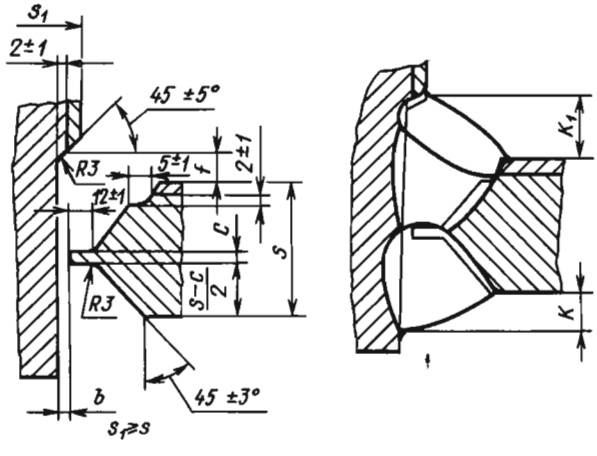


Рис. 2.7. Разделка кромок и сварное тавровое соединение двухслойной стали (Т5)

В качестве приложения к ГОСТ 16098–80* изложены рекомендации по подготовке кромок элементов конструкций из двухслойных сталей, расположенных друг относительно друга под острыми или тупыми углами.

Сварные соединения арматуры железобетонных конструкций. Контактная и ванная сварка. Эти соединения рассматриваются в ГОСТ 14098–91, который распространяется на сварные соединения, выполняемые с помощью контактной и дуговой ванной сварки в инвентарных формах при изготовлении ненапрягаемой арматуры железобетонных изделий и конструкций, а также при монтаже арматуры монолитного железобетона и сборных железобетонных конструкций.

Стандарт не распространяется на сварные соединения, выполняемые с дополнительными конструктивно-технологическими элементами в виде стальных накладок и подкладок, а также на сварные соединения элементов закладных деталей.

Для получения соединений этого типа могут использоваться следующие способы.

Стыковая контактная сварка – контактная сварка, при которой стержни свариваются по всей поверхности их соприкосновения (обычно по торцам); соединение встык – сварное соединение, где стержни соединяются по своим торцовым поверхностям (торцами).

Точечная сварка – контактная сварка, когда соединяемые стержни свариваются в отдельных точках.

Ванная сварка – процесс, при котором расплавление торцов стыкуемых стержней происходит в основном за счет теплоты ванны жидкого металла. Ванная механизированная сварка – процесс ванной сварки, отличающийся тем, что подача сварочной проволоки к месту соединения проводится автоматически, а управление дугой или держателем – вручную. Ванная многоэлектродная сварка – процесс ванной сварки, при котором электродный материал в виде гребенки электродов подается к месту соединения вручную; ванная одноэлектродная сварка – процесс ванной сварки, заключающийся в том, что электродный материал в виде одиночного электрода подается к месту соединения вручную.

Инвентарная форма – приспособление многоразового (медь или графит) либо одноразового (керамика) использования, обеспечивающее формирование расплавленного металла и допускающее легкое удаление после сварки.

Осадка (H, мм) стержней в крестообразных соединениях – величина вдавливания стержней друг в друга на участках, нагретых при сварке до пластического состояния.

Сварные соединения подразделяются на следующие типы:

1) крестообразные, выполняемые контактной сваркой (КТ-2, КТ-3);

2) стыковые, получаемые:

– контактной сваркой (КС-О, КС-Р, КС-М);

– ванной механизированной сваркой под флюсом в инвентарных формах (ВП-Г, ВП-В);

– ванной многоэлектродной сваркой в инвентарных формах с углублением для образования выпуклости шва [ВМ-1, ВМ-2 (3)];

– ванной одноэлектродной сваркой в инвентарных формах с гладкой внутренней поверхностью (ВО-Б).

Указанные типы соединений имеют условные графические обозначения на чертежах. Так, соединение ВМ-2, представляющее собой двухрядное соединение стержней, выполняемое ванной многоэлектродной сваркой в инвентарных формах (рис. 2.8), имеет на чертежах графическое изображение, соответствующее рис. 2.9.

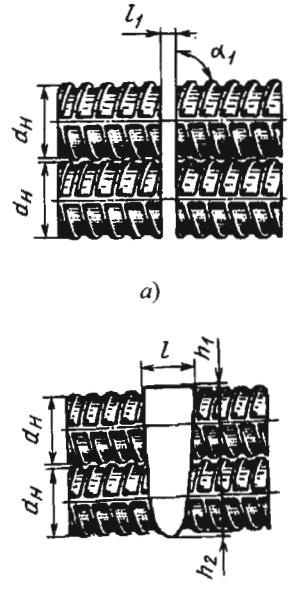


Рис. 2.8. Вид подготовки кромок (*а*) и сварного соединения (*б*) ВМ-2

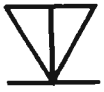


Рис. 2.9. Условное графическое изображение соединения ВМ-2 на чертеже

Технические требования и методы испытаний сварных соединений арматуры железобетонных изделий и конструкций должны соответствовать ГОСТ 10922–75.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Государственные** стандарты Союза ССР. Сварка, пайка и термическая резка металлов. М.: Изд-во стандартов, 1991. Ч. 1 – 3.

2. **Инструкция** по сварочным и наплавочным работам при ремонте тепловозов, электровозов, электропоездов и дизель-поездов. М.: МПС, 1996. 457 с.

3. **Куркин С.А., Николаев Г.А.** Сварные конструкции. Технология изготовления, автоматизация и контроль качества в сварочном производстве. М.: Высш. шк., 1991. 398 с.

4. **Окерблом Н.О.** Конструктивно-технологическое проектирование сварных конструкций. М. – Л.: Машиностроение, 1964. 420 с.

5. **Чернаков А.С., Богданов Ф.А.** Аргоно-дуговая сварка и ее применение. Л.: Судпромгиз, 1958. 219 с.

Глава 3

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

3.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Задача создания оригинальных машин или механизмов, предназначенных для выполнения каких-либо новых функций или известных функций, но новым способом, в практике проектирования возникает довольно редко. В большинстве случаев создаваемая конструкция представляет собой итог работы проектировщиков нескольких поколений. Тем не менее, всякое вновь проектируемое изделие имеет элемент оригинальности. Разнообразие назначений, форм и размеров сварных конструкций, а также прогресс техники и технологии не позволяют конструктору просто повторять готовые решения. Поэтому проектирование – творческая задача, не исключающая разумной конструктивной преемственности.

Оптимальны такие конструктивные формы, которые отвечают служебному назначению изделия, обеспечивают надежную работу в пределах заданного ресурса, позволяют изготовить изделие при минимальных затратах материалов, труда и времени. Эти признаки определяют понятие «технологичность конструкции». Кроме того, необходимо, чтобы конструкция отвечала требованиям технической эстетики. Они должны соблюдаться на всех стадиях проектирования конструкции и в процессе ее изготовления.

На этапе эскизного проектирования выявляют принципиальную возможность обеспечения заданных служебных свойств изделия при различных вариантах конструктивного оформления и оценивают их технологическую целесообразность.

Генеральное конструктивное оформление обычно предопределяется предшествующим опытом создания изделий данного типа. Напротив, выбор формы и размеров отдельных элементов конструкции зависит от параметров и особенностей данной проектируемой машины. При проектировании этих элементов одновременно с выбором материала и метода получения заготовок конструктор назначает расположение сварных соединений, их тип и способ сварки. Таким образом, основные вопросы технологичности сварных конструкций решаются уже на первом этапе проектирования путем умелого использования богатых возможностей компоновки из отдельных заготовок и применения наиболее прогрессивных приемов изготовления с помощью сварки.

Технолог не в состоянии эффективно использовать передовую технологию там, где конструкция разработана без учета технологичности. Поэтому на всех стадиях проектирования сварной конструкции при отработке технологичности конструктивных решений обязательно участие технологов-сварщиков, которое обеспечивается как через технологические отделы конструкторских бюро, так и путем согласования с отделом главного сварщика.

На стадии технического проекта конструкции всех основных узлов и наиболее трудоемких деталей обычно разрабатывают в нескольких вариантах, которые затем сравнивают по их технологичности и надежности в эксплуатации. В случае необходимости при этом проводят расчеты трудоемкости изготовления, металлоемкости и других показателей. Не всегда удается изыскать вариант, существенно превосходящий все другие. Тогда выбор ведут на основании того показателя, который в данном случае является решающим.

На этапе рабочего проектирования выполняют детальную технологическую проработку принятого варианта конструкции. В первую очередь прорабатывают чертежи и технические условия на крупные заготовки, в особенности поставляемые извне, затем чертежи всех основных узлов и деталей и технические условия на их изготовление, сборку, монтаж и испытания. Рабочие чертежи направляют в отдел главного сварщика.

Здесь при разработке рабочей технологии спроектированной конструкции выявляют недостатки, связанные в основном с выбором материалов (по их свариваемости), видов заго-

товок, размеров швов и характера подготовки кромок, припусков на механическую обработку, допусков формы и размеров, методов контрольных операций. Необходимые изменения по согласованию с конструктором вносят в чертежи и технологическую документацию до запуска изделия в производство. В ряде случаев при создании принципиально новых типов сварных конструкций, а также освоении новых материалов или сварочных процессов к решению наиболее сложных вопросов привлекают научно-исследовательские организации.

Создание наиболее экономичных сварных конструкций с максимальным использованием в них всех свойств металла и всех возможностей сварочной техники требует совершенствования принципов проектирования самих конструкций и технологических процессов их изготовления. Необходимо комплексное конструктивно-технологическое проектирование, при котором вопросы прочности решаются одновременно с вопросами трудоемкости, а для повышения работоспособности сварной конструкции используются как конструктивные, так и технологические средства.

Применяемые в настоящее время расчеты прочности и устойчивости в ряде случаев не учитывают изменений свойств основного металла и вызываемых сваркой деформаций и напряжений. Прочность сварных соединений оценивается обычно по прочности наиболее слабой зоны, которую определяют на основании сравнения результатов испытания образцов, вырезанных из различных зон сварного соединения. При этом совместная работа смежных зон с различными свойствами и механическими характеристиками никак не учитывается. Напряженное состояние определяется преимущественно от внешних сил, во многих случаях без учета его неравномерности и начального напряженного состояния, возникающего при изготовлении конструкции.

Существующие методы расчетов прочности, как правило, не учитывают воздействия, оказываемого на конструкцию при ее изготовлении. Поэтому в обычно выполняемых расчетах прочности, как правило, исходят из нормативных свойств материала. При этом не учитываются изменения, вызываемые процессом сварки, а также наличие в сварных соединениях неоднородности свойств в различных зонах. Расчеты прочности ведут, ориентируясь на то напряженное состояние, которое диктуется только внешней нагрузкой, и не учитывают поле напряжений, созданное в ходе изготовления конструкции. При расчетах исходят из проектных размеров и формы отдельных сварных соединений и элементов без учета тех искажений, которые вызываются сварочными деформациями.

Все это приводит к тому, что расчеты перестают правильно воспроизводить действительные условия работы конструкции и в ряде случаев не могут гарантировать надежность работы конструкции. Поэтому необходимо в расчетах прочности и устойчивости учитывать технологические воздействия.

Если сейчас в отдельных случаях и пытаются учесть воздействия технологии при расчетах, то это делают введением поправочных коэффициентов в допускаемые напряжения, предельные нагрузки или нормы. Такой подход приводит к излишним затратам материала, поскольку понижающие коэффициенты приходится применять и там, где они не нужны, и, кроме того, они не гарантируют надежность, так как один коэффициент не может учесть все многообразие действительных условий работы конструкции и ее сварных соединений. Поэтому необходимы уточненные методы расчетов прочности и устойчивости, в которых учитывались бы технологические факторы.

Наряду с расчетами прочности должны проводиться и расчеты точности, которые сейчас, как правило, совсем не ведутся. При проектировании обычно ограничиваются лишь требованиями к точности отдельных элементов и конструкции в целом, не проверяя, в какой мере при выбранных конструктивных формах достижима эта точность. В наши дни существуют инженерные методы расчета деформаций, возникающих при сварке, которые позволяют расчетным путем оценивать достижимую точность сварного элемента, а следовательно, еще при проектировании конструкции предусматривать те меры повышения точности, которые надо будет принимать во время изготовления конструкции, если конструктивными средствами достичь требуемой точности не удастся.

Таким образом, при конструктивно-технологическом проектировании сварных конструкций должны применяться уточненные методы расчетов прочности и устойчивости отдельных элементов, а также расчетные методы оценки технологичности и точности сварных конструкций. Очевидно, что применение новых методов расчетов, основанных на ком-

плексном учете разнообразных конструктивных и технологических факторов, потребует в ряде случаев пересмотра норм и критериев оценки качества сварных конструкций после накопления некоторого опыта применения расчетных методов конструктивно-технологического проектирования сварных конструкций.

Выдвижение новых требований к материалу часто не сопровождается пересмотром старых требований, введенных иногда без достаточных оснований и главным образом потому, что материал соответствовал им при малом разнообразии предъявляемых к нему требований. В то же время условия работы современных конструкций усложняются и от материалов для них требуются новые свойства. Это приводит к тому, что некоторые новые, казалось бы, хорошие материалы бракуются из-за низких показателей по тем свойствам, которые не определяют прочности, и не оцениваются их свойства, особенно важные для обеспечения работоспособности конструкции.

Кроме того, сварные соединения и конструкции обладают рядом отличительных особенностей, которые предопределяют и методику проектирования, и организационные формы проектных и конструкторских бюро. К числу основных особенностей сварных конструкций должны быть отнесены следующие.

1. Органическая связь отдельных элементов друг с другом, создаваемая сварными швами. При этом конструкция, составленная из нескольких отдельных заготовок и деталей, превращается в монолитную, совмещающую в себе преимущества составных конструкций с достоинствами монолитных.

2. Легкость придания разнообразных конструктивных форм, так как при сварке в отличие от клепки не требуется каких-либо промежуточных соединительных элементов для сопряжения двух листов под любыми углами и они могут быть соединены друг с другом непосредственно.

3. Возможность использования заготовок, выполненных с применением любых технологических процессов, наиболее соответствующих их назначению и экономичных при заданных размерах, форме и числе одинаковых заготовок. Это позволяет создавать наиболее рациональные и экономичные конструкции.

4. Возможность применения в одной конструкции разных материалов, наиболее отвечающих тем требованиям, которые предъявляются условиями работы различных элементов и деталей конструкций. Это облегчает полноценное использование всех свойств применяемых материалов и снижает затраты металла.

5. Наличие влияния друг на друга конструкции и технологии ее изготовления. Конструктивные формы в известной мере ограничивают выбор технологических приемов и методов сварки, а принятая технология изготовления сварной конструкции в определенной степени влияет на изменение исходных свойств материала, точность сохранения проектных размеров и формы конструкции и на возникновение в конструкции того или иного напряженного состояния. Все это может отразиться на работоспособности сварной конструкции.

6. Возникновение в сварном соединении различных неоднородностей вследствие доведения свариваемых кромок до плавления (при сварке плавлением) или до пластического состояния (при сварке давлением). В том и другом случаях в сварном соединении образуются зоны с разными химическим составом металла, структурой и свойствами. К этому может добавиться и геометрическая неоднородность, вызванная как заданными конструктивными формами, так и технологией выполнения сварки.

7. Появление остаточных деформаций и напряжений в сварной конструкции как следствие возникновения при сварке пластических деформаций.

Все те особенности сварных конструкций, которые, на первый взгляд, могут казаться отрицательными (например отмеченные в пп. 5 – 7), в действительности не окажут такого влияния, если их учесть еще при проектировании конструкции. В науке о сварке к настоящему времени созданы многочисленные разделы теории сварочной техники, которые позволяют регулировать процессы, происходящие при сварке, не только предотвращая какие-то вредные последствия, но и используя эти процессы для повышения работоспособности сварной конструкции.

Основной проблемой обеспечения конструктивно-технологической прочности инженерных сооружений является решение многофакторной задачи о влиянии реальной технологии их изготовления на последующую работоспособность конструкции. Проявление технологических аспектов в надежности сварных соединений многократно усиливается с повы-

шением прочности используемых материалов. Опыт эксплуатации различных конструкций свидетельствует о том, что почти в 30 % случаев их повреждение или разрушение так или иначе связано с различными неучтенными технологическими факторами или отступлениями.

Наиболее важные направления работ в области конструктивно-технологической прочности на каждом этапе создания конструкции связаны с решением ряда вопросов. На стадии проектирования – это выбор материалов, коэффициентов запаса, конструктивного оформления узлов и сварных соединений; оптимизация последовательности сборочно-сварочных операций, а также расположения сварных швов; назначение дополнительных технологических мероприятий. При изготовлении конструкции необходим контроль уровня дефектности, технологических отступлений и объема ремонта, на стадии эксплуатации – дефектация и контроль за состоянием конструкций, оптимизация технологии ремонта и анализа разрушений. Одно из важнейших требований, предъявляемых к конструкциям, – обеспечение высокого сопротивления катастрофическому (хрупкому) разрушению.

3.2. КЛАССИФИКАЦИЯ ОСНОВНЫХ ВИДОВ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Исключительное разнообразие сварных конструкций затрудняет их единую классификацию. Их можно классифицировать по методу получения заготовок (листовые, литосварные, кованосварные, штампосварные конструкции); по целевому назначению (вагонные, судовые, авиационные и др.). При рассмотрении вопросов проектирования и изготовления сварные конструкции целесообразно классифицировать в зависимости от характерных особенностей их работы. В этом случае можно выделить следующие типы сварных элементов и конструкций:

– балки – конструктивные элементы, работающие в основном на поперечный изгиб; жестко соединенные между собой балки образуют рамные конструкции;

– колонны – элементы, работающие преимущественно на сжатие или сжатие с продольным изгибом;

– решетчатые конструкции – системы стержней, соединенных в узлах таким образом, что стержни испытывают в основном растяжение или сжатие; к ним относятся фермы, мачты, арматурные сетки и каркасы;

– оболочковые конструкции, которые, как правило, испытывают избыточное давление; к ним предъявляют требование герметичности соединений; к этому типу относят различные емкости, сосуды и трубопроводы;

– корпусные транспортные конструкции, подвергаемые динамическим нагрузкам; к ним предъявляют требования высокой жесткости при минимальной массе. Основные конструкции данного типа – корпуса судов, вагонов, кузова автомобилей;

– детали машин и приборов, работающие преимущественно при переменных, многократно повторяющихся нагрузках. Характерное требование к ним – получение точных размеров, обеспечиваемое главным образом механической обработкой заготовок или готовых деталей. Примерами таких изделий являются станины, валы, колеса.

3.3. РАЦИОНАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЧНОСТЬ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

3.3.1. ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАБОТ НА СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Под технологичностью сварной конструкции обычно понимают такое ее оформление, при котором обеспечивается удобство ее изготовления с применением прогрессивных высокопроизводительных технологических процессов (ТП) при максимальной механизации производственных операций.

Требование технологичности – одно из основных, которое должно учитываться при проектировании конструкции, так как трудоемкость конструкции, сроки ее изготовления и ее экономичность в значительной мере определяются тем, насколько полно выполнены требования технологичности при выборе материала и конструктивных форм сварного изделия или сооружения. Учет технологичности при проектировании сварной конструкции означает, что выбранный материал сварной конструкции допускает сварку обычными приемами, не требуя каких-либо условий, осложняющих производство, а принятые конструктивные формы способствуют применению при изготовлении конструкции наиболее прогрессивных процессов автоматической сварки и других высокопроизводительных ТП, что принятое конструктивное решение требует минимального количества элементов, что в каждом элементе используется минимальное число

различных профилей и минимальное число различных толщин листового проката, что число производственных операций доведено до минимума.

Технологичность сварной конструкции может оказаться удовлетворительной только тогда, когда устанавливаемые при ее проектировании допуски на отдельные размеры согласованы с требованиями на точность производства заготовок. Иначе неизбежны дополнительные операции по подрубке кромок свариваемых заготовок, операций подгонки по месту каждой отдельной детали даже в том случае, если однотипных элементов одинаковых размеров встречается в конструкции несколько штук.

На стадии проектирования работа по улучшению технологичности обычно проводится в основном по трем направлениям.

1. **Экономия металла.** Поиск наилучших конструктивных форм, более точный учет характера и значений действующих нагрузок, применение уточненных методов расчета позволяют конструктору экономить металл, устраняя излишний запас прочности, уменьшая массу металла, слабо участвующего в работе. Целесообразно вместо пространственных решетчатых конструкций использовать оболочковые; требования высокой жесткости удовлетворять, применяя гнутые или гофрированные тонколистовые, а также сотовые элементы; при работе на продольную устойчивость использовать трубчатые элементы.

Выбор металла открывает большие возможности для снижения массы изделия. Наибольшая экономия металла может быть получена при использовании прочных и высокопрочных сталей и сплавов с высокой удельной прочностью (алюминиевых, титановых). Снижению массы изделия способствует также применение более прочных холоднокатаных элементов вместо горячекатаных. Повышение прочности, а следовательно, и снижение массы изделия достигаются термообработкой. Однако повышение прочности металла нередко сопровождается ухудшением его свариваемости или снижением сопротивления разрушению. Поэтому экономия металла за счет повышения его прочности целесообразна только при учете этих факторов. Большие перспективы имеет применение композиционных материалов, например двухслойных сталей.

2. **Снижение трудоемкости изготовления.** В этом плане важен выбор размеров и метода получения заготовок, а также приемов их сварки. При проработке конструктивной схемы и ориентировочном подсчете размеров сечений не требуется учитывать, будет конструкция монолитной или сварной. Вопросы, непосредственно связанные со сваркой, возникают при членении изделия на отдельные заготовки. Намечая расположение сварных соединений, проектировщик не только задает форму и размеры отдельных заготовок, но и в значительной степени предопределяет решение ряда конструктивных и технологических вопросов, таких как методы получения заготовок, типы соединений, приемы сварки и т.д. Поэтому выбор варианта расчленения весьма важен с позиций его влияния на технологичность конструкции.

При проектировании уникальных изделий больших размера и массы членение нередко является единственно возможным решением задачи, так как изготовить их целиком не позволяет недостаточная мощность существующего оборудования. При членении сложных деталей желательно сочетать простоту форм отдельных заготовок с рациональным расположением сварных соединений. Так, например, сложную стальную цельнолитую отливку большого размера приходится формовать в полу цеха с большими затратами ручного труда. Переход к сварному варианту из небольших простых литых заготовок позволяет применить машинную формовку и значительно сократить трудоемкость.

Нередко условия нагружения различных частей сварной конструкции различаются весьма заметно. В этом случае целесообразно выбирать материалы и методы получения заготовок с учетом различия требований к механическим свойствам отдельных частей.

При выборе метода сварки конструктор должен учесть свариваемость металла заготовок, назначить тип соединения и обеспечить удобство выполнения сборочно-сварочных операций. Доставка крупных сварных изделий к месту эксплуатации целиком нередко оказывается невозможной или нецелесообразной. В этом случае часть сварочных операций выполняют при монтаже.

Подход к выбору метода сварки и конструктивного оформления соединений для заводской и монтажной сварки может быть различным. Поэтому размеры элементов и места расположения монтажных швов назначают одновременно с выбором метода сварки. Выбор

метода сварки обычно включает назначение типа сварного соединения, приемов его выполнения и применяемого присадочного металла, а также термообработки, если это необходимо. Эти данные предопределяют механические свойства сварного соединения и значения допускаемого напряжения, что необходимо для расчетов на прочность.

На стадии рабочего проектирования конструктивное оформление сварных соединений прорабатывается более детально. На чертежах указываются характер обработки кромок, допуски на размер с учетом припусков на последующую механическую обработку узла или изделия.

Вопросы точности и стабильности размеров конструкции, конечно, не исчерпываются выбором метода сварки. Существенными являются учет сварочных деформаций и напряжений, назначение технологических мероприятий по их предотвращению и устранению. Этот круг вопросов решают на стадии рабочего проектирования как с целью обоснования значений допусков и припусков, так и с позиций целесообразности термообработки.

Многие весьма ответственные изделия вполне надежно работают после сварки без какой-либо термообработки. В то же время термообработка нередко заметно улучшает механические свойства и структуру сварных соединений, способствуя повышению их работоспособности. Неоправданное назначение операции термообработки может существенно увеличить трудоемкость изготовления изделия, в особенности при серийном производстве. Вопрос о проведении послесварочной термообработки или отказе от нее решают, принимая во внимание химический состав металла, метод сварки и присадочный металл, конструктивное оформление соединений и узлов, требования к механическим свойствам, условия эксплуатации. Следует учитывать также толщину металла. При толщинах >35...40 мм исключить послесварочную термообработку для уменьшения остаточных напряжений весьма проблематично.

При выборе общей схемы сооружения или конструкции следует стремиться составить ее из возможно меньшего числа элементов. Это требование выдвигается по соображениям экономии металла и снижения трудоемкости конструкции. Если одну и ту же нагрузку можно передать и через большее количество более легких элементов и через меньшее более тяжелых и массивных, то чаще всего меньшая общая масса конструкции будет при меньшем числе элементов. При малом числе элементов каждый из них будет загружен сильнее, а при этом легче подобрать сечение с полным использованием материала. Толщины листов, входящих в сечение, будут больше, а следовательно, устойчивость в сжатых частях сечения также будет больше, затраты же на постановку ребер жесткости станут меньше. Вообще число конструктивных деталей при сокращении числа элементов будет меньше, так как уменьшится количество ребер жесткости примерно в том же соотношении, что и длина элементов; снизится число узлов и сопряжений, а потому уменьшится количество таких деталей, как косынки, кронштейны и т.п.

Таким образом, при уменьшении числа элементов уменьшается их суммарная масса за счет уменьшения числа конструктивных деталей (непосредственно не участвующих в восприятии нагрузки), появления возможности более рационально разместить материал в крупном сечении и меньшего снижения допускаемых напряжений при продольном изгибе для обеспечения местной и общей устойчивости и т.п.

Меньшее число элементов уменьшает и затраты труда на их изготовление, так как пропорционально сокращается число всевозможных промежуточных операций, уменьшаются деформации вследствие повышения жесткости отдельных элементов, а также длина соединительных швов и т.п. В итоге уменьшение числа элементов приводит, как правило, к уменьшению затрат металла и труда. При этом, однако, не следует упускать из виду те ограничения, которые накладываются: существующим сортаментом прокатных листов и профилей, имеющимся на производстве; подъемно-транспортными средствами; механическим и сварочным оборудованием; другими производственными условиями. Поэтому выбор общей схемы сооружения или конструкции с тем или иным числом элементов должен быть подкреплен сравнительным анализом технических и экономических показателей нескольких вариантов решения.

Весьма большое значение для обеспечения технологичности конструкции имеет максимальное сокращение числа производственных операций. Здесь прежде всего необходимо исключить такие трудоемкие ручные операции,

как правка покоробленных конструкций, подрубка кромок при сборке, термообработка перед механической обработкой и др. Все эти операции связаны с большой затратой труда, резко удорожают изготовление конструкции и удлиняют производственный цикл.

Однако выполнение требования максимального сокращения числа производственных операций, как, впрочем, и всех других требований, направленных на повышение технологичности сварных конструкций, упирается в необходимость повышения точности как самих конструкций, так и процессов их изготовления. Поэтому на вопросы точности должно быть обращено особое внимание как при проектировании, так и при изготовлении сварных конструкций. Это тем более необходимо, что до последнего времени им уделяли мало внимания, а дальнейшее развитие сварных конструкций и методов их изготовления немыслимо без решения вопросов точности.

3. **Экономия времени.** Наибольшая экономия времени достигается в условиях непрерывного поточного автоматизированного производства при крупносерийном и массовом выпуске продукции, когда все операции согласованы во времени и выполняются механизмами. Следовательно, при проектировании сварных изделий конструктор должен обеспечить эффективность их изготовления с помощью высокопроизводительных механизмов и автоматических устройств. Однако доля сварных конструкций, изготовляемых в условиях серийного и массового производства, относительно невелика. В мелкосерийном производстве эффективно использовать поточные методы изготовления позволяют типизация и нормализация. Важно осуществить рациональный выбор системы конструкции и ее размерных параметров. Изыскание прогрессивных конструктивных форм и технологий дает возможность проектировщику ограничить количество типоразмеров и тем самым увеличить серийность выпускаемых изделий.

В случае, когда увеличить серийность выпуска изделия не удается и изготовление конструкции предполагается в условиях мелкосерийного производства, конструктору следует так подбирать типоразмеры узлов и элементов, чтобы они соответствовали формам и размерам нормализованной технологической оснастки.

3.3.2. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Исходными данными для проектирования ТП изготовления сварной конструкции являются чертежи изделия, технические условия (ТУ) и планируемая программа выпуска.

Чертежи содержат данные о материале заготовок, их конфигурации, размерах, типах сварных соединений, т.е. решения, которые были приняты конструктором в процессе проектирования изделия, и должны быть приняты к исполнению технологом. Технолог не имеет права вносить изменения в чертежи. Поэтому любому отклонению от чертежа должно предшествовать его исправление конструктором.

ТУ на изготовление определенного типа конструкций содержат перечень требований, которые предъявляются к материалам, оборудованию, а также к выполнению технологических и контрольных операций. ТУ, согласно ГОСТ 15001–88, должны соответствовать требованиям технического задания и стандартов на данный вид продукции, т.е. учитывать опыт проектирования, изготовления и эксплуатации, накопленный при выпуске подобных изделий.

Программа выпуска содержит сведения о числе изделий, которые надо изготовить в течение конкретного срока (например, за год). Эти цифры служат основанием для выбора оборудования, технологической оснастки, средств механизации и автоматизации. Кроме того, по программе выпуска оценивают экономическую эффективность этого выбора. Производственный процесс изготовления изделий включает различные технологические, контрольные и транспортные операции. Главное требования, определяющие последовательность выполнения этих операций, их содержание и обеспечение оснасткой, – это реализация заданной программы выпуска изделий высокого качества в кратчайшие сроки при минимальной стоимости.

Последовательность выполнения основных сборочно-сварочных операций зависит от выбора варианта членения конструкции на технологические узлы, подузлы и отдельные детали. Оптимальность такого членения определяется следующими соображениями.

1. На монтажной площадке условия труда, возможности применения высокопроизводительной оснастки и средств контроля качества менее благоприятны, чем на заводе.

Поэтому изделия больших габаритных размеров целесообразно расчленять на такие транспортабельные узлы, которые позволят свести к минимуму работы по монтажу.

2. С позиций доступности сварных соединений, удобства их выполнения и послеоперационного контроля сборочно-сварочные работы имеет смысл выполнять путем последовательного укрупнения отдельных элементов в подузлы и узлы с последующей сборкой всего изделия. Такое чередование сборочных и сварочных операций облегчает использование высокопроизводительной сварочной оснастки, но при малой жесткости отдельных узлов может приводить к росту деформаций от сварки.

3. Для оценки ожидаемых сварочных деформаций и выбора рациональной последовательности сборочно-сварочных операций надо пользоваться расчетными методами.

4. Требуемую точность размеров и формы сварного изделия следует обеспечивать рациональным построением ТП, применением правочных работ на стадии заготовки элементов, сборки и сварки отдельных узлов. Правка готового изделия, как правило, крайне трудоемка.

5. Термообработка всей конструкции может существенно усложнить процесс изготовления, особенно в условиях серийного и массового производств. Поэтому в случае необходимости улучшения механических свойств, снятия остаточных напряжений или стабилизации размеров в какой-либо зоне конструкции выгодно выбрать такую последовательность сборки и сварки, которая позволяет производить местную или предварительную термообработку отдельных подузлов и деталей.

Под механизацией производственного процесса понимают замену ручного труда работой машин. При автоматизированном процессе обслуживающий персонал выполняет лишь функции наладки и наблюдения за работой приборов и систем управления. Систему управления составляют механизмы и средства связи, обеспечивающие точное и согласованное во времени взаимодействие рабочих и вспомогательных агрегатов и устройств.

В области сварочного производства трудовые затраты собственно на сварочные работы обычно ≤ 30 %. Большой объем занимают заготовительные, сборочные и вспомогательные, особенно транспортные операции. Следовательно, повышение производительности только сварочных работ не может дать существенного эффекта. Отсюда – необходимость в комплексной механизации и автоматизации, охватывающих не только основные (заготовительные, сборочные, сварочные, отделочные), но и вспомогательные (транспортные, контрольные) операции.

Совершенствование производства сварных конструкций требует не только наличия механизмов, способных осуществлять все необходимые операции ТП, но и рациональной их компоновки. При этом требования как к механизмам, так и к их компоновке определяются характером производства. Например, для серийного и мелкосерийного производств требуются универсальные устройства, пригодные для работы в широком диапазоне типоразмеров заготовок и изделий; для крупносерийного и массового – более производительное специализированное оборудование в составе поточных, автоматических и роторных линий конкретного, целевого назначения.

Создание линий со специализированным оборудованием требует больших затрат на проектирование, изготовление и монтаж, тогда как в случае смены выпускаемой модели изделия эти линии переналадке обычно не поддаются. Более целесообразны переналаживаемые гибкие автоматизированные производственные системы (ГАПС).

Гибкой можно назвать систему, состоящую из универсального станка и квалифицированного рабочего. Противоположностью является жесткая система, включающая в себя специализированный однопозиционный станок и рабочего-оператора малой квалификации. Универсальность промышленных роботов (ПР) дает возможность автоматизировать практически любые операции, выполняемые человеком, а быстрота смены программы позволяет обеспечить ту же гибкость, которой обладает производство, обслуживаемое человеком.

Замена специализированного оборудования роботами уже позволила создать сварочные автоматические линии и роботизированные комплексы, способные в условиях крупносерийного производства одновременно выпускать несколько модификаций изделия. Для серийного и мелкосерийного производств создание подобных ГАПС на основе использования робототехники еще впереди.

3.4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СБОРОЧНО-СВАРОЧНЫХ ОПЕРАЦИЙ

3.4.1. ПРИЕМЫ ВЫПОЛНЕНИЯ ОПЕРАЦИЙ И ПРИСПОСОБЛЕНИЯ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Сборочная операция имеет цель – обеспечить правильное взаимное расположение и закрепление деталей собираемого сварного изделия. Для выполнения сборочной операции используют сборочное или сборочно-сварочное оборудование. В первом случае сборка заканчивается прихваткой; во втором собранное изделие сразу сваривают.

Собранный узел должен обладать жесткостью и прочностью, необходимыми как для извлечения его из сборочного приспособления и транспортировки к месту сварки, так и для уменьшения деформаций при сварке. Собранные детали часто фиксируют на прихватках. Размеры и расположение прихваток задают не только из условий прочности и жесткости, но и с позиции исключения их вредного влияния на качество выполнения сварных соединений и работоспособность конструкции. Поэтому прихватки должны иметь ограниченное поперечное сечение и длину и располагаться в местах, обеспечивающих их полную переварку при укладке основных швов. Если же прихватки накладывают на местах, где швы проектом не предусмотрены, то после сварки изделия такие прихватки следует удалить, а поверхности тщательно зачистить.

Сборку иногда осуществляют при плотном сопряжении собираемых деталей, но чаще с заданным технологическим зазором. Детали в приспособлении размещают (базируют) таким образом, чтобы их технологические базы опирались на установочные поверхности приспособления. В общем случае для этого достаточно прижать деталь к шести опорным точкам, расположенным в трех взаимно перпендикулярных плоскостях.

Во многих случаях детали в приспособлении зажимают механическими или пневматическими прижимами. Пневматические прижимы приводятся в действие сжатым воздухом низкого давления (в среднем 0,4 МПа). При таком давлении размеры цилиндров, необходимые для обеспечения требуемой силы зажатия, могут оказаться значительными. Иногда рациональнее использовать гидравлические устройства, работающие при существенно более высоком давлении.

Для высококачественного и производительного выполнения сварочной операции необходимо обеспечить:

1) сборку соединений с оптимальным зазором;

2) доступность зоны соединения для инструмента;

3) рациональное чередование сборочных и сварочных операций и соответствующую последовательность наложения швов;

4) позиционирование свариваемых кромок в пространстве и относительное перемещение инструмента и изделия, соответствующие оптимальным условиям сварки.

Если сварку проводить после полного завершения сборки, то пространственная жесткость конструкции будет способствовать уменьшению сварочных деформаций. Однако доступность некоторых соединений при этом может стать ограниченной. Чередование сборочных и сварочных операций при изготовлении конструкции путем наращивания отдельных элементов облегчает доступность соединений, но нередко способствует увеличению деформаций от сварки. Общей сборке сложной конструкции могут предшествовать сборка и сварка относительно простых узлов, обладающих пространственной жесткостью, соединения которых легко доступны для сварки.

Позиционирование изделия для выполнения каждого соединения в наиболее благоприятном для сварки положении требует неоднократного поворота изделия. Так, при дуговой сварке стыковые соединения обычно располагают в нижнем положении, а для угловых швов предпочтительно положение в лодочку. Кроме периодических установочных поворотов изделия применительно к сварке круговых и кольцевых швов требуется вращение изделия с постоянной сварочной скоростью. При сварочных операциях нужно также задавать положение инструмента относительно свариваемых кромок и перемещать его со скоростью сварки. Для механизации этих операций используют устройства, обеспечивающие позиционирование, или перемещение, изделия, а также инструмента (сварочной головки) относительно изделия.

Характерны следующие виды сборочного оборудования:

1) сборочные кондукторы, имеющие жесткое основание в виде рамы или плиты, на которой размещены установочные и зажимные элементы (рис. 3.1, *а*);

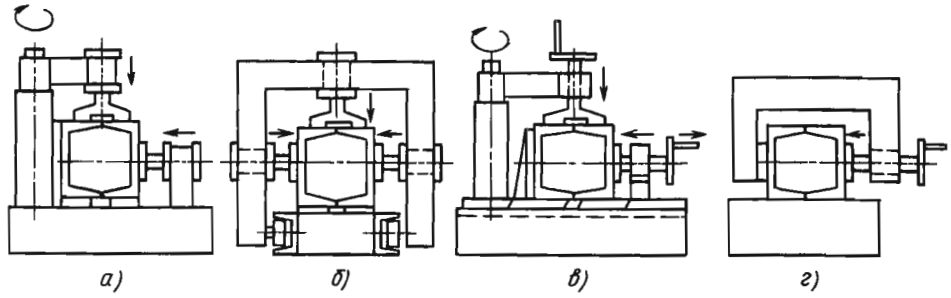


Рис. 3.1. Типы сборочного оборудования:
а – кондуктор; *б* – стенд с передвижным порталом; *в* – сборно-разборное приспособление; *г* – переносное приспособление (струбцина)

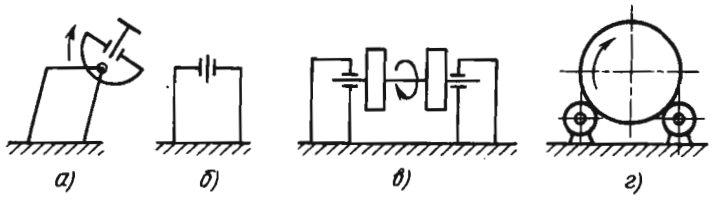


Рис. 3.2. Схемы устройств для позиционирования свариваемых изделий:
а – универсальный вращатель; *б* – вращатель; *в* – кантователь; *г* – роликовый вращатель

2) сборочные стенды, где неподвижное основание с установочными и зажимными элементами дополнительно оснащено передвижными устройствами (рис. 3.1, *б*);

3) универсально-сборочные приспособления (УСП), имеющие основание в виде плиты с Т-образными пазами для размещения и закрепления набора установочных и зажимных элементов в соответствии с конфигурацией собираемого изделия (рис. 3.1, *в*);

4) переносные приспособления (стяжки, струбцины, распорки и др.), применяемые главным образом при монтаже крупных изделий (рис. 3.1, *г*).

Основными видами оборудования для перемещения изделий являются универсальные сварочные вращатели, кантователи, роликовые вращатели (рис. 3.2). Выбор типа и размеров такого оборудования определяется конструкцией выпускаемых изделий, их массой и размерами. Для перемещения сварочных аппаратов служат колонны, тележки и направляющие устройства. Большинство колонн поворотные, они содержат консоли для самоходных сварочных аппаратов. Тележки наряду с маршевой скоростью для обеспечения позиционирования сварочного аппарата могут иметь сварочную скорость для его перемещения. Велосипедные тележки монтируют из колонн. Портальные тележки используют в основном при сварке цилиндрических изделий.

3.4.2. ПРИМЕНЕНИЕ РОБОТОВ В СВАРОЧНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Традиционные методы механизации и автоматизации производства, основанные на использовании поточных и автоматических линий, а также различных специализированных установок и приспособлений, эффективны главным образом в условиях крупносерийного производства. В то же время основная масса сварных изделий выпускается в условиях серийного и мелкосерийного производств, где осуществить комплексную механизацию и автоматизацию традиционными методами обычно не удается, следствием чего являются низкая производительность и большие затраты ручного труда.

Существенное сокращение ручного труда при выполнении сборочно-сварочных операций и, самое главное, ощутимое повышение качества сварных швов возможны при использовании робототехники. Универсальность роботов с шестью степенями свободы дает возможность автоматизировать любые операции, выполняемые рукой человека, а быстрота перестройки ТП позволяет обеспечить ту гибкость, которую сегодня имеют только производства,

обслуживаемые человеком. Использование робототехники не является самоцелью, оно должно повысить производительность труда с одновременным сокращением издержек производства, несмотря на высокую стоимость оборудования.

Решение этой сложной задачи требует от инженера-сварщика учета специфики как производства конкретных сварных изделий, так и применения роботов, а также обоснованного выбора подобного оборудования, рациональной его компоновки и эффективной эксплуатации.

Проводимые в сварочном производстве производственные работы обычно универсальны, пригодны для выполнения сборочных, сварочных, а также транспортных операций при изготовлении разнообразных конструкций. Их технологические возможности характеризуются следующими параметрами: кинематической схемой, грузоподъемностью и числом степеней подвижности; формой и размерами рабочей зоны; точностью позиционирования; характером привода и типом системы управления.

Системы управления роботом-манипулятором, несущим инструмент, могут быть цикловые, позиционные и контурные. Выбор системы управления определяется назначением робота.

Наиболее простая цикловая система управления предназначена для выдачи ряда команд в определенной последовательности, но без регламентации перемещения по каждой из осей. Цикловая система является простейшим случаем позиционной системы с минимальным числом позиций, программируемых по каждому перемещению (обычно две: начальная и конечная). ПР с цикловым управлением применяют в основном при сборке деталей, погрузочно-разгрузочных, транспортных и складских работах, при этом широко используют пневмопривод.

Позиционная система управления задает не только последовательность команд, но и положение всех звеньев ПР. Ее используют для обеспечения сложных манипуляций с большим количеством точек позиционирования. При этом траектория инструмента между отдельными точками *1* и *2* (рис. 3.3, *а*) не контролируется и может отклоняться от прямой, соединяющей эти точки. Однако завершение перемещения в точке *2* обеспечивается с заданной точностью. Систему называют однопозиционной, если она предусматривает останов инструмента в конце каждого отдельного перемещения; используют в ПР, предназначенных для контактной сварки, а также для сборочных или транспортных операций.

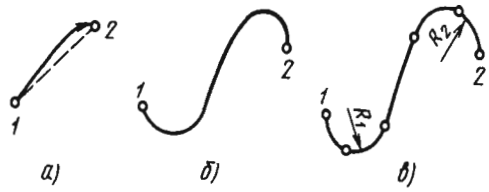


Рис. 3.3. Приемы введения программы при обучении робота в зависимости от системы управления:
а – позиционная; *б* – многопозиционная; *в* – контурная

Многопозиционная система управления позволяет проходить промежуточные точки без останова с сохранением заданной скорости. При достаточной частоте промежуточных точек (см. рис. 3.3, *б*) такая система способна обеспечить передвижение инструмента по заданной траектории и поэтому может использоваться в ПР для дуговой сварки. Однако в этом случае введение программы в память робота связано со значительными затратами времени.

Контурная система управления задает движение в виде непрерывной траектории, причем в каждый момент времени определяет не только положение звеньев механизма, но и вектор скорости движения инструмента. Поэтому движение инструмента по прямой линии или по окружности требует задания всего двух крайних точек в первом случае и трех точек (двух крайних и любой промежуточной) – во втором. Это позволяет интерполировать отдельные участки траектории отрезками прямых и дугами окружности, что существенно сокращает время обучения робота. Поэтому, как правило, применяют контурную систему управления в ПР для дуговой сварки, хотя она сложнее и дороже позиционной. Программа выполнения операций дуговой сварки обычно вводится в память ПР оператором в режиме обучения. Для этого на первом экземпляре узла намечают опорные точки линии шва, в которых меняется характер ее траектории. Оператор последовательно подводит горелку к этим точкам и нажатием кнопки «Память» вводит их координаты в систему управления с указанием характера траектории между ними: прямая, дуга. Одновременно в память системы вводится технологическая информация о скорости движения горелки и других параметрах режима

сварки, порядке перехода от одного шва к другому и т.д.

При сварке с помощью робота нередко используют колебания электрода. Манипуляционная система ПР в сочетании с системой управления позволяет выполнять колебания горелки на любой траектории. В условиях мелкосерийного производства отклонения размеров при переходе от одного узла серии к другому могут оказаться настолько значительными, что приходится каждый узел серии программировать заново. В этих случаях нашли применение ПР с иным способом обучения, занимающим меньше времени, чем программирование с использованием опорных точек.

При обучении такого робота (типа «Apprentece» или МАС-2000) оператор устанавливает на горелку наконечник, подводит ее к месту начала шва и вручную проводит горелку вдоль соединения так, чтобы наконечник касался линии сопряжения свариваемых деталей. Сигналы от датчика, фиксирующего перемещения горелки, вводятся в систему управления в виде координат точек, отстоящих одна от другой на определенном расстоянии.

Поскольку при обучении скорость перемещения горелки оказывается гораздо выше реальной скорости сварки, то время обучения такого робота существенно меньше времени самой сварки. Это позволяет вводить индивидуальную программу для каждого экземпляра изделия. Роботы такого типа обучения применяют при сварке протяженных швов в крупногабаритных листовых конструкциях или при частой смене изделия. При этом швы должны быть угловые, тавровые или стыковые с выраженной разделкой кромок, чтобы при обучении наконечник двигался точно по стыку.

3.5. ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОЕКТИРУЕМОЙ КОНСТРУКЦИИ

Задача оптимального проектирования отдельной конструкции включает в себя комплекс различных оптимизационных проблем. Сюда входят выбор конструктивной схемы, определение рациональных геометрических размеров, оптимальный подбор элементов, составляющих конструкцию, и, наконец, подбор сечений, расчет стыков и узлов.

Приведем примеры оптимизационных задач.

1. Оптимизация сечений двутавра, швеллера, уголка.

2. Рациональное распределение материала в конструкциях статически неопределимых ферм. В этих фермах изменение сечений элементов влечет за собой перераспределение усилий между стержнями. Нужно выяснить, как распорядиться сечениями стержней, чтобы при удовлетворении условий прочности и устойчивости масса фермы оказалась минимальной.

3. Оптимизация основных геометрических размеров конструкции. При заданной нагрузке минимизируется теоретическая масса конструкции путем выбора соответствующей структуры конструкций, построенной из стандартных элементов.

4. Оптимизация технико-экономических показателей и выбор параметров конструкции и ее элементов на предмет оптимального расхода металла.

Для решения любой задачи по оптимизации важна типизация элементов конструкции. Простейшими задачами унификации и типизации являются задачи выбора ряда оптимальных параметров для серии однотипных конструкций. В задаче оптимизации определяется совокупность средств и действий, необходимых для достижения поставленной цели. Поиск путей для этого составляет основную задачу теории исследования операций.

Под операцией понимается совокупность мероприятий, направленных на решение задачи. Одной из особенностей исследования операций является системный подход к рассмотрению предмета исследования. При системном подходе элементы системы (изделия) рассматриваются во взаимосвязи. При этом выявляются наиболее характерные факторы. Затем намечают план исследования, в частности устанавливают последовательность и средства для решения задачи.

Основной принцип методологии исследования операций состоит в создании модели операции и проведении исследований на этой модели. Математические модели описывают структуру изучаемой системы в количественных терминах. При разработке модели всегда возникают два противоречивых требования: как можно точнее описать в модели исследуемый объект и одновременно получить достаточно простую модель, позволяющую решить задачу до конца.

Обычно операционные модели имеют вид уравнения, выражающего общий критерий функционирования системы. Количественно

критерий зависит от учитываемых факторов, которые принято делить на две группы: неуправляемые, иначе их называют параметрами системы, – они обычно известны, и управляемые – переменные факторы, регулируя значения которых можно улучшить значение общего критерия функционирования системы. Иногда в системе учитывают случайные и не полностью определенные факторы.

Задача исследования состоит в установлении значений управляемых факторов таким образом, чтобы общий критерий функционирования достиг наилучшего значения. В модель операции могут входить ограничения на управляемые переменные. Очень часто, если в задаче оптимизируется несколько критериев, требуется получить решение, не безупречно оптимальное по каждому критерию, а приемлемое сразу по нескольким критериям. Существенной частью исследования операций являются поиск и принятие решения, разработка программных алгоритмов, реализующих группу численных методов решения оптимизационных задач.

Оптимизационная задача представляется как задача минимизации целевой функции многих переменных.

3.6. СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ (САПР) В СВАРОЧНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Под машинным проектированием металлоконструкций понимается автоматизированное и автоматическое выполнение с помощью ЭВМ и других технических средств основных процедур поэтапного проектирования изделия. Машинное проектирование, основанное на использовании ЭВМ, позволяет автоматизировать ряд звеньев процесса конструирования изделий, в том числе решение трудоемких и громоздких задач по нахождению оптимального варианта в условиях многокритериальности, больших массивов информации и разветвленных алгоритмов ее обработки. Это, в свою очередь, снижает сроки проектирования, повышает производительность труда проектировщиков и качество решений на основе самого полного использования потенциальных возможностей математических и других формализованных методов и автоматических средств обработки информации.

Задачи машинного проектирования не ограничиваются автоматизацией трудоемких расчетов. При машинном проектировании комплексно автоматизируется весь процесс проектирования – от разработки технического задания (ТЗ) до выдачи конструкторской документации. Для разработки и внедрения машинного проектирования в научно-исследовательских институтах необходимо провести большую работу по стабилизации номенклатуры, типизации и унификации узлов объектов проектирования, созданию единой технологии проектирования. Наряду с этим следует вести работы по формализации (математическому описанию) всех проектных решений, другими словами, создавать математические модели проектных решений и представлять результаты моделирования на различных языках программирования с целью их ввода в ЭВМ для проектирования (САПР). Основные элементы САПР – это коллектив проектировщиков, а также технический, программный и информационный комплекс.

Этапы проектирования металлоконструкции в САПР. Проектирование любого нового изделия в САПР проходит несколько этапов.

1. Формулировка ТЗ на проектирование. Оно составляется с учетом условий производства. Например, при изготовлении изделия в поточной линии учитываются номенклатура изделия, серийность изготовления, привязка линии к существующим системам обеспечения производства, степень механизации и автоматизации работ на каждом участке линии. Модель изделия при этом задают в виде параметров и определяют ожидаемый эффект от применения технологической линии.

2. Эскизное проектирование. Цель его сводится к разработке оптимального проекта нового изделия по параметрам, полученным на основе предварительных исследований. Эскизное проектирование предусматривает анализ с помощью ЭВМ большого числа конструктивных решений. Анализ технических решений позволяет убедиться в правильности разработанного проекта нового изделия еще до того, как оно поступит в эксплуатацию. На стадии эскизного проектирования компонуются изделие и все его узлы, определяются геометрические характеристики.

3. Техническое и рабочее проектирование. На этой стадии осуществляется детальная конструкторская проработка всех устройств, систем и узлов нового изделия. Готовится пол-

ный комплект чертежей. Проверяется ТЗ. ЭВМ здесь используется для оптимизации статических и динамических характеристик узлов изделия, подготовки чертежей и спецификаций.

4. Изготовление. Здесь ЭВМ используется для выбора конкретного технологического варианта изготовления изделия; подготовки программ к станкам и автоматам; оптимизации последовательности сборочных и транспортных операций, параметров режима сварки и т.п.

Весь процесс автоматизированного проектирования рассматривается как интерактивный, дающий возможность разработчику быстро проверить гипотезу (вариант модели проекта), оценить ее в многошаговом процессе оптимизации и приступить к конструкторской и технологической проработке проекта. В каждой гипотезе предлагается модель объекта, являющаяся теоретическим и аналитическим представлением проекта. Эта модель анализируется в блоке «Анализ». Результаты анализа в блоке «Оценка» сравниваются с заданием, которое определяет цель проекта. При наличии отклонений с помощью блока «Изменение» модель можно откорректировать и затем повторить процесс анализа. За N шагов проект приближается к оптимальному. На последнем этапе проектирования разработчик приступает к конструкторской и технологической проработке проекта с выдачей технологической документации на изготовление изделия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Горынин И.В., Ильин А.В., Леонов В.П., Малышевский В.А.** Конструктивно-технологическая прочность сварных соединений морских конструкций / Матер. технич. конф. в честь 100-летия Н.О. Окерблома. Конструктивно-технологич. прочность и производство сварных конструкций. СПб.: Изд-во С.-ПбГТУ, 2000. 105 с.

2. **Куркин С.А., Николаев Г.А.** Сварные конструкции. Технология изготовления, автоматизация и контроль качества в сварочном производстве. М.: Высш. шк., 1991. 398 с.

3. **Николаев Г.А., Куркин С.А., Винокуров В.А.** Сварные конструкции. Технология изготовления. Автоматизация производства и проектирование сварных конструкций. М.: Высш. шк., 1983. 344 с.

4. **Окерблом Н.О.** Конструктивно-технологическое проектирование сварных конструкций. М. – Л.: Машиностроение, 1964. 420 с.

Глава 4

ДУГОВАЯ И ЭЛЕКТРОШЛАКОВАЯ СВАРКА

4.1. РУЧНАЯ ДУГОВАЯ СВАРКА

4.1.1. СУЩНОСТЬ ПРОЦЕССА

Ручная дуговая сварка (РДС) штучными электродами как наиболее универсальная занимает наибольший объем среди всех способов сварки. Способ позволяет выполнять швы различных типов и назначения, а также вести сварку в любом пространственном положении.

Ручная сварка электрической дугой прямого действия находит наибольшее применение. Наилучшие результаты достигаются при сварке короткой дугой, длина которой обычно $\leq 0{,}5\ldots1{,}1$ диаметра электрода; токе 90…350 А и напряжении дуги 18…30 В. При длинной дуге усиливается окисление электродного металла, увеличивается разбрызгивание, снижается глубина провара.

Качество сварных соединений, выполненных РДС, в значительной степени зависит от условий работы и производственных навыков сварщиков.

Схема процесса РДС металлическим покрытым электродом показана на рис. 4.1. Дуга возбуждается при кратковременном замыкании электрической сварочной цепи касанием свариваемого металла концом электрода.

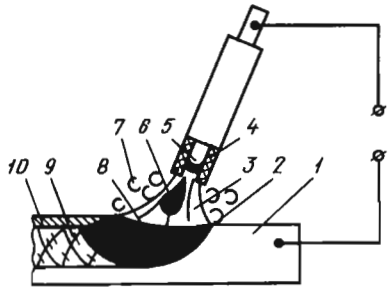


Рис. 4.1. Схема РДС:
1 – изделие; *2* – сварочная ванна; *3* – дуга; *4* – электрод; *5* – стержень электрода; *6* – капля электродного металла; *7* – газовая защита; *8* – расплавленный шлак; *9* – сварной шов; *10* – шлаковая корка

В процессе сварки электрод перемещают по направлению к изделию по мере плавления электрода, вдоль соединения и поперек стыка для получения необходимых формы и сечения шва.

При сварке покрытым электродом происходит плавление стержня и покрытия. Расплавляющееся покрытие образует шлак и газы. Шлак обволакивает капли металла, появляющиеся при плавлении электродной проволоки. В ванне шлак перемешивается и, всплывая на ее поверхность, образует шлаковый слой, предохраняющий металл от взаимодействия с кислородом и азотом воздуха. Кроме того, всплывая на поверхность ванны, шлак очищает расплавленный металл. Выделяющиеся при расплавлении покрытия газы оттесняют воздух из зоны плавления (зоны дуги) и, таким образом, способствуют созданию лучших условий защиты.

Жидкий шлак затвердевает и образует на поверхности шва твердую шлаковую корку, удаляемую после сварки. Следовательно, покрытие электрода обеспечивает газошлаковую защиту металла сварного соединения от взаимодействия с воздухом и металлургическую обработку металла в ванне.

Покрытыми электродами сваривают черные и цветные металлы и различные сплавы практически любой толщины. Покрытые электроды находят достаточно широкое применение и при наплавке.

Перемещение электрода вдоль линии сварки и подачу электрода в зону дуги по мере его плавления осуществляют вручную. При этом часто изменяется длина дуги, что отражается на постоянстве основных параметров режима – напряжения дуги и силы сварочного тока. С целью поддержания более стабильного режима при РДС применяют источники питания с крутопадающими вольт-амперными характеристиками.

Рациональная область распространения дуговой сварки покрытыми электродами – изготовление конструкций из металлов с толщи-

ной соединяемых элементов > 2 мм при небольшой протяженности швов, расположенных в труднодоступных местах и различных пространственных положениях.

Основными преимуществами способа являются универсальность и простота оборудования. Недостаток – невысокая производительность и применение ручного труда. Низкая производительность обусловлена малыми допустимыми значениями плотности тока, а также тем, что металл шва формируется в основном за счет электродного металла. В этих условиях определяющим в производительности процесса становится коэффициент наплавки $a_н$. Значение $a_н$ зависит от физико-химических свойств покрытия, рода тока и его полярности, состава электрода, режима сварки и изменяется обычно в пределах 8…12 г/(А · ч).

При сварке покрытыми электродами до 15…20 % длины стержня электрода теряется в виде неиспользуемых отходов-огарков и 5…10 % массы стержня – потери на угар и разбрызгивание и, таким образом, общие потери могут составлять до 30 %.

4.1.2. МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ РУЧНОЙ СВАРКИ ПОКРЫТЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

Введение в состав покрытия железного порошка повышает коэффициент наплавки до 18 г/(А · ч). В этом случае шов формируется из металла электродного стержня и металла, вводимого в состав покрытия. Например, при увеличении в рутиловом покрытии электродов содержания железного порошка с 20 до 50…60 % производительность сварки в нижнем положении возрастает в ~1,5 – 2 раза. К электродам с такими покрытиями относятся АН-1, ОЗС-3 и др.

Сварка с глубоким проплавлением. При этом способе сварку ведут при опирании козырька покрытия электрода на кромки свариваемого металла. Используют электроды с повышенной толщиной покрытия (например, ОЗС-3). Масса покрытия составляет 60…80 % массы стержня при отношении диаметра электрода к диаметру стержня 1,5…1,6. Положение электрода при сварке угловых и стыковых швов приведено на рис. 4.2, *а*, *б*. В результате наклона электрода к линии шва под углом 70…80° давление дуги вытесняет жидкий металл из сварочной ванны в сторону валика, глубина проплавления возрастает, уменьшается доля электродного металла в металле шва, что и обеспечивает повышение производительности. Таким образом удается выполнять одностороннюю сварку встык без разделки кромок стальных листов толщиной до 8…10 мм и двустороннюю сварку листов толщиной до 16…18 мм (табл. 4.1).

Сварка трехфазной дугой. При этом способе ток от трех фаз источника переменного тока подводится к двум электродам и свариваемому металлу.

В процессе сварки действуют три сварочные дуги: две между электродами и основным металлом и одна между электродами (рис. 4.2, *в*). Количество выделяемого при этом тепла и, соответственно, производительность возрастают по сравнению со сваркой однофазной дугой в 2 – 3 раза.

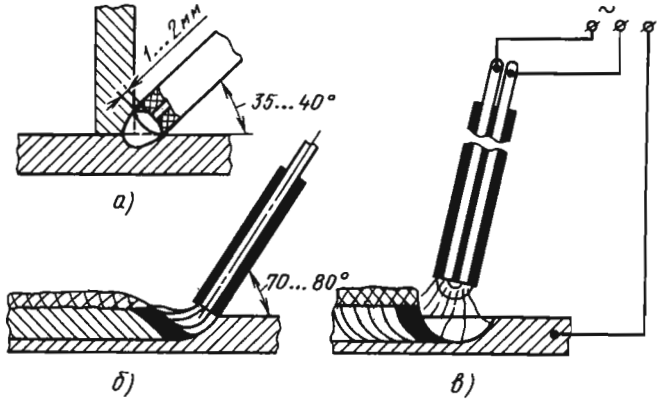


Рис. 4.2. Схемы сварки с глубоким изготовлением угловых (*а*) и стыковых швов (*б*) и сварки трехфазной дугой (*в*)

4.1. Режимы сварки с глубоким проплавлением без скоса кромок

Вид сварки	Толщина металла, мм	Зазор, мм	Диаметр электрода, мм	Глубина проплавления, мм	Ток, А
Односторонняя	4	1	5	4…5	200
	6	1,5	6	8	250
	8	2		6	350
Двусторонняя	8	1	6	5…7	380…420
	12	1,5…2	6…7	7…9	450…550
	16	1,5…2,5		9…12	

Сварка наклонным электродом. Плавящийся покрытый электрод устанавливают наклонно вдоль свариваемых кромок и закрепляют в обойме, которая во время плавления электрода скользит под действием силы тяжести по штанге, при этом дуга перемещается в направлении к штанге, образуя шов (рис. 4.3, *а*). Горение дуги и плавление электрода происходят без участия сварщика. Для фиксирования базы штанги используют струбцины или постоянные магниты.

Электроды имеют диаметры 4…10 мм и длину 450…1200 мм. Угол наклона электрода при использовании штангового приспособления 25…30°. Сварочный ток выбирают из расчета 40…45 А/мм диаметра электрода. Длинномерные швы выполняют при установке нескольких приспособлений вдоль свариваемых кромок. Один сварщик может одновременно обслуживать до трех-четырех постов, при этом производительность возрастает в 2,5 – 3 раза.

Сварка лежачим электродом. При этом способе покрытый плавящийся электрод укладывают вдоль свариваемых кромок (рис. 4.3, *б*). Устойчивое горение дуги обеспечивается за счет саморегулирования процесса.

Электроды состоят из металлического стержня, нанесенного на него слоя покрытия и наружной оболочки с продольным пазом для направления дуги в корень шва. При диаметре электрода 4 и 8 мм толщина покрытия соответственно 1,5 и 3 мм; длина электродов 700…900 мм.

Ток подводят при помощи контактов, устанавливаемых через каждые 500…800 мм. В местах установки контактов на электродах зачищают верхний слой покрытия. Для получения длинных швов стержни электродов соединяют между собой металлическими вставками.

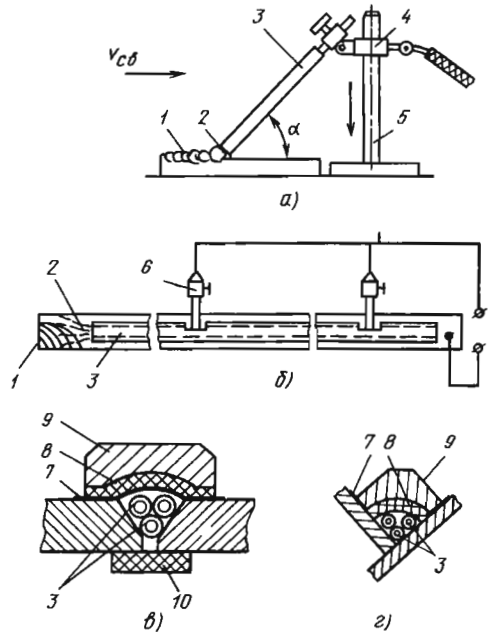


Рис. 4.3. Схемы сварки наклонным (*а*) и лежачим (*б*) электродами стыковых (*в*) и угловых (*г*) швов:
1 – шов; *2* – сварочная дуга; *3* – электрод; *4* – обойма; *5* – штанга; *6* – контакты токоподвода; *7* – изоляция; *8* – медный слой; *9* – стальная накладка; *10* – подкладка

Многослойную сварку выполняют, укладывая электроды в разделку кромок или в угол при положении в лодочку. Ток к электродам подают от нескольких источников. Для устойчивости процесса электроды закрывают стальной накладкой, облицованной медью, под которую укладывают слой изоляции (рис. 4.3, *в*, *г*).

4.1.3. ВЫБОР РЕЖИМОВ ПРИ РДС

Параметры режима подразделяют на основные и дополнительные. Основные параметры – диаметр электрода; сила, род и полярность сварочного тока; напряжение дуги. Дополнительные – состав и толщина покрытий, положение шва в пространстве, число проходов.

Диаметр электродов зависит от толщины металла, катета шва, положения шва в пространстве. Примерное соотношение между толщиной металла s и диаметром электрода $d_э$ при сварке шва в нижнем положении следующее:

s, мм	1…2	3…5	4…10	12…24	30…60
$d_э$, мм	2…3	3…4	4…5	5…6	≥6

Вертикальные, горизонтальные и потолочные швы независимо от толщины свариваемого металла выполняют электродами диаметром до 4 мм.

При сварке многослойных швов для лучшего провара корня шва первый шов сваривают электродом диаметром 3…4 мм, а последующие электродами большего диаметра.

Сила сварочного тока зависит от выбранного диаметра электрода. При сварке швов в нижнем положении величину тока подсчитывают по эмпирическим формулам

$$I_{св} = Kd_э$$

или

$$I_{св} = (20 + 6d_э)d_э,$$

где $d_э$ – диаметр электрода, мм; K – коэффициент, зависящий от диаметра электрода и имеющий следующие значения:

$d_э$, мм	2	3	4	5	6
K …..	25…30	30…45	35…50	40…55	45…60

При большей силе тока наблюдаются перегрев стержня электрода, осыпание покрытия со стержня и нарушается стабильность плавления электрода.

При сварке на вертикальной плоскости силу тока уменьшают на 10…15 %, а в потолочном положении – на 15…20 % по сравнению со значением, выбранным для нижнего положения.

Род тока и полярность устанавливают в зависимости от типа покрытия электрода, состава свариваемого металла и его толщины. При сварке постоянным током обратной полярности на электроде выделяется больше теплоты. Исходя из этого, обратная полярность применяется при сварке электродами с покрытием основного типа, а также при сварке тонких деталей с целью предотвращения прожога, алюминиевых сплавов для разрушения оксидной пленки и легированных сталей во избежание их перегрева. Род тока и полярность указаны в паспорте электрода.

Напряжение дуги при РДС изменяется в пределах (20…36 В) и пропорционально длине дуги. В процессе сварки необходимо поддерживать постоянную длину дуги, которая зависит от марки и диаметра электрода. Ориентировочно нормальная длина дуги должна быть в пределах $L_д = (0{,}5…1{,}1)\ d_э$, где $L_д$ – длина дуги, мм.

В табл. 4.2 приведены ориентировочные данные режимов РДС стыковых соединений (в нижнем положении) металла различной толщины.

4.2. Режимы РДС стыковых соединений

Толщина металла, мм	Диаметр электрода, мм	Сварочный ток, А	Толщина металла, мм	Диаметр электрода, мм	Сварочный ток, А
1…4	1,5	25…40	6…12	4	160…200
	2	60…70		5	220…280
3	3	100…140	≥13		
4…5				6	280…340
	4	160…200		7	350…400
				8	420…480

4.1.4. СПОСОБЫ ВЫПОЛНЕНИЯ ШВОВ

Выполнение стыковых швов. Стыковые соединения со скосом одной или двух кромок сваривают одно- или многослойными швами.

Корень шва выполняют электродом диаметром ≤4 мм, а последующие валики наплавляют, используя электроды большего диаметра.

Толщина отдельного слоя не должна превышать 4…5 мм. Последними проходами создается небольшая выпуклость шва высотой 2…3 мм над поверхностью основного металла.

В табл. 4.3 приведены рекомендации по числу слоев (проходов) при ручной сварке.

Сварку соединений ответственных конструкций большой толщины (>25 мм), когда появляются объемные напряжения и возрастает опасность образования трещин, выполняют с применением специальных приемов заполнения швов блоками или каскадом.

Выполнение угловых швов. Угловые швы применяют при сварке угловых, тавровых и нахлесточных соединений. Сварка угловых швов может проводиться в лодочку или наклонным электродом.

При сварке угловых швов в лодочку имеется возможность наплавлять за один проход швы большого сечения. Однако, как правило, тавровые соединения сваривают наклонным электродом «в угол» (рис. 4.4). Угол наклона электрода в процессе сварки изменяется в зависимости от того, где в данный момент горит дуга (см. рис. 4.4, *б*). При многослойной сварке для лучшего провара корня шва первый слой выполняют узким или ниточным швом электродом диаметром 3…4 мм без колебательных движений. При наплавке швов с катетами >8 мм сварку ведут в два слоя и более (см. рис. 4.4, *в*). При одно- или двустороннем скосе кромок вертикального элемента угловые швы сваривают одним или несколькими слоями в зависимости от толщины свариваемого металла (см. рис. 4.4, *г*). В табл. 4.3 приведены данные о числе слоев при сварке угловых швов.

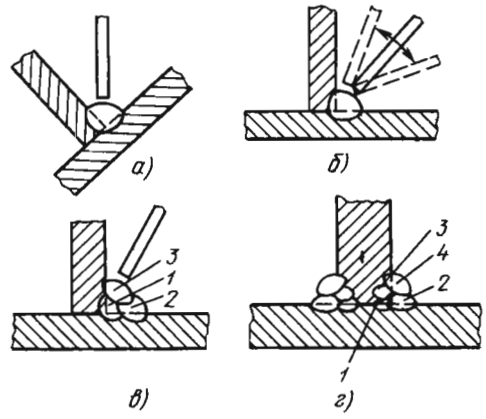


Рис. 4.4. Схемы сварки угловых швов в лодочку (*а*) и в угол (*б – г*):
1 – 4 – порядковые номера валика при многослойной сварке

Сварка тонколистового металла. При сварке листов толщиной 0,5…3 мм для обеспечения необходимого качества сварки применяют отбортовку кромок, временные теплоотводящие подкладки, остающиеся подкладки или расплавляемые элементы, электроды со специальным покрытием, специальное сварочное оборудование.

Сварку с отбортовкой кромок рекомендуют выполнять на спуск при установке кромок в полувертикальное положение (45…65°). Ориентировочные данные о диаметре электрода и силе тока при сварке тонколистовой стали приведены в табл. 4.4.

Для сварки на малых токах используют электроды со специальным покрытием и постоянный ток обратной полярности. При этом применяют источники питания с повышенным напряжением холостого хода, допускающие регулирование малых токов.

Сварка металла большой толщины. Для уменьшения опасности возникновения и развития в швах трещин при сварке толстолистовой стали применяют различные способы заполнения разделки (рис. 4.5).

4.3. Число слоев при сварке швов

Швы	Толщина свариваемого материала, мм							
	1…5	6	8	10	12	14	16	18…20
Стыковые	1	2	2…3	3…4	4	4…5	5…6	5…6
Угловые		1	1	2	2..3	3…4	5	

4.4. Режимы сварки тонколистовых стыковых соединений

Толщина металла, мм	Диаметр электрода, мм	Сварочный ток, А	Толщина металла, мм	Диаметр электрода, мм	Сварочный ток, А
0,5	1	10…20	2	2,5	50…65
1	1,6…2	30…35	2,5	2,5…3	65…100
1,5	2	35…45			

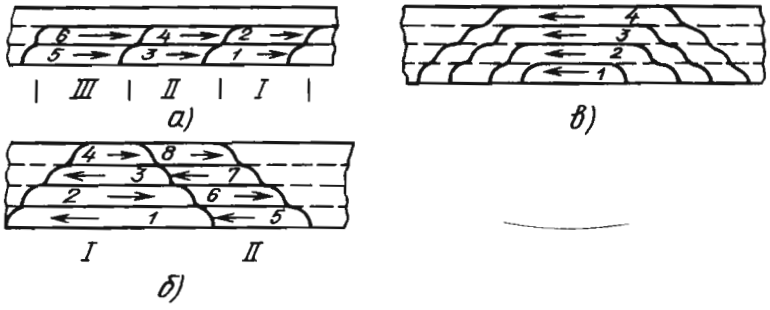


Рис. 4.5. Способы заполнения разделки при сварке толстолистовой стали:
а – двойной слой; *б* – блоками; *в* – горкой

Металл толщиной 15…20 мм сваривают способом двойного слоя. На участке *I* (см. рис. 4.5, *а*) длиной 250…300 мм наплавляют первый слой шва и по горячему металлу первого слоя (≥150…200 °С) накладывают второй слой. В такой же последовательности сваривают шов на участках *II*, *III* и последующих.

Металл толщиной ≥20…25 мм сваривают блоками или каскадом (секциями). При сварке блоками (см. рис. 4.5, *б*) многослойный шов выполняют отдельными участками, а промежутки между ними заполняют до того, как будет завершена сварка всего шва. При сварке каскадом или горкой (см. рис. 4.5, *в*) каждый последующий слой многослойного шва перекрывает весь или часть предыдущего участка.

При У-образной подготовке кромок длина секции каскадной сварки 300…400 мм, при Х-образной подготовке 500…800 мм. При этом каждый слой секции делят на ступени длиной 150…200 мм и выполняют сварку обратноступенчатым способом. При увеличении толщины металла длину секций уменьшают.

Металл толщиной ≥30 мм сваривают одновременно два сварщика, находящихся с противоположных сторон соединения.

Сварка швов различной протяженности. По протяженности швы разделяют на короткие (300…350 мм), средние (350…1000 мм) и длинные (>1000 мм).

Короткие швы сваривают от одного конца шва к другому (напроход); швы средней длины – от середины соединения к концам; длинные швы – обратноступенчатым способом (рис. 4.6). Длина ступени (участка) 100…350 мм, причем при сварке тонкого металла ступени короче, а при сварке толстого металла они более длинные.

Обратноступенчатую сварку ведут в общем направлении *А* от середины к концам. Сварка может выполняться одним или двумя сварщиками (см. рис. 4.6, *г*, участки *1*, *1а*, *2*, *2а*).

При выполнении многослойных швов также используется обратноступенчатый способ, при этом смежные участки вышележащих слоев сваривают в направлении, обратном сварке нижележащих швов. Концы швов смежных участков должны быть смещены на 25…30 мм (см. рис. 4.6, *д*).

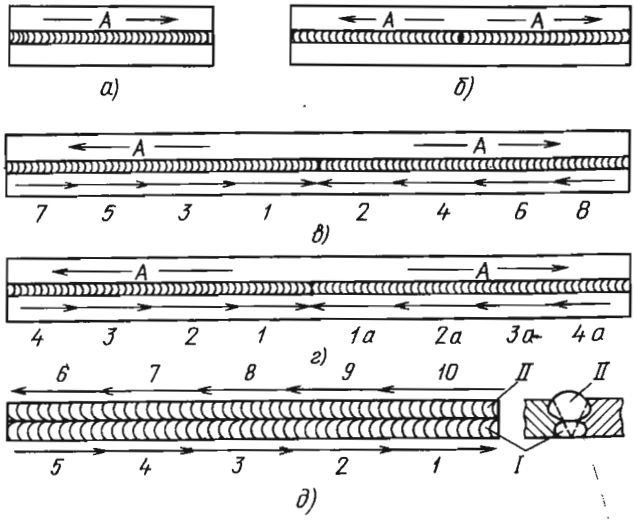


Рис. 4.6. Схемы сварки швов различной протяженности:
а, б – соответственно короткие и средние швы; *в – д* – длинные швы; *I* и *II* – первый и второй слои соответственно

4.1.5. ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ В РАЗЛИЧНЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ПОЛОЖЕНИЯХ

Выполнение швов в нижнем положении наиболее удобно для сварки, так как капли электродного металла переходят в сварочную ванну под действием силы тяжести, жидкий металл ванны удерживается кромками основного металла, лучше наблюдение за формированием шва. В процессе сварки электрод наклоняют по направлению сварки на угол 10…20°.

Выполнение швов в вертикальном положении. В этом случае возможно стекание расплавленного металла сварочной ванны под действием сил тяжести. Поэтому вертикальные швы выполняют короткой дугой в направлении снизу вверх – «на подъем» или сверху вниз – «на спуск». В первом случае дуга возбуждается в самой нижней точке вертикально расположенных пластин и для предотвращения вытекания жидкого металла из ванны необходимо совершать колебательные движения электродом поперек оси шва. Это обеспечивает быстрое затвердевание жидкого металла.

Сварку на спуск применяют при малой толщине металла или наложении первого слоя шва в процессе многослойной сварки. В начале сварки дуга возбуждается в самой верхней точке пластин при горизонтальном расположении электрода и подтекающий под дугу жидкий металл уменьшает возможность образования сквозных прожогов. Для улучшения условий формирования шва амплитуда поперечных колебаний электрода должна быть небольшой, а дуга очень короткой.

Выполнение швов в горизонтальном положении. Эти швы выполнять труднее, чем в вертикальном положении. Для предупреждения стекания жидкого металла скос кромок обычно делается на одной верхней детали. Дуга в этом случае возбуждается на нижней горизонтальной кромке, потом переносится на притупление деталей и затем на верхнюю кромку, поднимая вверх стекающую каплю металла. Колебательные движения электродом совершают по спирали. Горизонтальными сварными швами выполнять легче нахлесточные соединения, чем стыковые, так как горизонтальная кромка листа способствует удержанию расплавленного металла.

Выполнение швов в потолочном положении. Объем сварочной ванны должен быть небольшим. Этого достигают применением электродов малого диаметра (≤3…4 мм) и небольших сварочных токов. Основным условием получения высококачественного шва является поддержание короткой дуги с периодическими замыканиями электрода с ванной жидкого металла. Одновременно электродом выполняют поперечные колебания. Наклон электрода к поверхности детали должен составлять 70…80° в направлении сварки.

4.2. МЕХАНИЗИРОВАННАЯ ДУГОВАЯ СВАРКА ПОД ФЛЮСОМ

4.2.1. ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА СВАРКИ ПОД ФЛЮСОМ

Дуговая механизированная сварка под флюсом обеспечивает высокую производительность, хорошие гигиенические условия труда и механизацию сварочных работ. Схема сварки под флюсом приведена на рис. 4.7. Электрическая дуга горит между концом электродной (сварочной) проволоки и свариваемым металлом, находящимся под слоем флюса в парогазовом пузыре, образованном в результате плавления флюса и металла и заполненном парами металла, флюса и газами. Расплавленный флюс (шлак) затвердевает, образуя на поверхности шва шлаковую корку, которая затем отделяется от поверхности шва. Специальным механизмом подают электродную проволоку в дугу.

Сварку ведут на переменном токе прямой или обратной полярности. Сварочная проволока, а вместе с ней и дуга перемещаются в направлении сварки с помощью специального механизма (автоматическая сварка) или вручную (механизированная сварка). Флюс засыпают на кромки стыка из бункера впереди дуги слоем толщиной 40...80 и шириной 40... 100 мм. Чем больше толщина свариваемого металла и ширина шва, тем больше толщина и ширина слоя флюса. Масса расплавленного флюса, образующего шлаковую корку, обычно равна массе расплавленной сварочной проволоки.

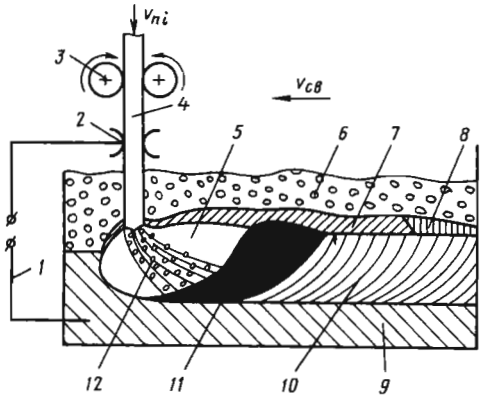


Рис. 4.7. Схема сварки под флюсом:
1 – токопровод к изделию; *2* – токопровод к электроду; *3* – подающие ролики; *4* – электродная проволока; *5* – парогазовый пузырь; *6* – флюс; *7* – расплавленный флюс; *8* – шлаковая корка; *9* – основной металл; *10* – сварной шов; *11* – сварочная ванна; *12* – сварочная дуга

Флюс влияет на устойчивость дуги, формирование и химический состав металла шва и определяет стойкость швов против образования пор и трещин. От состава флюса зависит сцепление шлаковой корки с поверхностью шва. Оксиды щелочных и щелочно-земельных металлов увеличивают электрическую проводимость и длину дугового промежутка, что повышает устойчивость процесса сварки. Соединения фтора, напротив, снижают эти показатели.

Насыпная масса флюса и гранулометрический состав влияют на форму шва.

Швы, сваренные под стекловидными плавленными флюсами (насыпная масса 1,4... 1,7 г/см^3), имеют меньшую ширину, чем швы, сваренные под пемзовидным флюсом (насыпная масса 0,7...0,9 г/см^3).

Гранулометрический состав флюса (размер его зерен) также влияет на форму шва. Под мелким флюсом швы получаются более узкие, с бóльшими глубиной проплавления и высотой усиления, чем при использовании крупнозернистого флюса.

Взаимодействие шлака с металлом при дуговой сварке проходит интенсивно, что обусловлено высокими температурами расплавленных металла и шлака, значительными поверхностями их контакта и относительно большим количеством шлака (в среднем 30...40 % массы металла).

Наиболее важную роль при сварке под плавленными флюсами играют реакции восстановления марганца и кремния. Переход марганца в шов тем значительнее, чем больше MnO и меньше SiO_2 содержится в сварочном флюсе (шлаке). Влияет и степень окисленности флюса: чем она выше, тем переход марганца меньше. Переход кремния из сварочного шлака в металл пропорционален концентрации SiO_2 в шлаке и обычно невелик (0,1...0,2 %). Увеличение основности флюса снижает переход кремния из шлака в металл.

Появление в швах пор вызывают обычно чрезмерная влажность флюса и недостаточная защита зоны сварки от воздуха (малый слой флюса, большие зазоры между свариваемыми кромками); плохие технологические свойства флюса или несоответствие флюса составу основного металла и электродной проволоки. С помощью флюса водород связывают в нерас-

творимые в жидком металле соединения, прежде всего в соединение HF. Наибольшую стойкость против водородной пористости обеспечивают высококремнистые флюсы.

Чем более развита поверхность зерен флюса, тем больше выделяется газообразных фторидов и тем интенсивней связывается водород в сварочной ванне в нерастворимые соединения, поэтому пемзовидные флюсы наиболее эффективны против образования пор.

Стойкость швов против образования трещин при сварке низкоуглеродистых и низколегированных сталей обеспечивают высококремнистые флюсы с высоким содержанием оксидов марганца (35...40 %). Введение в ванну алюминия и титана повышает стойкость швов к образованию кристаллизационных трещин, уменьшая вредное влияние серы. Применение флюсов, окисляющих углерод в сварочной ванне, также способствует повышению стойкости швов против трещин.

В промышленности преимущественное применение находит способ сварки под флюсом сварочной проволокой. Однако в некоторых случаях сварку и особенно наплавку выполняют ленточными электродами. Лента, используемая для этих электродов, имеет толщину до 2 и ширину до 40 мм. Изменяя форму ленты, можно изменить и форму поперечного сечения шва, достигая повышенной глубины проплавления по его оси или получая более равномерную глубину проплавления по всему сечению шва.

Сварку стыковых швов с разделкой кромок и угловых швов, где требуется большое количество наплавленного металла, выполняют с порошковым присадочным металлом (ППМ). С этой же целью увеличивают до 100 мм вылет электрода. Это позволяет на 50...70 % увеличить количество наплавляемого металла.

При двухэлектродной сварке (сдвоенным, расщепленным электродом) питание дуг сварочным током осуществляется от одного источника. Обычно расстояние между электродами <20 мм и дуги горят в одном газовом пузыре, образуя единую сварочную ванну. Электроды могут располагаться поперек или вдоль стыка кромок или занимать промежуточное положение (рис. 4.8). При поперечном расположении электродов сваривают отдельные слои многослойных швов при увеличенных зазорах в стыке между кромками, а также выполняют наплавку. При последовательном расположении электродов глубина проплавления возрастает.

При двухдуговой сварке каждый электрод присоединен к отдельному источнику постоянного либо переменного тока или дуги питаются разнородными токами. Образовавшиеся две дуги при малом расстоянии между электродами горят в одном газовом пузыре. Электроды располагаются перпендикулярно к свариваемой поверхности или наклонно в плоскости, параллельной направлению сварки (см. рис. 4.8, *б*).

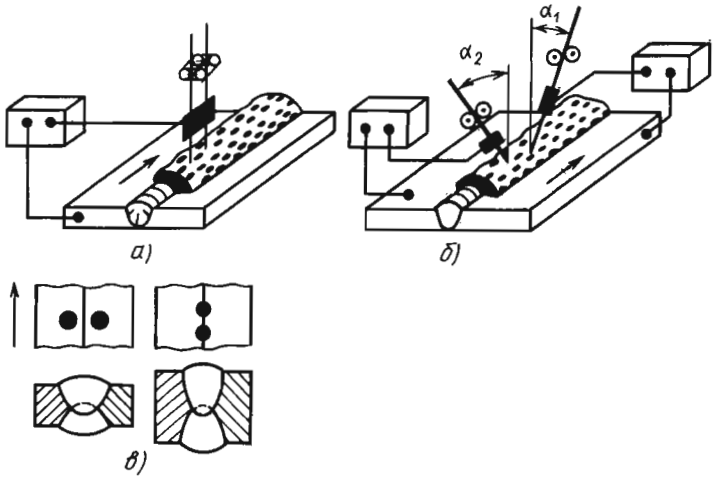


Рис. 4.8. Схемы многоэлектродной (*а*) и многодуговой (*б*) сварки под флюсом и варианты расположения электродов относительно оси стыка (*в*)

При отклонении первой дуги на угол α_1 растет глубина проплавления этой дугой; при отклонении второй дуги на угол α_2 увеличивается ширина шва, определяемая этой дугой, благодаря чему можно избежать подрезов по кромкам шва. Сварка по такой схеме дает возможность резко повысить скорость, а значит, и производительность процесса. При увеличенном расстоянии между электродами дуги направлены в раздельные сварочные ванны. Обычно в таком случае электроды располагаются перпендикулярно к поверхности изделия. Сварка по этой схеме позволяет уменьшить вероятность появления закалочных структур в металле шва и околошовной зоны.

Первая дуга выполняет как бы предварительный подогрев, который уменьшает скорость охлаждения металла шва и околошовной зоны, а вторая дуга частично переплавляет первый шов и термически обрабатывает его. Изменяя сварочный ток каждой дуги и расстояние между ними, можно получать требуемый термический цикл сварки и регулировать свойства металла сварного соединения.

Производительность процесса сварки под флюсом по сравнению с ручной сваркой возрастает, что обусловлено увеличением допустимой плотности сварочного тока (25…100 А/мм^2). Использование больших сварочных токов (табл. 4.5) резко повышает глубину проплавления основного металла и обеспечивает сварку металла повышенной толщины без разделки кромок. При сварке с разделкой кромок меньше угол разделки и больше величина притупления, следовательно, уменьшается количество электродного металла, необходимого для заполнения разделки. Металл шва состоит на 70…80 % из переплавленного основного металла. В результате скорость сварки может быть значительно увеличена. Так, под флюсом сваривают металл толщиной 2…60 мм при скорости однодуговой сварки до 70 м/ч. Применение многодуговой сварки позволяет повысить ее скорость до 300 м/ч. Соответственно, возрастает производительность процесса.

Высокое качество сварного соединения достигается за счет надежной защиты расплавленного металла от взаимодействия с воздухом, его металлургической обработки и легирования расплавленным флюсом. Наличие шлака на поверхности шва уменьшает скорость кристаллизации металла сварочной ванны и скорость охлаждения сварного соединения. В результате металл шва не имеет пор, содержит пониженное количество неметаллических включений. Улучшение формы шва и стабильности его размеров, особенно глубины проплавления, обеспечивает стабильность химического состава и других свойств по всей длине шва.

Сварку под флюсом применяют для изготовления крупногабаритных резервуаров, строительных конструкций, труб и т.д. из сталей, никелевых сплавов, меди, алюминия, титана и их сплавов.

Экономичность процесса определяется снижением расхода сварочных материалов за счет сокращения потерь металла на угар, разбрызгивание (≤3 %, в то время как при ручной сварке до 15 %), огарки. Лучшее использование теплоты дуги при сварке под флюсом по сравнению с ручной сваркой уменьшает расход электроэнергии на 30…40 %. Повышению экономичности способствует и снижение трудоемкости работ по разделке кромок под сварку, зачистке шва от брызг и шлака. Сварку выполняют с применением специальных автоматов или полуавтоматов.

Недостатки способа – большой объем сварочной ванны и повышенная жидкотекучесть расплавленного металла и флюса, что ограничивает возможность применения сварки в различных пространственных положениях. Сварка наиболее целесообразна в нижнем положении при отклонении плоскости шва от горизонтальной не более чем на 10…15 °С.

4.5. Значения сварочного тока для различных диаметров электрода

Параметр	Диаметр электродной проволоки, мм				
	2	3	4	5	6
Диапазон сварочного тока, А	200…400	300…600	400…800	700…1000	700…1200

4.2.2. ПОДГОТОВКА ДЕТАЛЕЙ ПОД СВАРКУ

Основные типы соединений, конструктивные элементы и их размеры в настоящее время регламентируются двумя стандартами: ГОСТ 8713–79 «Сварка под флюсом. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры» и 11533–75 «Автоматическая и полуавтоматическая дуговая сварка под флюсом. Соединения сварные под острыми и тупыми углами. Основные типы, конструктивные элементы и размеры».

Подготовка элементов к сварке под флюсом проводится любым механическим способом или методом термической резки (кислородной, плазменной).

Если свариваемые кромки имеют разную толщину, то должен быть сделан скос с одной или двух сторон листа большей толщины (см. рис. 2.4).

Сборку и сварку элементов со стыковыми швами проводят на стеллажах или в специальных приспособлениях. Зазор и взаимное расположение листов при сварке стыковых швов без разделки кромок фиксируется прихватками и технологическими (выводными) планками. Длина прихваток 50…100 мм, расстояние между ними по длине стыка <500…550 мм, высота выпуклости прихватки 3…4 мм. Сварку следует начинать на входных, а заканчивать на выходных технологических планках (рис. 4.9), которые после остывания шва удаляют. Длина выходной планки должна быть на 40…50 мм больше кратера основного шва, ширина обычно 80…120 мм.

Стыковые соединения с разделкой кромок чаще всего собирают без прихваток, а собранные листы перед сваркой скрепляют концевыми планками. Разделка кромок входных и выходных технологических планок должна быть такая же, как и кромок основного соединения.

Сборку тавровых соединений обычно выполняют в специальных кондукторах либо на стеллажах по разметке. Перед сваркой элементы соединяют прихватками (длина прихваток 80…120 мм, катет <5 × 5 мм, расстояние между прихватками 500…600 мм). Если зазор между элементами >2 мм, выполняют подварку штучными электродами со стороны, противоположной первому шву.

Односторонняя сварка стыковых швов при проплавлении металла на всю толщину может привести к вытеканию сварочной ванны и образованию прожога. Для предупреждения прожогов используют *формирующие подкладки* (из меди, стали, остающиеся подкладки, флюсовые подушки). При двусторонней сварке глубина провара в каждом шве <0,7 толщины металла и расплавленный металл удерживается от вытекания из сварочной ванны нерасплавившейся частью кромок. Для сварки второго шва необходима кантовка изделия

Сварка на медной подкладке, удаляемой после сварки, весьма распространена (рис. 4.10, *а*). Подкладку поджимают к стыку, а для провара корня шва и формирования обратного валика в ней делают канавку. Для предупреждения подплавления подкладки в канавку предварительно засыпают флюс. Подкладка может быть неподвижной или скользящей.

Остающуюся стальную подкладку используют в некоторых случаях при сварке сталей (см. рис. 4.10, *б*). Ее толщина составляет до 40 % толщины свариваемого металла (но ≤4…5 мм) при ширине 30…50 мм. Сварной шов должен частично проплавлять и подкладку. Зазор между подкладкой и кромками не должен превышать 1 мм. Стальную подкладку под стыком обычно закрепляют на прихватках, что требует кантовки изделия и увеличивает расход металла. Зазор между подкладкой и деталью может быть причиной появления трещин в шве при переменных нагрузках.

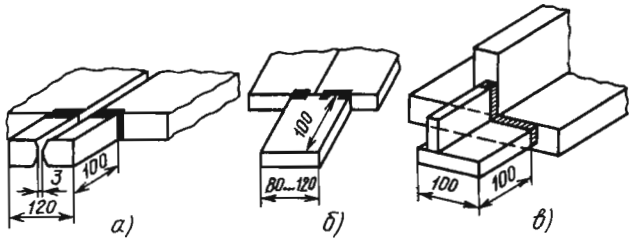


Рис. 4.9. Варианты конструкции входных и выходных планок:
а – стыковое соединение с разделкой кромок; *б* – то же, без разделки кромок; *в* – угловое соединение

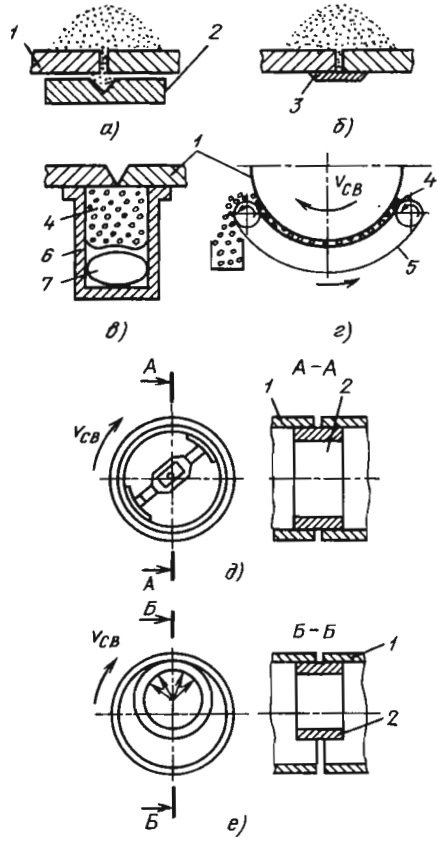


Рис. 4.10. Схема сборки стыка на медно-флюсовой (*а*, *д*, *е*), остающейся стальной (*б*) подкладках и флюсовой подушке (*в*, *г*):
1 – изделие; *2* – флюсомедная подкладка; *3* – стальная подкладка; *4* – флюс; *5* – ремень; *6* – лоток; *7* – брезентовый рукав

Сварка с предварительной подваркой корня шва технологически более удобна. Подварочный шов можно выполнять вручную покрытыми электродами или плавящимся электродом в защитном газе. Глубина провара должна достигать 1/3 толщины свариваемого металла. Требования к равномерности зазора по длине стыка снижаются.

Сварка на флюсовой подушке (см. рис. 4.10, *в*) допускает меньшую точность сборки стыка под сварку, чем сварка на подкладке. Свариваемые листы укладывают на стеллаж, в котором смонтирована флюсовая подушка. Воздух, подаваемый в брезентовый рукав, поджимает лоток с флюсом. Для предупреждения подъема свариваемых листов от стеллажа на них укладывают грузы или используют электромагниты, устанавливаемые снизу. При сварке кольцевых швов изнутри флюс снаружи поджимается флюсоременной подушкой, движение которой обеспечивается за счет трения о поверхность изделия (см. рис. 4.10, *г*). Подушка представляет собой ремень, имеющий форму лотка, в который в процессе сварки непрерывно подается мелкий флюс. Сварка первым слоем проводится изнутри сосуда, а последующими – снаружи.

При сварке кольцевыми швами труб диаметром до 800 мм часто применяют флюсомедные подкладки, которые могут быть неподвижными или перекатывающимися (см. рис. 4.10, *д*, *е*). Высокое качество шва обеспечивается при плотном поджатии флюса.

Получают распространение *самоклеящиеся гибкие флюсонесущие ленты*, *ленты из стекловолокна*, съемные подкладки одно- или многоразового пользования из спрессованного флюса или многослойного керамического формирующего материала в виде специальных пластин.

Подкладки закрепляют с помощью эксцентриков, рычажных, винтовых поджимов и другими способами.

4.2.3. РЕЖИМЫ СВАРКИ ПОД ФЛЮСОМ

Параметры режима делят на основные и дополнительные. К основным относят ток, его род и полярность, напряжение дуги, диаметр электродной проволоки, скорость сварки. Дополнительные параметры режима – вылет электродной проволоки, состав и строение флюса (плотность, размеры частиц), положение изделия и электрода при сварке.

Параметры режима сварки зависят от толщины и свойств свариваемого металла и обычно приводятся в технических условиях на сварку конкретного изделия и корректируются при сварке опытных образцов. При отсутствии таких данных режимы подбирают экспериментально. Основным условием для успешного ведения процесса сварки является поддержание стабильного горения дуги. Для этого определенной силе сварочного тока должна соответствовать своя скорость подачи электродной проволоки. Скорость подачи должна повышаться с увеличением вылета электрода. При его постоянном вылете увеличение скорости подачи уменьшает напряжение дуги. При использовании легированных проволок, имеющих повышенное электросопротивление, скорость подачи должна возрастать.

На рис. 4.11 показано влияние изменения основных параметров сварки на размеры шва. Закономерности относятся к случаю наплавки, когда глубина провара ≤0,8 толщины основного металла. При большей глубине провара ухудшение теплоотвода от нижней части шва приводит к резкому росту провара – вплоть до прожога.

Наибольшее влияние на форму и размеры шва оказывает сварочный ток. При его увеличении (см. рис. 4.11, *а*) интенсивно повышаются глубина проплавления и высота усиления шва, а его ширина возрастает незначительно.

Повышение напряжения на дуге увеличивает ширину сварного шва, глубина проплавления практически не меняется, высота выпуклости снижается (см. рис. 4.11, *б*).

Влияние скорости сварки (см. рис. 4.11, *в*) на глубину проплавления и ширину шва носит сложный характер. Сначала при увеличении скорости сварки давление дуги все больше вытесняет жидкий металл, толщина прослойки жидкого металла под дугой уменьшается и глубина проплавления возрастает. При дальнейшем увеличении скорости сварки (>20 м/ч) заметно снижается погонная энергия и глубина проплавления начинает уменьшаться. Во всех случаях при увеличении скорости сварки ширина шва уменьшается. При скорости сварки >70…80 м/ч по обеим сторонам шва возможны несплавления с кромкой или подрезы. Если необходимо вести сварку на больших скоростях, применяют специальные методы (сварка трехфазной дугой, двухдуговая и др.).

Диаметр электродной проволоки заметно влияет на форму и размеры шва, особенно на глубину проплавления. Как видно из табл. 4.6, при отсутствии источников, обеспечивающих необходимый сварочный ток, требуемая глубина проплавления может быть достигнута при уменьшении диаметра используемой электродной проволоки.

Род и полярность тока влияют на глубину провара. По сравнению с постоянным током прямой полярности сварка на постоянном токе обратной полярности на 40…50 %, а на переменном на 25…30 % увеличивает глубину проплавления. Изменение температуры изделия в пределах –60…+350 °С практически не влияет на размеры и форму шва. При подогреве изделия до более высокой температуры возрастают глубина и особенно ширина шва.

Наклон электрода вдоль шва и положение детали также отражаются на форме шва. Обычно сварку выполняют вертикально расположенным электродом, но в отдельных случаях она может проводиться с наклоном электрода углом вперед или углом назад. При сварке углом вперед жидкий металл подтекает под дугу, толщина его прослойки увеличивается, а глубина проплавления уменьшается. Сварка углом назад уменьшает прослойку, и проплавление возрастает. Сварка на подъем увеличивает глубину проплавления и вероятность прожога. При сварке на спуск металл сварочной ванны, подтекая под дугу, уменьшает глубину проплавления, поэтому возможно образование несплавлений и шлаковых включений.

Состав флюса, его насыпная масса также изменяют форму и размеры шва. При увеличении насыпной массы флюса глубина проплавления возрастает, ширина шва уменьшается.

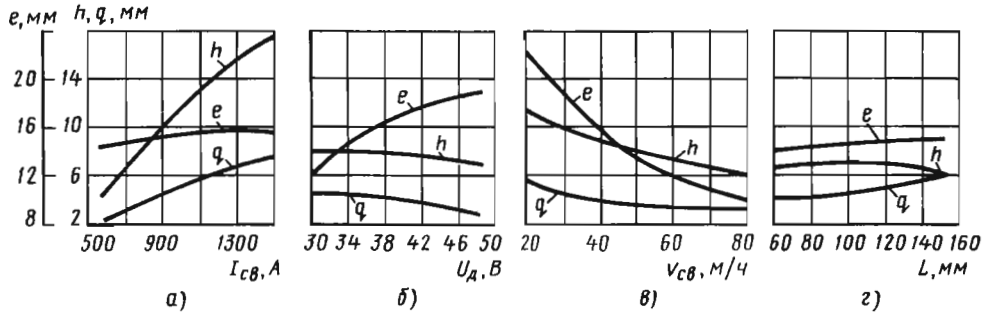


Рис. 4.11. Изменение ширины *e* и выпуклости *q* шва и глубины проплавления *h* в зависимости от параметров режима (*а – в*) и вылета электрода (*г*):
$U_д$ – напряжение дуги; $I_{св}$ – сварочный ток; $v_{св}$ – скорость сварки

4.6. Глубина проплавления шва при различных диаметрах электродной проволоки и величинах сварочного тока (А) (сварка под флюсом)

Глубина проплавления, мм	Диаметр электродной проволоки, мм	Сварочный ток, А
3	5	450
	4	375
	3	300
	2	200
4	5	500
	4	425
	3	350
	2	300
5	5	550
	4	500
	3	400
	2	350
6	5	600
	4	550
	3	500
	2	400
8	5	725
	4	675
	3	625
	2	500
10	5	825
	4	900
	3	750
	2	600
12	5	930
	4	925
	3	875
	2	700

4.2.4. ТЕХНИКА СВАРКИ ПОД ФЛЮСОМ ШВОВ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ

Стыковые швы выполняют односторонней однопроходной сваркой, двусторонней одно- или многопроходной сваркой.

При односторонней сварке металла толщиной до 4…6 мм без разделки кромок зазор при сборке устанавливают минимальным.

Для металла толщиной 10…12 мм стыки собирают с зазором. Тонкие листы (до 10 мм) и цилиндрические конструкции соединяют на стальных подкладках толщиной 3…6 и шириной 30…50 мм, если они не запрещены по условиям работы конструкции.

Соединение «в замок» применяют в ответственных изделиях, при сборке толстостенных крупногабаритных изделий.

Одностороннюю сварку на флюсовой подушке применяют для сварки листовых конструкций и выполнения кольцевых швов как с разделкой, так и без разделки кромок с обязательным технологическим зазором (табл. 4.7).

Для получения стабильной формы корневого валика одностороннюю сварку выполняют на медной или флюсомедной подкладке.

Сварка без подкладок возможна только при условии плотной и точной сборки стыка без зазоров и глубине провара ≤2/3 толщины металла.

Двусторонняя однопроходная сварка обеспечивает более высокое качество швов за счет уменьшения влияния изменения режимов сварки и точности сборки стыков.

Первый проход двустороннего шва выполняют на флюсовой подушке или на весу. Второй проход с обратной стороны осуществляют после зачистки корня шва первого прохода.

Режимы сварки первого слоя выбирают так, чтобы глубина провара не превышала половины толщины металла. Второй шов сваривают с проваром, равным 0,65…0,7 толщины основного металла (табл. 4.8).

Многопроходные двусторонние швы применяют для стыковых соединений металла толщиной >20 мм с разделкой кромок. Число слоев определяется толщиной металла и режимом сварки.

При сварке первых двух слоев электрод должен быть направлен точно по оси разделки во избежание подрезов. Последующие слои сваривают со смещением электродов с оси так, чтобы каждый последующий слой перекрывал предыдущий на 1/3 ширины.

Ориентировочные режимы многопроходной автоматической сварки под флюсом стали с Х- и U-образной разделкой кромок приведены в табл. 4.9.

При соединении металлов большой толщины (до 300 мм) сварку ведут в узкий зазор (щелевая разделка) между свариваемыми кромками шириной 16…36 мм. Это позволяет уменьшить деформации и остаточные напряжения в швах. Однако повышаются требования к точности сборки кромок, особенно величины зазора между ними. Сварку осуществляют с

4.7. Типовые режимы сварки сталей на флюсовой подушке

Толщина металла, мм	Ширина зазора в стыке, мм	$d_э$, мм	$I_{св}$, А	$U_д$, В	$v_{св}$, м/ч	Давление воздуха в шланге флюсовой подушки, кПа
2	0…1,0	1,6	120	24…28	43,5	80
3	0…1,5	2	275…300	28…30	44,0	
		3	400…425	25…28	70,0	
5	0…2,5	2	425…500	32…34	35,0	100…150
		4	575…625	28…30	46,0	108
8	0…3,5		725…775	30…36	34,0	100…150

4.8. Режимы механизированной сварки под флюсом двусторонних стыков швов без разделки кромок

Толщина металла, мм	Зазор в стыке, мм	$I_{св}$, А	$U_д$, В	$v_{св}$, м/ч
14	3…4	700…750	34…36	30
20	4…5	850…900	36…40	27
24		900…950	38…42	25
30	6…7	950…1000	40…44	16
40	8…9	1100…1200		12
50	10…11	1200…1300	44…48	10

4.9. Режимы многопроходной сварки сталей под флюсом

Толщина металла, мм	Разделка кромок	$d_э$, мм	Число слоев	$I_{св}$, А	$U_д$, В	$v_{св}$, м/ч
70	U-образная	8	16	1000…1050	35…40	28
90	U-образная		22			
30	X-образная	6	8	900…1100	36…40	20

раскладкой по два или три валика в каждом слое проволокой диаметром 2 или 3 мм на режимах, которые подбирают в зависимости от ширины зазора, вида материала и пр.

Сварка под флюсом тавровых, угловых и нахлесточных соединений. Сварку угловых швов выполняют при положении в лодочку или в угол (рис. 4.12). Сварку в лодочку (*а*) выполняют при симметричном или несимметричном расположении электрода.

В зависимости от площади поперечного сечения шва и положения сварки угловые швы можно сваривать без скоса или со скосом одной из кромок с одной или двух сторон как одно-, так и многопроходными швами. Сварку однопроходным угловым швом тавровых соединений ведут на весу, на флюсовой подушке или по ручной подварке. При сварке в лодочку однослойный шов или каждый шов в многослойном шве имеет большее сечение, чем при сварке наклонным электродом, но применение медных подкладок и флюсовых подушек затруднено, поэтому зазор между деталями не должен превышать 1,5 мм.

При выборе режима сварки угловых швов в лодочку формирование шва высококачественное, если ширина провара больше его глубины не более чем в 2 раза, иначе неизбежны подрезы стенок тавра и непровар корня шва.

В табл. 4.10 приведены ориентировочные режимы сварки в лодочку угловых швов тавровых и нахлесточных соединений.

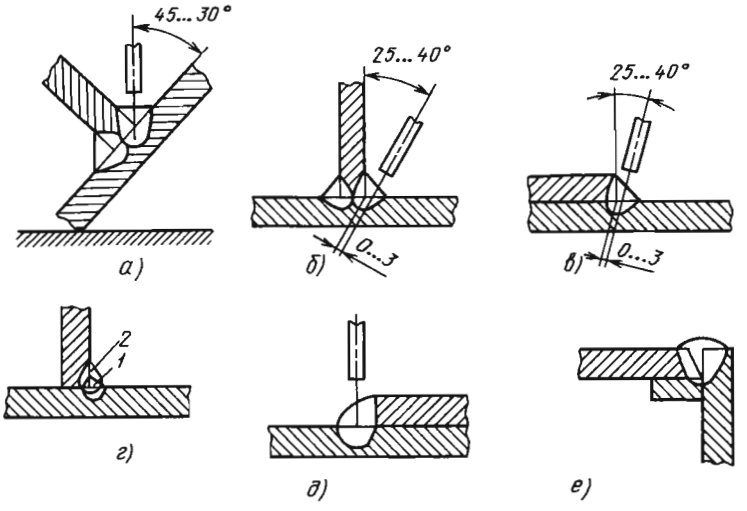


Рис. 4.12. Схемы сварки угловых швов:
1 и *2* – первый и второй проходы

4.10. Режимы сварки в лодочку угловых швов тавровых и нахлесточных соединений

Катет шва, мм	$d_э$, мм	$I_{св}$, А	$U_д$, В	$v_{св}$, м/ч
6	2	450...475	34...36	30
8	3	550...600		
	4	575...625		
	5	675...725	32...34	32
10	3	600...650	34...36	23
	4	650...700		
	5	725...775	32...34	25
12	3	600...650	34...36	15
	4	725...775	36...38	20
	5	775...825		18

Способ сварки в угол не требует специальных мер против вытекания жидкого металла, поэтому зазор может быть увеличен до 3 мм. При увеличенных зазорах выполняют ручную или механизированную подварку швом, который переплавляется при сварке основного шва.

Техника сварки при положении в лодочку не отличается от сварки стыковых швов с разделкой кромок; за один проход можно сварить шов с катетом до 14 мм. Возможность образования подреза при сварке наклонным электродом ограничивает получение шва с катетом >6 мм. В этом случае необходимо особенно точно направлять электрод в разделку кромок.

Для обеспечения провара при различной толщине свариваемых элементов сварку осуществляют в несимметричную лодочку или несимметрично наклонным электродом. Для предупреждения подреза при сварке наклонным электродом его смещают, как показано на рис. 4.12, *б* и *в*. Последовательность сварки многопроходных швов показана на рис. 4.12, *г*. Швы следует располагать так, чтобы ранее наложенный валик препятствовал стеканию металла и шлака последующих слоев.

Ориентировочные режимы сварки в угол швов тавровых и нахлесточных соединений приведены в табл. 4.11.

4.11. Режимы сварки в угол швов тавровых и нахлесточных соединений

Катет шва, мм	$d_э$, мм	$I_{св}$, А	$U_д$, В	$v_{св}$, м/ч
3	2	200…220	25…28	60
4	2	280…300	28…30	55
	3	350		
5	2	375…400	30…32	
	3	450	28…30	
	4			60
7	2	375…400	30…32	28
	3	500		48
	4	675	32…35	50
8	4			45
	5	720…750	38…40	50

Сварка вертикальным электродом с оплавлением верхней кромки нахлесточного соединения (см. рис. 4.12, *д*) применяется, когда толщина листа ≤8 мм. При этом формируются нормальные швы с вертикальным катетом, равным толщине верхнего листа. Горизонтальный катет обычно больше вертикального в 1,5 – 2 раза. Угловые соединения можно сваривать вертикальным электродом с медной подкладкой (см. рис. 4.12, *е*) или с гибкими самоклеящимися флюсонесущими лентами.

Сварка электрозаклепками обычно выполняется в соединениях внахлестку, втавр, а также угловых. Основной трудностью сварки подобных соединений является обеспечение плотного прилегания поверхностей свариваемых деталей. Для предупреждения вытекания расплавленного флюса и металла зазор не должен превышать 1 мм. Электрозаклепки можно сваривать по предварительно подготовленным отверстиям в верхнем листе толщиной >10 мм (рис. 4.13, *а*) или с проплавлением верхнего листа толщиной до 10 мм (см. рис. 4.13, *б*). При сварке с отверстием диаметр электрода должен быть равен 0,2…0,25 диаметра отверстия. Сварка может сопровождаться подачей электрода в процессе сварки или без его подачи до естественного обрыва дуги. В первом случае используют обычные полуавтоматы для сварки под флюсом, во втором – специальные электрозаклепочники.

Прорезные швы также могут выполнять по предварительно подготовленным отверстиям

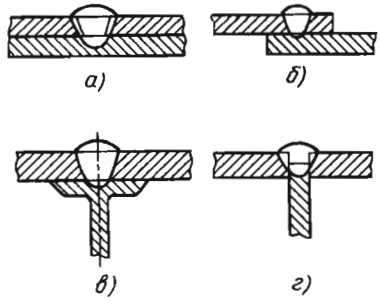


Рис. 4.13. Схемы сварки электрозаклепочных и прорезных швов

удлиненной формы или с проплавлением верхнего листа при его толщине до 10 мм (см. рис. 4.13, *в*, *г*). По существу, сварка прорезных швов является сваркой на остающейся подкладке. Общий недостаток таких швов – трудность контроля их качества и, в частности, провара нижнего листа.

Приварка шпилек под флюсом. Для этого используют специальные установки и флюсовые шайбы высотой 6…10 мм с наружным диаметром 15…20 мм. При диаметре шпильки >8 мм для облегчения возбуждения дуги привариваемый конец затачивают на угол 90°. В вертикальном и потолочном положениях сварочный ток снижают на 25…30 % по сравнению со сваркой в нижнем положении. После образования достаточной сварочной ванны и обрыва дуги шпильку быстро подают до упора.

4.3. ДУГОВАЯ СВАРКА В ЗАЩИТНЫХ ГАЗАХ

4.3.1. ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ В ЗАЩИТНЫХ ГАЗАХ

При сварке в защитных газах для защиты зоны дуги и расплавленного металла используют специальный газ, подаваемый струей в зону плавления при помощи горелки, или сварку выполняют в камерах, заполненных газом.

Наиболее распространенной является струйная местная защита потоком газа, истекающим из сопла сварочной горелки (рис. 4.14). Качество струйной защиты зависит от конструкции и размеров сопла *1*, расстояния *L* от среза сопла *А – А* до поверхности свариваемого материала и расхода защитного газа. В строении газового потока различают две области: ядро струи *2* и периферийный участок *3*. Надежная защита металла гарантирована только в пределах ядра потока, максимальная длина *H* которого наблюдается при ламинарном истечении газа из сопла. Применяют различную форму проточной части сопла: коническую, цилиндрическую и профилированную. Для улучшения струйной защиты на входе в сопло в горелке устанавливают мелкие сетки, пористые материалы и т.п., позволяющие дополнительно выравнивать поток газа на выходе из сопла. Расход защитного газа должен обеспечивать ламинарное истечение струи.

В качестве защитных газов используют инертные газы (аргон, гелий и их смеси), не взаимодействующие с металлом при сварке, и активные газы (CO_2, N_2 и др.), взаимодействующие с металлом, а также их смеси. Защитный газ определяет физические, металлургические и технологические характеристики способа сварки.

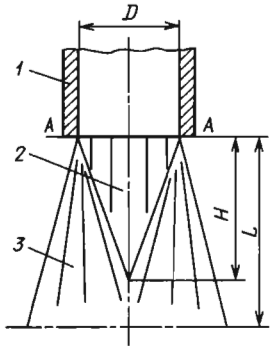


Рис. 4.14. Схема газового потока при местной защите зоны сварки

Сварку в защитных газах можно выполнять неплавящимся, обычно вольфрамовым, или плавящимся электродом (рис. 4.15). В первом случае используют инертные газы и их смеси. Сварной шов образуется за счет расплавления кромок изделия и, если необходимо, подаваемой в зону дуги присадочной проволоки.

Во втором случае используют сварочную проволоку, непрерывно подаваемую в зону дуги, которая в процессе сварки расплавляется и участвует в образовании металла шва. Для повышения устойчивости дуги, увеличения глубины проплавления или изменения формы шва, металлургической обработки расплавленного металла, повышения производительности сварки углеродистых и легированных сталей применяют смеси инертных газов с активными газами: смесь аргона с 1…5 % O_2, смесь аргона с 10…25 % CO_2, смесь аргона с CO_2 (до 20 %) и с добавкой ≤5 % O_2.

Смесь углекислого газа с кислородом (до 20 %) применяют при сварке углеродистой стали. Эта смесь имеет высокую окислительную способность, обеспечивает глубокое проплавление и хорошую форму шва, уменьшает пористость.

В зону сварки защитный газ может подаваться концентрично вокруг дуги, а при повышенных скоростях сварки плавящимся электродом – сбоку (рис. 4.16.). Для экономии расхода инертных газов используют защиту двумя раздельными потоками газов (см. рис. 4.16, *в*); при этом наружный поток обычно из углекислого газа. При сварке активных материалов для предупреждения контакта воздуха не только с расплавленным, но и с нагретым твердым металлом применяют удлиненные насадки на

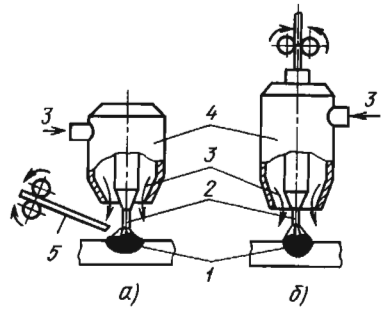


Рис. 4.15. Схемы сварки неплавящимся (*а*) и плавящимся (*б*) электродами в защитных газах:
1 – металл шва; *2* – электрод; *3* – защитный газ; *4* – сопло горелки; *5* – присадочная проволока

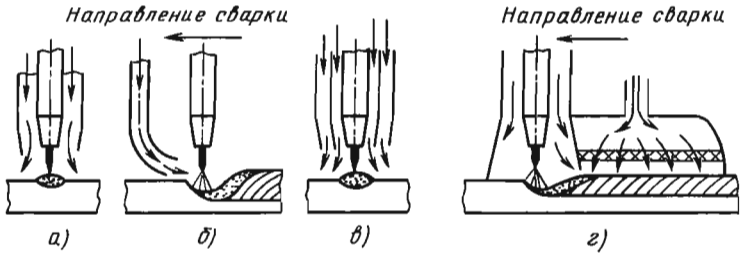


Рис. 4.16. Схемы подачи защитного газа в зону плавления:
а – концентрическая; *б* – боковая; *в* – двумя концентрическими потоками; *г* – с дополнительной насадкой

сопла (подвижные камеры, см. рис. 4.16, *г*). Наиболее надежная защита достигается при размещении изделия в стационарных камерах, предварительно вакуумированных и затем заполненных защитным газом. Для сварки крупногабаритных изделий используют переносные камеры из мягких пластичных, обычно прозрачных материалов, устанавливаемых локально над свариваемым стыком.

Теплофизические свойства защитных газов влияют на технологические свойства дуги. При равных условиях дуга в гелии по сравнению с дугой в аргоне имеет более высокое напряжение, а образующийся шов имеет меньшую глубину проплавления и большую ширину. Углекислый газ по влиянию на форму шва занимает промежуточное положение.

При необходимости металлургической обработки и дополнительного легирования шва в зону дуги подают небольшое количество раскисляющих или легирующих веществ. Шлакообразующие вещества вводят в виде пыли или паров вместе с защитным газом; как магнитный флюс или флюс, засыпаемый в разделку кромок; в виде покрытия, наносимого на поверхность электродной проволоки, и другими способами. Состав металла шва можно изменить путем подачи в зону сварки дополнительной присадочной проволоки, а также двухдуговой сварки в общую ванну с использованием проволок различного состава.

Основными преимуществами способа сварки в защитных газах являются высокое качество сварных соединений металлов и их сплавов разной толщины и малый угар легирующих элементов при сварке в инертных газах; возможность сварки в различных пространственных положениях; возможность наблюдения за образованием шва и легкость механизации и автоматизации процесса.

К недостаткам способа относятся необходимость применения защитных мер против световой и тепловой радиации дуги, возможность нарушения газовой защиты при сдувании струи и в некоторых случаях трудность водяного охлаждения горелок.

4.3.2. СВАРКА НЕПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ В ИНЕРТНЫХ ГАЗАХ

В настоящее время в качестве неплавящегося электрода используют преимущественно стержни из чистого вольфрама, реже из графита. Применяемые вольфрамовые электроды должны отвечать требованиям ГОСТ 23949–80. Они могут содержать активирующие добавки оксида лантана (ЭВЛ), иттрия (ЭВИ), диоксида тория (ЭВТ). Эти добавки облегчают зажигание и поддерживают горение дуги, повышают эррозионную стойкость электрода. Наибольшее распространение получили электроды ЭВЛ и ЭВИ диаметром 0,5...10 мм, выдерживающие большую токовую нагрузку (табл. 4.12). Из-за окисления вольфрамовых электродов и их быстрого разрушения для защиты не допускается использовать газы, содержащие кислород.

Основным защитным газом является аргон. Горение дуги в гелии происходит при более высоком напряжении (в 1,4 – 1,7 раза выше, чем в аргоне). Это требует применения для питания дуги специализированных источников с повышенным напряжением холостого хода. Использовать аргоно-гелиевые смеси целесообразно в тех случаях, когда нужно повысить проплавляющую способность дуги без увеличения сварочного тока. Наряду с инертными газами для сварки вольфрамовым электродом используют и другие газы, например азот и водород или их смеси с аргоном.

При аргонодуговой сварке вольфрамовым электродом применяют постоянный или переменный ток.

4.12. Выбор диаметра вольфрамового электрода в зависимости от силы тока (А) и рода сварочного тока (защитный газ – аргон)

Марка электрода	Род тока	Диаметр электрода, мм					
		2	3	4	5	6	7
ЭВЧ – чистый вольфрам	Постоянный, прямой полярности, А	50	170	370	470	560	–
	То же, обратной полярности, А	30	40	55	65	85	110
	Переменный, А	20	50	80	220	260	310
ЭВЛ – вольфрам с оксидами лантана	Постоянный, прямой полярности, А	150	250	500	710	1000	–
	То же, обратной полярности, А	35	45	60	80	100	125
	Переменный, А	100	160	220	280	340	410

При сварке на постоянном токе прямой полярности обеспечиваются лучшие условия для термоэлектронной эмиссии с электрода, выше его стойкость и допускаемая сила тока. Дуга на прямой полярности легко возбуждается и горит при напряжении 10...15 В в широком диапазоне плотностей тока.

При сварке на постоянном токе обратной полярности возрастает напряжение дуги, уменьшается устойчивость горения, резко снижается стойкость электрода и повышается его нагрев. Однако дуга обратной полярности обладает важным технологическим свойством: при ее воздействии на поверхность свариваемого металла очищается поверхность металла, удаляются поверхностные оксиды. Процесс удаления поверхностных оксидов получил название *катодного распыления* (катодной очистки). Это свойство используют при сварке алюминия, магния, бериллия и их сплавов, имеющих на поверхности прочные оксидные пленки. Поскольку при постоянном токе обратной полярности стойкость вольфрамового электрода низка, то для катодной очистки используют переменный ток. Таким образом, при сварке вольфрамовым электродом на переменном токе реализуются преимущества дуги прямой и обратной полярностей, т.е. обеспечиваются устойчивость электрода и разрушение поверхностных оксидов на изделии.

При сварке на переменном токе рабочий конец вольфрамового электрода затачивают в виде полусферы. При сварке на постоянном токе конец электрода затачивают под углом 60° на длине двух-трех диаметров или в виде четырехгранной пирамиды. Расход вольфрамовых электродов невелик (табл. 4.13). Для его уменьшения подачу защитного газа следует начинать за 10...15 с до возбуждения дуги, а заканчивать через 5...10 с после обрыва дуги для охлаждения электрода в струе газа. Для предупреждения загрязнения вольфрамового электрода дугу возбуждают, не касаясь концом электрода изделия, а используя осцилляторы или разряд конденсаторов, без касания изделия концом электрода.

Технологические свойства дуги зависят от рода тока. При прямой полярности на изделия выделяется ~70 % тепла, что и обеспечивает более глубокое проплавление основного металла, чем при обратной полярности, где наблюдается повышенный разогрев электрода и допустимая сила сварочного тока меньше (табл. 4.12). При использовании переменного тока из-за физических особенностей электропроводимости дуги сила сварочного тока больше при прямой и меньше при обратной полярностях (рис. 4.17), т.е. проявляется выпрямляющий эффект сварочной дуги, связанный с различными теплофизическими свойствами электрода и изделия.

Для увеличения глубины проплавления используют:

– сварку по окисленной поверхности при толщине оксидной пленки в пределах 20... 200 мкм, что повышает эффективность выделения тепла на изделии, отчего глубина проплавления возрастает на 15...30 %,

4.13. Расход вольфрамовых электродов

Свариваемый материал	Толщина материала, мм	Диаметр электрода, мм	Расход на 100 м шва, г	
			Ручная сварка	Механизированная сварка
Конструкционные, коррозионно-стойкие стали и жаропрочные сплавы	1	1,5	8,3	3,9
	2	2	23,4	10,9
	3	3	83,3	39
	4	4	132,2	125
	≥5	5	165	156
Алюминиевые и магниевые сплавы	2	2	23,4	10,9
	4	3	83,3	39
	5...6	4	132,2	125
	≥7	5	165	156

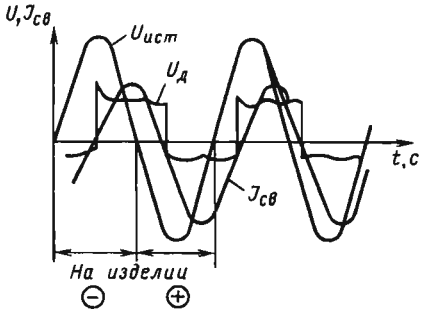


Рис. 4.17. Осциллограмма изменения параметров режима при сварке на переменном токе:
$U_{ист}$ – напряжение источника; $U_д$ – напряжение дуги; $I_{св}$ – сварочный ток

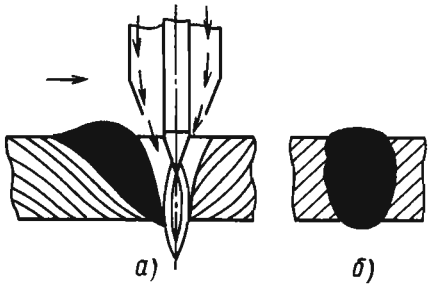


Рис. 4.18. Схема сварки погруженной дугой (*а*) и форма проплавления в поперечном сечении шва (*б*)

– сварку по слою флюса толщиной до 0,25 мм, состоящего из галогенидов и некоторых окислов, что способствует увеличению концентрации тепловой энергии в активном пятне на изделии, эффективной мощности дуги и глубины проплавления;

– сварку с активированной присадочной проволокой, на поверхность которой наносят фтористый кальций или вводят его в присадочную проволоку в виде сердечника из расчета 3 мг/см шва.

4.3.3. РАЗНОВИДНОСТИ СВАРКИ НЕПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ

Сварка погруженной дугой (рис. 4.18) является одной из разновидностей сварки вольфрамовым электродом. Увеличение расхода защитного газа позволяет обжать дугу и способствует ее углублению в основной металл. В результате глубина провара резко увеличивается.

Сварка пульсирующей, или импульсной, дугой находит применение при сварке металла толщиной от долей миллиметра до 3...4 мм. Ток включается периодически, импульсами, с частотой до 25 имп./с, что уменьшает размеры сварочной ванны (рис. 4.19). Шов образуется из отдельных расплавленных ванн. В перерыве между импульсами тока сварочная ванна частично кристаллизуется, что снижает вероятность прожогов. Для уменьшения деионизации в паузах между импульсами поддерживается дежурная дуга с уменьшенным током $I_{деж}$. Регулируя соотношение между $I_{св}$ и $I_{деж}$, $t_{св}$ и $t_п$, а также скорость сварки, изменяют форму и размеры шва. Этот способ позволяет сваривать стыковые соединения на весу во всех пространственных положениях.

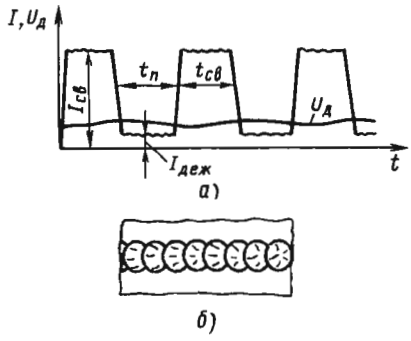


Рис. 4.19. Форма импульсов тока (*а*) и вид шва (*б*) при импульсно-дуговой сварке

4.3.4. СВАРКА ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ В ИНЕРТНОМ ГАЗЕ

При сварке плавящимся электродом для обеспечения газовой защиты расстояние от сопла горелки до изделия выдерживают в пределах 8…15 мм. Токоподводящий наконечник должен находиться на уровне края сопла или утапливаться в него на глубину до 3 мм. При сварке угловых швов и стыковых швов с глубокой разделкой токоподводящий наконечник может выступать из сопла на 5…10 мм.

Тонколистовой материал толщиной до 4 мм сваривают короткой дугой с периодическими короткими замыканиями, металл большей толщины – на токах выше критических.

Увеличение тока выше критического при аргонодуговой сварке плавящимся электродом приводит к мелкокапельному (струйному) переносу электродного металла. При этом резко повышаются стабильность дуги в различных пространственных положениях и глубина проплавления по оси шва. Критический ток уменьшается при активировании электрода легкоионизирующимися элементами, увеличении вылета электрода и добавлении к аргону до 5 % O_2.

Сила тока регулируется скоростью подачи электродной проволоки. Напряжение дуги устанавливается примерно равным напряжению холостого хода источника тока. Закономерности изменения формы и размеров шва в зависимости от основных параметров режима примерно такие же, как и при сварке под флюсом.

Некоторые режимы аргонодуговой сварки сталей плавящимся и неплавящимся электродами приведены в табл. 4.14.

4.14. Режимы аргонодуговой сварки высоколегированных сталей

Толщина металла, мм	Тип соединения	$d_э$, мм	$I_{св}$, А	$v_{св}$, м/ч	Расход газа, л/мин	Число проходов	Примечание
Ручная сварка неплавящимся электродом							
2	С отбортовкой	–	75…120	–	5…7	1	Присадочная проволока ∅1,6 мм. Ток постоянный прямой полярности
3	Встык без разделки с присадкой		120…160		6…8		
Автоматическая сварка неплавящимся электродом							
4	Встык с присадкой	–	200…250	25…27	6…8	1	То же
	Встык без присадки		130…250	25…28		–	
Автоматическая сварка плавящимся электродом							
5	Разделка V-образная	1,0	260…275	36…38	8…9	1	Ток постоянный обратной полярности
10		2,0	320…400	14…16	12…18	2	

Сварку плавящимся электродом часто выполняют при импульсном режиме, когда периодически изменяются по определенной программе основные параметры процесса: напряжение и ток дуги. Возможно изменение и скорости подачи или вылета электрода, скорости сварки и т.д. Изменение основных параметров режима обеспечивает мелкокапельный перенос и улучшение формирования шва.

Для получения управляемого мелкокапельного переноса электродного металла применяют импульсный сварочный ток с частотой >25 имп./с. При увеличении тока во время импульса резко возрастающие электродинамические силы сбрасывают каплю с торца электрода.

Другой технологической целью импульсного режима являются воздействие на процессы кристаллизации металла сварочной ванны и термический цикл с целью улучшения свойств сварных соединений.

Поперечные колебания электрода при механизированной сварке расширяют технологические возможности способа, позволяя улучшить формирование корня шва при сварке на весу и получить уширенные валики. Характер поперечных колебаний электрода зависит от толщины металла и формы разделки, а также от навыков сварщика.

Механизированная сварка в нижнем положении стыковых соединений может выполняться углом вперед или назад. Минимальная толщина свариваемого металла ≥0,8 мм. Для соединения тонкого металла рекомендуется: сварка проволокой 0,8…1,2 мм на малых токах и напряжениях. Металл толщиной до 4 мм следует сваривать без разделки кромок в сборочно-сварочных приспособлениях на съемных либо остающихся подкладках. Сварку ведут углом вперед.

Металл толщиной >5 мм можно сваривать как на весу, так и на подкладках; толщиной до 12 мм – без разделки кромок или с V-образной разделкой под углом 50…60°, а большие толщины – с V-, U- и X-образной разделкой. Для улучшения формирования шва применяют поперечные колебания электрода.

Сварка нахлесточных соединений. Металл толщиной до 1,5 мм обычно сваривают на подкладке. Дугу направляют на верхнюю кромку. Металл большей толщины сваривают с наклонным электродом. Дугу направляют в угол среза кромки верхнего листа.

Сварку угловых соединений осуществляют как в лодочку, так и наклонным электродом. В последнем случае электрод наклоняют на 50…60° к полке. При сварке тонколистового металла дугу направляют в угол. При толщине металла >5 мм во избежание подрезов стенки электрод смещают в сторону полки

Сварка вертикальных швов выполняется тонкой проволокой ($d_э$ = 0,8…1,2 мм) на режимах с частыми короткими замыканиями и импульсной дугой. При сварке сверху вниз обеспечиваются высокая производительность и хорошее формирование шва на тонком металле. Металл больших толщин сваривают снизу вверх, хотя скорость сварки при этом в 1,5 – 3 раза меньше. Сварку снизу вверх металла толщиной до 4 мм ведут без поперечных колебаний электрода, а бóльших толщин – с колебаниями. Сила тока и напряжение должны быть минимальными.

В ряде случаев для надежного проплавления корень шва рекомендуют проваривать неплавящимся электродом.

Сварку горизонтальных швов на металле толщиной 1…6 мм выполняют тонкой проволокой на режимах с частыми короткими замыканиями и импульсной дугой. Металл толщиной до 3 мм сваривают без разделки кромок. При толщине металла >4 мм необходим скос кромки верхнего листа. Сварку ведут с наклоном электрода сверху вниз. На металле толщиной >8 мм корневой шов сваривают тонкой проволокой с частыми короткими замыканиями, импульсно-дуговой сваркой или неплавящимся электродом. Разделку заполняют плавящимся электродом на больших токах, а облицовочный шов сваривают тем же способом, что и корневой.

Сварку потолочных швов ведут углом назад непрерывной или импульсной дугой тонкой проволокой на режимах с частыми короткими замыканиями или при струйном переносе на пониженных напряжениях. Металл толщиной до 4 мм сваривают без поперечных колебаний электрода, а большей толщины – с колебаниями. Металл толщиной >6 мм рекомендуют сваривать за несколько проходов.

4.3.5. СВАРКА В УГЛЕКИСЛОМ ГАЗЕ

Сварочный процесс осуществляется с короткими замыканиями или с крупнокапельным переносом. При использовании порошковых проволок может быть получен процесс сварки с непрерывным горением дуги и переносом металла каплями среднего размера.

Процесс с короткими замыканиями реализуется при сварке тонкими проволоками на низких напряжениях (рис. 4.20). При зажигании дуги *1* на конце электрода образуется капля расплавленного электродного металла, которая при постоянной скорости подачи проволоки приближается к ванне и замыкает дуговой промежуток *2*. Дуга гаснет, напряжение резко уменьшается, а сила тока в цепи возрастает. Утоненная шейка между электродом и каплей перегревается проходящим током и перегорает со взрывом (*3*). Напряжение резко возрастает, и вновь зажигается дуга *4*. После этого цикл повторяется.

С повышением силы тока длительность цикла уменьшается, частота коротких замыканий увеличивается, а диаметр капель на электроде и потери на разбрызгивание уменьшаются. С возрастанием напряжения увеличивается длительность горения дуги и всего цикла, частота коротких замыканий уменьшается, увеличиваются диаметр капель на электроде, длительность их пребывания в зоне дуги, потери на окисление и разбрызгивание. При увеличении силы тока и напряжения процесс переходит в крупнокапельный без замыканий.

Состав проволоки влияет на процесс переноса, если изменяются поверхностное натяжение или удельное электрическое сопротивление электрода. С увеличением вылета электрода удлиняется дуга, увеличиваются длительность периодов горения дуги и диаметр капель.

Основные параметры режима сварки в активных газах и их влияние на процесс сварки практически те же, что и при сварке в инертных газах. Сварку в активных газах выполняют на постоянном токе обратной полярности. Сила тока зависит от диаметра и состава электрода, скорости подачи электродной проволоки, полярности, вылета электрода и состава газа (рис. 4.21). Силу тока регулируют путем изменения скорости подачи проволоки и напряжения дуги.

Вылет электрода влияет на стабильность процесса сварки проволоками диаметром 0,5…1,4 мм, при диаметрах ≥1,6 мм влияние вылета уменьшается.

Состав активного газа и вид переноса электродного металла оказывают значительное влияние на технологические характеристики дуги и форму проплавления. При сварке в углекислом газе и смеси Ar + (>25 %) CO_2 на всех режимах, а также в смесях Ar + O_2 и Ar + + (<15 %) CO_2 с силой тока меньше критической форма провара такая же, как при сварке 'под флюсом. При сварке в смесях Ar + O_2 и Ar + (<15 %) CO_2 с силой тока выше критической появляется узкое глубокое проплавление по центру шва.

Процесс сварки на прямой полярности отличается большим разбрызгиванием. Скорость расплавления электрода увеличивается в 1,6 – 1,8 раза.

Режимы сварки в углекислом газе низкоуглеродистой стали приведены в табл. 4.15.

Стыковые соединения металла толщиной 0,8…1,2 мм можно сваривать на подкладках или на весу. Применяют сварку на обратной полярности проволокой диаметром 0,7…0,8 мм в углекислом газе и смеси Ar + 25 % CO_2, Ar + O_2 + 20 % CO_2.

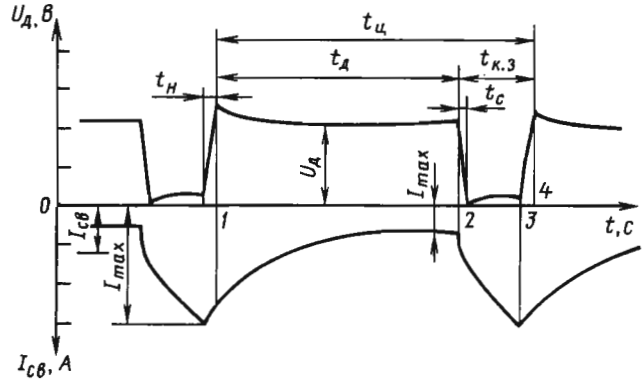


Рис. 4.20. Осциллограмма изменения параметров режима при сварке в CO_2 с короткими замыканиями:
$t_н$, $t_д$ – время возбуждения и горения дуги соответственно; $t_ц$ – время цикла;
$t_{к.з}$ – время короткого замыкания дугового промежутка; $t_с$ – время гашения дуги

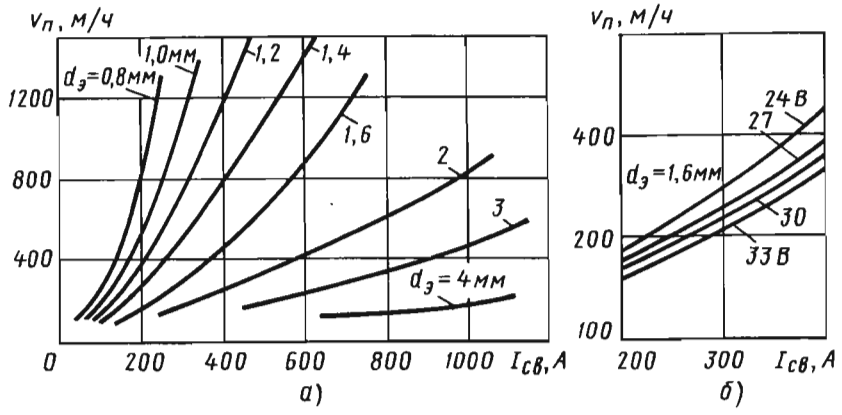


Рис. 4.21. Влияние диаметра электрода (*а*) и напряжения на дуге (*б*) на зависимость тока сварки от скорости подачи электрода

4.15. Режимы полуавтоматической сварки в углекислом газе низкоуглеродистой стали

Катет шва, мм	Диаметр проволоки, мм	Режим сварки			Вылет электрода, мм	Производительность, г/с
		Сила тока, А	Напряжение на дуге, В	Расход газа, л/мин		
2	0,8	100	20…22	8	8…10	0,43
	1,0	110	19…20		10…12	0,41
3	1,0	150	21…22	8…10	10…12	0,82
	1,2	180	22…23		12…15	1,09
	1,4	200	21…22		14…16	0,98
4	1,2	200	22…23	10…14	12…15	0,99
	1,4	270	24…25		15…18	1,09
5…6	1,4	320	27…28	14…20	18…20	1,36
	1,6	380	27…29		18…20	1,44

Металл толщиной 1,2…2 мм сваривают за один проход, с периодическим прекращением процесса или с поперечными колебаниями электрода. При толщине >3 мм обычно сваривают с двух сторон.

Разделку кромок при сварке в углекислом газе, учитывая большую глубину провара, выполняют согласно ГОСТ 14771–76. При использовании смесей Ar + CO_2, Ar + O_2 + CO_2 и Ar + O_2 разделку кромок обычно делают такую, как при сварке под флюсом.

Сварка нахлесточных соединений. Металл толщиной 0,8…1,5 мм сваривают на весу или на подкладке, листы большей толщиной – обычно на весу. Металл толщиной 0,8…1,2 мм сваривают вертикальным электродом, направленным на кромку верхнего листа со смещением от среза на ±(1…1,5) мм.

При толщине >1,5 мм электроды наклоняют поперек шва на 50…60° к поверхности листов. При сварке металла равных толщин электрод направляют в угол, а неравных – в сторону листа большей толщины.

Сварку угловых соединений выполняют наклонным электродом или в лодочку. При сварке наклонным электродом без разделки кромок угол наклона его к полке должен составлять 40…50°, а при сварке металла большой толщины со скосом кромки электрод направляют в угол разделки.

Швы с катетом >8 мм сваривают в лодочку для улучшения формирования шва и повышения скорости сварки.

Сварка вертикальных швов. Металл толщиной до 6 мм сваривают сверху вниз углом назад, без колебаний электрода при толщине до 3 мм и с его поперечными колебаниями при большей толщине. Скорость сварки сверху вниз обычно в 2 – 2,5 раза выше, чем при сварке снизу вверх.

Стали толщиной >7 мм обычно сваривают снизу вверх. При сварке со свободным формированием используют ту же технику, что и при РДС. Сварку выполняют проволоками диаметром до 1,6 мм как углом вперед, так и углом назад.

Сварку горизонтальных швов стали толщиной до 6 мм обычно проводят в углекислом газе проволоками диаметром 0,8…1,4 мм. Соединения на металле толщиной до 3 мм без скоса кромок сваривают с наклоном электрода снизу вверх и углом назад без поперечных колебаний. При толщине металла >4 мм делают скос на кромке верхнего листа и сварку выполняют с наклоном электрода сверху вниз.

Сварку потолочных швов рекомендуют проводить проволокой диаметром 0,5…1,4 мм углом назад на напряжениях и токах, несколько меньших, чем при сварке вертикальных швов. Стыковые швы с разделкой выполняют с поперечными колебаниями электрода. Металл толщиной >6 мм сваривают в два и более прохода.

Техника механизированной сварки в углекислом газе и в смеси CO_2 + Ar. Сварку можно вести с наклоном электрода как углом вперед, так и углом назад до 10…30°. При сварке тонкими проволоками форма колебаний электрода обычно та же, что и при РДС. Для уменьшения пористости при сварке во всех активных газах за счет улучшения защиты и перемешивания жидкой ванны используют возвратно-поступательные движения горелки.

В начале сварки необходимо предварительно подать газ до зажигания дуги и начинать сварку вертикальным электродом. Для высококачественной заварки кратера необходимо обдувать его газом до полного затвердевания металла. При сварке с большой силой тока при заварке кратера уменьшают силу тока и напряжение (ориентировочно до 150…170 А и 24…26 В).

4.3.6. РАЗНОВИДНОСТИ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ СВАРКИ ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ

Сварка порошковыми проволоками. Конструкция порошковой проволоки определяет некоторые особенности ее плавления. Сердечник проволоки на 50…70 % состоит из неметаллических, неэлектропроводных материалов, поэтому дуга горит на металлической оболочке. Малая жесткость порошковых проволок требует применения специальных механизмов подачи с двойным приводом и малым давлением поджатия.

Металлургические особенности процесса сварки порошковыми проволоками определяют повышенные требования к соблюдению рекомендуемых напряжения дуги и вылета электрода. Если плавление сердечника отстает от плавления оболочки, возможен переход его в сварочную ванну в нерасплавленном состоянии, что вызывает образование пор и неметаллических включений в металле шва.

Проволоки применяют для сварки без дополнительной защиты (самозащитные) или с дополнительной защитой углекислым газом. В зависимости от типа проволоки (рутил-органический, карбонатно-флюоритовый и др.) используют постоянный ток прямой или обратной полярности. Для сварки в углекислом газе рекомендуют рутиловые и рутил-флюоритовые порошковые проволоки.

Техника сварки порошковыми проволоками мало отличается от сварки плавящимся электродом в защитных газах. Однако появление на поверхности сварочной ванны шлака изменяет условия проплавления корня шва и при многослойной сварке требует тщательно очищать от шлака поверхность предыдущих швов.

Подготовка кромок, их очистка и сборка под сварку осуществляются теми же способами, что и при других способах сварки. Прихватки выполняют покрытыми электродами или порошковой проволокой.

Проволоки рутил-органического типа имеют удовлетворительные технологические свойства, малочувствительны к изменению напряжения дуги. Вылет электрода должен быть 15…20 мм. Проволоки карбонатно-флюоритового типа требуют стабилизации напряжения дуги и более тщательной очистки кромок, чем проволоки рутил-органического типа. Для надежного возбуждения и горения дуги и предупреждения в швах пор вылет электрода должен устанавливаться в пределах 25…30 мм.

Для предупреждения пористости проволоку следует прокаливать при 230…250 °С в течение 2…3 ч.

Сварка электрозаклепок выполняется в любом пространственном положении вольфрамовым или плавящимся электродом. Для получения высококачественного соединения необходимо плотное прилегание листов с зазором ≤0,5 мм. Размеры электрозаклепки и ее свойства зависят главным образом от силы сварочного тока, напряжения и времени горения дуги. При сварке вольфрамовым электродом хорошее качество заклепок достигается при толщине верхнего листа до 2 мм. При увеличении сварочного тока и времени горения дуги глубина проплавления и диаметр заклепки увеличиваются. Для обеспечения хорошей защиты зоны сварки применяют различные типы газовых насадок. Образование подрезов, трещин и пор в заклепке предупреждают повторным кратковременным возбуждением дуги и плавным уменьшением тока.

При использовании плавящегося электрода заклепки сваривают в нижнем положении при толщине верхнего листа до 6 мм без предварительного сверления отверстия в верхнем листе. В вертикальном и потолочном положениях сварку ведут с короткими замыканиями импульсно-дуговым способом. Размеры заклепок регулируют, изменяя силу сварочного тока и напряжение дуги, диаметр электрода и время горения дуги. Для защиты можно использовать сопла, как и при обычной сварке, но с отверстиями для выхода газа. В процессе сварки металла толщиной >2 мм рекомендуется к концу сварки уменьшать ток и увеличивать напряжение дуги.

4.4. ЭЛЕКТРОШЛАКОВАЯ СВАРКА

Способ электрошлаковой сварки (ЭШС) разработан коллективом Института электросварки им. Е.О. Патона (Киев) в середине прошлого века. Он отличается тем, что источником нагрева при сварке служит тепло, выделяющееся в ванне расплавленного флюса при прохождении через нее тока от электрода к изделию. Способ применяется при изготовлении металлических конструкций толщиной, как правило, >20 мм. ЭШС можно наиболее эффективно соединять металл практически неограниченной толщины.

Описание процесса (рис. 4.22). Шлаковая ванна *3* образуется в результате расплавления сварочного флюса. В течение всего процесса глубина шлаковой ванны, находящейся в зазоре между свариваемыми кромками, закрытыми с боков формирующими водоохлаждаемыми устройствами *2* (ползунами, накладками) или остающимися стальными пластинами, сохраняется, как правило, постоянной. Сварочный ток, проходя через шлаковую ванну *3* между погруженными в нее электродами (проволочными *1*, пластинчатым *7* или плавящимся мундштуком *6*) и металлической ванной *4*, поддерживает высокую температуру и электропроводность шлака. Металлическая ванна *4*, кристаллизуясь, образует сварной шов *5*.

К отличительным чертам ЭШС, которые определяют его технические возможности, относятся:

– характер выделения теплоты в зоне процесса сварки, зависящий от вида расплавляющихся присадочных материалов (пластина, проволоки, мундштуки и т.д.), и параметры электрического тока в шлаковой ванне (уровни тока и напряжения, продолжительность пауз в протекании тока, зависимость их от скоростей плавления расплавляющихся присадочных материалов);

– пространственная распределенность источников теплоты, сказывающаяся на поле температур в свариваемой детали и, соответственно, форме сварочной ванны; характер термических циклов и влияние их на структуру и свойства основного металла;

– наличие минимально возможного зазора между свариваемыми деталями, который должен поддерживаться малоизменяющимся, несмотря на возникающие при ЭШС значительные деформации и перемещения свариваемых деталей;

– существенные по уровню собственные (внутренние) напряжения, имеющие трехосный характер и превышающие предел текучести металла ввиду своей объемности, что может вызывать хрупкие разрушения деталей как в процессе сварки, так и после нее;

– необходимость, как правило, термической обработки после завершения сварки для релаксации объемных остаточных напряжений и улучшения структуры сварного соединения.

4.4.1. РАЗНОВИДНОСТИ ПРОЦЕССОВ ЭШС

Существуют три основные разновидности способа ЭШС и наплавки: проволочными электродами; плавящимся мундштуком; электродами большого сечения.

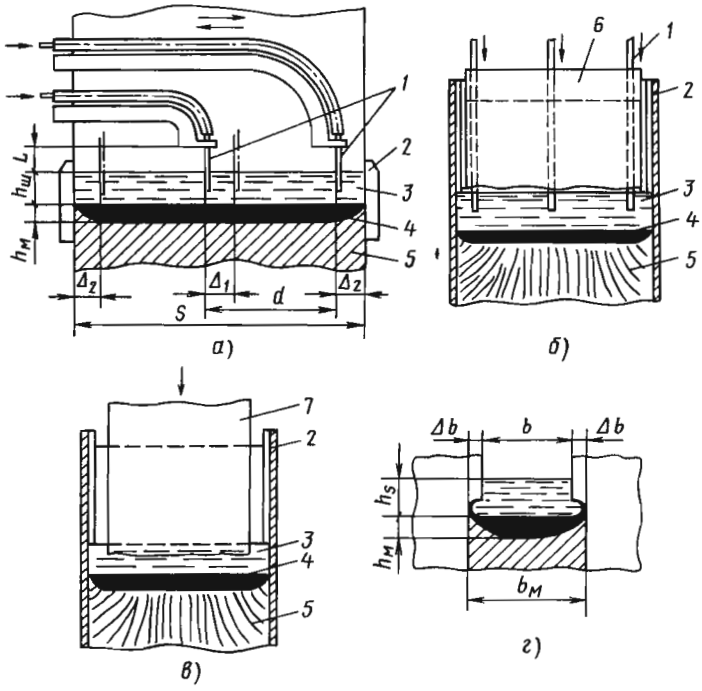


Рис. 4.22. Схема ЭШС:

а – проволочными электродами; *б* – плавящимся мундштуком; *в* – электродом большого сечения; *г* – поперечное сечение зазора; $h_м$, $h_ш$ – глубина металлической и шлаковой ванн соответственно

Сварка проволочными электродами наиболее широко применяется в промышленности и, в свою очередь, имеет следующие основные разновидности: одной, двумя или тремя электродными проволоками без колебаний; то же, с колебаниями (см. рис. 4.22, *а*); проволочными электродами без введения мундштука в зазор.

Проволочными электродами чаще всего выполняют протяженные или кольцевые сварные соединения металла толщиной 20... 500 мм. Число электродных проволок выбирают в зависимости от толщины свариваемого металла. Металл толщиной до 50 мм обычно сваривают одним неподвижным электродом. При сварке металла толщиной >50 мм электроды совершают в сварочном зазоре колебательные движения.

Сварка плавящимся мундштуком (см. рис. 4.22, *б*) – наиболее универсальный способ, которым можно соединять детали толщиной 20...3000 мм, в том числе детали, имеющие переменную толщину и криволинейную форму. Плавящийся мундштук представляет собой набор пластин или стержней, которые снабжены каналами для подачи электродной проволоки, В частном случае плавящимся мундштуком может быть толстостенная трубка с внутренним диаметром, на 1...2 мм превышающим диаметр электродной проволоки. Форма плавящегося мундштука определяется конфигурацией свариваемого стыка, а материал, как правило, подобен основному металлу изделия или выбирается в зависимости от требований, предъявляемых к химическому составу металла шва. Широкое распространение получил мундштук с каналами для подачи электродной проволоки в виде спиралей, навитых из сварочной проволоки.

Сварка электродами большого сечения (см. рис. 4.22, *в*) включает сварку одной, двумя или тремя пластинами сплошного сечения или с продольными разрезами, подключенными к общему или разным источникам сварочного тока. Электроды могут подключаться к источнику питания по трехфазной или бифилярной схеме (рис. 4.23 и 4.24). Пластинчатые электроды чаще всего применяют для сварки прямолинейных швов длиной ≤1500 мм металла толщиной >30 мм. Толщина пластинчатых

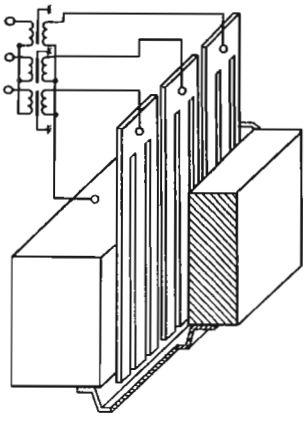


Рис. 4.23. Схема трехфазного подключения к источнику питания электродов большого сечения

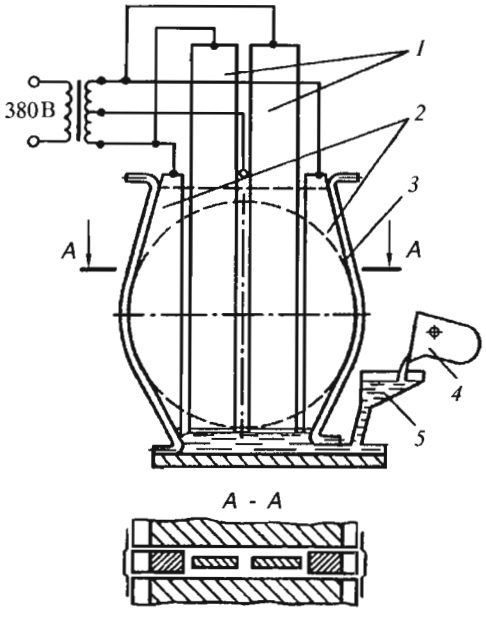


Рис. 4.24. Бифилярная схема подключения электродов к источнику питания:
1 – подвижные электроды; *2* – неподвижные электроды; *3* – устройство, формирующее наружную поверхность шва; *4* – ковш со шлаком; *5* – сифон

электродов обычно 10...15 мм, при сварке алюминия и его сплавов 20...25 мм и при сварке металла толщиной до 2000 мм с бифилярным подключением электродов достигает 60...100 мм.

Близка к способу сварки пластинчатым электродом ЭШС ленточным электродом (рис. 4.25). В качестве плавящегося электрода может быть использована порошковая проволока и порошковая лента. Порошковая шихта, составляющая наполнение такого электрода, может содержать компоненты, воздействующие на металлургические процессы (раскисление, обессеривание, легирование, модифицирование) или восполняющие расход сварочного флюса в процессе сварки.

Электрошлаковая наплавка деталей обычно осуществляется по той же технологии, что и сварка. При этом вместо одной из свариваемых кромок используется медная водоохлаждаемая пластина. Применяется также электрошлаковая наплавка плоскостей в нижнем положении и наплавка цилиндрических поверхностей.

Типы сварных соединений и виды швов. Наиболее распространенным соединением, выполняемым ЭШС, является стыковое соединение (рис. 4.26 и 4.27). Оно имеет зазор b (табл. 4.16) между двумя прямыми кромками (см. рис. 4.26, *а – г* и *з*). В некоторых случаях допускается фасонная разделка (см. рис. 4.26, *д – ж*).

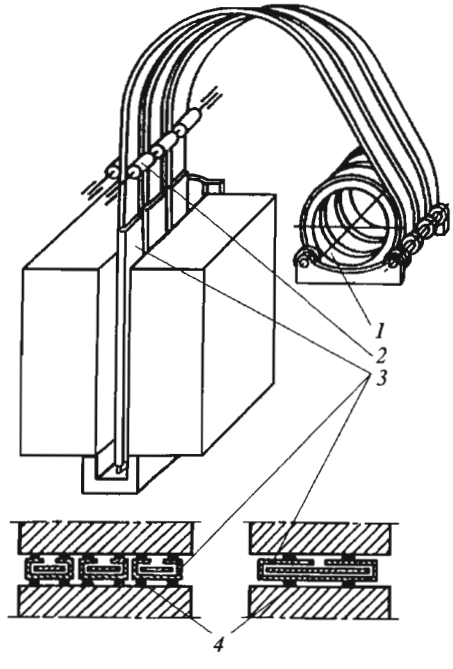


Рис. 4.25. Схема сварки ленточными электродами:
1 – рулон ленточного электрода; *2* – подающий механизм; *3* – направляющие обоймы; *4* – изоляторы

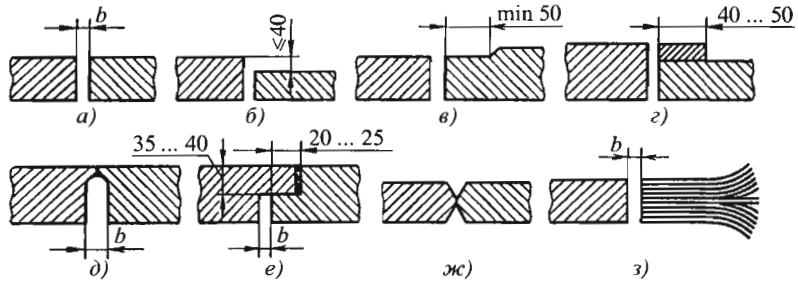


Рис. 4.26. Типы стыковых сварных соединений

4.16. Сборочный зазор между параллельными кромками в зависимости от толщины свариваемого металла и расчетного зазора

Зазор, мм	Толщина свариваемого металла, мм				
	16...30	30...80	80...500	500...1000	1000...2000
Расчетный	18	22	26	30	30
Сборочный	19...20	24...25	28...32	36...40	40...42

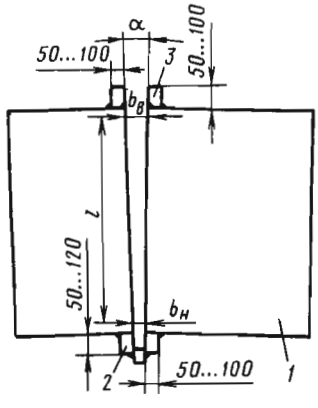


Рис. 4.27. Общий вид стыка, подготовленного к ЭШС:
1 – свариваемое изделие;
2 – начальная технологическая планка;
3 – конечные технологические планки

Для компенсации деформаций соединяемых частей и сохранения в процессе сварки заданной величины сварочного зазора сборка деталей осуществляется, как правило, с клиновидным зазором, расширяющимся кверху. Угол раскрытия зазора α при сборке может составлять 1...2° или определяться по специальной методике.

Выполняемые ЭШС прямолинейные швы обычно сваривают в вертикальном положении. Возможно наклонное положение, допускающее отклонение продольной оси шва от вертикали не более чем на 20°. Дальнейшее увеличение угла приводит к ухудшению устойчивости процесса и неравномерности провара кромок основного металла.

Угловые и тавровые соединения (рис. 4.28, *а – в*) встречаются реже, чем стыковые, из-за сложности их выполнения; V- и К-образную разделки (рис. 4.28, *г – д*) выбирают в случае использования трубчатого плавящегося мундштука. Последний позволяет выполнять также крестообразные соединения (см. рис. 4.28, *ж – з*). Если можно, угловые и тавровые соединения заменяют стыковыми (см. рис. 4.28, *е*).

4.4.2. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ И ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ЭШС

Шлаковая ванна представляет собой расплав солей, окислов, сульфидов и других химических соединений, обладающих ионной проводимостью в широких диапазонах температур и плотности тока. В шлаковой ванне наибольшая плотность тока у конца электрода, существенно меньшая вблизи металлической ванны и наименьшая около стенок ванны (свариваемых кромок и формирующих устройств). Поэтому наибольшее количество теплоты выделяется в шлаковой ванне вблизи электрода и под ним, в так называемой активной зоне. Тепловая энергия переносится отсюда в периферийные области шлаковой ванны.

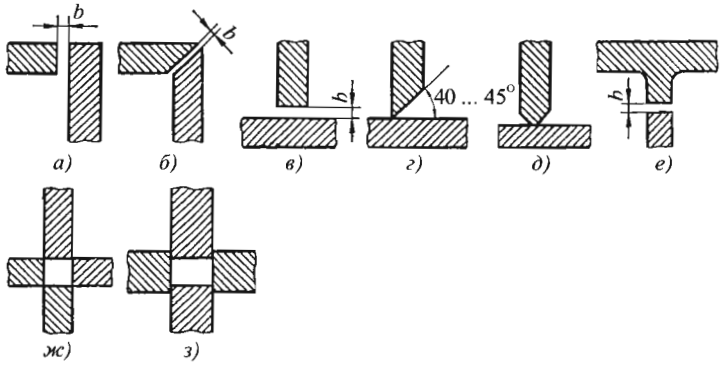


Рис. 4.28. Типы угловых и тавровых соединений

Электродинамические силы, возникающие под действием сварочного тока, деформируют свободную поверхность металлической ванны, образуя на ней углубление (лунку) под электродом. С возрастанием скорости подачи электродной проволоки, а следовательно, и силы тока лунка углубляется. При этом увеличиваются глубина металлической ванны, глубина погружения электрода в шлак и скорость его плавления. Температура перегрева капель превышает температуру шлака у поверхности металлической ванны, т.е. >1800 °С.

Электродинамические силы вызывают образование потоков и в металлической ванне.

Омывая свариваемые кромки, потоки перегретого металла передают им теплоту и подмывают их. Этим объясняется своеобразная форма проплавления кромок – в виде полостей или ниш.

При ЭШС плавящимся мундштуком одним из основных источников тепловой мощности является ток пластины мундштука. На него влияют скорость сварки, напряжение, сопротивление сварочной ванны, нагрев мундштука проходящим током, излучение шлаковой ванны, уровень подъема шлаковой ванны при оплавлении мундштука.

Ток через мундштуки протекает периодически. Эта периодичность помимо прочих факторов зависит от скорости сварки. В период контакта мундштук интенсивно нагревается шлаком и постепенно плавится. Однако при этом контакт со шлаком продолжает сохраняться за счет подъема шлака благодаря смачиванию. После разрыва шлаковой перемычки мундштук также интенсивно нагревается в результате излучения шлаковой ванны, которое зависит от температуры поверхности ванны. Скорость плавления от излучения обычно меньше скорости сварки, и через некоторое время снова наступает контакт мундштука со шлаком. Вследствие этого суммарный ток от электродов и мундштуков резко возрастает, что создает необходимую мощность тепловыделения в шлаковой ванне.

Исследования закономерностей тепловыделения при ЭШС позволили перейти к расчетным методам определения тепловыделения и режимов ЭШС.

Описание температурных полей. Для описания температурных полей существенным является пространственный характер выделения теплоты в зоне сварки. Вся выделяющаяся при ЭШС теплота может быть разделена на две части:

1) поступающую с расплавленным металлом, который имеет температуру активной зоны шлаковой ванны;

2) поступающую из шлаковой ванны в основной металл, равную разности между полным количеством выделяющейся при сварке теплоты и теплотой, приносимой расплавленным и перегретым в шлаковой ванне присадочным металлом.

Такое разделение теплоты позволило ввести в расчетную схему так называемый металлический источник теплоты $\theta_{мет}$, действующий по линии длиной $2f$ (рис. 4.29), равный ширине сварочного зазора между соединяемыми деталями, и шлаковый источник $\theta_{шл}$, действующий по высоте шлаковой ванны $h_{ванны}$ в виде двух полосовых источников на границе между шлаковой ванной и основным металлом (см. рис. 4.29, *а*). Такая схема источников, помещенных в целое тело (см. рис. 4.29, *в*), при

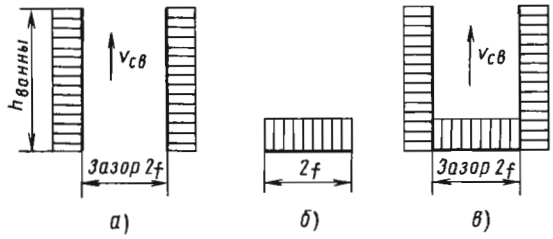


Рис. 4.29. Металлический и шлаковые источники теплоты

использовании аппарата теории теплопроводности с не зависящими от температуры теплофизическими свойствами металла дает удовлетворительное для практических целей описания термических циклов (рис. 4.30, *а*) и температурного поля (рис. 4.30, *б*).

С использованием выведенных на основе предложенной схемы формул построены номограммы для определения величины проплавления r (рис. 4.31).

Собственные напряжения в электрошлаковых сварных соединениях. При сварке металла большой толщины могут возникать значительные трехосные остаточные напряжения, способные вызывать их разрушение. По разработанной в МГТУ им. Н.Э. Баумана методике были определены остаточные напряжения в электрошлаковых сварных соединениях толщиной до 720 мм. Установлено, что, хотя все

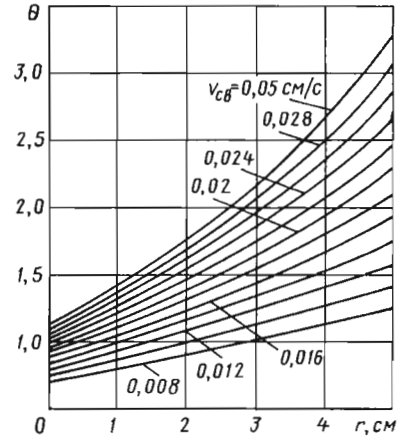


Рис. 4.31. Номограмма для определения величины провара r

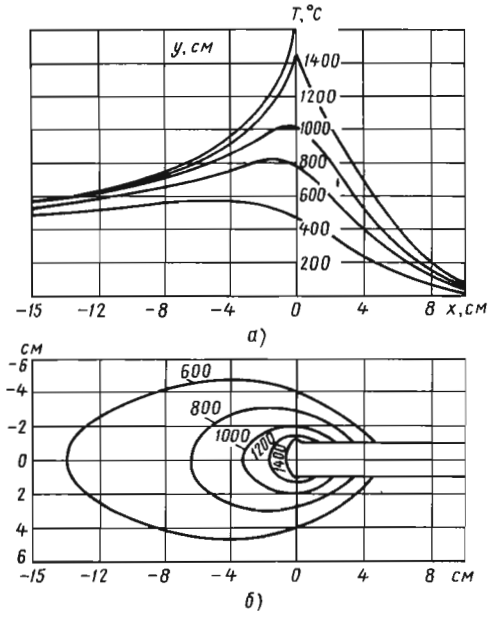


Рис. 4.30. Температурное поле при ЭШС

три главных компонента остаточных напряжений в глубине металла являются растягивающими, а наибольший из них σ_x превосходит предел текучести $\sigma_т$, схема напряжений не является жесткой, так как интенсивность напряжений σ_i близка к $\sigma_т$, а максимальные напряжения существенно ниже истинного разрушающего напряжения металла. Это означает, что в глубине металла во время остывания идет процесс пластической деформации, а не образуется равномерное растяжение, приводящее к разрушению металла. Таким образом, характер распределения и уровень остаточных напряжений в электрошлаковых соединениях большой толщины в целом не опасен, и это позволяет успешно сваривать электрошлаковым способом металл сверхбольших толщин.

Исследования напряженно-деформированного состояния непосредственно в процессе ЭШС выявили значительные поперечные растягивающие напряжения впереди зоны структурных превращений, испытывающей расширение металла. Применением дополнительного

подогрева за ползуном движущимся источником тепла можно изменять уровень растягивающих поперечных напряжений, кинетику структурных превращений и временных напряжений от них.

4.4.3. ТЕХНИКА ВЫПОЛНЕНИЯ ЭШС

Подготовка деталей к сварке. Наиболее важными факторами в подготовке к сварке являются форма и шероховатость торцовых поверхностей свариваемых кромок, состояние боковых поверхностей, по которым будут перемещаться или на которые будут установлены формирующие устройства. При сварке металла толщиной до 200 мм допускается обработка торцовой поверхности газорезательными аппаратами. Однако для ответственных изделий из легированных сталей подготовка кромок должна осуществляться механическим способом. В литых и кованых заготовках поверхности, по которым будут перемещаться ползуны, подвергают механической обработке до третьего-четвертого классов шероховатости поверхности на ширину 60...80 мм от торца кромки. Если заготовки выполнены из проката, поверхность под ползуны может быть очищена от окалины и заусенцев переносным наждачным кругом.

Сварка деталей. При ЭШС получение сварного соединения гарантированного качества зависит не только от правильного выбора технологических параметров режима (скорости подачи электрода, напряжения сварки и т.д.), но и от точного выполнения оператором-сварщиком всей совокупности операций по обеспечению процесса (правильной установки аппарата, укрепления ползунов и корректировки их положения в процессе сварки, соблюдения оптимального положения токоподводящего мундштука в зазоре, предотвращения протекания шлака через случайные зазоры между поверхностью детали и ползуном и т.д.).

При ЭШС прямолинейных швов собранное изделие размещают на сварочном стенде в зоне действия сварочного аппарата либо аппарат крепят на изделии. Устанавливают требуемый вылет электрода, проверяют параллельность формирующих ползунов свариваемым кромкам. Выставляют в зазоре электроды и, если необходимо, добиваются нужного размаха их колебаний (возвратно-поступательного перемещения вдоль зазора). После этого опускают аппарат вниз по стыку, к началу шва, чтобы мундштуки находились от дна «кармана» на расстоянии 110...120 мм, и плотно прижимают ползуны к стыку. По контуру прилегания ползунов зазор уплотняют глиной. На дно начальной планки насыпают металлический порошок или стружку слоем толщиной ~10 мм, затем слой сварочного флюса толщиной 3...5 мм. В нижней части изделия приваривают пластину 150 × 100 × 10 мм для крепления кабеля заземления.

Включают подачу в ползуны охлаждающей воды. На пульте управления аппарата и на источнике питания устанавливают заданные параметры сварки. Проверив наличие необходимого количества электродной проволоки, флюса, а также инструмента, нажимают, кнопку «Пуск». После возбуждения дуги досыпают флюс до заданного количества. Если требуется, изменяют скорость подачи электродной проволоку. По мере увеличения глубины шлаковой ванны сообщают электродам возвратно-поступательное перемещение в зазоре. При необходимости корректируют напряжение сварки.

Время наведения шлаковой ванны и перехода к ЭШС 3...5 мин. Нормальный электрошлаковый процесс должен установиться в пределах начальной технологической планки (кармана).

При подходе зеркала шлаковой ванны к верхнему срезу ползунов включают механизм вертикального перемещения сварочного аппарата. При ручном управлении аппаратом механизм его вертикального перемещения включают периодически, чтобы высота подъема за одно включение составляла 2...3 мм. Средняя скорость $v_{св}$ (кривая *1*) и напряжение $U_{св}$ (кривая *2*) сварки зависят от толщины свариваемых деталей: $v_{св}$ с увеличением толщины деталей уменьшается, $U_{св}$ увеличивается (рис. 4.32).

В процессе сварки необходимо наблюдать за расположением электродов и при необходимости корректировать их, а также периодически обстукивать ползуны.

После выполнения шва нажимают кнопку «Стоп», а затем кнопку «Вверх» для вывода электродов из шлаковой ванны. Снимают ползуны и отключают подачу охлаждающей воды.

Техника сварки плавящимся мундштуком. Плавящийся мундштук состоит из расплавляемой и нерасплавляемой частей (рис. 4.33). Нерасплавляемая часть предназначена для крепления мундштука и присоединения к нему кабеля. При сварке однотипных швов она может быть использована многократно.

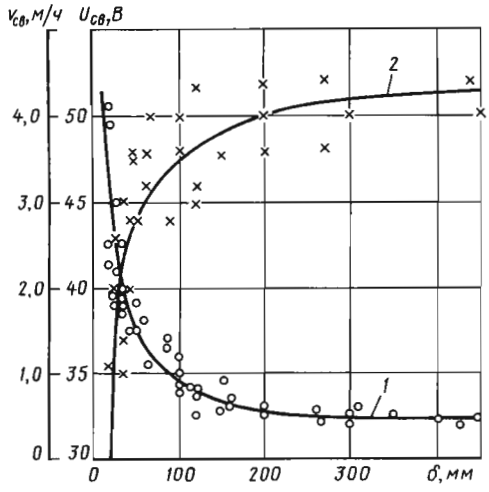


Рис. 4.32. Зависимость скорости и напряжения сварки от толщины свариваемых деталей

Форма плавящегося мундштука определяется конфигурацией свариваемого стыка (рис. 4.34, *а – и*). При сварке ответственных конструкций большой толщины в мундштуке рядом с основным каналом делают запасной для дублирующей проволоки (рис. 4.34, *ж*). В случае непредвиденной остановки основного подающего механизма или одной из подаваемых проволок включается подача дублирующей проволоки.

Плавящийся мундштук надежно ограждают от кромки свариваемого металла специальными изоляторами. Материал изоляторов должен быть таким, чтобы, попадая в шлаковую ванну, он не оказывал вредного влияния на металл шва и шлаковую ванну и не снижал устойчивость электрошлакового процесса. В качестве изоляторов можно применять тампоны или мешочки из стеклоткани, заполненные стекло- или шлаковатой, а также пробки в виде металлических пластин, обернутых несколькими слоями стеклоткани, пропитанной жидким стеклом (см. рис. 4.33). Изоляторы либо заклинивают между мундштуками и кромками изделия, либо крепят на мундштуке.

После приварки мундштука к кронштейну со дна кармана удаляют деревянные клинья и брус, служившие упором для мундштука при его установке. Далее каналы мундштука соединяют с механизмом подачи проволоки с помощью трубок переходного тракта. Перед подключением сварочных кабелей проверяют изоляцию всей системы путем касания мундштука держателем для РДС.

Техника начала ЭШС плавящимся мундштуком практически такая же, как и при обычной ЭШС проволочными электродами. В этот период возможно приваривание электродной проволоки к мундштуку. Чтобы предотвратить истирание проволоки подающими роликами, прижимной ролик немедленно отжимают, а проволоку отрывают плоскогубцами и поднимают на 300…500 мм. Затем с помощью прижимного ролика снова включают подачу проволоки вниз.

Заканчивают сварку по обычной методике.

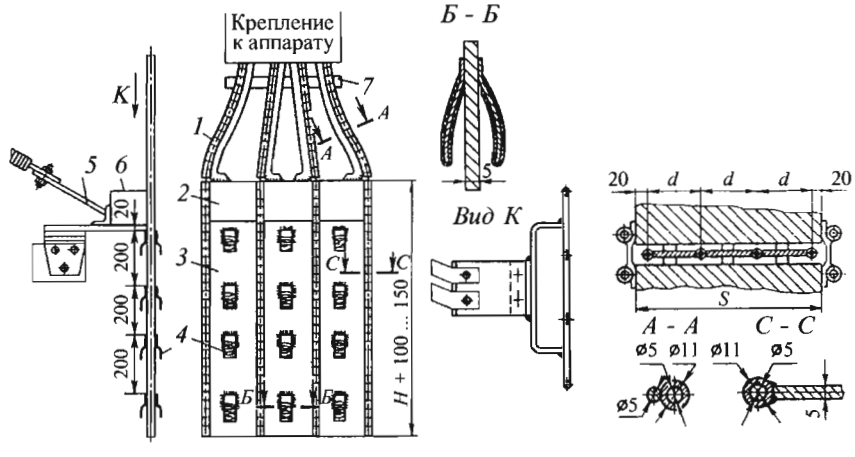


Рис. 4.33. Плавящийся мундштук с закрепленными изоляторами:
1 – переходные спиральные или трубчатые каналы; *2* и *3* – соответственно неплавящаяся и плавящаяся части мундштука; *4* – изоляторы; *5* – токоподвод; *6* – кронштейн; *7* – связывающая планка; *H* – высота детали

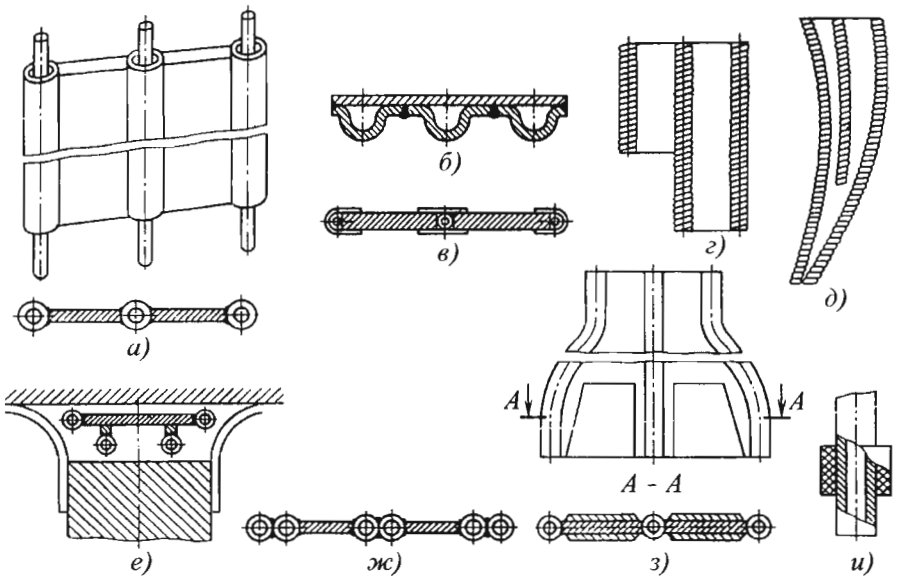


Рис. 4.34. Конструкции плавящихся мундштуков:
а – и – разные формы (конструкции) мундштуков

Сварка кольцевых швов. Техника выполнения электрошлаковым способом кольцевых швов вызывает значительные трудности. Основная из них состоит в необходимости замыкания конца шва с началом. Поэтому в начале шва устанавливают фигурную планку таким образом, чтобы объем металла, который необходимо удалить для получения замыкающей части кольцевого шва, был бы минимальным (рис. 4.35). Удаление этого металла необходимо выполнить в процессе сварки.

Выполнение замыкания связано с опасностью получения трещин из-за очень высокой жесткости сварного соединения в этой зоне и непроваров, вызванных необходимостью постоянно корректировать положение мундштуков (рис. 4.36).

Все это привело к тому, что ЭШС кольцевых швов оказалась неэффективной по сравнению с дуговой сваркой под флюсом в узкощелевую разделку, при которой нет необходимости проводить высокотемпературную термообработку сварного соединения.

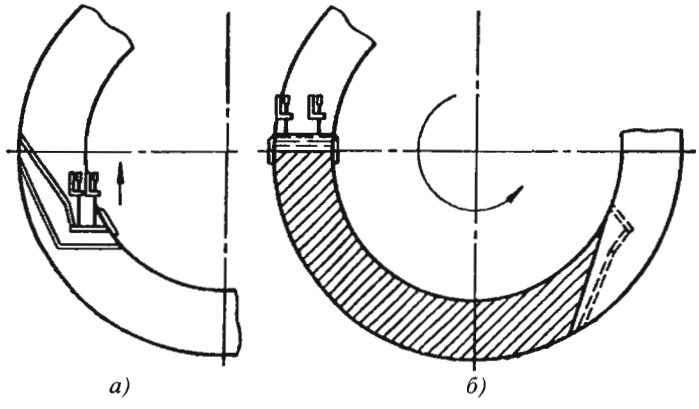


Рис. 4.35. Схема сварки кольцевого шва:
а – начало сварки; *б* – выполнение кольцевого шва

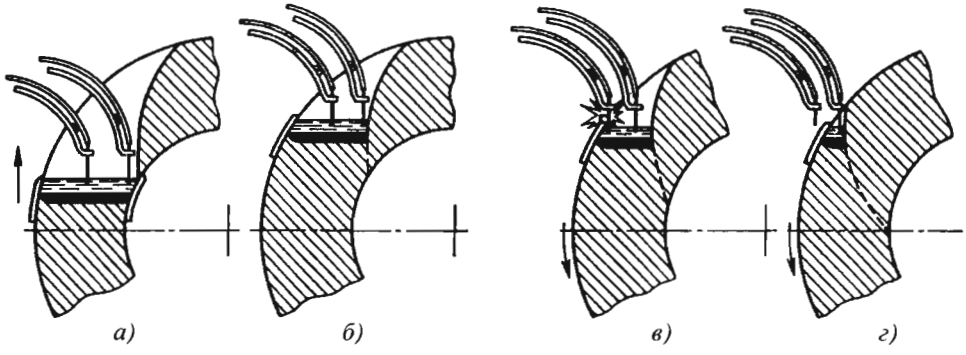


Рис. 4.36. Замыкание кольцевого шва:
а – г – этапы вывода электродов из зоны сварки

4.4.4. РЕЖИМЫ ЭШС

Качество сварного соединения характеризуется глубиной и равномерностью проплавления, сплошностью металла шва и ОШЗ, а также прочностными свойствами металла шва и основного металла, прилегающего к нему. Указанные факторы зависят от режима сварки, который включает в себя следующие параметры: напряжение на электродах U; величину тока I, зависящую от площади поперечного сечения электрода $F_э$, скорости погружения его в шлаковую ванну $v_э$, сухого вылета электродной проволоки из мундштука L и глубины шлаковой ванны $h_ш$, а также скорость сварки $v_{св}$.

При сварке проволочными электродами на равномерность проплавления существенно влияют расположение и характер перемещения электродов в зазоре, в том числе скорость и размах колебаний электродов, минимальное расстояние электродов до ползунов Δ_2 и время остановок при изменении направления колебательных движений электродов, величина участков, не перекрываемых электродами при их колебаниях, Δ_1 (см. рис. 4.22).

Для получения равномерного по толщине шва провара расстояние между сварочными проволоками выбирают по формуле

$$d = \frac{s + \Delta_1 - 2\Delta_2}{n},$$

где Δ_1 = 17...18 мм; Δ_2 зависит от глубины канавки в ползунах и равно 4...5 мм и 0 при глубине канавки 2,5 и 8...10 мм соответственно. Обычно $d \le 160$ мм.

Скорость сварки устанавливают из соображений предотвращения горячих трещин и толщины металла (см. рис. 4.32). Скорость подачи электродных проволок находят по соотношению

$$v_e = v_{св} F_н / \sum F_e,$$

где $F_н$ – площадь сечения наплавленного металла, см^2; $\sum F_e$ – суммарная площадь сечения плавящихся электродов, см^2.

Допускаемая скорость подачи электродных проволок в зависимости от содержания углерода в наплавленном металле показана на рис. 4.37.

Определение параметров режима сварки плавящимся мундштуком. При сварке плавящимся мундштуком на равномерность проплавления существенно влияют расстояние между электродами d и толщина пластины

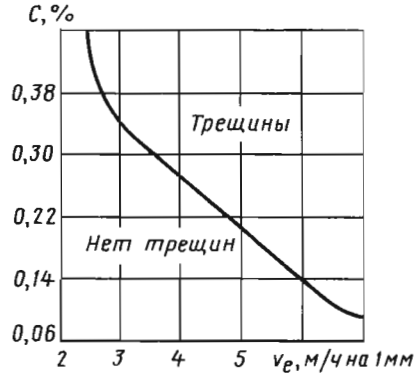


Рис. 4.37. Изменение критической скорости подачи электродной проволоки при ЭШС в зависимости от содержания углерода в основном металле

мундштука $\delta_м$. Величина проплавления r для сварки металла большой толщины принимается с учетом необходимости обеспечения гарантированного проплавления при возможных колебаниях в силовой сети, неточной установки мундштуков в разделке и др.

Величина зазора $b_з$ между свариваемыми частями детали при сварке плавящимся мундштуком устанавливается исходя из толщины мундштуков, надежной их изоляции в разделке и ожидаемого перемещения кромок в процессе сварки. Обычно без учета перемещений кромок принимается $b_з = 30…40$ мм.

Наиболее часто применяются мундштуки толщиной 5 и 10 мм. Оптимальное расстояние между электродами при толщине пластины 10 мм составляет 100…120 мм.

Скорость сварки весьма отражается на тепловом режиме сварки и термическом цикле в ОШЗ и поэтому выбирается, исходя из состава и толщины свариваемой стали. Для сварки углеродистых и низколегированных сталей скорость сварки принимается в пределах 0,6…1,0 м/ч, для сварки легированных и закаливающихся сталей 0,4…0,6 м/ч.

Скорость подачи электродной проволоки рассчитывается по формуле

$$v_э = \frac{[(b_з - 2w)\delta + F_м n_1 + F_{ус}]v}{F_э n},$$

где $2w$ – местное перемещение кромок в глубь разделки (выпучивание) в результате нагрева шлаковой ванной, $2w = 0{,}5…0{,}7$ см; δ – толщина свариваемого металла; n – число электродных проволок; n_1 – число пластин мундштуков; $F_{ус}$ – площадь поперечного сечения усиления шва; $F_э$, $F_м$ – площади поперечных сечений электрода и пластины мундштука.

Значение тока, проходящего через проволочный электрод, вычисляется по формуле

$$I_э = \sqrt{1250 v_э}.$$

Средний ток, проходящий через пластину мундштука,

$$I_{п.п} = \frac{F_м U(59{,}2v - 3)}{0{,}02U^2 + 9}.$$

Напряжение для расчета сварочного тока принимается $U = 40$ В.

Эффективная тепловая мощность источника тепла

$$q_и = \theta T_{пл} \pi \lambda \delta,$$

где $T_{пл}$ – температура плавления металла; λ – коэффициент теплопроводности; θ – безразмерная величина, определяется по графику на рис. 4.32.

Напряжение на мундштуках

$$U = \frac{q_и}{0{,}24(I_э n + I_{дл1})}.$$

При сварке металла толщиной >1 м мундштуки необходимо разделять на три фазы для равномерной загрузки электросети. Расстояние между крайними электродами различных фаз должно быть равно половине расчетного расстояния между электродами.

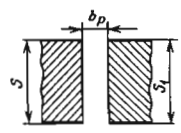
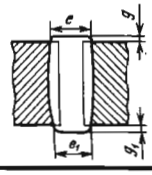
В промежутках между фазами в верхней части разделки возможна установка стальных распорок для уменьшения деформаций и предотвращения замыкания мундштука на кромку.

Выбор режима сварки в соответствии с действующими нормами и правилами. Режимы сварки для ответственных изделий обычно не рассчитывают, а выбирают в соответствии с действующей технической документацией. Так, в атомной энергетике конструкция шва выбирается в соответствии с табл. 4.17, а режимы сварки – по табл. 4.18.

4.4.5. ТРЕБОВАНИЯ К ОБОРУДОВАНИЮ ДЛЯ ЭШС

К оборудованию для ЭШС предъявляют многочисленные и разнообразные требования, так как на условия выполнения сварки влияют качество и точность сборки, необходимость одновременного выполнения большого числа операций и т.п. Поэтому предприятия, предусматривающие применение ЭШС при изготовлении производимых ими изделий, создают участки, оснащенные комплексом сварочной аппаратуры и вспомогательного оборудования, который принято называть сварочными установками. Так, на ряде заводов действуют установки для ЭШС продольных швов цилиндрических сосудов, установки для ЭШС проволочными электродами кольцевых швов, установки для сварки плавящимся мундштуком или электродами большого сечения крупногабаритных деталей большой толщины.

4.17. Подготовка кромок и размеры шва

Условное обозначение сварного соединения	Конструкционные элементы		$s = s_1$, мм	b_p, мм		$e = e_1$, мм		$g = g_1$, мм	
	подготовленных кромок свариваемых деталей	шва сварного соединения		Номинальное значение	Предельное отклонение	Номинальное значение	Предельное отклонение	Номинальное значение	Предельное отклонение
1–19 (С19)			20…34	22	±2	28	±4	2,5	±1,5
			35…80	26		33	±5	3,0	±2,0
			81…500	30		38	±6	3,5	±2,5

4.18. ЭШС

Характеристика	Класс стали свариваемых деталей			
	перлитный		аустенитный	
	Электродная проволока	Плавящийся мундштук	Электродная проволока	Плавящийся мундштук
Номинальная толщина деталей в месте сварки, мм	30…500	>100	30…500	>100
Зазор между кромками свариваемых деталей, мм	Согласно табл. 4.17	35 ±5	Согласно табл. 4.17	35 ±5
Диаметр электродных проволок, мм	3…5			
Число электродных проволок (мундштуков)	1…3	1 шт. на 50…70 мм толщины	1…3	1 шт. на 50…70 мм толщины
Скорость поперечных колебаний электродов, мм/с	9…10	–	9…10	–
Время выдержки электродов в крайних положениях, с	4…5		4…5	
Сухой вылет электрода, мм	50…70		40…50	
Толщина пластины плавящегося электрода, мм	–	8…15	–	8…15
Сила тока на одну электродную проволоку, А	До 700		До 450	До 400
Напряжение на шлаковой ванне, В	42…46	36…42	34…36	30…32
Скорость сварки металла толщиной s, мм/с, не более	$98/300 + s$			
Глубина шлаковой ванны, мм	50…70	40…60	40…50	30…40
Температура охлаждающей воды, °С, не более	60			

Существует много других установок для ЭШС и наплавки разнообразных конструкций с использованием электродных проволок, пластин, плавящихся мундштуков и др., различающихся уровнем механизации и автоматизации основных и вспомогательных операций и другими характеристиками. Все они имеют ряд общих характерных конструктивных особенностей, определяемых вертикальным или близким к нему положением шва; преимущественно значительными размерами и массой свариваемых изделий; необходимостью удержания сварочной ванны в зазоре между соединяемыми кромками; повышенными требованиями к надежности оборудования, в том числе при длительной работе.

Независимо от разнообразных конструктивных особенностей установок они укомплектованы следующим оборудованием: сварочным, к которому относятся источник питания и сварочный аппарат с приборами управления и регулирования процесса; механическим и вспомогательным, предназначенным для установки и перемещения изделия перед сваркой или в процессе выполнения шва, а также обслуживания зоны сварки; оснасткой для принудительного формирования металла шва, а также системой охлаждения; сборочно-сварочными приспособлениями, позволяющими осуществлять быструю и точную сборку заготовок, удерживать их в требуемом положении во время работы и предотвращать или уменьшать при этом деформации и внутренние напряжения в свариваемых изделиях.

Источники питания. Требования к источникам питания для ЭШС менее жестки, чем для дуговой. Источники питания, применяемые для дуговой сварки, годятся и для ЭШС. Однако более стабильный процесс можно получить с помощью специализированных источников питания с низким напряжением холостого хода, жесткой или пологопадающей внешней характеристикой.

Электрошлаковый процесс на переменном токе протекает более устойчиво, чем на постоянном. Поэтому для ЭШС используют, как правило, трансформаторы. Наибольшее распространение в настоящее время получили трансформаторы со ступенчатым регулированием напряжения. Это одно- и трехфазные трансформаторы ТШС-1000-1, ТШС-1000-3, ТШС-3000-1 и ТШС-3000-3. Источники постоянного тока – генераторы и выпрямители с жесткой внешней характеристикой – применяют в основном при сварке металла толщиной ≤50 мм.

Аппараты для сварки и наплавки. Аппараты для ЭШС отличаются наличием устройств для удержания сварочной ванны в зазоре между свариваемыми кромками (формирующие устройства); механизмов вертикального или наклонного перемещения; устройств для автоматического или ручного регулирования скорости вертикального перемещения аппарата; специальных механизмов для подачи пластин, стержней или лент при сварке электродами большого сечения; устройств для перемещения электродов вдоль зазора между кромками.

Разработано много типов аппаратов для ЭШС, которые нашли применение в промышленности. Они различаются функциональными признаками, технологическими возможностями и конструктивными особенностями.

Наибольшее распространение получили аппараты рельсового, безрельсового и подвесного типов для сварки вертикальных швов, обеспечивающих регулируемую подачу трех электродных проволок, удержание сварочной ванны в зазоре, вертикальное перемещение формирующих устройств по мере образования шва, возвратно-поступательное перемещение электродов вдоль ванны.

Большинство автоматов было создано в ИЭС им. Е.О. Патона АН УССР (А-535, А-612, А-1170 и др.), а также в Чехословакии (VUZ-ETZ-450, VUZ-ENZ-700), Бельгии («Vertomatic S»), Швеции, Японии и других странах. Наибольшее распространение в России получил трехэлектродный универсальный автомат А-535.

Важнейшими элементами автоматов для сварки проволочными электродами являются мундштуки для подачи сварочной проволоки. Наиболее надежной для подачи сварочной проволоки оказалась конструкция мундштука, состоящая из направляющей стальной трубки *1*, медной токоподводящей шины *2*, изолирующих бандажей *3*, корректоров *4* и *5* для регулировки положения проволоки в зазоре в радиальном и поперечном направлениях (рис. 4.38). Для формирования шва успешно применяется конструкция шарнирного ползуна с балансированной подвеской, позволяющего удерживать шлаковую ванну при значительном превышении одной кромки над другой и обеспечивать оптимальное распределение усилия прижатия ползуна (рис. 4.39).

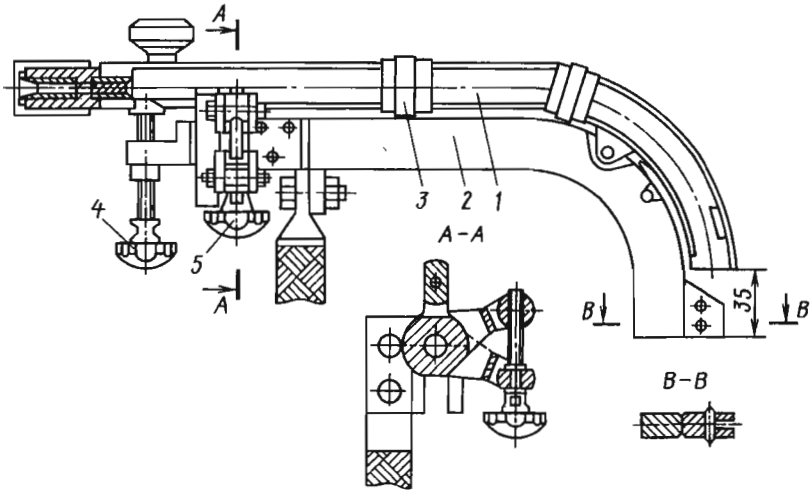


Рис. 4.38. Конструкция мундштука для ЭШС

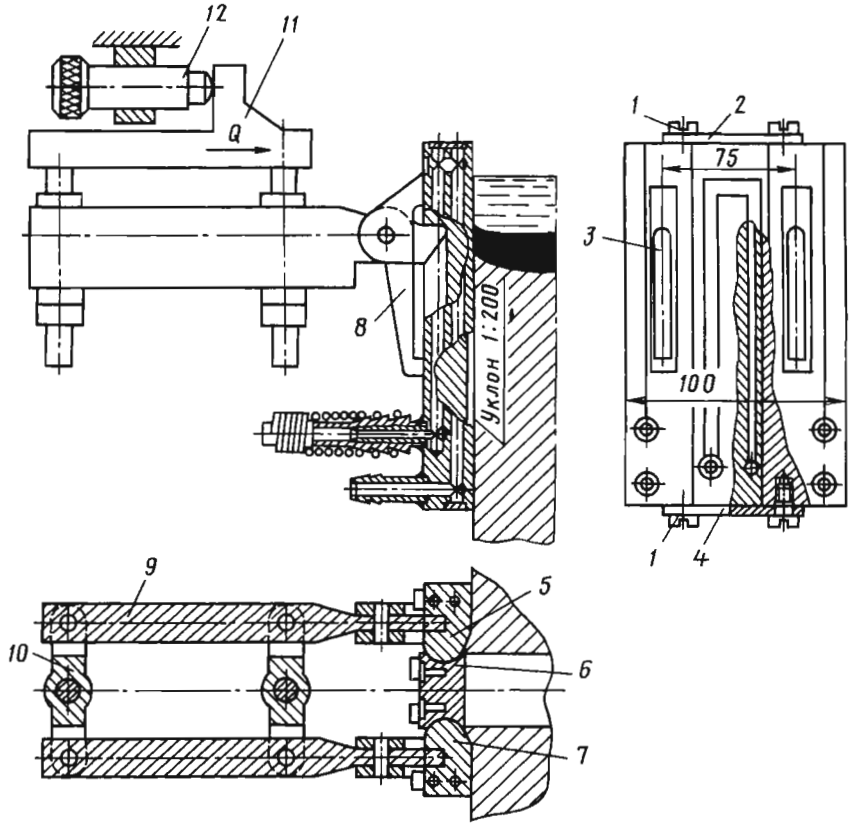


Рис. 4.39. Конструкция шарнирного ползуна с балансирной подвеской:
1 – винт; *2* и *4* – соответственно верхняя и нижняя планки; *3* – пазы для крепления ползуна; *5* и *7* – боковые секции; *6* – вставка; *8* – вертикальные балансиры; *9* – ножи; *10* – горизонтальные балансиры; *11* – плавающее основание; *12* – пружинный стакан

Для ЭШС плавящимся мундштуком получили распространение полуавтоматы А-645М и А-1304, которые крепятся на изделии, обеспечивая подачу соответственно шести и четырех проволок. При необходимости обеспечить подачу большего числа сварочных проволок на изделии устанавливают несколько полуавтоматов, работающих одновременно.

4.4.6. ДЕФОРМАЦИИ И ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ПРИ ЭШС

Одной из характерных особенностей ЭШС протяженных швов по сравнению с другими способами сварки является возникновение значительных перемещений свариваемых деталей относительно друг друга. Это может вызвать остановку процесса сварки вследствие замыкания токоведущих элементов, расположенных в зазоре, на кромку изделия или вытекания сварочной ванны; неблагоприятное изменение режима сварки; искажение размеров и формы свариваемых деталей и др.

Возникающие перемещения, если их знать заранее, можно во многих случаях компенсировать при сборке деталей, устанавливая последние относительно друг друга так, чтобы перемещения при сборке имели противоположный знак по сравнению с перемещениями при сварке.

В МГТУ им. Н.Э. Баумана была разработана теория расчета сварочных деформаций и напряжений для движущегося источника теплоты.

Характерный вид возникающих перемещений v кромок в зоне сварки показан на рис. 4.40. Скорость отхода кромок в начальное положение позади источника теплоты зависит от безразмерной теплоотдачи. Чем она выше, тем быстрее перемещаются кромки к нулевому (начальному) положению. Сваренные между собой кромки, стремясь отойти в прежнее положение на участке позади сварочного источника теплоты (участок AB на рис. 4.40), вызывают сближение и поворот свариваемых деталей, а также закрывание сварочного зазора. Для практического использования результаты расчетов температурных деформаций даны в виде номограмм на рис. 4.41. Поворот деталей θ вычисляется по формуле

$$\theta = [\alpha q /(2\pi\lambda\delta)] F_\theta ,$$

а поступательное сближение – по формуле

$$\Delta = [\alpha q /(\pi c\gamma\lambda\delta v_c)] F_\Delta ,$$

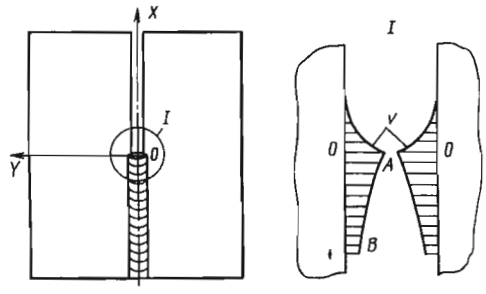


Рис. 4.40. Схема перемещения v кромок свариваемых пластин в направлении оси *Y*

где λ – теплопроводность металла; α – коэффициент линейного расширения металла; q и v_c – мощность источника теплоты и скорость его движения; δ – толщина детали.

Помимо перемещений от температурных деформаций возникают перемещения, вызываемые структурными превращениями. Разработаны программы решения задач по неизотермической теории течения, в которых учтены зависимости теплофизических и механических свойств металла от температуры, а также сложный характер протекания пластических деформаций при сварке. Этот расчетный аппарат позволяет определить ожидаемые перемещения по их направлению и величине и принять решение о том, какими приемами можно уменьшить или предотвратить те или иные виды перемещений.

Институтом электросварки им. Е.О. Патона на основе опыта и экспериментальных данных предложены зависимости, позволяющие определить уровень дозированного изгибающего момента, противодействующего деформациям при ЭШС. Разработан способ нагружения деталей, который позволяет во многих случаях свести возникающие при сварке угловые перемещения к минимуму. При сварке изделий противодействующие моменты и силы изменяются пропорционально толщине свариваемого металла:

$$M = M_0 S \quad \text{и} \quad P = P_0 s ,$$

где M_0 и P_0 – соответственно удельные противодействующие момент и сила; s – толщина свариваемого металла.

Зависимости угла поворота β свариваемых деталей от удельного противодействующего момента M_0 приведены на рис. 4.42.

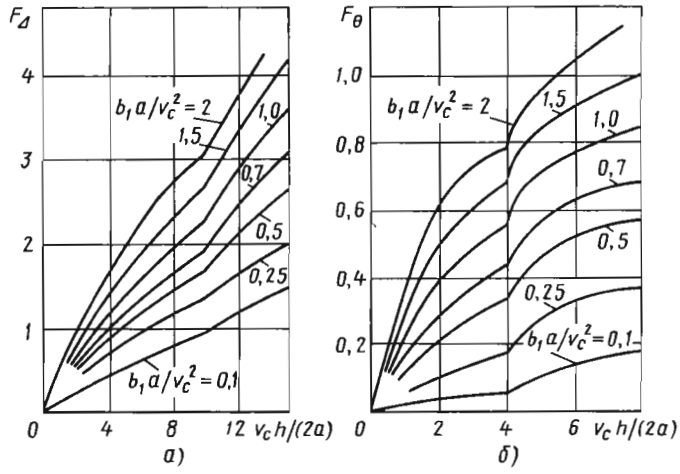


Рис. 4.41. Номограммы для определения сближения (F_Δ) и углового поворота (F_θ) плит при ЭШС в зависимости от безразмерной длины заваренного шва $v_c h/(2a)$ и безразмерной теплоотдачи $b_1 a/v_c^2$

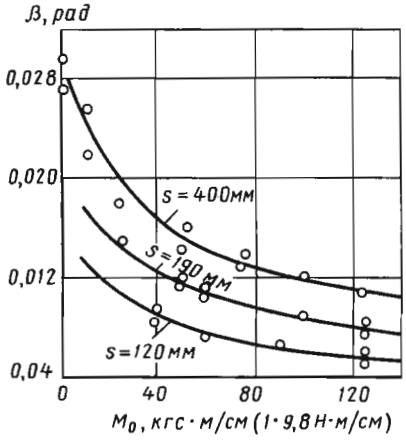


Рис. 4.42. Зависимость угла поворота от величины удельного противодействующего момента M_0 и толщины свариваемого металла s (v_c = 0,5 м/ч; q_0 = 50 ккал/см²)

4.4.7. МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ЭШС

Характер металлургических процессов при ЭШС в основном такой же, как и при дуговой сварке. Шлаковая ванна образуется за счет плавления сварочного флюса, который должен удовлетворять следующим специфическим требованиям:

– обеспечивать легкое возбуждение электрошлакового процесса;

– поддерживать устойчивость процесса;

– обеспечивать полный провар кромок и удовлетворительное формирование поверхности шва без подрезов и наплывов;

– не отжимать ползуны от свариваемых деталей;

– не вытекать в зазоры между ползунами и кромками.

Технологические свойства флюса в значительной степени определяются его электропроводностью, вязкостью, газонасыщенностью.

При повышении электропроводности флюса повышаются устойчивость процесса и легкость его возбуждения. Однако при очень высокой электропроводности флюса количество энергии, выделяющейся в шлаковой ванне, может оказаться недостаточным для проплавления кромок свариваемых деталей.

При работе на флюсе с коротким интервалом температуры, при которой резко изменяется его вязкость, а также на тугоплавком флюсе имеет место отжимание ползунов. В то же время флюсы с чрезмерно низкой вязкостью склонны к вытеканию в зазоры. Поэтому необходимо выбирать флюс оптимальной жидкотекучести.

Газонасыщенность флюса должна быть минимальной, так как выделение газа в ходе сварки приводит к снижению устойчивости процесса.

Наиболее полно указанным требованиям удовлетворяют специально разработанный для ЭШС углеродистых и низколегированных сталей флюс марки АН-8, а также применяемые при дуговой сварке флюсы ОСЦ-45 и АН-348А.

Ввиду незначительного обмена шлака в процессе сварки несколько возрастает его окислительная способность за счет повышения содержания в шлаке окислов железа.

По сравнению с электродным металлом основной металл в процессе оплавления слабо реагирует со шлаком. Поэтому состав металла шва ориентировочно может быть подсчитан по формуле

$$[M_ш] = \gamma[M_о] + (1-\gamma)[M_э + \Delta M_э],$$

где $M_ш$, $M_о$, $M_э$ – содержание элемента в металле шва, основном и электродном, %; $\Delta M_э$ – изменение содержания элемента в металле электрода, в процессе сварки, %; γ – доля участия основного металла в образовании шва (зависит от величины провара и в обычно принятых режимах составляет 0,3…0,5).

При сварке углеродистых и низколегированных сталей с использованием флюса АН-8 значения $\Delta M_э$ для перехода кремния и марганца могут быть взяты из табл. 4.19, а для углерода $\Delta M_э \approx 0{,}01…0{,}03$ %.

Используя широкий ассортимент электродных проволок, возможность их сочетания, а также дополнительной подачи присадочного металла, можно рассчитать и обеспечить заданный состав металла сварного шва для большинства марок стали.

Влияние режима ЭШС на переход элементов связывают с характером капельного переноса электродного металла. Чем мельче капли и больше время их существования, тем интенсивнее взаимодействие их металла со шлаком и тем быстрее происходит накопление окислов железа в шлаке.

4.19. Изменение содержания кремния и марганца в процессе сварки

Марка проволоки	Один электрод		Два электрода	
	ΔMn, %	ΔSi, %	ΔMn, %	ΔSi, %
Св-08	0	0	+0,1	0
Св-08Г; Св-15Г	–0,2		–0,1	+0,1
Св-10Г2	–0,5		–0,4	
Св-10ГС	+0,5	–0,2	+0,2	0

Повышение окислительной способности шлака и вызванное этим усиление перехода марганца и кремния в шлак (или ослабление их перехода из шлака в металл) наблюдаются при снижении скорости подачи электродной проволоки, увеличении напряжения на ванне и уменьшении глубины шлаковой ванны.

На процессы перехода элементов влияет температура шлаковой ванны. При повышении температуры создаются более благоприятные условия для восстановления кремния и марганца. Переход примесей в значительной степени зависит от рода тока и его полярности (вследствие электролиза шлака и изменения характера капельного переноса металла). Так, наибольшее окисление элементов имеет место при сварке на постоянном токе обратной полярности. Сера и фосфор при ЭШС обычно переходят из шлака в металл сварочной ванны. Однако, поскольку обмен шлака незначителен, переход серы и фосфора невелик.

При сварке легированных сталей, содержащих легкоокисляющиеся элементы, к флюсам для ЭШС предъявляются специфические требования. Для максимального снижения окислительной способности эти флюсы строятся на основе фтористого кальция (ОФ-1). Для снижения электропроводности в состав флюса вводят Al_2O_3 и CaO (ОФ-6, ОФ-7 и др.). Важной особенностью таких флюсов является их способность обессеривать металл. Кроме того, вследствие высокой электропроводности фторидные шлаки позволяют вести процесс на низком напряжении. Благодаря этому снижается перегрев основного металла в ОШЗ.

Существенный недостаток флюсов данного класса – их высокая жидкотекучесть, что затрудняет предотвращение вытекания шлака. По результатам исследований особенностей протекания металлургических процессов при ЭШС легированных сталей были разработаны флюсы ФЦ-21 и АН-9. Оптимальное отношение основных окислов к кислым позволило получить необходимые металлургические свойства флюса, обеспечить устойчивость процесса сварки и высокое качество наплавленного металла.

При разработке сварочных проволок для ЭШС было подтверждено определяющее влияние на стойкость против образования горячих трещин содержания в присадочном металле

серы и элементов, способствующих образованию легкоплавких эвтектик. Поэтому для ЭШС в основном используются проволоки с повышенным содержанием марганца.

Было установлено, что помимо выделения по границам дендритов включений типа оксисульфидов, образованию горячих трещин могут способствовать и силикатные включения типа $MnO.SiO_2$ и $(MnO)_2SiO_2$, содержащие до 50…70 % MnO. При относительно низком содержании серы в металле (0,02 %) и содержании марганца, обеспечивающем устранение пленочного выделения оксисульфидов, возрастает роль силикатных включений в процессе образования горячих трещин. Поэтому марганец при его содержании >0,6 % перестает положительно влиять на трещиностойкость металла шва.

При низком содержании серы уменьшается возможность образования легкоплавкой эвтектики Fe – Ni – S и никель полностью переходит в твердый раствор. В этом случае при комплексном легировании никелем и хромом обеспечивается необходимое упрочнение металла шва при сохранении высоких пластичности и ударной вязкости. Для снижения отпускной хрупкости, которая особенно проявляется в сталях, содержащих хром и марганец, эффективно легирование металла шва молибденом при его содержании 0,3…0,6 %. Поэтому для получения сварных соединений сталей повышенной прочности, выполненных ЭШС, были рекомендованы сварочная проволока Св-08ХН2М; при более высоких требованиях к прочности сварных соединений – проволока марки Св-10ХН2М, модифицированная церием; для ЭШС стали 25ХН3МФ разработана проволока Св-ХН3М, для ЭШС корпусных сталей, применяемых в атомном энергомашиностроении, годятся сварочные проволоки Св-10ГН2МФА и Св-16Х2НМФТА.

Структура швов, выполненных ЭШС, и последующая термообработка. При ЭШС конструкционных углеродистых и низколегированных сталей макроструктура швов может характеризоваться наличием:

1) зоны крупных столбчатых кристаллов, ориентированных по периферии шва нормально к оплавляемым кромкам разделки шва;

2) зоны столбчатых кристаллов, характеризуемой отклонением растущих кристаллов в сторону теплового центра (дендриты этой зоны крупнее дендритов первой зоны и имеют оси первого и второго порядков);

3) зоны крупных равновесных кристаллов, имеющих дендритное, сильно разветвленное строение.

В зависимости от химического состава основного и электродного металлов и режима сварки, могут быть получены различные по строению швы, в частности швы, состоящие из двух или одной зоны (первой или второй).

Направленность кристаллизации в значительной степени зависит от коэффициента формы ванны (отношения ширины ванны к ее глубине). При малых коэффициентах дендриды растут навстречу друг другу и образуют плоскость слабины, в которой скапливаются ликвационные примеси, выделяющиеся в процессе кристаллизации металла шва. Из-за этого повышается склонность швов к образованию кристаллизационных трещин. Увеличение коэффициента формы, а следовательно, и повышение стойкости против образования трещин происходят при уменьшении сварочного тока и скорости сварки при повышении напряжения и увеличении зазора.

При ЭШС имеет место медленное охлаждение в интервале температур, при которых происходят фазовые превращения. Поэтому микроструктура сварных швов, выполненных на углеродистых и низколегированных сталях, характеризуется грубым ферритно-перлитным строением с утолщенной оторочкой феррита по границам кристаллов.

Характерными для термического цикла ОШЗ при ЭШС являются длительный нагрев этой зоны, продолжительная выдержка ее при температурах перегрева, медленное последующее охлаждение. Поэтому зона термического влияния при ЭШС характеризуется грубой видманштеттовой ферритно-перлитной структурой. По мере удаления от линии сплавления видманштеттова структура сменяется мелкозернистой нормализованной структурой.

При ЭШС закаливающихся сталей термический цикл ОШЗ способствует распаду аустенита в области перлитного и промежуточного превращений, подавлению мартенситного превращения или протеканию его с самоотпуском образующегося мартенсита. Это уменьшает напряженность ОШЗ, вызываемую структурным превращением, и снижает вероятность образования в ней закалочных трещин.

Указанный характер структуры сварных соединений во многом определяет относительно низкие показатели пластичности металла шва и существенное падение ударной вязкости

в ОШЗ, непосредственно примыкающей к линии сплавления.

В связи с этим принимались меры для улучшения структуры металла, получаемого при ЭШС. Для этого проводили микролегирование металла шва и основного металла, свариваемого ЭШС модифицирующими добавками, вводили в шлаковую и металлическую ванны ультразвуковые колебания в процессе сварки.

Было достигнуто при этом заметное улучшение структуры металла сварных соединений и некоторое улучшение механических свойств. Особенно эффективным было модифицирование основного и присадочного металла алюминием и титаном. Однако добиться заметного улучшения качества границ применением вышеуказанных мер не удалось. Поэтому одним из важнейших требований, предъявляемых к ЭШС ответственных конструкций, является необходимость проведения после сварки высокотемпературной термической обработки (нормализация или закалка с отпуском). В тех случаях, когда заготовки, сваренные ЭШС, подвергаются последующей обработке давлением (ковка или штамповка), высокотемпературная термообработка сварного соединения может быть совмещена с этими операциями, и тогда проводится термическая обработка по режимам, предусмотренным для кованого или штампованного изделия.

Выполненные ЭШС соединения деталей из сталей аустенитного класса подвергаются аустенизации по режимам, установленным для свариваемого металла.

Одной из основных причин необходимости термической обработки сварных соединений, выполняемых ЭШС, особенно при толщинах металла >500 мм, является устранение высоких остаточных трехосных напряжений, образующихся в результате сварки. Поэтому непосредственно после сварки и особенно деталей из легированных сталей, свариваемых с предварительным и сопутствующим подогревом, сварные соединения подвергаются предварительному отпуску для релаксации сварочных напряжений. Температура предварительного отпуска обычно не ниже температуры окончательного отпуска, принятого для деталей из свариваемых сталей. Продолжительность отпуска 5…6 ч, так как это гарантирует существенное снижение напряжений, достаточное для устранения опасности разрушения изделия.

В ходе предварительного отпуска сварных соединений из легированных сталей необходимо, чтобы перед началом нагрева было обеспечено переохлаждение сваренного изделия до температуры не выше окончания $\gamma \rightarrow \alpha$-превращения для устранения опасности длительного пребывания металла в двухфазной зоне, диффузии углерода в аустенит и опасности мартенситного превращения этого аустенита при охлаждении от температуры отпуска.

4.4.8. ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ СТАЛЕЙ, ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ. СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И СВОЙСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Углеродистые и низколегированные стали. ЭШС широко применяется при изготовлении конструкций из углеродистых и низколегированных сталей. Равнопрочность сварного соединения при этом достигается легированием металла шва через электродную проволоку. Для сварки используются стандартные сварочные проволоки марок Св-08ГА, Св-10Г2, Св-08ГС и сварочные флюсы АН-8 или ОСЦ-45. Наличие марганца в составе сварочных проволок позволяет не только обеспечивать равнопрочность сварных соединений, но и, связывая серу, повышать стойкость сварных соединений к образованию горячих трещин.

При ЭШС сталей этого класса в зоне сплавления могут наблюдаться микротрещины, возникающие, как правило, если скорость подачи электродной проволоки превосходит допустимую. Для предотвращения околошовных трещин в углеродистых сталях можно рекомендовать предварительный подогрев изделия, сварку на повышенном напряжении и пониженной скорости подачи электродной проволоки.

Для предупреждения образования газовых полостей и пузырей, вызванных выделением оксида углерода, при сварке кипящих сталей рекомендуются сварочные проволоки Св-08ГС и Св-08Г2С, содержащие 0,6…0,85 % Si.

Снижение ударной вязкости в шве и ОШЗ, вызванное перегревом и образованием видманштеттовой и ферритных оторочек по границам зерен, наиболее эффективно устраняется проведением после сварки термообработки, включающей нормализацию и отпуск. Это обеспечивает получение сварных соединений, однородных с основным металлом по структуре и свойствам.

Среднелегированные стали содержат до 10 % легирующих элементов и отличаются высокой прочностью. Сварные соединения этих сталей должны обладать равнопрочностью с основным металлом, а также удовлетворять специфическим требованиям, зависящим от условий эксплуатации конструкций. Значительные трудности при сварке данных сталей связаны с их восприимчивостью к закалке, низкой стойкостью против образования горячих трещин в шве, а также холодных трещин в шве и зоне термического влияния. При ЭШС многие из указанных трудностей в значительной мере ослаблены. Замедленное охлаждение соединений в интервале температур промежуточного и мартенситного превращений аустенита заметно снижает опасность образования холодных трещин. Большой коэффициент формы металлической ванны позволяет использовать сварочные проволоки или пластины с повышенным легированием, обеспечивая равнопрочность сварного соединения и сохраняя достаточно высокую стойкость его против горячих трещин.

Для наиболее полного перехода в шов легкоокисляющихся элементов присадочных материалов для ЭШС легированных сталей используются флюсы ОФ-6 и ФЦ-21, обладающие рафинирующими свойствами, что также повышает стойкость металла шва к образованию горячих трещин.

Зона термического влияния в среднелегированных сталях значительно сильнее, чем в низколегированных, подвержена образованию холодных трещин. Для их предупреждения при ЭШС осуществляют предварительный, а иногда и сопутствующий подогрев до 150...350 °С и высокий отпуск соединения непосредственно после окончания сварки или после проведения термического отдыха заваренного стыка.

Наибольшие трудности при ЭШС ряда сталей связаны с получением требуемых свойств металла в зоне термического влияния. Повышенное легирование металла может способствовать получению более стойких форм перегрева, которые не устраняются одноразовой нормализацией или закалкой. Кристаллографически упорядоченная структура металла в ОШЗ может вызвать структурную его наследственность. Нормализация таких соединений при температурах на 40...60 °С выше критической точки Ac_3 не приводит к изменению аустенитного зерна в зоне перегрева. Оно сохраняется таким же крупным, как в состоянии после сварки, а ударная вязкость металла остается низкой.

Для устранения последствий перегрева в таких сталях необходимо применять специальные, более сложные режимы термообработки или подвергать их значительным пластическим деформациям (например, ковке). Крупные аустенитные зерна в процессе деформирования раздробляются, а последующая закалка с отпуском сообщает металлу требуемые прочность и вязкость. Наиболее эффективно сочетание пластической деформации соединений с термообработкой при изготовлении крупнотоннажных заготовок ответственного назначения.

В качестве специального режима термической обработки, обеспечивающего устранение наследственной крупнозернистости без пластической деформации, разработан способ термической обработки заготовок после ЭШС, включающий аустенизацию, выполняемую при температуре T_a °С, определяемый из условия

$$T_a = Ac_3 + [(n - i + 1)\,80] \pm 10,$$

где n – общее число операций предварительной обработки; i – номер операции.

После охлаждения проводятся отжиг в межкритическом температурном интервале, нормализация или закалка и окончательный отпуск.

Механические свойства сварных соединений нескольких сталей приведены в табл. 4.20.

Высоколегированные стали и стали на никелевой основе. При сварке высоколегированных сталей (мартенситного, мартенситно-ферритного, аустенитно-мартенситного, аустенитно-ферритного, аустенитного классов) и сплавов на железоникелевой и никелевой основах в качестве присадочных материалов используют сварочные проволоки и пластины, соответствующие по составу свариваемым сталям, и безокислительные флюсы системы $CaO - CaF_2$ или $CaO - CaF_2 - Al_2O_3$ (ОФ-6, ОФ-7 и др.). Для защиты от окисления элементов сварочных материалов в процессе сварки в ряде случаев осуществляют дополнительную защиту поверхности шлаковой ванны обдувом ее аргоном.

При ЭШС высоколегированных сталей обеспечивается высокая стойкость сварных соединений против образования горячих трещин, в том числе при сварке аустенитных сталей, не содержащих ферритной фазы.

4.20. Механические свойства сварных соединений из сталей

Сталь, толщина, мм	Присадочные материалы	Термообработка	$\sigma_т$	$\sigma_в$	δ	γ	$a_н$	Участок перегрева $a_н$
			МН/м^2		%		МДж/м^2	
20Х2МА, 120	Св-08Х3Г2СМ, флюс АН-8	Нормализация 910 °С, отпуск 650 °С	540	660	18	70	1	1
20ХНМФ, 1000	Св-08ХН2М, флюс АН-348	Нормализация 920 °С, отпуск 640 °С	670	840	15	33	0,45	
15Х2МФА, 650	Св-13Х2МФТ, флюс ОФ-6	Закалка 1000 °С, отпуск 640 °С	540	650	18	73	2	2,5
25ХН3МФ, 1800	Св-ХН3МФ, пл. 25ХН3МФ, флюс ОФ-6	Нормализация 950 °С и 870 °С, отпуск 620 °С	700	830	15	60	1	1
35ХН3МФА, 750	35ХН3, флюс ОФ-6МФА	Ковка, закалка 850 °С, отпуск 610 °С	690	820	20		1,4	1,4
30Х2ГСНВМА, 50	20Х2ГСНВМА, флюс АН-8	Закалка 940 °С, отпуск 210 °С	–	1700	9	36	0,5	0,5

Существенной технологической трудностью при ЭШС высоколегированных сталей оказалось образование несплавлений – практически при использовании всех флюсов, рекомендуемых для сварки этих сталей. Несплавления образуются только вблизи линии сплавления, зачастую совмещаясь с нею; берут начало от края стыка; иногда появляются в металле шва, но всегда начало их лежит на линии сплавления; преимущественно образуются при сварке сталей и сплавов, содержащих алюминий и титан; имеют место при использовании флюсов, содержащих окислы с малой упругостью диссоциации (например, Al_2O_3).

Решающее влияние на образование несплавлений оказывают физические характеристики жидкого шлака: способность его к обособлению на границе раздела жидких фаз шлак – металл и к растеканию или коагуляции на поверхности твердого металла. Шлак с незначительным поверхностным натяжением обеспечивает хорошее смачивание, и в этом случае образуются несплавления. Шлак с высоким поверхностным натяжением способствует формированию глобулей, их всплыванию и, как следствие, отсутствию несплавлений. Всякое уменьшение поверхностного натяжения жидкого металла, обусловленное присутствием каких-либо пленок, поверхностно активных элементов и т.д., улучшает растекание жидкого шлака по поверхности жидкого металла, но ухудшает смачивание твердого металла шлаком (способствует уменьшению опасности появления несплавления, но увеличению опасности образования шлаковых включений).

Сварка чугуна. При изготовлении крупногабаритных конструкций возникает необходимость применения сварки для соединения отдельных литых элементов и для исправления дефектов литья. Высокое содержание углерода резко снижает пластичность чугунов, делает сварку затруднительной, требует разработки при этом специальных приемов.

Теплофизические особенности и технические возможности электрошлакового процесса позволили успешно применить его для сварки чугунных деталей большого сечения при изготовлении и ремонте конструкций. Широкие возможности регулирования термического цикла при ЭШС дали возможность избежать в значительной мере отбеливания металла шва и ОШЗ при сварке серого чугуна толщиной

30…100 мм. ЭШС осуществляли с применением флюса ОФ-6 электродами большого сечения того же состава, что и основной металл, при сварочном токе 600…900 А, напряжении на шлаковой ванне 36…38 В. Сварное соединение имело вполне удовлетворительную структуру и механические свойства.

При исправлении с помощью ЭШС дефектов литья, а также изломов и трещин, возникающих при эксплуатации, удалять дефектные места и разделывать кромки под сварку необходимо механическими способами. Техника ЭШС чугуна электродами большого сечения на автомате или полуавтоматическим способом практически ничем не отличается от сварки стальных заготовок и арматуры.

Сварка алюминия и его ставов. Алюминий имеет повышенное сродство к кислороду и образует на поверхности тугоплавкую трудно-растворимую в шлаках плотную пленку окислов. Он обладает повышенной теплопроводностью и теплоемкостью, а также довольно большой скрытой теплотой плавления. Все это затрудняет сварку алюминия и его сплавов.

С целью интенсификации удаления окисла алюминия в шлак в качестве флюсов используют смеси фторидов и хлоридов щелочных и щелочно-земельных металлов. Поскольку такие флюсы в расплавленном состоянии характеризуются повышенной жидкотекучестью, принимаются дополнительные меры для предотвращения их утечки через возможные зазоры между поверхностями деталей и формирующих устройств: используют асбестовые шнуры, огнеупорную глину и т.д. С целью обеспечения надежного провара сварку алюминия и его сплавов ведут на большей погонной энергии, чем сварку стали. Для предотвращения образования кристаллизационных трещин строго регламентируют соотношение содержания примесей в металле шва, уменьшают жесткость закрепления деталей при сборке, подбирают параметры режима сварки так, чтобы коэффициент формы ванны был достаточно большим: >1,5.

Это обеспечивает возможность получения высококачественных сварных соединений, обладающих требуемыми механическими и коррозионными свойствами.

Титан и его сплавы. Для соединения деталей из толстостенного титана и его сплавов эффективно применение ЭШС. Короткие швы из титана сваривают с помощью пластинчатого электрода. Разработаны способы ЭШС с применением проволочных электродов и плавящегося мундштука. Созданы тугоплавкие безкислородные флюсы типов АНТ-2, АНТ-4 и др., обеспечивающие высокую стабильность процесса и хорошее внешнее формирование шва.

Чтобы избежать загрязнения наплавленного металла газами, применяют дополнительную защиту шлаковой ванны чистым аргоном.

Технический титан и однофазные α-сплавы титана (ОТ4, ВТ5, ВТ5-1, АТ3 и др.) хорошо свариваются электрошлаковым способом и после сварки не требуют термообработки сварных соединений. В табл. 4.21 представлены механические свойства сварных соединений из сплава ВТ1-0, выполненные с применением плавящегося мундштука и проволоки из сплава ВТ1-00.

Для некоторых двухфазных титановых сплавов не удается получить удовлетворительные пластичность и вязкость в состоянии после сварки. Механические свойства соединений таких сплавов улучшают последующей термообработкой.

Сварка меди. Особенности технологии ЭШС меди состоят в обеспечении необходимого подогрева и достаточного сплавления свариваемых кромок, а также в рафинировании расплавляемого основного и присадочного металла с помощью шлаковой ванны. Это достигается путем сочетания плавящегося и неплавящегося электродов, применением специальных флюсов и особых формирующих устройств.

4.21. Механические свойства сварных соединений из сплава ВТ1-0

Толщина, мм	Флюс	Число проволок	$\sigma_т$	$\sigma_в$	δ	φ	Ударная вязкость, МДж/м^2		
			МН/м^2		%		Основной металл	Шов	Линия сплавления
110	АНТ-2	2	351	427	28,5	67,5	1,21	1,56	1,28
250	АНТ-4	3	310	394	29,7	70,1	–	1,69	–
400		4	379	440	28,3	67,9		1,38	

Разработаны легкоплавкие флюсы на основе фторидов щелочно-земельных элементов (типа АНОМ10) для ЭШС меди, которые обеспечивают хорошую устойчивость электрошлакового процесса, достаточный подогрев и проплавление кромок на требуемую глубину, а также хорошее формирование поверхности швов.

ЭШС меди необходимо вести на больших погонных энергиях с применением пластинчатого или плавящегося мундштука. Напряжение сварки устанавливают достаточно высоким (40...50 В). Учитывая высокую электропроводность флюсов, глубину шлаковой ванны поддерживают в пределах 50...70 мм, а сварочный зазор увеличивают до 56...60 мм.

Чтобы обеспечить максимальную концентрацию тепловой энергии и свести к минимуму ее потери, в качестве формирующих устройств используют накладки из графита. Сварку начинают путем заливки в сварочный зазор расплавленного флюса («жидкий старт»).

Швы, полученные электрошлаковым способом, имеют характерное транскристаллитное строение, при котором столбчатые дендриты прорастают до оси шва. Металл шва отличается высокой плотностью, отсутствием трещин и шлаковых включений. По механическим свойствам он практически равноценен основному металлу. Теплофизические свойства металла шва также незначительно отличаются от таких же свойств основного металла.

4.4.9. ДЕФЕКТЫ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ И МЕТОДЫ ИХ УСТРАНЕНИЯ

Дефекты в сварных соединениях образуются вследствие нарушения установленной технологии: отклонения от рекомендованных режимов сварки, использования некачественных сварочных материалов или свариваемого металла, неисправности сварочного оборудования, загрязнения свариваемых кромок, неблагоприятных внешних условий.

Характерными дефектами ЭШС являются те, которые вызваны кратковременной или длительной остановкой процесса из-за потери его устойчивости, замыкания электродов либо мундштуков на свариваемые кромки или формирующие устройства, вытекание шлаковой и металлической ванны и др.

При кратковременной остановке, когда удается быстро восстановить процесс сварки, это приводит к появлению непроваров, заполненных шлаком. Этот участок после окончания сварки и предварительной термообработки должен быть удален и заварен вручную.

При длительной остановке происходит сокращение зазора, что затрудняет дальнейшее нормальное ведение процесса сварки. В этом случае рекомендуется прекратить сварку стыка, удалить его заваренную часть и вновь подготовить стык к сварке.

Дефектами формирования шва могут быть непровары, подрезы, неравномерность ширины шва, наплывы (рис. 4.43, 4.44).

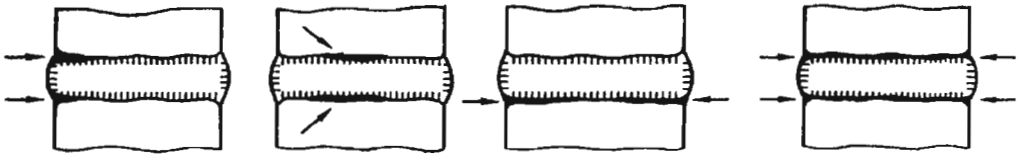


Рис. 4.43. Непровары в электрошлаковых сварных соединениях

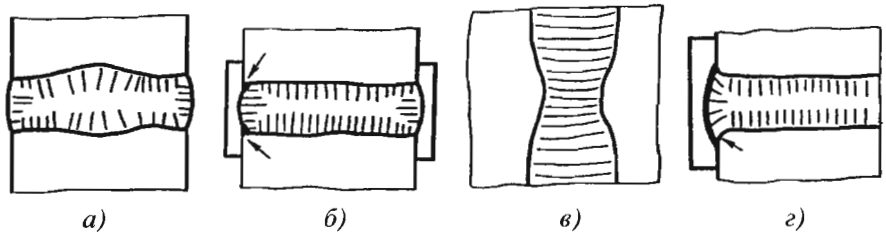


Рис. 4.44. Дефекты формирования шва:
а – расширение провара посредине шва; *б* – подрезы; *в* – неравномерность ширины шва; *г* – наплывы

Непровары возникают при увеличении расстояния между крайним положением электрода и ползуном, смещении электрода к одной из кромок, чрезмерно большом расстоянии между электродами, недостаточном напряжении сварки.

Расширение в центре шва возникает при заниженном расстоянии между электродами. При несплавлениях оплавленные кромки отделены от шва слоем шлака. Этот дефект возникает при повышенной глубине шлаковой ванны и использовании тугоплавкого флюса.

Подрезы образуются при малой ширине формирующей канавки в ползуне, его интенсивном охлаждении и большой ширине шва.

Неравномерность ширины шва наблюдается при колебаниях напряжения и скорости сварки. В местах сужения могут образовываться дефекты.

Наплывы возникают при ширине формирующей канавки в ползуне, намного превышающей ширину шва, и при недостаточном прогреве металлической ванны у ползуна.

Дефекты швов, расположенные на поверхности или на незначительной глубине, следует удалить, и разделку заварить дуговой сваркой. Внутренние, протяженные дефекты не подлежат ремонту. Швы с такими дефектами удаляют и вновь заваривают.

Горячие трещины являются одним из основных видов брака при сварке. Причина их образования состоит в неблагоприятном сочетании низкой пластичности металла шва в процессе кристаллизации и повышении деформации растяжения в этот период.

Меры борьбы с появлением горячих трещин заключаются в уменьшении сварочного тока и скорости сварки для улучшения коэффициента формы шва и предотвращения встречного роста кристаллов в центре шва, а также правильном выборе сварочного флюса и электродного металла. Элементами, способствующими образованию кристаллизационных трещин, являются сера, фосфор, углерод и кремний. Марганец при содержании до 1,8 % уменьшает вредное влияние серы и углерода.

Опасность возникновения полигонизационных трещин уменьшается легированием металла шва элементами, тормозящими развитие полигонизационных границ. Такое действие могут оказывать хром, марганец, ванадий и молибден в коррозионно-стойких аустенитных сталях.

В ОШЗ причинами возникновения горячих трещин-надрывов могут быть легкоплавкие сульфидные включения в основном металле. Повышение содержания в стали серы, фосфора, углерода, кремния и никеля, способствующих образованию сульфидных включений по границам зерен, увеличивает вероятность надрывов в зоне термического влияния.

Для предупреждения надрывов увеличивают чистоту свариваемого металла и легируют его элементами, связывающими серу в тугоплавкие соединения; выполняют сварку при повышенном напряжении и большем проплавлением кромок; иногда осуществляют сварку по предварительно наплавленным кромкам. В последнем случае в состав электродов для наплавки вводят элементы с высокой акцепторной активностью к сере.

Холодные трещины могут возникать в сварных соединениях из средне- и высоколегированных сталей перлитного и мартенситного классов. Они образуются в результате действия ряда факторов, основные из которых – сварочные напряжения, закалочные явления и водород. Вероятность образования холодных трещин в соединениях, выполненных ЭШС, существенно ниже, чем при дуговой. Вместе с тем, заметно больший перегрев металла вблизи границы сплавления, сопровождающийся интенсивным ростом зерен и усилением их химической неоднородности, а также более высокий уровень сварочных напряжений могут вызвать при неблагоприятном сочетании различных факторов развитие холодных трещин и при ЭШС.

Для предупреждения возникновения холодных трещин следует ограничивать перегрев свариваемого металла и принимать меры для уменьшения в нем количества неметаллических включений. Образование трещин затрудняется при уменьшении скорости охлаждения соединения. Предварительный или сопутствующий подогрев опасных участков соединений или всей свариваемой конструкции обычно полностью предотвращает возникновение в них трещин.

Трещины повторного нагрева. Сварные соединения некоторых легированных сталей после электрошлакового переплава склонны к появлению в них трещин повторного нагрева. Это обусловлено высокой чистотой металла, при которой границы зерен подвержены особой опасности появления трещин при релаксации сварочных напряжений. Этому способствует и то, что металл ОШЗ имеет заметно меньшую релаксационную стойкость по сравнению с основным металлом. Поэтому в данном случае рекомендуется предварительную

термическую обработку проводить при температуре, меньшей той, при которой происходит снижение пластичности металла с релаксацией сварочных напряжений.

Другим методом борьбы с образованием трещин повторного нагрева является технология, заключающаяся в том, что после окончания сварки изделие не подвергается промежуточному отпуску, а сразу передается на высокотемпературный нагрев (на штамповку или нормализацию). В этом случае механизм образования трещин повторного нагрева, имеющего инкубационный период, не успевает реализоваться, а после высокотемпературного нагрева опасность возникновения трещин повторного нагрева исчезает.

Поры появляются в результате выделения газов из кристаллизующегося металла. Основной причиной образования пор при ЭШС служит наличие оксида углерода и водорода.

Поры, вызванные оксидом углерода, могут образовываться, если существуют термодинамические условия окисления углерода в металлической ванне в процессе ее затвердевания, в частности при недостаточном раскислении металла. В пузырьки оксида углерода могут диффундировать водород и азот, вследствие чего размеры пузырьков будут увеличиваться.

Для предупреждения образования пор необходимо раскислять металлическую ванну (например, используя электродную проволоку, содержащую раскислители) и предотвращать попадание в ванну водорода и азота.

4.4.10. СВАРНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ИЗГОТОВЛЯЕМЫЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭШС

Увеличение мощности и габаритных размеров энергетических установок, металлургического оборудования, нефтехимической аппаратуры, вызвавшее необходимость сварки металла большой толщины, привело к широкому применению ЭШС при изготовлении многих ответственных изделий на ряде заводов в нашей стране и за рубежом.

Одним из основных объектов применения ЭШС стало производство крупных сосудов. Это барабаны паровых котлов, пароперегреватели, многочисленные и разнообразные сосуды химической и нефтехимической аппаратуры. Чаще всего такие сосуды изготовляют из листового проката. Для этого листы загибают в штампе и полученные заготовки сваривают продольными швами в цилиндрическую обечайку. После термической обработки, которая может быть совмещена с вальцовкой, обечайки сваривают между собой кольцевыми швами. Это обычно выполняют дуговой сваркой под флюсом.

Другим объектом применения ЭШС является производство сварных конструкций из толстолистовой стали. Производство наиболее нагруженных частей машин и агрегатов кузнечно-прессового, прокатного и металлургического оборудования позволило снизить массу конструкции при сохранении технических характеристик и трудозатраты на их изготовление.

Из толстолистового проката толщиной до 350 мм изготовляют сварные заготовки под штамповку днищ корпусов реакторов, компенсаторов давления, парогенераторов современных атомных энергоблоков.

Метод ЭШС нашел применение при изготовлении сварно-литых конструкций. Это станины прокатных станов, архитравы, рамы щековых дробилок, крупногабаритные бандажи цементных и обжиговых печей, рабочие колеса мощных гидротурбин, элементы корпусов кораблей и многие другие детали. Их масса может достигать 200...250 т.

Одним из уникальных изделий, изготовленных применением ЭШС, стал сварнокованый ротор турбогенератора мощностью 1000 МВт. Он изготовлялся из трех поковок стали 25ХН3МФА массой 169 и 200 т. В плоскостях сварки поковки имели прямоугольное сечение размером 2000 × 2650 мм. Для сварки этого изделия была создана специализированная 36-электродная установка А-1374, оснащенная нагревательным индукционным устройством мощностью 1500 кВт для предварительного и сопутствующего подогревов свариваемых частей. Сварку выполняли плавящимся мундштуком, по каналам которого подавали 18 основных проволок (Св-20ХН3МФА) и 18 дублирующих. После сварки каждого стыка проводился отжиг, и далее следовали термообработка и ковка всего сварного моноблока.

Позднее сварка таких стыков выполнялась электродами большого сечения с их подключением по бифилярной схеме (см. рис. 4.24).

Таким образом, освоение производством технологических процессов ЭШС не только позволило производить крупные заготовки из существующей заготовительной базы, но и создало возможности для проектирования и изготовления машин и оборудования новых поколений как в настоящее время, так и в перспективе.

4.5. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ДУГОВОЙ И ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ СВАРКИ

4.5.1. АВТОМАТЫ ДЛЯ СВАРКИ НЕПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ В ЗАЩИТНОМ ГАЗЕ

Сварка неплавящимся электродом в защитном инертном газе в связи с высокой степенью концентрации дуги, ее стабильностью, хорошим формированием шва в различных пространственных положениях легко поддается автоматизации. Автоматическая сварка этим способом (в основном аргонодуговая сварка) находит широкое применение в авиа- и судостроении, энергомашиностроении, химической и пищевой промышленности, ракетостроении, атомной энергетике и промышленности и в некоторых других отраслях. Большинство отраслей, имея свои конструкторские подразделения и производственные мощности, разрабатывает и выпускает автоматы для сварки неплавящимся электродом, ориентируясь в основном на собственные нужды.

Начиная с 50-х годов прошлого века, разработано огромное количество самых разных моделей автоматов для аргонодуговой сварки неплавящимся электродом. Эти автоматы выпускаются малыми сериями по целевым заказам.

Простейшие автоматы для аргонодуговой сварки неплавящимся электродом без подачи присадочной проволоки обеспечивают горение сварочной дуги между электродом и изделием, газовую защиту электрода, сварочной ванны и прилегающего к ней металла от воздействия воздуха, передвижение дуги вдоль свариваемых кромок. Автоматы для сварки с присадкой осуществляют еще подачу присадочной проволоки.

На рис. 4.45 в качестве примера представлен пост автоматический сварки неплавящимся электродом в защитном газе неповоротных стыков труб. В общем виде он состоит из источника сварочного тока, баллона с защитным газом и автомата, включающего в себя трубосварочную головку и аппаратуру управления, состоящую из аппаратного шкафа и выносного пульта. В других типах автоматов место трубосварочной головки могут занимать подвесная головка, сварочный трактор, а в стационарных сварочных автоматах – установка станочного, консольного или другого типа. В тракторных и стационарных установках сварочная головка является основной частью системы.

Сварочная головка самого простого автомата включает в себя горелку с устройствами ее настройки на шов и регулировки длины дугового промежутка. По мере усложнения головка оснащается механическими копирными или автоматическими устройствами поддержания длины дуги, механизмом колебания горелки, механизмом подачи присадочной проволоки с системами настроечных перемещений мундштука, в самоходных головках – устройством ее перемещения вдоль шва. Некоторым головкам придаются и дополнительные устройства: светильники, оптические или

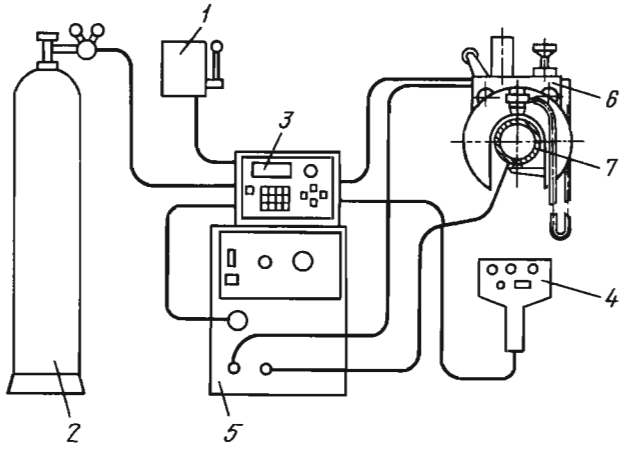


Рис. 4.45. Типовая схема поста автоматической сварки в защитном газе:
1 – рубильник; *2* – баллон с защитным газом; *3* – аппаратный шкаф; *4* – выносной пульт управления; *5* – источник сварочного тока; *6* – сварочная головка; *7* – свариваемое изделие

телевизионные системы наблюдения, устройства для магнитного перемешивания металла сварочной ванны, устройства дополнительной защиты зоны сварки, датчики слежения и т.п.

На рис. 4.46 представлена классификация основных автоматов для сварки неплавящимся электродом в защитном газе.

Автоматы разрабатывают и выпускают как без привязки к конкретным изделиям или условиям применения – автоматы общего назначения, так и специализированные – для случаев, когда невозможно выполнять сварку автоматами общего назначения. Характерными примерами автоматов общего назначения являются большинство сварочных тракторов, станков для сварки прямолинейных и кольцевых швов, консольные установки, множество автоматов с подвесными и переносными головками.

Типичными специализированными автоматами являются многие автоматы, выпускаемые для сварки при монтаже и ремонте конкретных соединений атомных реакторов. Только для монтажа трубопроводов реакторов типа РБМК имеется 13 специализированных автоматов, каждый из которых предназначен для сварки одного-двух типов конкретных соединений. Для сварки при ремонте реакторов разрабатывают и выпускают дистанционно управляемые автоматы, иногда для ремонта одного конкретного сварного соединения.

Много специализированного оборудования для автоматической сварки неплавящимся электродом разрабатывают и производят авиационная промышленность и предприятия ракетостроения.

Основными вариантами такого рода сварки являются сварка без присадочной проволоки и сварка с подачей присадочной проволоки.

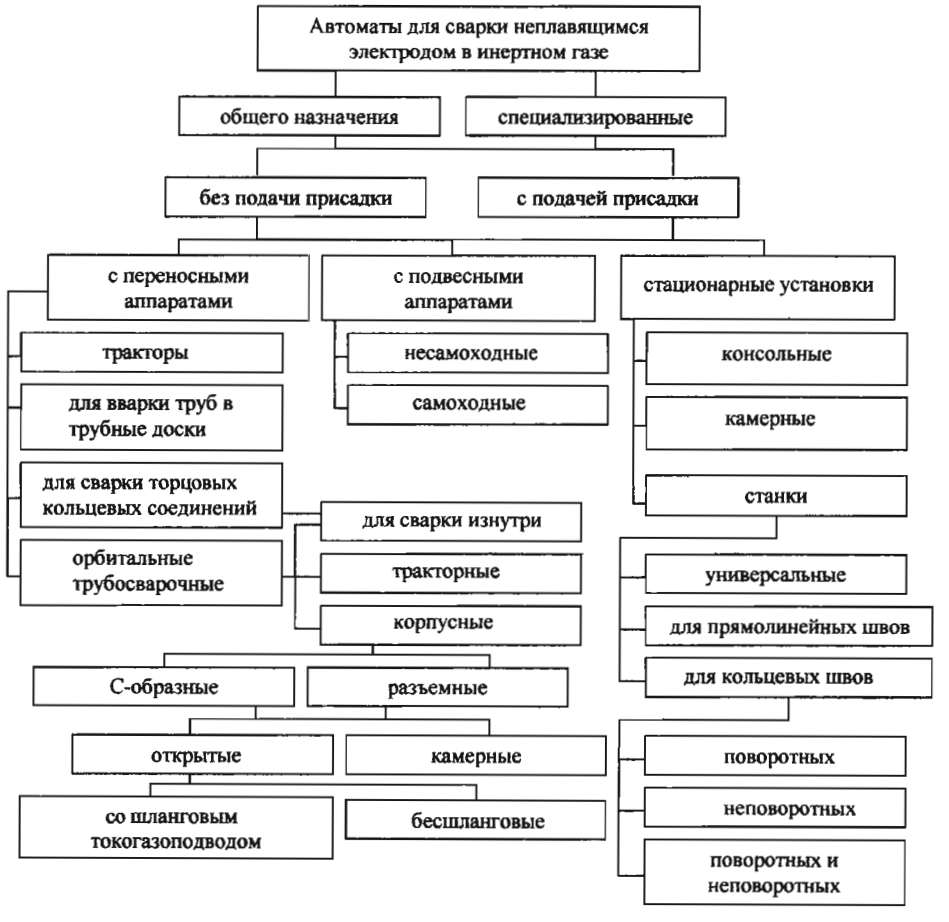


Рис. 4.46. Классификация автоматов для сварки неплавящимся электродом в инертном газе

Наибольшее распространение в России и мире получили переносные трубосварочные автоматы, используемые для сварки неповоротных стыков (орбитальной сварки) как в цеховых условиях, так и при монтаже трубопроводов.

Первые нашедшие широкое практическое применение трубосварочные автоматы были созданы в СССР Научно-исследовательским институтом авиационной технологии и организации производства (НИАТ, Москва). За рубежом такие автоматы появились значительно позже.

Сегодня на мировом и отечественном рынках сварочного оборудования предлагается широкий выбор автоматов для орбитальной сварки практически на весь диапазон диаметров трубных соединений, отличающихся конструктивными схемами и реализуемыми вариантами технологического процесса сварки.

Автоматы для сварки без подачи присадочной проволоки используются или для сварки труб с толщиной стенок до 3,5...4 мм, или для сварки корневых проходов более толстостенных труб, заполнение разделки которых выполняется ручной дуговой сваркой покрытыми электродами, ручной или автоматической аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом с присадочной проволокой и реже другими способами.

Первое время усиление стыков, свариваемых без подачи присадочной проволоки, получали за счет предварительной раскатки или отбортовки кромок соединения специальными устройствами, что ограничивало применение орбитальных бесприсадочных автоматов. Широкое распространение орбитальные автоматы для сварки без присадочной проволоки получили после разработки Научно-исследовательским и конструкторским институтом монтажной технологии (НИКИМТ, Москва) Министерства РФ по атомной энергии способа сварки с автоопрессовкой и его варианта – сварки последовательным проплавлением.

На рис. 4.47, *а* представлена типовая технологическая структура орбитальной головки для аргонодуговой сварки неплавящимся электродом без подачи присадочной проволоки.

Горелка в этом автомате вращается вокруг свариваемого соединения. Дуга, горящая между закрепленным в горелке неплавящимся вольфрамовым электродом и кромками стыка, оплавляет последние, образуя сварное соединение. Горящая дуга, нагретый до высокой температуры электрод, ванна расплавленного металла и прилегающая к ней поверхность трубы защищаются струей аргона, выходящего из сопла горелки. Таким образом, основным (технологическим) движением является перемещение горелки вдоль шва $v_{св}$ (вращение горелки вокруг трубы). К вспомогательным относятся корректировочные перемещения горелки: поперек шва (⊙⊕) и аксиальное (вдоль оси электрода) (↕).

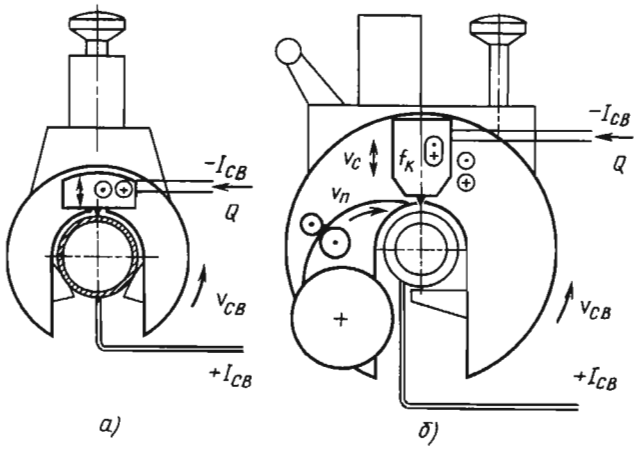


Рис. 4.47. Типовая технологическая структура орбитальных автоматов для сварки неплавящимся электродом в инертном газе

Технологическая структура головки включает также системы подвода сварочного тока $I_{св}$ и аргона (Q).

Основными (технологическими) движениями в автоматах с подачей присадочной проволоки (рис. 4.47, *б*) являются движение горелки вдоль шва ($v_{св}$), подача присадочной проволоки ($v_п$) и иногда колебания электрода ($f_к$) поперек шва. К вспомогательным перемещениям относятся аксиальная и поперечная корректировки горелки (↕⊙⊕), а также конца присадочной проволоки. Аксиальная корректировка горелки может осуществляться системой автоматического регулирования напряжения дуги (АРНД) со скоростью слежения (отработки) $v_с$.

Орбитальные трубосварочные автоматы – одни из самых наукоемких и сложных многофункциональных образцов сварочного оборудования. При этом при единой технологической структуре они могут существенно отличаться степенью сложности.

Конструкция головок для сварки без присадочной проволоки может быть простейшей: иметь только устройство фиксации на трубе, С-образную или разъемную вращающуюся вокруг трубы планшайбу с жестко закрепленной на ней горелкой и шланговым подводом тока и газа.

Более сложные варианты головок такого типа имеют плавающую горелку с копиром, механизм аксиальной и поперечной корректировки горелки. Существуют конструкции бесприсадочных головок, оснащенных системой АРНД и механизмом колебания горелки. При этом регулировка размаха колебаний горелки и ее поперечная корректировка имеют электромоторные приводы и управляются дистанционно. Есть конструкции, в которых рукоятки ручных аксиальной и поперечной корректировок вынесены на невращающиеся части головки. Некоторые головки оснащаются волоконно-оптическими или телевизионными системами наблюдения за настройкой электрода и сваркой и системами слежения за стыком. Различаются по степени сложности также автоматы для сварки с присадочной проволокой.

При этом не следует отождествлять степень сложности автомата с его техническим совершенством. Необходимая степень сложности выбирается в соответствии с конкретными задачами. Для сварочных работ, характеризующихся простым и непродолжительным циклом сварки при большом количестве одинаковых стыков, выбирается сравнительно несложное и надежное оборудование, обеспечивающее многократное повторение одной и той же операции сварки. В случае длительного процесса сварки стыков толстостенных труб, сопровождающегося изменениями режимов сварки, больше подходит максимально автоматизированное оборудование высокой степени сложности. Еще большей степени сложности обычно требует оборудование, управляемое дистанционно.

Орбитальные трубосварочные автоматы отличаются большим разнообразием конструктивных схем, основные из которых представлены на рис. 4.48.

В корпусных головках корпус *4* крепится на одной из свариваемых труб *1*, а планшайба *2* с горелкой *3* вращается, перемещая горелку вдоль стыка. Открытыми, в отличие от камерных, называются головки, в которых защита расплавленного металла и электрода струйная, реализуемая горелкой, расположенной на наружных частях головки. Корпусные головки бывают как С-образные, так и разъемные (см. рис. 4.48, *а*).

С-образный вырез в корпусе и планшайбе предназначен для установки головки на свариваемые трубы сбоку, для чего вырез планшайбы совмещается с вырезом в корпусе. С-образная планшайба имеет зубчатый венец и вращается с помощью двух синхронно вращающихся ведущих шестерен, размещенных в корпусе привода, содержащего двигатель, редуктор и раздвоитель для синхронизации вращения шестерен. Головки С-образного типа иногда называют скобами, или клещами.

На рис. 4.49 представлены трубосварочные головки конструкции НИКИМТа: ОДА-1, ОДА-2 и ОДА-3, предназначенные для орбитальной аргонодуговой сварки неплавящимся электродом без присадочной проволоки труб диаметром 8...26, 20...42 и 42...76 мм. Это самые распространенные в России трубосварочные автоматы, надежные и удобные в работе, обладающие ресурсом >600 ч машинного времени. Основные технологические процессы, реализуемые автоматами ОДА, – сварка с автоопрессовкой или последовательным проплавлением, они обеспечивают высокое качество сварных соединений труб из коррозионностойких сталей с толщиной стенок до 3,5 мм. Автоматы ОДА разных модификаций выпускаются более 40 лет, и за это время ими сварены

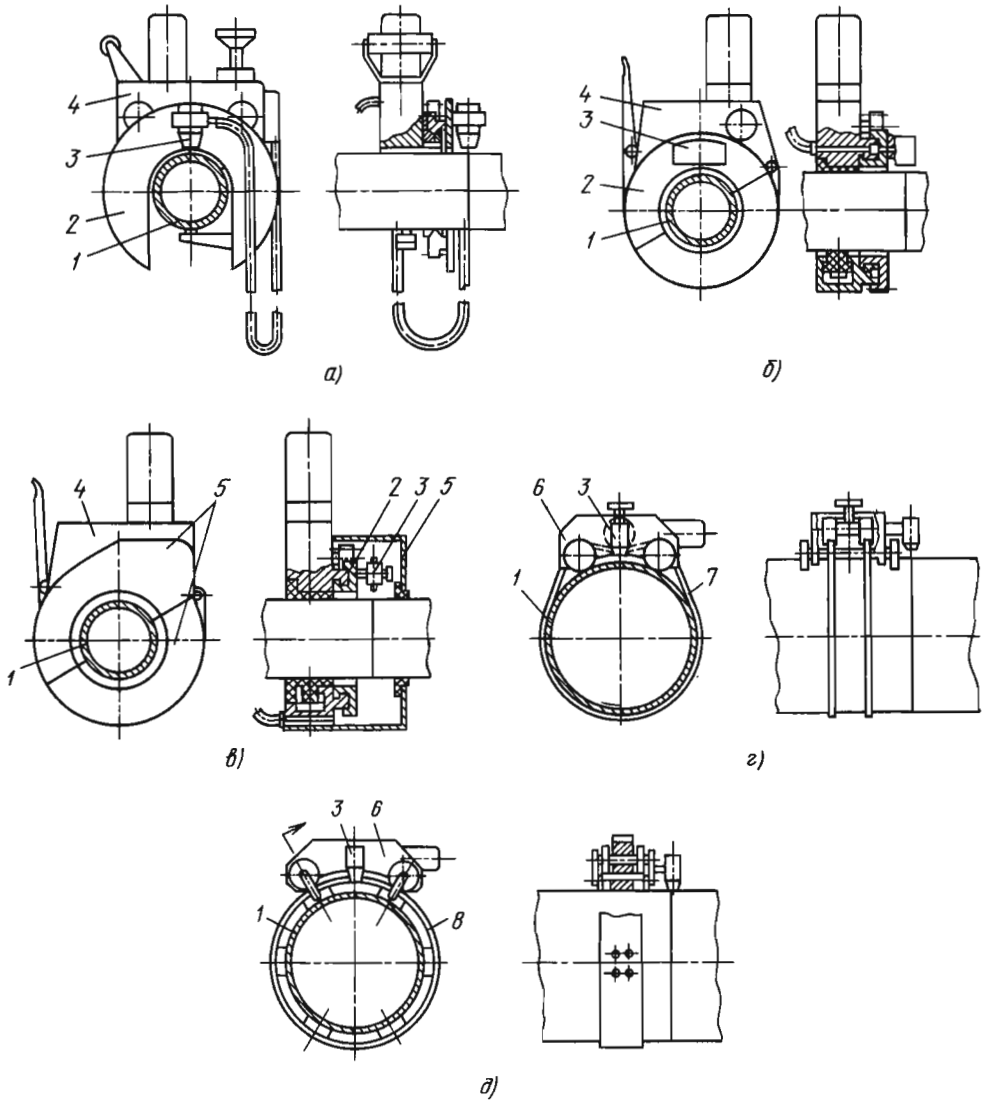


Рис. 4.48. Основные конструктивные схемы головок орбитальных трубосварочных автоматов:
а – С-образная открытая головка; *б* и *в* – корпусные разъемные открытая и камерная головки соответственно; *г* – тракторная головка, перемещаемая по поверхности трубы; *д* – то же, с неподвижной направляющей; *1* – труба; *2* – планшайба; *3* – горелка; *4* – корпус; *5* – камера; *6* – каретка; *7* – гибкий элемент поджатия головки к трубе; *8* – жесткая направляющая

сотни тысяч стыков в основном трубопроводов атомных электростанций. Головки ОДА оснащены надежными призменно-клещевыми механизмами фиксации на трубе. На головках ОДА-1 и ОДА-2 рукоятки механизмов поперечной корректировки вынесены на невращающиеся корпусные части. Головка ОДА-3 имеет муфту сцепления для ускоренной ручной размотки шлангов и быстродействующий рычажный привод механизма фиксации.

Для сварки корневых проходов имеются автоматы ОКА-1 – для труб диаметром 76… 133 мм (рис. 4.50) и ОКА-2 – для труб диаметром 133…159 мм (НИКИМТ).

Рис. 4.49. Головки ОДА-1, ОДА-2 и ОДА-3 для орбитальной сварки последовательным проплавлением и с автоопрессовкой труб диаметром 8...26, 20...42 и 42...76 мм соответственно

Рис. 4.50. Головка ОКА-1 для орбитальной сварки корневых швов труб диаметром 76...133 мм неплавящимся электродом без присадки

Конструктивная схема корпусных головок ОКА отличается тем, что планшайба с зубчатым венцом может после установки на трубе замыкаться, ликвидируя вырез. Это позволило отказаться от системы из двух ведущих шестерен и, соответственно, от раздвоителя.

Рис. 4.51. Головка ОДА 42-76П для орбитальной сварки труб диаметром 42...76 мм колеблющимся неплавящимся электродом с присадкой

На базе головки ОДА-3 разработан и выпускается параметрический ряд из трех сварочных головок: ОДА 20-42П, ОДА 42-76П (рис. 4.51) и ОДА 76-133П – обеспечивающих орбитальную сварку неплавящимся электродом с подачей присадочной проволоки труб с толщиной стенок >3,5 мм. Автомат ОДА 76-133П кроме механизма подачи присадочной проволоки оснащен системой АРНД и простым кулачковым механизмом колебания горелки.

Один из самых совершенных автоматов для орбитальной сварки с присадочной проволокой – «Комета» (НИКИМТ) трех типоразмеров: 20...57, 56...108 (рис. 4.52) и 108...160 мм. Так же, как и ОДА-3 разных модификаций, головки автоматов «Комета» имеют: быстродействующий самоцентрирующийся механизм фиксации на трубе; дистанционно, без остановки процесса управляемые механизмы колебания и поперечной корректировки горелки; систему АРНД со скоростью отработки до 30 мм/с (что облегчает поперечную настройку при сварке с колебаниями горелки); быстросменную горелку, минимальные люфты механизмов и высокую надежность. Аппаратура управления автомата обеспечивает полностью автоматический цикл сварки с управлением током

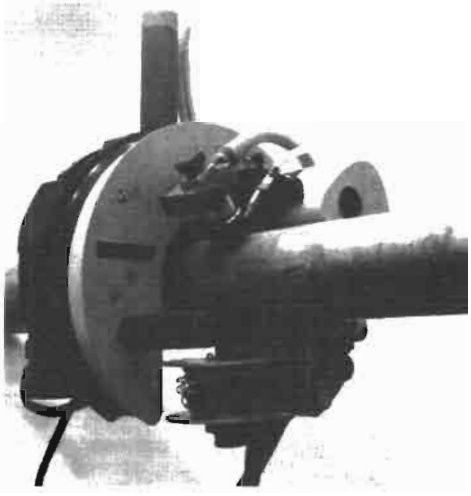


Рис. 4.52. Головка «Комета-108» для орбитальной сварки труб диаметром 56...108 мм колеблющимся неплавящимся электродом с присадкой

сварки и скоростью подачи присадочной проволоки синхронно с колебаниями горелки.

Вторая разновидность корпусных головок – это разъемные головки, в которых планшайба и направляющая ее вращения изготовлены размыкаемыми по диаметральной плоскости (см. рис. 4.48, *б*) или имеют выемной сектор. Разъемные головки не требуют раздвоителя с синхронными шестернями.

Кроме того, отсутствие выреза позволяет выполнять коллекторный подвод к горелке сварочного тока и защитного газа без шлангов, обязательных в С-образных головках.

По такой схеме НИКИМТ изготовил головки СА-304 – СА-307, а НИИ технологии машиностроения (НИИТМ, теперь «Техномаш», Москва) Министерства общего машиностроения – головки ГНСА (рис. 4.53), а затем – ГМС, ГСМ и ГНС. Последние имеют разъемные планшайбы, но шланговые токогазоподводы.

Разъемная конструкция головок позволяет получить самые малые технологические размеры (радиус вращающихся частей и установочная длина), а бесшланговый токогазоподвод избавляет от необходимости следить за шлангами и разматывать их по окончании процесса сварки.

Бесшланговыми выполняют, как правило, только головки для сварки без подачи присадочной проволоки, поскольку подвод питания к двигателю подачи существенно усложняет конструкцию коллектора.

Рис. 4.53. Бесшланговые головки ГНСА для орбитальной сварки труб диаметром 12...32 мм неплавящимся электродом без присадки

В камерных головках (см. рис. 4.48, *в*) сварка выполняется внутри неподвижной или перемещаемой вдоль шва камере, заполненной инертным газом. Камерными чаще бывают головки с разъемными, но встречаются и с С-образными корпусами. Камерных головок много среди отечественных, но еще больше среди зарубежных разработок. Такие головки обеспечивают сварку в контролируемой атмосфере инертного газа и применяются там, где нужно получить более качественную газовую защиту: для сварки труб из легкоокисляемых сплавов, труб оборудования «чистых комнат» и т.д.

Бытует мнение о том, что камерные схемы позволяют экономить инертный газ. Это неверно. При струйной защите, обеспечиваемой горелками открытых головок, фактический расход газа меньше, чем требуется при предварительной и сопутствующей (в процессе сварки) продувках камер. Однако качество защиты камерные головки обеспечивают хорошее.

К камерным относятся орбитальные бесприсадочные головки КАМА конструкции НИКИМТ, четыре типоразмера которых выполняют сварку без присадочной проволоки труб диаметром 6...56 мм. На рис. 4.54 представлены головки КАМА-1 и КАМА-4.

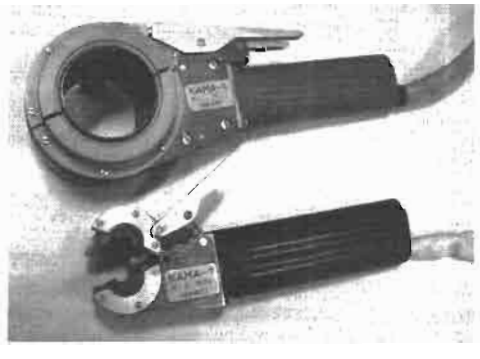


Рис. 4.54. Камерные орбитальные трубосварочные головки КАМА-1 и КАМА-4

Кроме корпусных головок для орбитальной сварки труб широко применяются головки тракторного типа, которые обегают периметр трубы, перемещаясь непосредственно по ее поверхности (см. рис. 4.48, *г*) или по неподвижно закрепленной на ее поверхности направляющей (см. рис. 4.48, *д*).

Головки такого типа иногда называют «орбитальными», но термин «орбитальный» последнее время относят к сварке неповоротных стыков труб и ко всем автоматам, реализующим такую сварку.

Корпусные головки по сравнению с тракторными выигрывают в производительности за счет простоты установки на трубах и в массогабаритных показателях при диаметрах свариваемых труб до 100...150 мм. Однако с увеличением диаметров труб масса корпусных головок существенно увеличивается, поэтому для бóльших диаметров тракторные головки предпочтительнее.

Существенным недостатком корпусных головок является ограниченность диапазонов диаметров труб, свариваемых одной головкой, а значит, – потребность в связи с этим в большом количестве их типоразмеров. Общий диапазон диаметров труб, свариваемых тракторными головками, намного шире, но почти для каждого диаметра необходима отдельная направляющая. На рис. 4.55 представлена головка такого типа «Минора-1» конструкции НИКИМТ, предназначенная для сварки с подачей присадочной проволоки труб диаметром ≥30 мм и прямолинейных швов в любом пространственном положении. Несмотря на малые технологические размеры (клиренс 66 мм) и массу (4 кг), по функциональной сложности и технологическим возможностям автомат «Минора-1» аналогичен «Комете».

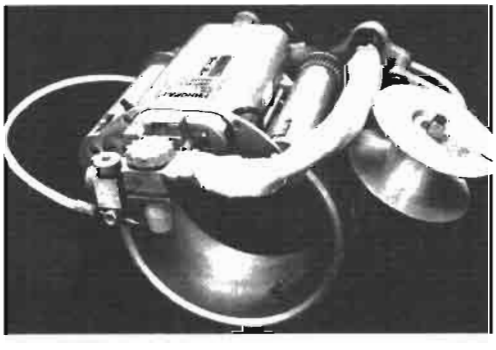


Рис. 4.55. Малогабаритная тракторная орбитальная трубосварочная головка «Минора-1» на кольцевой направляющей

На рис. 4.56 представлена специальная тракторная головка автомата СА-673 (НИКИМТ) для сварки труб диаметром 325 мм при ремонте трубопроводов атомных электростанций. Автомат СА-673 от автомата «Минора-1» отличается возможностью дистанционного управления, повышенной надежностью, наличием телевизионной системы с тремя телекамерами, блока регистрации параметров сварки, некоторых других устройств.

К тракторному типу относятся головки ГНСБ-500, ГНСБ-600, ГНСБ-700 и ГНСБ-840 конструкции НИИТМ, а также АДГ-301 конструкции ВНИИ электросварочного оборудования (ВНИИЭСО, теперь Институт сварки России, С.-Петербург).

Подход к разработке автоматов в разных отраслях несколько различается. В ракетной и авиационной технике при высокой плотности компоновки трубопроводов основное требование к головкам – малые технологические размеры: установочная длина (длина прямого участка трубы, необходимого для базирования головки) и радиус вращающихся частей, или клиренс (размер в свету между стенкой свариваемой трубы и соседним предметом).

Атомная индустрия отличается огромным количеством трубных соединений, свариваемых непосредственно на монтаже. На одном блоке реактора количество только монтажных стыков может достигать 250 000. Поэтому используемые автоматы должны удовлетворять в первую очередь таким требованиям, как ресурс, безотказность и производительность. Этим отличаются орбитальные сварочные автоматы, используемые различными отраслями.

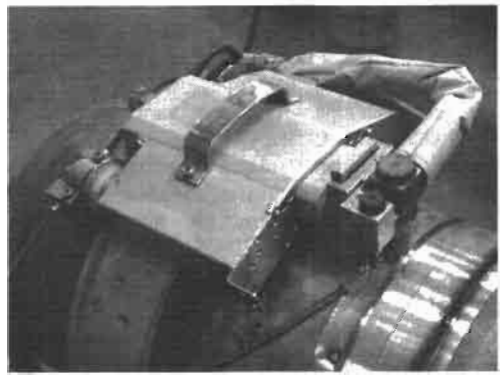


Рис. 4.56. Головка специального дистанционно управляемого тракторного орбитального автомата СА-673 для сварки труб диаметром 325 мм

В табл. 4.22 и 4.23 приведены технические характеристики основных орбитальных трубосварочных автоматов для аргонодуговой сварки без присадочной проволоки и с подачей проволоки.

Автоматы для сварки кольцевых стыковых и торцовых соединений изнутри – это чаще всего специализированные автоматы.

Для сварки изнутри неповоротных стыковых соединений алюминиевых трубопроводов неплавящимся электродом без присадочной проволоки НИИТМ создал автоматы ГСК-65 на трубы диаметром 46...61 мм и ГСК-100 на трубы диаметром 59...94 мм. Эти автоматы имеют систему АРНД и оптические устройства.

Значительное количество специализированных автоматов с такими головками используется для технического обслуживания и ремонта реакторов атомных электростанций, к стыкам трубопроводов которых можно подойти только изнутри, зачастую на расстояние ≥20 м от местонахождения сварщика. Это сложные, обычно дистанционно управляемые автоматы, удовлетворяющие ряду специальных требований, связанных с радиационным облучением и загрязнением. Большинство таких автоматов оснащено оптическими или телевизионными системами наблюдения за настройкой, сваркой и для осмотра полученного соединения.

Головка одного из таких автоматов (СА-374) конструкции НИКИМТ представлена на рис. 4.57. Головка автомата на штанге опускается на нужную глубину и вращается с помощью той же штанги. Головка имеет механизм подачи присадочной проволоки, систему АРНД, дистанционно управляемые механизмы настройки горелки на стык и подачи присадочной проволоки, а также оптическую систему.

В качестве, как правило, специальных выпускаются автоматы и для сварки без присадочной проволоки наружных торцовых соединений. Несколько моделей таких автоматов используют при монтаже каналов реакторов атомных электростанций. К ним относятся автоматы СА-117 и СА-134 (НИКИМТ).

Достаточно широко применяются в промышленности сварочные тракторы, представляющие собой самоходную тележку, перемещающуюся по поверхности свариваемого изделия или по специальной направляющей и смонтированную на тележке сварочную головку. Пульт управления в тракторных автоматах

Рис. 4.57. Головка специального дистанционно управляемого автомата СА-374 для сварки изнутри на глубине до 4 м неповоротных стыков труб с внутренним диаметром 132...140 мм

выполняется либо выносным, как в орбитальных трубосварочных автоматах, либо размещается непосредственно на головке.

Наиболее известны сварочные тракторы АДСВ (РПО «Электромеханика», г. Ржев) нескольких модификаций. Все модели АДСВ имеют механизмы подачи присадочной проволоки, а модели АДСВ-6 и АДСВ-7 оснащены системами АРНД и автоматического слежения за стыком.

Для вварки труб в трубные доски распространение получили созданные в ЦНИИ технологии машиностроения (ЦНИИТмаш, Москва) автоматы с головками АГ трех типоразмеров: АГ6-12М, АГ10-18М и АГ19-32М (цифры обозначают диаметры свариваемых труб), выполняющие сварку с присадочной проволокой торцовых и тавровых соединений труб с трубными досками. Все головки фиксируются зажимами по внутренним поверхностям труб. Имеются различные модификации головок сер. АГ.

4.22. Технические характеристики корпусных головок для орбитальной аргонодуговой сварки труб неплавящимся электродом

Разработчик	Тип головки	Конструктивная схема головки	Диаметр свариваемых труб, мм	Радиус вращающихся частей, мм	Установочная длина, мм	Максимальные			Масса головки, кг
						сварочный ток, А	скорость сварки, об/мин	скорость подачи присадочной проволоки, м/ч	
НИКИМТ	СА-304	Разъемная бесшланговая	5…14	20	30	80	5,45	Сварка без присадки	2,2
	СА-305		14…25	28	45		3,04		2,3
	СА-306		25…38	36		100	3,06		3,8
	СА-307		38…57	50	60		2,00		4,1
	ОДА-1СИ	С-образная	8…26	40	63		5,3		3,7
	ОДА-2СИ		20…42	53	90	160	3,3		5,7
	ОДА-3М		42…76	85	85		2,2		3,9
	ОДА-26М		8…26	40	77	120	14,3		2,5
	ОДА-42М		20…42	53	82	160	5,0		2,8
	ОКА-1И		76…133	128	137	200	1,5		12,5
	ОКА-2И		133…219	180	140		0,8		18,0
	КАМА-1	Разъемная камерная	6…12	23*	20	70	19,2		1,5
	КАМА-2		14…25	32*	24		14,4		1,8
	КАМА-3		25…38	43*	40		2,5		2,2
	КАМА-4		38…56	52*	54	100	1,9		3,0
	ОДА 20-42П	С-образная	20…42	73	80	160	2,56	70	3,8
	ОДА 42-76П		42…76	95	85	200	2,16		4,6
	ОДА 76-133П		76…133	160	105		1,1	71	9,5
	«Комета 2-57»		20…57	150	170	300	2,12	160	13,5
	«Комета 2-108»		56…108	170	175		1,13		16,5
	«Комета 2-160»		108…159	200			0,5		17,5

Продолжение табл. 4.22

Разработчик	Тип головки	Конструктивная схема головки	Диаметр свариваемых труб, мм	Радиус вращающихся частей, мм	Установочная длина, мм	Максимальные			Масса головки, кг
						сварочный ток, А	скорость сварки, м/ч	скорость подачи присадочной проволоки, м/ч	
НИИТМ	ГМС 3-12	Разъемная бесшланговая	3…12	20	15	100	6	Сварка без присадки	1,2
	ГНС 3-14	С-образная	3…14	32,5	22	80	14		1,8
	ГСМ 3-30	Разъемная бесшланговая с единым приводом	4…10	22	19	100	9		1,85
			10…12	26,5			12		1,9
			20…30	31,5			20		2,8
	ГНС-14М	С-образная	6…14	40	25	80			1,9
	ГНС 14-25		14…25	38	22		14		0,4
	ГНС 30-100	Разъемная бесшланговая с единым приводом	30…40	44,5	25	200	15		0,7
			40…70	61					0,9
			70…100	76					5,2
	ГНС-26	С-образная	14…26	48	28	100	20	60	
	ГНС-45М		25…45	65,3	48	200	10	70	7,5
	ГНС-70М		45…70	86	49				8
	ГНС-105М		70…105	113,5	64,5		8	40	
	ГНС-112М		95…112	120	73,5				10
	ГНС-140М		105…140	132	64,5				20,5
	ГНС-180М2		140…180	154,5	77		10		22,5
	ГНС-220М2		180…220	177	98	300	16	56	25
	ГНС-270М		220…270	198					27
	ГНС-310М		270…310	220,5					
	ГНС-330		290…330	261	93	250	15	40	
	ГНС-390		350…391	291					

Окончание табл. 4.22

Разработчик	Тип головки	Конструктивная схема головки	Диаметр свариваемых труб, мм	Радиус вращающихся частей, мм	Установочная длина, мм	Максимальные			Масса головки, кг
						сварочный ток, А	скорость сварки, м/ч	скорость подачи присадочной проволоки, м/ч	
НИИТМ	ГНС-465	С-образная	411…462	322	93	250	15	40	30
	ГНС-45АМ*		35…50	55	55	150	20	41	3,12
	ГНС-79АМ*		45…70	75	40			43	5
	ГНС-105АМ*		60…115	130	50	200	18	100	
	ГНС-140АМ*		95…150	140					6
	ГНС-220АМ*		170…230	180					8
	ГНС-270АМ*		210…280	205					12,5
	АСТРА	Разъемная шланговая с единым приводом	18…40	64	58	150		–	2,3
			40…67	78					2,5
			67…95	93					2,7
			95…120	104					3,0
Хабаровский филиал ЦНИИТС**	АТОС-22	Разъемная бесшланговая со съемной камерой	10…22	45	70	200	5,6	46	4,9
	АТОС-38		22…38	50	98		5,5	65	9,0
	АТОС-65		42…65	75	115		7,5	47	12,0
ВНИИЭСО	АДГ-201	С-образная	57…76	93	90	160	15	30	12,5
			89…108	139	100				14,5
			120…133	152					15,5
			152…160	165					16

* Для сварки труб из алюминиевых сплавов.

** Центральный научно-исследовательский институт технологии судостроения (ЦНИИТС).

4.23. Технические характеристики тракторных головок для орбитальной аргонодуговой сварки труб неплавящимся электродом

Разработчик	Тип головки	Диаметр свариваемых труб, мм	Радиус вращающихся частей, мм	Установочная длина, мм	Максимальные			Габаритные размеры, мм	Масса головки, кг
					сварочный ток, А	скорость сварки, м/ч	скорость подачи присадочной проволоки, м/ч		
НИКИМТ	«Орбита»	219…1420*	$R_{тр}$ + 160	300	300	33	172	148 × 448 × 415	12,4
	«Минора-1»	≥30*	$R_{тр}$ + 66	195		24	88	245 × 220 × 66	4,0
	СА-496**	56…1028	$R_{тр}$ + 150	270		10	150	310 × 404 × 150	18,0
	СА-673	325	263	260	250	30		292 × 290 × 100	10,0
	СА-675	442…476	342					295 × 290 × 106	10,6
	СА-670	828	546					292 × 300 × 110	12,0
НИИТМ	ГНСВ-500	470…512	436	113	250	15	40	817 × 762 × 202	20,0***
	ГНСВ-600	570…613	486					915 × 864 × 202	23,0***
	ГНСВ-700	660…703	531					1008 × 954 × 202	26,0***
	ГНСВ-840	800…838	598					1143 × 1089 × 202	30,0***
ВНИИЭСО	АДГ-301	219…1020	$R_{тр}$ + 300	400	350	10	50	500 × 500 × 250	25,0

* Может выполнять сварку прямолинейных швов.
** Оснащена съемными кожухами для работы в полевых условиях на ветру.
*** С направляющей.
Примечание. $R_{тр}$ – радиус свариваемой трубы.

К такому же типу относится и автомат СА-176 (НИКИМТ).

Автомат СА-208 (НИКИМТ) в отличие от предыдущих выполняет аргонодуговую сварку без присадочной проволоки стыковых соединений труб с трубной доской изнутри на заглублении до 200 мм от зеркала доски.

Большую группу автоматов для сварки неплавящимся электродом в защитном газе составляют автоматы с подвесными сварочными головками. Несамоходные подвесные головки обычно используют в составе установок, стендов и стапелей, когда головка закреплена, а изделие в процессе сварки перемещается или вращается.

Самоходные подвесные головки представляют собой сварочную головку, смонтированную на самоходной тележке, обеспечивающей необходимую скорость сварки.

Как самоходные, так и несамоходные подвесные головки широко используются в ракетостроении. Подвесные головки конструкции НИИТМ отличаются широкой унификацией. Характерной для отрасли особенностью является то, что для сварки конструкций из алюминиевых сплавов с толщинами стенок ≥6 мм головки некоторых автоматов оснащены горелками для сварки сжатой или трехфазной дугой.

На рис. 4.58 представлена подвесная самоходная головка ГСУ-7 для автоматической сварки сжатой дугой с подачей присадочной проволоки продольных швов изделий из алюминиевых сплавов толщиной 6...8 мм.

Подвесные головки производит и РПО «Электромеханика» (г. Ржев). Основные технические характеристики подвесных головок приведены в табл. 4.24.

К стационарным относятся консольные, камерные установки и станки.

В промышленности широко распространены радиально-консольные установки сер. АРК, много лет выпускаемые РПО «Электромеханика». Более 10 модификаций установок АРК состоят из унифицированных узлов: колонны, поворотной консоли, перемещающейся на колонне, и перемещающейся на консоли каретки со сварочной головкой. Движения колонны, консоли и каретки механизированы. Установки оснащаются разными типами сварочных головок и могут сваривать продольные и кольцевые швы изделий из разных сталей, алюминиевых и титановых сплавов.

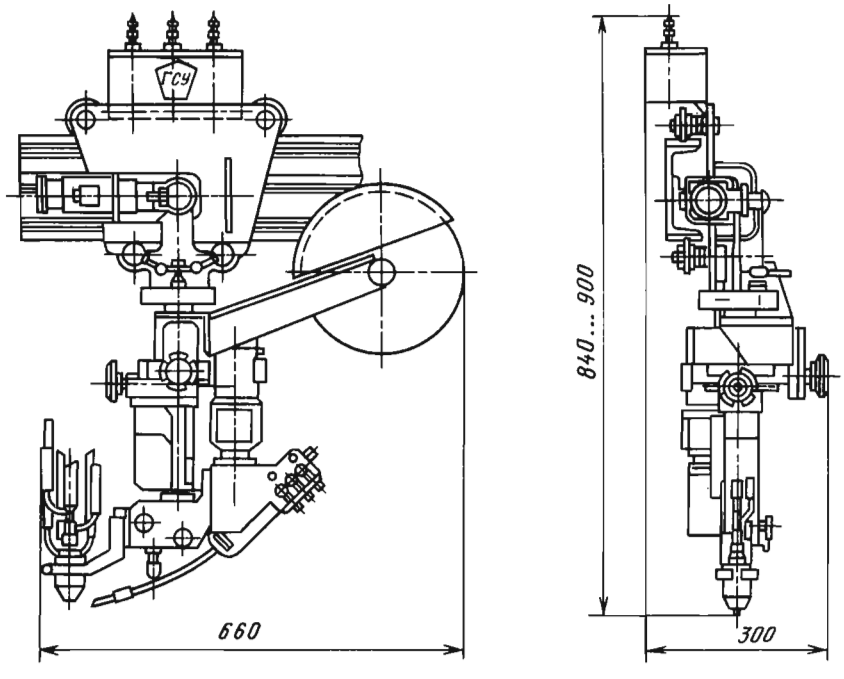


Рис. 4.58. Самоходная подвесная головка ГСУ-7 для сварки продольных швов изделий из алюминиевых сплавов сжатой дугой с подачей присадочной проволоки

4.24. Технические характеристики подвесных головок для аргонодуговой сварки неплавящимся электродом

Разработчик	Тип головки	Конструктивная схема головки	Род тока, номинальный сварочный ток, А	Скорость сварки, м/ч	Скорость подачи присадочной проволоки, м/ч	Габаритные размеры, мм	Масса головки, кг	Назначение
НИИТМ	ГСУ-7	Самоходная	Переменный, 1000	5…55	20…100	660 × 300 × 840	80	Сварка сжатой дугой продольных швов конструкций из алюминиевых сплавов
	ГСУ-8		Переменный и трехфазный, 550			740 × 260 × 867		Сварка продольных швов конструкций из легких сплавов
	ГСУ-9		Переменный, 500			710 × 260 × 867		
	ГСУ-10	Несамоходная	Постоянный и трехфазный, 550	–		740 × 290 × 705		Сварка кольцевых швов конструкций из легких сплавов
	ГСУ-11		Переменный, 500			700 × 290 × 705		
	ГСУ-18*		Постоянный, 500		16…80	1002 × 400 × 165	45	Сварка прямолинейных и кольцевых швов конструкций из сталей, титановых и других сплавов
	ГСП-1		Постоянный, 300		–	315 × 150 × 95	5	Сварка без присадки продольных швов оболочек в потолочном положении в составе стапеля
	ТУР-10**		Постоянный и переменный, 350		20…100	285 × 175 × 235	8	Автоматическая и роботизированная сварка конструкций из сталей и алюминиевых сплавов в различных пространственных положениях

Окончание табл. 4.24

Разработчик	Тип головки	Конструктивная схема головки	Род тока, номинальный сварочный ток, А	Скорость сварки, м/ч	Скорость подачи присадочной проволоки, м/ч	Габаритные размеры, мм	Масса головки, кг	Назначение
РПО «Электромеханика»	ГСВ-4-4ПУ	Несамоходная	Постоянный и переменный, 315	–	10…108	176 × 395 × 580	16,6	Сварка прямо- и криволинейных швов пространственных конструкций из сталей и легких сплавов
	АСГВ-4АП		Постоянный и переменный, 400		8…80	310 × 360 × 675	22	Сварка конструкций из сталей, алюминиевых и титановых сплавов
	АСГВ-5		Постоянный и переменный, 315		8…100	290 × 385 × 675	26,5	
	ГСПД-1М		Постоянный, 2000		–	250 × 90 × 110	6,5	Сварка погруженной дугой без присадки продольных и круговых швов конструкций из сталей и легких сплавов

* Оснащена системами АРНД и колебаний горелки, имеется исполнение для сварки плавящимся электродом в защитном газе.

** Оснащена системой АРНД.

Технические характеристики радиально-консольной установки АРК-4

Номинальный сварочный ток, А	315
Скорость сварки, м/ч	5...50
Длина сварного шва, мм	1000
Перемещение консоли по вертикали, мм	1000
Скорость:	
перемещения консоли, мм/с	10
поворота консоли, град/с:	
АРК-4-1В	Ручная
АРК-4-2В; АРК-4-3В	Маршевая 0,03; настроечная 0,003
Габаритные размеры, мм	2200 × 70 × 2450
Масса, кг	710

Установка АРК-3 в отличие от АРК-4 имеет бóльшие габаритные размеры и массу и позволяет сваривать продольные швы длиной до 2500 мм.

Двухконсольная поворотная колонна с головками для разных способов сварки входит в состав разработанного в НИКИМТ цехового трубосварочного комплекса ЦТК, предназначенного для сварки поворотных кольцевых стыков труб диаметром 57...630 мм. При этом на одной консоли монтируется головка для сварки неплавящимся электродом с присадочной проволокой, а на другой – головка для сварки плавящимся электродом в защитном газе или головка для сварки под флюсом. Последние предназначены в основном для заполнения разделки. В составе ЦТК имеется дополнительная консольная колонна с головкой для сварки неплавящимся электродом с присадочной проволокой внутренних швов труб диаметром ≥295 мм. Вылет консоли позволяет выполнять сварку на расстоянии до 6 м от торца трубы. Как наружная, так и внутренняя головки содержат механизмы колебания горелки и системы АРНД. Внутренняя головка дополнительно оснащена телевизионной системой. Сочетание в одном комплексе двухконсольной колонны со сменными головками и колонны с консолью и внутренней головкой позволяет выполнять двустороннюю сварку, что повышает производительность и снижает затраты на сварку.

Велико разнообразие установок станочного типа для сварки неплавящимся электродом в защитном газе.

Сварочные станки общего назначения изготовляются в основном применительно к сварке продольных швов листов и обечаек и кольцевых швов тел вращения, в том числе труб. Трубосварочные станки выпускают как для сварки поворотных стыков, где сварочная головка неподвижна, а изделие вращается, так и для сварки неповоротных стыков при закрепленном на станке изделии и вращающейся вокруг него сварочной головке.

При сварке поворотных стыков приходится выполнять на стыке прихватки или синхронно вращать обе свариваемые между собой трубы, но в последнем варианте нередки случаи образования трещин в корневом шве. В то же время сварка стыков в неповоротном закрепленном положении недостаточно производительна, поэтому оптимален комбинированный вариант технологического процесса, реализуемый установками для сварки как поворотных, так и неповоротных стыков труб. При этой схеме корневой проход с присадочной проволокой или без нее выполняется в неповоротном положении и без прихваток, а заполнение разделки с подачей присадочной проволоки – в поворотном, обеспечивая оптимальное формирование шва и повышенную производительность.

Технические характеристики станков для аргонодуговой сварки трубных соединений неплавящимся электродом приведены в табл. 4.25. На рис. 4.59 представлена установка СА-200 для сварки поворотных кольцевых и продольных стыков и на рис. 4.60 – СА-460 для сварки поворотных и неповоротных стыков трубопроводов. Установка СА-290 отличается тем, что ее вращатель со сварочной головкой может опускаться в станину для работы в составе стапеля с поперечным перемещением трубных плетей. Все эти установки оснащены системой АРНД и механизмом колебания горелки.

В табл. 4.26 приведены технические характеристики установок для сварки тонколистовых изделий, в том числе обечаек.

Установки, сваривающие продольные швы, оснащены подкладками, устройствами для поддува защитного газа с обратной стороны шва и прижимами различных конструкций – в основном клавишными пневматическими. На рис. 4.61 представлена установка «Лист-1200» для сварки продольных швов листов и обечаек.

4.25. Технические характеристики стационарных установок станочного типа для аргонодуговой сварки труб неплавящимся электродом

Разработчик	Тип установки	Диаметр свариваемых труб, мм	Толщина стенок свариваемых труб, мм	Род тока, номинальный ток, А	Положение при сварке	Габаритные размеры, мм	Масса головки, кг	Назначение
НИКИМТ	СА-157	180…630	До 65	Постоянный, 300	Поворотное	2800×1700×1970	1970	Сварка с присадкой кольцевых и продольных швов
	СА-200	16…200	До 28			2480×1165×1770	500	
	СА-226	14…86	До 3,5	Постоянный, 150	Неповоротное	1160 × 532 × 1235	333	Сварка без присадки кольцевых швов
	СА-290	50…133	До 25	Постоянный, 200	Поворотное и неповоротное	760 × 1105 × 1485	520	Сварка с присадкой кольцевых швов. Вращатель с головкой опускается для загрузки труб сбоку
	СА-460	8…57	До 6	Постоянный, 250		1340 × 1020 × 688	270	Сварка с присадкой кольцевых швов
	СА-471	5…57	До 3,5	Постоянный, 150	Неповоротное		220	Сварка без присадки кольцевых швов
	СА-489	4…630	До 25	Постоянный, два исполнения: 150; 300	Поворотное	2480×1165×1770	500	Сварка с присадкой кольцевых и продольных швов
РПО «Электромеханика»	АСТ-3А	8…25	0,5…3,0	Переменный, 160	Неповоротное	140 × 270 × 525	10,65	Сварка с присадкой кольцевых швов
		25…40						
		40…85				140 × 292 × 535	11,15	
		85…150				140 × 300 × 550	13,35	
		150…220				140 × 310 × 560	14,85	

Окончание табл. 4.25

Разработчик	Тип установки	Диаметр свариваемых труб, мм	Толщина стенок свариваемых труб, мм	Род тока, номинальный ток, А	Положение при сварке	Габаритные размеры, мм	Масса головки, кг	Назначение
РПО «Электромеханика»	УСК-22М	20…460 (шар-баллоны 140…400)	0,8…10,0	Постоянный, 315	Поворотное	2100 × 600 × 2000	850	Сварка с присадкой кольцевых швов труб и шар-баллонов
	УСК-22МК	20…600		Постоянный и переменный, 400			1200	Сварка с присадкой кольцевых стыковых и кольцевых торцовых швов
	УСТ-9М	20…200	0,8…3,0	Постоянный и переменный, 200	Неповоротное	2550 × 600 × 2000	1130	Сварка с присадкой арматуры с трубопроводами
	УСТ-14	20…220	0,8…2,0	Переменный, 160			640	Сварка с присадкой кольцевых швов прямо- и криволинейных труб без закрепления их в сварочной головке
	УСТ-15М			Постоянный, 160		2710 × 900 × 1620	723	
НИТИ «Прогресс», Ижевск	УСК-100	6…100	0,8…2,5	Постоянный, 100	Поворотное	1700 × 800 × 1800	2500	Сварка с присадкой кольцевых швов
	УСК-400	До 400	0,8…10,0	Постоянный, 300		2500 × 800 × 1900	3800	

4.26. Технические характеристики установок для аргонодуговой сварки тонколистовых конструкций неплавящимся электродом

Разработчик	Тип установки	Диаметр свариваемых соединений, мм	Максимальная длина свариваемых соединений, мм	Толщина листов свариваемых соединений, мм	Род тока, номинальный ток, А	Скорость сварки, м/ч	Габаритные размеры, мм	Масса, кг	Назначение
НИКИМТ	«Лист-1200»	450…1200	1200	0,8…3,0	Постоянный, 200	≤45	2620 × 1855 × 580	550	Сварка с подачей присадочной проволоки продольных швов обечаек и листовых конструкций из низколегированных и коррозионно-стойких сталей
	«Лист-3000»	1200…3000	3000	2,0…4,0	Постоянный, 300		6680×1920×1440	2800	
	СА-566	400…1200	1850	0,5…2,0		≤28	2500×2200×1965	1500	Сварка с подачей присадочной проволоки обечаек с днищами и других кольцевых швов цилиндрических изделий из низколегированных и коррозионно-стойких сталей
НИТИ «Прогресс»	УСП-800	60…750	800	0,3…1,0	Постоянный, 150	18…80	2170 × 970 × 1800	2100	Сварка без присадки обечаек и листов
	УСП-1200	60…500	1200	0,5…2,0	Постоянный, 200	5…80	2570×2670×1800	3600	Сварка с подачей присадочной проволоки обечаек и листов
РПО «Электромеханика»	УСПО	80…1800	≤(500…2000) в зависимости от исполнения	0,15…6,0	Постоянный и переменный, 400	9 исполнений: для сварки с подачей присадочной проволоки продольных швов листов и обечаек максимальной длиной 600…2000 мм из разных сплавов на постоянном и переменном токе			

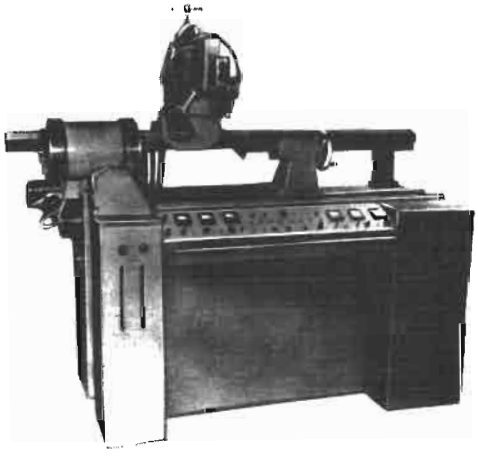


Рис. 4.59. Установка СА-200 для сварки поворотных стыков труб диаметром 16...200 мм и продольных швов длиной до 1000 мм колеблющимся неплавящимся электродом с присадкой

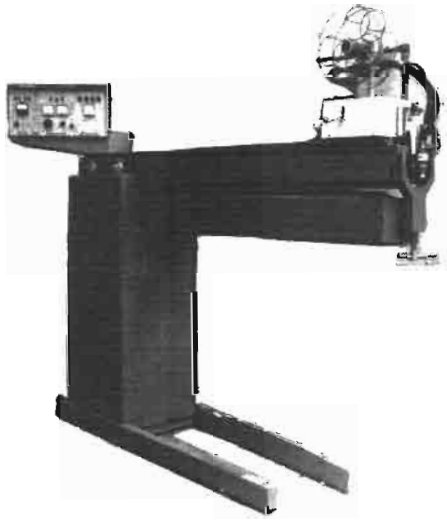


Рис. 4.61. Установка «Лист-1200» для сварки обечаек и листовых конструкций неплавящимся электродом с присадкой

Рис. 4.60. Установка СА-460 для сварки поворотных и неповоротных стыков труб диаметром 8...57 мм колеблющимся неплавящимся электродом с присадкой

Большинство этих установок оснащено механизмами подачи присадочной проволоки, системами АРНД и колебания горелки.

Значительное количество стационарных установок станочного типа для сварки кольцевых швов выпускают применительно к специальным задачам. В авиационной промышленности используют много специализированных установок, разработанных РПО «Электромеханика».

Установка УСКК-2 предназначена для сварки неплавящимся электродом с подачей присадочной проволоки круговых и кольцевых швов диаметром 100...310 мм на торцовых и цилиндрических поверхностях моторных узлов из коррозионно-стойких и жаропрочных сталей.

УСКШ-1 выполняет такую же сварку кольцевых швов шаровых узлов трубопроводов диаметром до 400 мм из алюминиевых сплавов на переменном токе и из коррозионно-стойких сталей – на постоянном токе.

УСФ-10 создана для приварки фланцев к обечайкам, УСТ-9 и УСТ-10 – арматуры к трубам, а УСТ-7 рассчитана на сварку продольных швов тонкостенных труб.

Специализированные станки для сварки неплавящимся электродом в защитном газе выпускают и другие отрасли промышленности.

Камеры для сварки в контролируемой атмосфере часто применяют при ручной аргонодуговой сварке неплавящимся электродом крупногабаритных узлов из легкоокисляемых сплавов. Они представляют собой герметичные камеры, заполняемые аргоном после их загрузки (обычно через шлюзы) свариваемыми деталями и предварительного вакуумирования. При этом находящийся снаружи сварщик работает внутри камеры с помощью перчаточных вводов, наблюдая за процессом через иллюминаторы. Для автоматической сварки такие системы используют реже. Примером камерной установки для автоматической сварки неплавящимся электродом служит установка УСКС-20 разработки РПО «Электромеханика».

В атомной технологии эксплуатируются камерные установки СА-457, СА-448, СА-477 (НИКИМТ) и ряд других, в которых сварка стыков и герметизация торцов тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ) атомных реакторов выполняется в контролируемой атмосфере иногда при повышенном до 40 атм давлении аргона или гелия в камере, что обусловлено специальными требованиями к изделиям. Из условий радиационной безопасности эти установки целиком размещают в камерах биологической защиты и управляют ими дистанционно. Особенностью установок СА-448 и СА-457 является герметизация торцов ТВЭЛ неплавящимся электродом конической дугой, управляемой (вращаемой) магнитным полем, – ДУМП-процесс.

4.5.2. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ

4.5.2.1. ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ СВАРКИ ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ

Основу оборудования для сварки плавящимся электродом составляют источники сварочного тока для ручной и механизированной сварки, полуавтоматы и автоматы для сварки в защитных газах и под флюсом.

При выбранном способе дуговой сварки тип оборудования определяют по основному параметру – сварочному току, который рассчитывают в зависимости от производительности сварки или наплавки и площади сечения шва. Для определения типа оборудования и правильной его эксплуатации, наряду с главными требованиями – производительностью, качеством сварного соединения, – следует учитывать ряд критериев, связанных с технологическими и эксплуатационными характеристиками оборудования. К ним относятся:

– условия, связанные с конструкцией свариваемого изделия: протяженность и пространственное расположение швов, удобство подхода к шву и доступность соединения для автомата, точность подготовки соединения под сварку, число изделий в партии и связанная с этим периодичность переналадки оборудования;

– условия производства: цеховые и монтажные условия, необходимость энерго-, газо- и водоснабжения, возможность отвода аэрозолей от места сварки, требования по очистке от брызг.

В индивидуальном и мелкосерийном производстве предпочтение отдают универсальному оборудованию, построенному на модульном принципе, которое может быть использовано для различных технологических процессов. В крупносерийном и массовом производстве применяют специальные автоматы и роботы, входящие в состав поточно-механизированных линий.

Оборудование для ручной сварки штучными электродами остается наиболее распространенной группой оборудования, включающей в себя трансформаторы, преобразователи и выпрямители на токи до 500 А. Благодаря технологической гибкости ручной сварки, возможности сварки в различных пространственных положениях и простоте организации работ эти источники широко применяются в промышленности, строительстве, на монтаже и выдерживают сложные климатические условия.

Перед потребителем часто встает вопрос, какой тип оборудования использовать – трансформатор или выпрямитель.

При использовании сварочных выпрямителей стабильность горения дуги выше, а следовательно, обеспечивается более высокое качество сварного шва и снижается вероятность образования непроваров, шлаковых включений, пористости.

Трансформаторы отличаются простотой конструкции, отсутствием аппаратуры управления, имеют высокие показатели надежности, и поэтому им следует отдать предпочтение при работах на открытом воздухе.

Трансформаторы применяют при сварке конструкций, когда на сварочную дугу воздействует «магнитное дутье»; на переменном токе отклонения дуги меньше, чем на постоянном. Влияние дутья дуги может быть устранено изменением положения зажима обратного провода.

Полуавтоматы и автоматы для сварки плавящимся электродом в защитных газах используют в цеховых условиях при производстве разнообразных изделий в различных пространственных положениях. Применение полуавтоматов взамен ручной сварки штучными электродами повышает производительность в 1,5 – 3 раза.

Весь диапазон толщин свариваемых металлов, начиная от 0,8 мм до нескольких десятков, может быть сварен на одном и том же полуавтомате с применением различных защитных газов, диаметров проволок и вида процесса. В зависимости от вида переноса электродного металла через дугу в сварочную ванну существуют следующие процессы: 1) сварка с короткими замыканиями; 2) струйный перенос; 3) капельный перенос; 4) импульсно-дуговая сварка. Рассмотрим их.

1) Для сварки в различных пространственных положениях применяется процесс с короткими замыканиями, когда капли переходят с конца электрода в сварочную ванну, образуя мостик короткого замыкания, который разрывается под действием пинч-эффекта. Сварка ведется проволоками диаметром 0,8...1,4 мм. Для углеродистых сталей используется углекислый газ либо смеси 80 % Ar и 20 % CO_2. Газовые смеси обеспечивают меньшее разбрызгивание, плавное очертание шва и более мягкую дугу.

2) Сварка со струйным переносом электродного металла проводится в смесях газов, содержащих ≥90 % Ar, металлов толщиной ≥2 мм. В этом процессе электродный металл переходит через дугу в виде мелких капель диаметром, равным или меньшим диаметра электрода. Поэтому разбрызгивание минимально, а формирование шва плавное, с гладкой поверхностью. Для каждого диаметра проволоки существует критический сварочный ток, при котором процесс из крупнокапельного переходит в струйный. С увеличением сварочного тока диаметр капель уменьшается, а частота переноса возрастает. Глубокое проплавление дугой со струйным переносом дает возможность односторонней сварки листов без скоса кромок толщиной до 5 мм.

3) Сварка с капельным переносом выполняется в углекислом газе, который наиболее дешев. При этом процессе электродный металл переходит через дугу в форме разнообразных по диаметру капель и сопровождается значительным разбрызгиванием. Последнее может быть уменьшено на режимах с пониженным напряжением, когда дуга погружается в сварочную ванну, а торец электродной проволоки находится ниже поверхности сварочной ванны. Другим вариантом уменьшения разбрызгивания при сварке в CO_2 является сварка на больших плотностях тока (350...450 А/мм^2), одновременно повышается производительность наплавки.

4) При импульсно-дуговой сварке плавящимся электродом на базовый сварочный ток налагаются импульсы тока, управляющие переносом капель электродного металла. Параметрами режима, наряду с базовым током, являются амплитуда, частота импульсов, которая регулируется в пределах 25...100 Гц. Алюминий, магний, медь, титан и их сплавы свариваются в аргоне, высоколегированные стали – в смеси аргона с 1...5 % O_2. При импульсной сварке обеспечивается перенос металла без разбрызгивания на токах меньше критического для данного диаметра проволоки. Появляется возможность сварки тонколистового металла проволокой диаметром 1,6...2,0 мм.

Расширяется область применения порошковых проволок, предназначенных для сварки как в защитных газах, так и самозащитных, позволяющих вести сварку без дополнительной газовой защиты при скорости ветра до 10 м/с. При сварке порошковыми проволоками в CO_2 либо в смеси аргона и CO_2 снижается разбрызгивание, обеспечивается возможность полуавтоматической и автоматической сварки и наплавки специальных сталей.

Оборудование для сварки под флюсом применяется при производстве сварных конструкций, имеющих протяженные швы, например при строительстве мостов, судов, изготовлении вагонов, кранов, резервуаров, труб большого диаметра и других изделий. Автоматы общего назначения рассчитаны на сварку стыковых и угловых швов металлов толщиной 2...80 мм, специальные автоматы выполняют сварку металлов толщиной до 400 мм. Полуавтоматы для сварки под флюсом в настоящее время практически не используются, так как они могут выполнять сварку только в нижнем положении.

В структуре условного обозначения полуавтоматов и автоматов буквы указывают вид изделия и способ защиты дуги (Ф – флюс, Г – газ, и – инертный газ, о – открытый дугой).

Цифры обозначают номинальный сварочный ток (в десятках, сотнях, гектоамперах) и номер модификации.

Далее указывается вид климатического исполнения и размещения и напряжение питающей сети.

Пример условного обозначения полуавтомата для дуговой сварки в защитных газах на номинальный ток 500 А с номером модификации 16, климатического исполнения У, категории размещения 3, на напряжение питающей сети 380 В:

Полуавтомат ПДГ-516 УЗ, 380 В.

4.5.2.2. РЕГУЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА МЕХАНИЗИРОВАННОЙ СВАРКИ ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ

Конструктивная схема полуавтомата приведена на рис. 4.62. Электродная проволока от механизма подачи *1* через направляющий кабель *2* поступает в сварочную горелку *3*. Через контактный наконечник к ней подводятся электрический ток от источника сварочного тока *4*, а через сопло *5* – защитный газ из баллона *6*. Сварщик поддерживает постоянство вылета электрода и вручную перемещает горелку вдоль линии шва с необходимой скоростью сварки. При автоматической сварке горелка перемещается сварочным трактором либо устанавливается неподвижно, а свариваемое изделие перемещается манипулятором со скоростью сварки.

В зависимости от толщины свариваемого металла, катета шва определяют параметры режима сварки (сварочный ток, напряжение дуги, диаметр проволоки, вылет электрода, скорость сварки) и подсчитывают производительность наплавки.

Основная комбинация, обеспечивающая стабильный режим сварки, – это постоянная (независимая от напряжения дуги) скорость подачи электродной проволоки и жесткая (пологопадающая) внешняя характеристика источника сварочного тока.

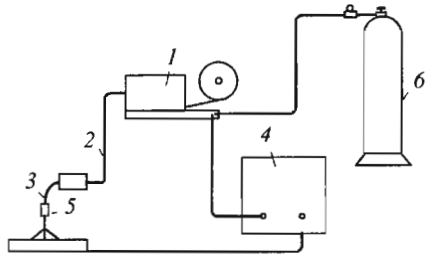


Рис. 4.62. Конструктивная схема полуавтомата

Практически для настройки режима сварщик выбирает необходимое напряжение дуги по шкале источника, а сварочный ток регулирует изменением скорости подачи проволоки.

На рис. 4.63 приведены две внешние вольт-амперные характеристики (ВАХ) источника сварочного тока, кривые *1* и *2* и две статические характеристики сварочной дуги для двух значений ее длины, кривые l_1, l_2; $l_1 > l_2$.

Для определенной длины дуги l_1 и выбранного напряжения U существует устойчивая рабочая точка A (точка пересечения внешней характеристики источника *1* и характеристики дуги l_1, в которой скорости плавления и подачи проволоки равны).

При увеличении скорости подачи проволоки образуется новая точка B пересечения характеристик источника и дуги. Длина дуги в этой точке автоматически укорачивается, ее сопротивление уменьшается, а сварочный ток растет. Это означает, что увеличение скорости подачи ведет к возрастанию сварочного тока и, наоборот, уменьшение скорости подачи снижает сварочный ток.

Для того чтобы поддерживалось постоянство длины дуги и обеспечивалось надежное саморегулирование дуги, источники сварочного тока должны иметь жесткие либо пологопадающие внешние характеристики. При случайных укорочениях либо удлинениях дуги возрастание или уменьшение сварочного тока сопровождается соответствующим изменением скорости плавления проволоки, приводящим к восстановлению длины дуги.

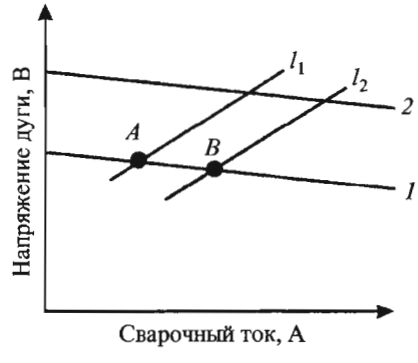


Рис. 4.63. Пологопадающие ВАХ источника и статические характеристики дуги

В автоматах для сварки проволоками >3 мм для поддержания стабильного горения дуги используют регуляторы напряжения дуги. Источник сварочного тока должен иметь крутопадающую внешнюю ВАХ, а привод подачи – обеспечивать зависимую скорость подачи проволоки от напряжения дуги. В этой комбинации при случайных отклонениях длины дуги сигнал изменения напряжения дуги воздействует на регулятор скорости подачи проволоки и восстанавливает первоначальную длину дуги.

На рис. 4.64 показаны крутопадающие ВАХ источника: *1* – малые токи, *2* – большие токи и две статические характеристики дуги l_1 – малые напряжения, l_2 – большие напряжения. При этой системе регулирования сварочный ток изменяют регулятором источника, а напряжение дуги – регулятором скорости подачи проволоки.

Скорость плавления электродной проволоки является весьма важной характеристикой, определяющей производительность процесса сварки. На рис. 4.65 показаны кривые скорости плавления электродной проволоки Св-08Г2С диаметром 0,8...3 мм в зависимости от сварочного тока.

На рис. 4.66 приведены рекомендуемые напряжения дуги при сварке в CO_2 в зависимости от сварочного тока для проволоки Св-08Г2С диаметром 0,8...3 мм.

С увеличением сварочного тока напряжение дуги возрастает, причем каждому диаметру проволоки соответствует свое оптимальное напряжение дуги. При сварке в смеси аргона и CO_2 напряжения дуги должны быть снижены на 1...2 В.

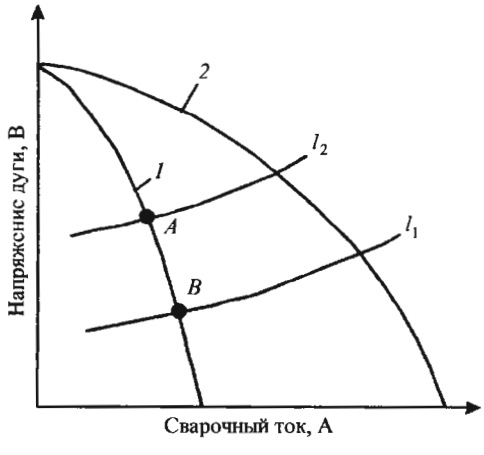


Рис. 4.64. Крутопадающие ВАХ источника и статические характеристики дуги

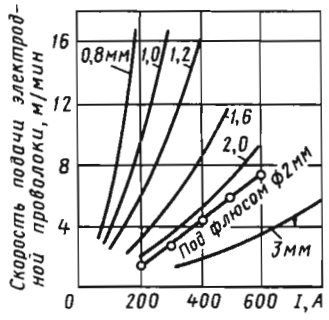


Рис. 4.65. Скорость плавления электродной проволоки в зависимости от сварочного тока

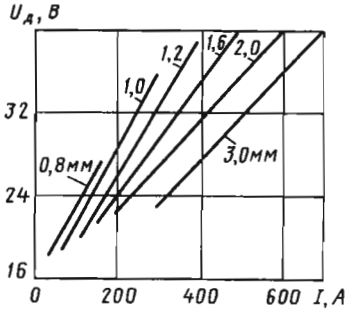


Рис. 4.66. Рекомендуемые напряжения дуги в зависимости от сварочного тока

4.5.2.3. ОСНОВНЫЕ УЗЛЫ СВАРОЧНЫХ ПОЛУАВТОМАТОВ

Сварочная горелка предназначена для подачи электродной проволоки и защитного газа в зону сварки и подвода электрического тока через токоведущий наконечник к электродной проволоке. Сварщик при выполнении работ держит горелку в руке, поэтому его утомляемость зависит от формы горелки и ее массы. Ряд фирм выпускает горелки с поворотом корпуса относительно рукоятки на различные углы. По характеру охлаждения токоведущих и нагреваемых теплом дуги частей различают горелки с естественным и принудительным (водяным) охлаждением. За главный параметр для горелки принят сварочный ток, он выбирается из стандартного ряда 125; 160; 200; 250; 315; 400; 500 и 630 А. При сварке в аргоне и его смесях токовая нагрузка должна быть снижена на 30 % по сравнению со сваркой в CO_2.

В табл. 4.27 приведены технические характеристики сварочных горелок, выпускаемых заводом «Электрик» (Санкт-Петербург).

4.27. Технические характеристики сварочных горелок завода «Электрик»

Тип	Сварочный ток, А, ПВ 60 %	Охлаждение	Диаметр проволоки, мм	Тип разъема и диаметр резьбы токов наконечника, мм
ГДПГ-101-10	160	Естественное	0,8…1,2	ВКМ-03/М6
ГДПГ-207-1	180			Евроразъем/М6
ГДПГ-307-1	315		1,0…1,4	Евроразъем/М8
ГДПГ-307-2(-3)				ВКМ-02(-03)/М8
ГДПГ-301-8			1,2…1,4	ВКМ-03/М8
ГДПГ-507-1	500		1,2…2,0	Евроразъем/М8
ГДПГ-507-2(-3)				ВКМ-02(-03)/М8
ГДПГ-501-5		Водяное	1,4…2,0	ВКМ-03/М8
ГДПГ-603	630		1,6…2,5	

Сварочная горелка включает в себя следующие узлы: контактный наконечник, газовое сопло, рукоятку с кнопкой, направляющий канал для подачи проволоки, кабели, шланги для подвода тока, воды и газа. Наибольшее применение нашли трубчатые контактные наконечники благодаря своей компактности и простоте изготовления. Для стальной проволоки они изготовляются из хромистой либо хромоциркониевой бронзы, для алюминиевой проволоки рекомендуют медно-графитовые наконечники. Диаметр отверстия должен быть на 0,1…0,2 мм больше, чем диаметр проволоки. В трубчатых наконечниках по мере износа отсутствует возможность обеспечения стабильного давления по всей зоне контакта. Кроме того, в них контактирование может происходить в перемещающихся точках и существенно зависит от исходного состояния электродной проволоки, ее кривизны, чистоты поверхности. Для улучшения контакта при сварке тонкими проволоками иногда применяют наконечники типа «сапожок» с подгибом нижней части наконечника.

В тяжелонагруженных режимах, когда сварочные токи превышают 300 А, при длительной непрерывной работе наконечник перегревается, что способствует возрастанию электромеханического износа и привариванию проволоки к внутренней поверхности наконечника. В этих случаях необходимо применять горелки с водяным охлаждением.

Сопло сварочной горелки формирует равномерный ламинарный поток защитного газа и направляет его в зону сварки. Размеры сопла выбирают в зависимости от величины сварочного тока и диаметра проволоки. Для сварки тонколистового металла используют сопла малых диаметров, при этом торец наконечника на 2…5 мм выступает из сопла.

При сварке со струйным переносом на больших токах применяют сопла с внутренним диаметром до 25 мм, при этом торец токоведущего наконечника должен быть утоплен в сопло.

Для того чтобы сократить потери рабочего времени на зачистку сопла от брызг, внутри его помещают изоляционную втулку (например, из жаростойкой слюды). Горелки соединяют с механизмами подачи шлангами длиной 1,5…4,5 м. Наибольшее распространение получили шланги совмещенного типа, в которых подача электродной проволоки, защитного газа, подвод сварочного тока и при необходимости водяного охлаждения осуществляется внутри общего рукава.

Направляющий канал состоит из каркасной спирали с расположенной в ней сменной спиралью, через которую проходит электродная проволока. Сменную спираль изготовляют из пружинной проволоки. Для подачи электродной проволоки из алюминиевых сплавов используют направляющие каналы из неметаллических материалов, имеющих низкий коэффициент трения: тефлона, полиамида.

В наиболее распространенной системе подачи электродной проволоки «толкающего» типа причинами колебаний скорости подачи являются факторы, зависящие от конструктив-

ных особенностей системы и качества поверхности проволоки. Из-за наличия сопротивления трения между проволокой и стенками направляющего канала проволока изгибается, и чем больше сопротивление трения, тем чаще становятся циклы изгиба. При увеличении нагрузки в осевом направлении сопротивление трения растет по экспоненциальной зависимости:

$$T_1 = T_2 e^{\mu\alpha},$$

где T_2 – сила сопротивления в прямом направляющем канале; μ – коэффициент трения; α – угол закручивания направляющего канала.

Отсюда следует, что сила сопротивления при скручивании канала резко возрастает и нарушается равномерная подача проволоки.

Изгиб электродной проволоки в большой степени зависит от соотношения между диаметром проволоки и внутренним диаметром направляющего канала. Оптимальные соотношения, применяемые в горелках отечественных полуавтоматов, приведены ниже:

Диаметр электродной проволоки, мм	0,8...1,0	1,0...1,4	1,4...2,0	2,0...3,0
Внутренний диаметр канала, мм	1,5	2,5	3,2	4,7

Конструкция кабеля направляющего канала не должна допускать удлинений >2 мм при усилии растяжения оболочки до 300 Н.

В процессе эксплуатации необходимо иметь в виду, что сопротивление прохождения проволоки зависит от положения шланга.

На рис. 4.67 приведена зависимость усилий подачи электродной стальной и титановой проволок от угла изгиба направляющего канала при петле диаметром 400 мм. Усилия сопротивления подаче интенсивно растут в связи с загрязнением направляющего канала.

На рис. 4.68 показана зависимость усилия подачи проволоки диаметром 2 мм при скорости 600 м/ч от степени загрязненности канала, где цифры на оси абсцисс означают: *1* – чистый канал, *2* – среднюю степень загрязненности, *3* – сильно загрязненный канал. Шланг имеет одну петлю диаметром 500 мм.

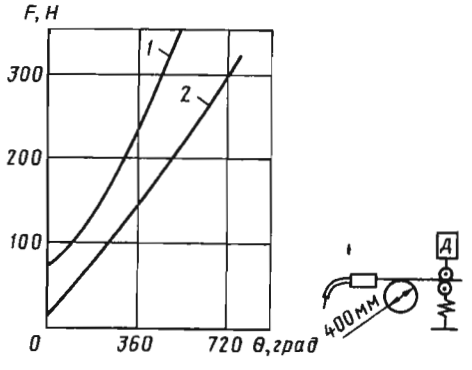


Рис. 4.67. Зависимость усилий подачи проволоки от угла изгиба направляющего канала

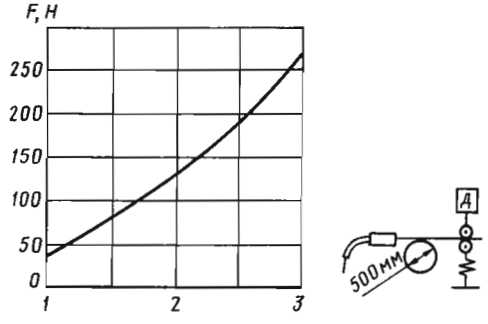


Рис. 4.68. Зависимость усилий подачи проволоки от степени загрязненности направляющего канала

Механизм подачи электродной проволоки состоит из мотор-редуктора, роликового устройства, кассеты с проволокой. На механизме подачи располагаются блок управления либо отдельные элементы системы управления. Подача электродной проволоки осуществляется ее проталкиванием между вращающимися роликами, прижатыми к проволоке. Различают механизмы подачи со ступенчатым и плавным регулированием скорости подачи проволоки. К достоинствам механизмов подачи со ступенчатым регулированием следует отнести простоту эксплуатации трехфазного асинхронного двигателя, надежность электрической схемы. Механизм подачи с коробкой скоростей, применяемый в полуавтомате ПДГ-508, имеет девять ступеней переключения и два сменных подающих ролика, что позволяет расширить кратность регулирования и получить необходимый диапазон скоростей подачи проволоки.

Механизмы подачи с плавным регулированием скорости подачи распространены гораздо шире, чем со ступенчатым регулированием. Применяются малогабаритные двигатели постоянного тока с частотой вращения 3000… 8000 об/мин.

Если учесть, что наибольшее значение скорости подачи, соответствующее номинальной частоте вращения двигателя, $v_э = 720…1200$ м/ч, а диаметр подающих роликов близок к $D_р = 40$ мм, то несложные расчеты показывают, что передаточное число редуктора должно быть $i = 20…100$. В различных механизмах подачи применены как цилиндрические, так и червячные редукторы.

Полезная мощность, необходимая для подачи проволоки в шланговые полуавтоматы, равна произведению полезного сопротивления подаче проволоки на скорость подачи. ГОСТ 18130–79 предусматривает усилие проталкивания $P_{пр}$ проволоки 200 Н для проволоки диаметром 1,6…3,5 мм. Если принять предусмотренное этим же стандартом верхнее значение скорости подачи проволоки $v_{max} = 960$ м/ч, то значение полезной мощности определится из выражения

$$N = \frac{9{,}8 P_{пр} v_{max}}{3600} = \frac{9{,}8 \cdot 20 \cdot 960}{3600} = 52{,}26 \text{ Вт}.$$

Фактическая мощность электродвигателя выбирается большей из-за необходимости преодоления тормозных усилий кассетных устройств с учетом КПД редуктора и роликового подающего устройства. В большинстве полуавтоматов мощность двигателя колеблется в пределах 80…180 Вт. Подавляющее большинство механизмов подачи оснащено роликовыми устройствами подачи. В зависимости от назначения применяются схемы с одним приводным роликом для тонкой стальной проволоки, с двумя – для стальной проволоки диаметром 1,6…2,0 мм, порошковой и алюминиевой проволок. Рабочая поверхность роликов имеет различные формы: цилиндрическую, цилиндрическую с насечкой, коническую, тороидальную. Применяются также роликишестерни.

В ряде отечественных полуавтоматов применяются механизмы подачи типа CWF фирмы «Cooptim» (Венгрия). Фирма поставляет ряд механизмов с червячными редукторами и двигателями на постоянных магнитах мощностью 40…120 Вт.

Катушки, кассеты или кассетные устройства выбираются в зависимости от исполнения полуавтоматов и применяемых форм поставки электродной проволоки. Предусмотрена поставка проволоки в виде: шпуль с диаметром внутреннего отверстия 51 мм, надеваемых на тормозное устройство механизма подачи диаметром 200 и 300 мм; в круглых мотках либо в мотках прямоугольного сечения.

В табл. 4.28 приведены технические характеристики механизмов подачи, выпускаемых заводом «Электрик».

Блок управления сварочным полуавтоматом предназначен для управления циклом работы и скоростью подачи электродной проволоки. Он обеспечивает:

– ручную регулировку скорости подачи проволоки и ее автоматическую стабилизацию;

– автоматическое включение и выключение исполнительных органов (привод подачи проволоки, газовый клапан, источник сварочного тока);

– автоматический отсчет длительности горения дуги при сварке точками;

– динамическое торможение электродвигателя;

– защиту электродвигателя от перегрузок.

Управление блоками при сварке осуществляется кнопкой, расположенной на сварочной горелке. Для снижения утомляемости сварщика предусмотрены два режима управления:

– режим коротких швов, когда сварочный цикл начинается с момента замыкания кнопки на горелке и заканчивается при ее размыкании;

– режим длинных швов, когда сварочный цикл начинается с момента первого замыкания контактов кнопки на горелке и завершается при повторном замыкании этих контактов.

Это позволяет сварщику снимать палец с кнопки после начала сварки, что снижает его утомляемость.

Предусмотрена возможность сварки точками с автоматической выдержкой времени горения дуги. Малые размеры блока позволяют разместить его на механизме подачи либо внутри источника сварочного тока.

4.28. Технические характеристики механизмов подачи завода «Электрик»

Тип	Напряжение питания, В	Сварочный ток (ПВ), А (%)	Скорость подачи, м/мин	Диаметр проволоки стальной / порошковой, мм	Число роликов	Тип разъема для подключения горелок	Масса, кг	Габаритные размеры (ширина × длина × высота), мм
МПО-2	48, постоянное	500 (60)	1,25…16	1,2…2,0 / –	2	ВКМ-02	13	340 × 440 × 220
МПО-3						ВКМ-03		
МПО-4	29, переменное		2…12	1,6…2,0 / 1,6…2,0	4	ВКМ-02	15	350 × 700 × 260
МПЗ-2А автономный			1,2…16	0,6…2,0 / –	2	Евроразъем	16	230 × 590 × 420
МПЗ-4А автономный				0,6…2,0 / 1,0…2,0	4		16,5	230 × 650 × 440
МПК-2А компактный автономный				0,6…2,0 / –	2		12,5	180 × 470 × 330
LN542(742) автономный	42, переменное		2,0…20	0,6…2,0 / 1,2…2,0	2 или 4		9,7	240 × 300 × 290

Примечания. 1. МПО – механизмы открытого типа; МПЗ и LN – закрытого типа. LN – механизмы фирмы «Lincoln Electric» (США); LN742 – программируемый для ответственной сварки.

2. Автономные механизмы включают в себя все элементы управления процессом сварки. Отдельный блок управления при комплектации соответствующими модификациями источников питания не требуется.

3. Диаметр кассеты – 300 мм (для МПК-2А он равен 200мм).

4. Комплектация роликами под диаметр и тип сварочной проволоки оговариваются при заказе.

4.5.2.4. КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПОЛУАВТОМАТОВ

Полуавтоматы поставляются в комплекте, состоящем из механизма подачи, горелок со шлангами, источника сварочного тока, системы подачи газа, блока управления, соединительных проводов. В ряде случаев этот комплект дополняется транспортными устройствами, автономными системами водяного охлаждения. В табл. 4.29 приведены технические характеристики полуавтоматов завода «Электрик».

По конструктивному исполнению (компоновке) они подразделяются на:

– однокорпусные – их механизм подачи и блок управления размещаются в одном корпусе с источником сварочного тока. Преимуществом такого исполнения является то, что все подвижные элементы защищены от брызг, пыли. Недостаток состоит в ограничении зоны обслуживания, равном длине шланга горелки (3…4 м). Такие полуавтоматы используют на стационарных рабочих местах. К ним относятся полуавтоматы ПДГ-165-1, ПДГ-2510 завода «Электрик»;

– стационарные полуавтоматы – механизмы подачи размещаются на верхней крышке источника сварочного тока, на турели – устройстве, допускающем его вращение вокруг вертикальной оси. При необходимости механизм подачи может быть снят и перемещен на необходимое расстояние. Примером такого исполнения является полуавтомат ПДГ-525-3, показанный на рис. 4.69.

4.29. Технические характеристики полуавтоматов, выпускаемых заводом «Электрик»

Тип	Напряжение питания, В	Сварочный ток (ПВ), А (%)	Диаметр проволоки стальной порошковой, мм	Масса подающего механизма источника, кг	Габаритные размеры (ширина × длина × высота) подающего механизма источника, мм
ПДГ-164-2 с ВДГ-164	220	160 (32) 90 (100)	0,8…1,2 –	10 50	160 × 525 × 300 300 × 525 × 400
ПДГ-165-1 (однокорпусной)		160 (60) 120 (100)		60	300 × 545 × 550
ПДГ-2010 (однокорпусной)	380	200 (60) 125 (100)	0,6…1,2 –	90	380 × 840 × 780
ПДГ-2510* (однокорпусной)	3 × 380	315 (32) 250 (60) 190 (100)	0,8…1,4 –	168	470 × 910 × 810
ПДГ-2511** с ВДУ-251		315 (32) 250 (60) 190 (100)		16 (МПЗ-2А) 150	230 × 590 × 420 490 × 710 × 940
ПДГ-252 с ВДУ-251				16 (МПЗ-3) 150	202 × 580 × 420 490 × 710 × 940
ПДГ-3010** с ВДУ-3010		315 (60) 245 (100)	0,6…1,6 –	16 (МПЗ-2А) 195	230 × 590 × 420 545 × 935 × 940
ПДГО-5010 с ВДУ-505		500 (60) 385 (100)	1,6…2,0 1,6…3,0	15 (МПО-4) 300	350 × 700 × 260 700 × 760 × 900
ПДГ-525** с ВДУ-505		500 (60) 385 (100)	1,0…2,0 (0,8 – заказ) 1,0…2,0	16 (МПЗ-4) 300	230 × 650 × 440 700 × 760 × 900

* ПДГ-2510 – с возможностью оснащения приставкой для сварки в аргоне неплавящимся электродом и четырехроликовым механизмом подачи проволоки.

** ПДГ-2511, ПДГ-3010 и ПДГ-525-4 комплектуются по выбору заказчика подающими механизмами МПЗ-2А, МПЗ-4А или МПК-2А; ПДГ-525-2 – механизмами открытого типа МПО-2(-3).

Рис. 4.69. Полуавтомат типа ПДГ-525-3

Полуавтоматы с транспортируемым механизмом подачи располагаются вблизи рабочего места на расстоянии 10...20 м от источника сварочного тока. В зависимости от транспортируемой массы эти устройства имеют колеса для перекатывания или рукоятки для переноски.

Удобна компоновка полуавтомата типа ПДГ-164-2 (рис. 4.70), в котором источник сварочного тока типа ВДГ-164 и механизм подачи транспортируются на тележке.

Полуавтомат типа ПДИ-304 предназначен для импульсно-дуговой сварки алюминия, его сплавов и высоколегированных сталей в аргоне. Он состоит из механизма подачи проволоки, комплекта сварочных горелок, выносного пульта и комплектуется выпрямителем типа ВДГИ-302. Сварочные горелки имеют сменные каналы из полиамида, обеспечивающие равномерную подачу алюминиевых проволок диаметром 1,6 и 2,0 мм.

Обеспечивается сварка алюминиевых сплавов толщиной 2...20 мм на токах 60... 315 А. Для каждого сварочного тока должны быть выбраны оптимальные частота и энергия импульсов. Частоту 50 Гц следует применять на токах до 100 А.

Рис. 4.70. Полуавтомат ПДГ-164-2

Для оптимальной энергии импульсов характерны монотонное гудение дуги, мелкокапельный перенос металла и почти полное отсутствие разбрызгивания.

Полуавтоматы с инверторными выпрямителями. Параметры отечественных полуавтоматов такого рода приведены в табл. 4.30.

Зарубежные фирмы создали широкую гамму полуавтоматов с компактными инверторными выпрямителями на токи 100...630 А, которые обладают лучшими технологическими характеристиками и возможностями, чем традиционные полуавтоматы.

1. Управление процессом сварки с помощью микрокомпьютера в комбинации с мощными быстродействующими транзисторными

4.30. Технические характеристики полуавтоматов с инверторными выпрямителями

Тип	Напряжение питания, В	Сварочный ток (ПВ), А (%)	Диаметр проволоки, мм	Масса механизма подачи / Масса источника, кг	Предприятие-изготовитель
ПМ-3 с ДС-250	220	250 (40)	0,8…1,2	8 / 32	НПП «Технотрон» (г. Чебоксары)
ПМ-3 с ДС-400	380	400 (60)	0,8…1,6	8 / 45	
ФЭБ-01М с ФЭБ-200М	220	200 (40)	0,8…1,2	12 / 23	НПП «ФЭБ» (г. Санкт-Петербург)
ФЭБ-02 с ФЭБ-350М	380	350 (40)	0,8…2,0	13 / 45	

источниками позволяет регулировать параметры режима на всех стадиях перехода капли через дугу в сварочную ванну и существенно повысить качество сварки. Блок программирования дает возможность даже неопытному сварщику достичь хороших результатов по сварке и обеспечивает опытному сварщику свободу программирования параметров для специальных условий применения. Сначала выбирается способ сварки: ручная дуговая штучным электродом; газоэлектрическая плавящимся электродом; импульсная. После предварительного введения данных о типе и толщине свариваемого материала, материале и диаметре проволоки, составе газа – компьютер выбирает сварочные параметры, которые наилучшим образом подходят для данной задачи. Ключом для синергетической сварки являются оптимальные зависимости напряжения дуги и сварочного тока (скорости подачи электродной проволоки). Можно отрегулировать сварочные параметры во время сварки, не нарушая синергетического эффекта. Память хранит до 100 сварочных программ. Кроме того, сварщик может применить любую из 20…40 готовых стандартных программ.

2. Инверторные выпрямители, управляемые компьютером, обеспечивают стабильное быстрое зажигание дуги, минимальное разбрызгивание и высокую стабильность дуги. Продолжительностью зажигания является промежуток от момента касания электрода детали до момента достижения стабильного процесса сварки. Благодаря двукратному уменьшению времени (высокой скорости нарастания сварочного тока) инверторные выпрямители обеспечивают зажигание дуги с первого касания.

3. В ряде полуавтоматов для обеспечения стабильного повторного зажигания дуги предусмотрен сброс последней капли с электродной проволоки за счет подачи импульса тока при выключении дуги. Это позволяет в конце сварки иметь заостренный торец проволоки, что является предпосылкой для хорошего повторного зажигания дуги.

4. Индуктивность в зависимости от условий сварки (материал и диаметр электродной проволоки, состав защитного газа) регулируется. Плавная регулировка индуктивности позволяет выбрать оптимальные условия горения дуги, снизить разбрызгивание и получить плавное формирование шва. При переходе на проволоку большего диаметра индуктивность должна быть увеличена. При возрастании индуктивности дуга горит «мягче», с малым разбрызгиванием, обеспечиваются большая глубина проплавления и плавная конфигурация шва с мелкой чешуйчатостью. При уменьшении индуктивности дуга становится «жесткой», разбрызгивание увеличивается, шов имеет усиление с резким переходом к основному металлу.

5. Двухрежимная сварка дает возможность сварщику изменять режим между двумя заранее установленными уровнями: малый ток – большой ток – нажатием на кнопку горелки. Эта функция позволяет быстро переходить с режима на режим при сварке в различных пространственных положениях. Она очень эффективна при сварке соединений, собранных со значительными зазорами. Участки с большим зазором выполняются на малых режимах, а там, где зазоры маленькие, сварочный ток увеличивается.

4.5.2.5. СВАРОЧНЫЕ АВТОМАТЫ ОБЩЕГО ПРИМЕНЕНИЯ

Общие сведения. Сварочными автоматами принято называть аппараты, предназначенные для автоматической сварки, т.е. механизированной подачи электродной проволоки и перемещения дуги вдоль оси шва.

Автоматы, снабженные устройством для перемещения вдоль оси шва, именуют самоходными. Подвесные автоматы закрепляются на станке, а свариваемое изделие перемещается, вращается со сварочной скоростью вращателями-манипуляторами.

Сварочными тракторами называют аппараты, перемещающиеся непосредственно по свариваемому изделию или специальному рельсу.

Основные узлы и агрегаты сварочных автоматов следующие:

– механизмы подачи электродной проволоки или ленты;

– токоподводящие устройства (мундштуки, горелки);

– механизмы или системы механизмов настроечных перемещений электродов относительно шва;

– устройства для размещения электродного материала (проволоки или ленты);

– флюсовая аппаратура;

– газовая аппаратура;

– самоходные тележки;

– системы управления (пульты, шкафы управления);

– источники сварочного тока.

Автоматы комплектуются из унифицированных узлов, имеющих определенное функциональное назначение, что позволяет собирать автоматы в различных компоновках.

Автоматы общего применения классифицируются:

– по способу защиты сварочной дуги – под флюсом; в защитных газах; универсальные, обеспечивающие сварку несколькими способами;

– по числу электродов – одноэлектродные с общим источником питания дуг (сварка расщепленным электродом) и многоэлектродные с раздельными источниками питания дуг;

– по назначению – для сварки и наплавки;

– по типу плавящихся электродов – для сварки проволоками или лентами.

Главным параметром автомата принято считать величину сварочного тока.

Самоходные автоматы для сварки плавящимся электродом. Каховский завод электросварочного оборудования выпускает гамму самоходных автоматов для сварки под флюсом и в защитных газах. Их технические характеристики приведены в табл. 4.31.

Автомат А-1416 предназначен для однодуговой сварки под флюсом и состоит из следующих основных узлов: собственно сварочной головки, содержащей механизм подачи проволоки с правильным устройством, токоподводящий мундштук и устройство для защиты зоны дуги флюсом; механизма регулировки мундштука поперек линии шва; подъемного механизма, позволяющего осуществлять механизированное перемещение подвесной сварочной головки на вертикальной штанге; флюсоаппарата, снабженного флюсоотсасывающим устройством эжекторного типа; самоходной тележки велосипедного типа, на которой закреплены узлы автомата и которая служит для перемещения его вдоль линии сварки с рабочей и маршевой скоростями. Маршевое перемещение автомата осуществляется от отдельного двигателя. Регулировка скорости сварки и скорости подачи электродной проволоки ступенчатая, выполняется подбором сменных шестерен.

Автомат выпускается в двух исполнениях: на 500 А комплектуется сварочным выпрямителем типа КИУ-501; на 1000 А комплектуется сварочным выпрямителем типа КИУ-1201.

Назначение автомата АД-320 – однодуговая сварка электродной проволоки диаметром 2…5 мм под флюсом. Применение двигателей постоянного тока обеспечивает возможность плавной регулировки скорости подачи электродной проволоки и скорости сварки. Это позволяет использовать автомат в высокоавтоматизированных установках и линиях, где необходимо периодически перенастраивать режимы сварки.

Автоматы типов А-1412 и АД-321 рассчитаны на двухдуговую сварку под флюсом. Они позволяют повысить скорости сварки в 1,5 – 3 раза по сравнению с однодуговой сваркой под флюсом. Автомат содержит комплект из двух головок, смонтированных на оси общей траверсы, подвешенной к механизму вертикального перемещения. Автоматы комплектуются двумя сварочными выпрямителями типа КИУ-1201, рассчитанными на ток 1250 А.

В автомате АД-321 вертикальное и поперечное перемещение сварочной головки осуществляется с помощью электроприводов.

4.31. Технические характеристики самоходных автоматов для сварки под флюсом и в защитных газах

Технические характеристики	А-1416	АД-320	А-1412	АД-321
Номинальное напряжение питающей сети частотой 50 Гц, В	380			
Номинальный сварочный ток (ПВ), А (%)	500 (60)		1250 × 2 (100)	
	1000 (100)	1250 (100)		
Число электродов	1		2	2, 4
Диаметр электродной проволоки, мм	1,2…2; 2…5	2…5	3…6	3…5
Диапазон регулирования скорости подачи проволоки, м/ч	47…509		14,9…583	14,9…553
Диапазон регулирования скорости сварки, м/ч	12…120		12…250	6,6…257
Вертикальное перемещение сварочной головки:				
ход, мм	250			400
скорость, м/ч	0,49	29	0,49	24
Поперечное перемещение сварочной головки:				
ход, мм	75	200	75	200
скорость, м/ч	–	7,2…2,8	–	7,2…57
Маршевая скорость перемещения, м/ч	950			
Флюсоаппаратура:				
вместимость, дм^3	25	22	25	22
расход воздуха, м^3/ч	30			
Масса, кг:				
головки	295	Общая 1900	350	Общая 1900
источника	260…700		700	
Габаритные размеры головки, мм	960 × 860 × 1860	865 × 800 × 1565	1388 × 800 × 1820	1120 × 820 × 1750

Подвесные автоматы. При сварке и наплавке разнообразных изделий, таких как цилиндрические сосуды, валы, трубы и многие другие, в серийном и массовом производстве используются преимущественно стационарные подвесные сварочные автоматы. Они входят в состав установок, включающих в себя кроме собственно сварочного оборудования еще различного рода манипуляторы, кантователи, служащие для крепления и поворота свариваемых изделий.

Технические характеристики подвесных автоматов, выпускаемых Каховским заводом электросварочного оборудования, приведены в табл. 4.32.

4.32. Технические характеристики подвесных автоматов

Технические характеристики	А-1406	АД-231	ГДФ-1001
Номинальное напряжение питающей сети частотой 50 Гц, В	380		
Номинальный сварочный ток (ПВ), А (%)	500 (60); 1000 (100)	1250 (100)	1000 (100)
Число электродов	1		
Диаметр электродной проволоки, мм:			3…5
сплошной	1,2…2; 2…5	4,0…6,0	
порошковой	2…3	3…6,0	
Толщина ленты, мм	–	0,5…1,0	–
Диапазон регулировки скорости подач	17…553	5…230	32…583
Вертикальное перемещение сварочной головки:			
ход, мм	500	400	100
скорость, м/ч	30	24	–
Флюсоаппаратура:			
вместимость, дм^3	40	55	40
расход воздуха, м^3/ч	20		
Масса головки, кг	195	295	280
Габаритные размеры головки, мм	1010 × 890 × 1725	1090 × 860 × 2350	1680 × 1050 × 1845

Наиболее универсальным является автомат типа А-1406. Основное его назначение – сварка и наплавка проволочными электродами под флюсом или в защитных газах тел вращения. Вертикальное перемещение сварочной головки осуществляется от электропривода, а поперечное перемещение – вручную.

Автомат выпускается в двух исполнениях: на 500 А с выпрямителем КИУ-501; на 1250 А с выпрямителем КИУ 1201.

Благодаря применению тонких электродных проволок диаметром 1,2 мм можно наплавлять валы малых диаметров: начиная от 40 мм и выше. Для того чтобы можно было наплавлять тела вращения, автомат используют в комплекте со специальным вращателем или устанавливают на станке.

Подвесной автомат АД-231 предназначен для наплавки под флюсом сплошной и порошковой электродной проволокой, а также ленточным электродом как сплошного сечения, так и порошковым. При наплавке ленточным электродом обеспечиваются максимальная производительность и минимальная доля участия основного металла в металле шва.

Поверхность наплавленного слоя гладкая, не имеет пор, трещин и других дефектов.

Автомат комплектуется сварочным выпрямителем типа КИУ-1201.

Подвесная головка типа ГДФ-1001 служит для дуговой сварки плавящимся электродом под флюсом поворотных стыков труб диаметром 500…1420 мм из низколегированных сталей для нефтегазопроводов и входит в состав оборудования полевой автосварочной установки.

При сварке поворотных стыков сварочная головка закреплена неподвижно, а собранные под сварку трубы вращаются с помощью роликового или шпиндельного вращателя. Головка снабжена копирными роликами для поддержания постоянства «вылета» электродной прово-

локи и обеспечения точного направления дуги по линии стыка.

Головка выпускается в комплекте со сварочным выпрямителем КИУ-1201.

Автоматы для дуговой сварки тракторного типа. В состав сварочного трактора входят: самоходная тележка; механизм подачи электродной проволоки; механизмы настроечных перемещений; флюсовая аппаратура; газовая аппаратура (если трактор предназначен для сварки в защитных газах); система управления; источник сварочного тока. Технические характеристики автоматов тракторного типа приведены в табл. 4.33.

Сварочный трактор при сварке перемещается по поверхности свариваемых деталей или по легкому переносному рельсовому пути. Часто от одного шва к другому сварочный трактор транспортируется сварщиком. Поэтому в числе главных требований к его конструкции – компактность и небольшая масса. Этому требованию отвечают сварочные автоматы типов АДФ-10030 (завод «Электрик») (рис. 4.71) и КА-001 (Каховский завод электросварочного оборудования), являющиеся модификациями сварочного трактора типа ТС-17.

Уменьшение массы трактора ТС-17 (45...50 кг) и его модификаций достигается использованием одного трехфазного двигателя для механизмов перемещения трактора и подачи электродной проволоки. Наличие одного двигателя с постоянным числом оборотов позволяет настроечно регулировать скорости сварки и подачи электродной проволоки. Оба механизма смонтированы с электродвигателем в один блок, который является несущим корпусом для всего трактора.

Универсальность трактору придает комплект сменных узлов и деталей. Направление его по шву в большинстве случаев осуществляется самокопированием, однако предусмотрена возможность ручного направления трактора по указателю и направляющей линейке.

При сварке внутренних кольцевых швов трактор движется по сосуду со скоростью, равной окружной скорости его вращения в обратном направлении. Благодаря этому он фактически стоит на месте, а сосуд движется под ним с заданной скоростью. Точно уравнять скорости движения трактора и сосуда сложно, поэтому скорость трактора выбирается несколько меньшей и он как бы отстает от сосуда. Это отставание компенсируется периодическими остановками сосуда без остановки трактора и без нарушения процесса сварки.

4.33. Технические характеристики автоматов тракторного типа

Тип	Защитная среда	Напряжение питания, В	Сварочный ток (ПВ), А (%)	Масса трактор / источник, кг	Габаритные размеры (ширина × длина × высота) трактор / источник, мм	Изготовитель
АДГ-515 с ВДУ-505	Защитный газ	3 × 380	500 (60) 385 (100)	56 300	450 × 800 × 600 700 × 760 × 900	Завод «Электрик», г. Санкт-Петербург
АДФ-1202 с ВДУ-1202	Флюс		1250 (100)	78 540	450 × 1110 × 770 685 × 1000 × 885	
АДФ-10030 с ВДМ-1201-2			1000 (100)	50 380	345 × 900 × 550 660 × 1000 × 830	
КА-001 с КИУ-1201				46	540 × 360 × 740 1000 × 880 × 660	Каховский завод электросварочного оборудования
АДР-1003 с ВДМ-1201-2 и РБ					540 × 360 × 740 660 × 1000 × 830	Завод «Искра», г. Первоуральск

Рис. 4.71. Автомат АДФ-10030

Одномоторные автоматы имеют упрощенную электрическую схему управления, что обеспечивает необходимую надежность при эксплуатации автоматов в монтажных условиях, например при сварке мостовых конструкций. В этих случаях автоматы комплектуются выпрямителями типа ВДМ-1201-2 с балластными реостатами.

Сварочные автоматы тракторного типа АДГ-515 и АДФ-1202 предназначены для сварки стыковых и угловых соединений. Трактора перемещаются по рельсовому пути и позволяют осуществлять сварку как внутри колеи, так и вне ее на расстоянии до 200 мм. Конструкция тракторов дает возможность корректировать в поперечном направлении положение электрода относительно стыка в пределах 60 мм. Для привода трактора применен двигатель сер. КПА мощностью 60 Вт, а для привода механизма подачи электродной проволоки – двигатель той же сер. мощностью 90 Вт.

Автомат АДГ-515 (рис. 4.72) предназначен для сварки в защитных газах электродными проволоками диаметром 1,2...2,0 мм. Регулировка скорости подачи электродной проволоки

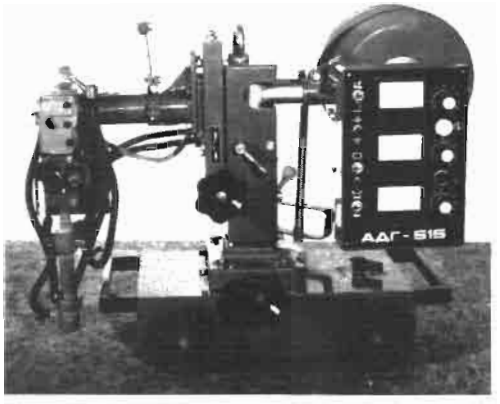


Рис. 4.72. Автомат АДГ-515

и скорости сварки плавная. Автоматическая система регулировки частоты вращения двигателей позволяет жестко стабилизировать выбранные скорости.

Автомат комплектуется тиристорным сварочным выпрямителем ВДУ-505.

Автомат типа АДФ-1202 служит для однодуговой сварки под флюсом на постоянном токе электродной проволокой диаметром 2...6 мм. Он комплектуется тиристорным сварочным выпрямителем типа ВДУ-1202 с «жесткими» и падающими внешними характеристиками. При сварке проволокой диаметром 2,0 и 3,0 мм применяются система управления с независимой скоростью подачи электродной проволоки от напряжения дуги и «жесткие» внешние характеристики сварочного выпрямителя, а диаметром >3 мм – система управления с зависимой скоростью подачи проволоки от напряжения дуги и «крутопадающие» внешние характеристики сварочного выпрямителя.

4.5.2.6. СПЕЦИАЛЬНЫЕ АВТОМАТЫ

При массовом и крупносерийном производстве, когда свариваются различные модификации изделий, широко применяются роботизированные комплексы.

Для сварки однотипных изделий, когда не требуется частая переналадка, целесообразно использовать специальные автоматы, стоимость которых существенно ниже роботов. Применение установки для автоматической сварки оправдано, если экономится зарплата как минимум двух сварщиков.

Специальные автоматы создаются с широким использованием унифицированных узлов и в то же время имеют ряд быстродейст-

вующих устройств, предназначенных для выполнения вспомогательных операций: подвода и отвода сварочной головки, копирования линии шва, движения головки по определенной траектории и т.п.

Специальные автоматы в 3 – 4 раза повышают производительность, например, при сварке продольных наружных и внутренних швов труб большого диаметра (автоматы типов А-1448 и А-1373 разработки ИЭС им. Е.О. Патона).

Ниже даются примеры использования специальных сварочных автоматов, разработанных Институтом сварки (ИС) России (г. Санкт-Петербург).

Автомат для сварки труб радиаторов работает в линиях по производству отопительных радиаторов. Радиаторы изготовляются из стальных труб диаметром 22 мм, которые привариваются кольцевыми швами в уголки толщиной 3 мм и длиной до 1,5 м, а затем проводится сварка четырех продольных швов. Радиаторы обеспечивают высокую теплопередачу и должны обладать высочайшей надежностью и герметичностью сварных швов, так как устанавливаются в жилых помещениях.

Для обеспечения минимальных разогрева и коробления изделия применен способ сварки плавящейся электродной проволокой диаметром 1,0 мм в смеси 90 % Ar и 10 % CO_2. Сварочный ток 160…180 А, напряжение дуги 16…17 В, время сварки одной трубы 7 с.

Важнейшим условием полной автоматизации сварки труб с трубными досками является оснащение сварочного аппарата сенсором для отыскания центра трубы и автоматической ориентации горелки перед сваркой. В разработанном автомате типа АДГ-250 для этой цели применены лазерный излучатель и фотоприемник отраженного луча.

Автомат представляет собой сварочный трактор, обеспечивающий продольное и поперечное перемещения сварочной головки относительно ряда труб. В момент определения фотоприемником внутренней окружности трубы поступает команда на включение процесса сварки и вращение горелки вокруг трубы. Микропроцессорный блок управления программирует число труб, шаг, диаметр трубы и ряд параметров режима.

С целью уменьшения короблений может быть выбран нужный алгоритм пошагового перемещения горелки от трубы к трубе – от середины к краям изделия, в шахматном порядке и т.д. Для того чтобы защитить лазер и оптическую систему от задымления, автомат оснащен дымоотсосом.

Применение автомата позволило существенно повысить надежность отопительных радиаторов и сэкономить труд пяти сварщиков.

Машина для стыковой сварки концов рулонов лент при производстве труб. На станах высокочастотной сварки труб диаметром 20…114 мм для поддержания непрерывного производства необходимо сваривать концы лент (штрипса) толщиной 0,8…6 мм. Стыкуемые в стыкосварочной машине концы рулонов должны быть сварены с полным проплавлением стыка и минимальным усилением шва как с наружной, так и с обратной стороны стыка. Разработана технология сварки в CO_2 проволокой диаметром 1,2 мм по гарантированному зазору. Выбраны оптимальные зазоры в стыке и глубина канавки в медной подкладке, обеспечивающие усиление шва ≤0,8 мм. Институтом сварки России совместно с Электростальским заводом тяжелого машиностроения создана стыкосварочная машина, встраиваемая в линию трубосварочного стана; она обеспечивает предварительную обрезку, стыковку и сварку концов лент.

Установка для наплавки тел вращения износостойкой сталью. Известно, что электродуговая наплавка рабочих поверхностей валов, роликов износо- и коррозионно-стойкой сталью – наиболее эффективный и распространенный способ увеличения срока службы подобных деталей. Так, ролики типа МНЛЗ, применяемые в машинах непрерывного литья заготовок, должны иметь твердость рабочей поверхности 32…55 HRC; содержание хрома в наплавленном металле должно составлять ≥12 %, толщина упрочняющего слоя должна находиться в пределах 3…4 мм, а стойкость роликов – обеспечивать разливку ≥1 млн. т стали.

Совместно с ОАО «Уралмаш» (г. Екатеринбург) ИС России разработал технологию и установку типа У-95 для наплавки плавящейся электродной проволокой в защитных газах.

Наплавка выполняется проволокой марки Св-08Х17ГС диаметром 1,6 мм. Сварочный ток 400 А, напряжение дуги 35 В, скорость наплавки 22 м/ч, частота колебаний 0,9 Гц, амплитуда колебаний 7 мм. Наплавка производится в смеси газов 90 % Ar + 10 % CO_2. Для обеспечения максимальной производительности наплавленного металла при минимальной

доле участия основного металла новая технология предусматривает поперечные колебания дуги и синхронные с ними изменения сварочного тока. В разработанной установке заложены следующие режимы наплавки:

– по «винту» (ролик вращается, а суппорт установки со сварочной головкой перемещается с малой скоростью, обеспечивающей шаг 8…9 мм/об.);

– наплавка по кольцу с шаговым смещением после завершения одного оборота;

– наплавка изделия по образующей.

Учитывая значительные размеры роликов (диаметр 130…500 мм, длина до 2,5 м), а также что время непрерывной наплавки составляет от 1 до нескольких часов, особое внимание при проектировании установки обращено на надежность узлов.

Сейчас в ОАО «Уралмаш» эксплуатируются три установки типа У-95, на которых проводится наплавка роликов из стали 24Х1МФ. Обеспечиваются необходимые параметры наплавленного слоя – твердость 50…52 HRC, содержание хрома 12,5…13,5 %; краскокапиллярный и ультразвуковой методы контроля показывают отсутствие дефектов по линии оплавления и в зоне термического влияния.

Автомат типа АДСД-300 для двухдуговой сварки продольных швов конических колонн работает в составе агрегата для гибки конических обечаек длиной до 12 м с толщиной стенки 3…6 мм. Головка автомата имеет шарнирное крепление и снабжена копирным роликом, входящим в разделку кромок и обеспечивающим точное направление обеих дуг по линии стыка. Диаметр электродной проволоки 1,2 мм, скорость сварки 2 м/мин. Автомат комплектуется двумя сварочными выпрямителями типа ВДГ-303.

4.5.3. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ЭШС

К оборудованию для ЭШС предъявляют множество разнообразных требований, так как на условия выполнения сварки влияют качество и точность сборки, необходимость одновременного выполнения большого числа операций и т.п. Поэтому предприятия, предусматривающие применение ЭШС при изготовлении производимых ими изделий, создают участки, оснащенные комплексом сварочной аппаратуры и вспомогательного оборудования, которые принято называть сварочными установками. Так, на ряде заводов действуют установки для:

– ЭШС продольных швов цилиндрических сосудов;

– ЭШС проволочными электродами кольцевых швов;

– сварки плавящимся мундштуком или электродами большого сечения крупногабаритных деталей большой толщины.

Существует много других установок для ЭШС и наплавки разнообразных конструкций с использованием электродных проволок, пластин, плавящихся мундштуков и др., различающихся уровнем механизации и автоматизации основных и вспомогательных операций и другими характеристиками. Все они имеют ряд общих характерных конструктивных особенностей, определяемых:

– вертикальным или близким к вертикальному положением шва;

– преимущественно значительными размерами и массой свариваемых изделий;

– необходимостью удержания сварочной ванны в зазоре между соединяемыми кромками;

– повышенными требованиями к надежности оборудования, в том числе при длительной работе.

Независимо от разнообразных конструктивных особенностей установок они укомплектованы следующим оборудованием: сварочным, к которому относятся источник питания и сварочный аппарат с приборами управления и регулированием процесса; механическим и вспомогательным, предназначенным для установки и перемещения изделия перед сваркой или в процессе выполнения шва, а также обслуживания зоны сварки; оснасткой для принудительного формирования металла шва, а также системой охлаждения; сборочно-сварочными приспособлениями, позволяющими осуществлять быструю и точную сборку заготовок, удерживать их в требуемом положении во время работы и предотвращать или уменьшать при этом деформации и внутренние напряжения в свариваемых изделиях.

Вместе с тем, на многих предприятиях возникает необходимость единичного или мелкосерийного изготовления изделий, в которых отдельные сварные соединения целесообразно выполнять с применением ЭШС. Однако, принимая во внимание единичный характер таких работ, создавать участки, оснащенные специализированными сварочными установками, не имеет смысла.

В этом случае существует возможность использовать для выполнения таких соединений имеющееся на заводе сварочное оборудование, которое может быть укомплектовано отдельными приспособлениями, необходимыми для ЭШС.

Наиболее простыми способами получения таких соединении являются методы сварки плавящимся мундштуком или пластинчатым электродом. Для этого нужны источник питания соответствующей мощности с регулируемой характеристикой и определенные механизмы: в первом случае – для подачи сварочной проволоки в плавящийся мундштук, во втором – для вертикального перемещения пластинчатого электрода с требуемой скоростью.

Однако когда объем производства изделий, изготовляемых с применением ЭШС, значителен, а требования к качеству сварных соединений высоки, необходимо создание участков, укомплектованных специализированными сварочными установками.

Наиболее характерными изделиями, изготовляемыми с применением ЭШС, являются толстостенные сосуды и емкости. Для их производства нужны установка для ЭШС продольных швов и установка для сварки кольцевых швов, если изготовитель считает нецелесообразным применять для этого дуговую многопроходную сварку под флюсом в узкую разделку.

Установка для ЭШС продольных швов. В качестве примера рассмотрим показанную на рис. 4.73 установку для сварки одного или одновременно двух продольных швов цилиндрических сосудов.

Обечайка *7* сосуда установлена на планшайбе *3* вращателя *2* и прикреплена к ней зажимами. Регулировочные устройства обеспечивают соответствующее расположение свариваемого стыка в пространстве. При значительной длине обечайки для фиксации ее положения применяют растяжки *1*. К двум колоннам *4*, расположенным на рельсовых тележках *12*, при помощи крестообразного суппорта *10*, подвешен вертикальный рельсовый путь *9*, по которому движется сварочный аппарат *8*. Крестообразный суппорт *10* обеспечивает установку рельсового пути параллельно свариваемым кромкам. Для обслуживания аппарата *8* на колонне имеется подвижная площадка или кабина для сварщика. Часто в этой кабине размещают пульт управления всей установкой, катушки с электродной проволокой, емкости для

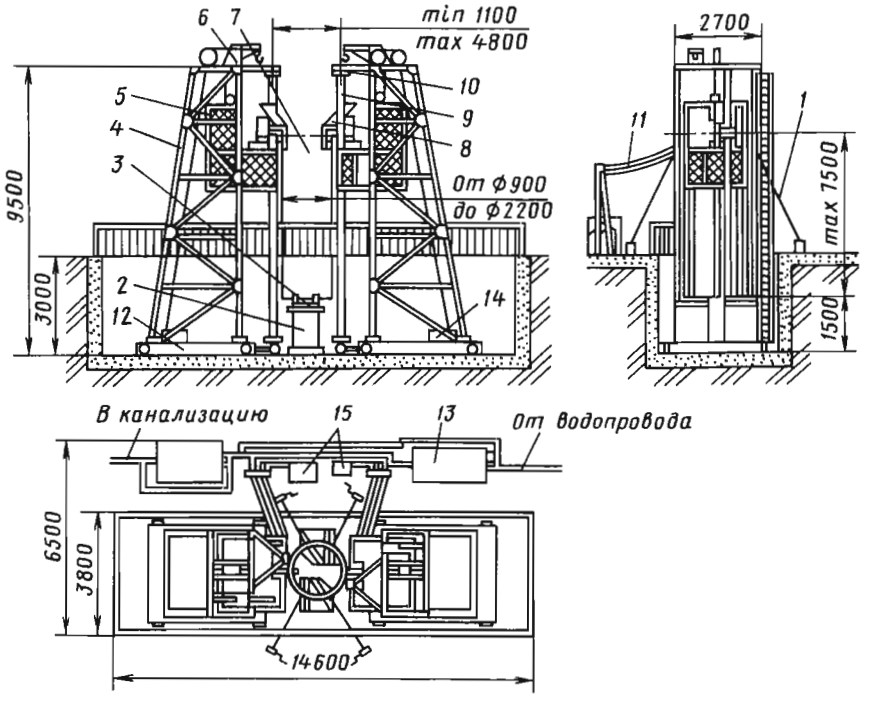


Рис. 4.73. Установка для ЭШС продольных швов

флюса и другие устройства. Кабина *5* может быть снабжена отдельным, независимым от сварочного аппарата подъемником *14* На колонне установлен кран-укосина *6*, необходимый для обслуживания установки (снятия аппарата, загрузки катушки и др.). В состав установки входят также источники питания *13*, шкафы *15* с аппаратурой контроля и управления, гирлянды *11* сварочных проводов и проводов управления, система водяного охлаждения и ряд других составных элементов. Для обслуживания установки участок должен быть оснащен сварочным аппаратом для ручной дуговой сварки, газовой резки и пневматическим оборудованием.

Установка для ЭШС проволочными электродами кольцевых швов (рис. 4.74) содержит вращатель *10*, обеспечивающий вращение свариваемого изделия *1* относительно сварочного аппарата *16*. Последний крепится на тележке *15*, что облегчает его точную установку относительно свариваемого стыка. На тележке крепят также катушки *12* для проволоки, корректировочные устройства *11* и *24*, источник питания *14* и аппаратуру управления *13*, а также площадки обслуживания и другие устройства.

Установка сварки кольцевых швов снабжена также системой принудительного формирования внутренней стороны шва.

Для повышения надежности при выполнении кольцевых швов больших толщины и диаметра создана установка, оснащенная двумя сварочными автоматами. В том случае, если откажет в работе основной сварочный автомат, он выводится из разделки, а на его место при помощи специальной пружины вводится в разделку дублирующий автомат, настроенный на сварку так же, как и первый.

Установка для сварки плавящимся мундштуком крупногабаритных деталей. Для изготовления сварно-литых и сварно-кованых массивных изделий целесообразно оснащение производства установкой для ЭШС плавящимся мундштуком.

Установка (рис. 4.75) состоит из стенда *1* для укладки и сборки заготовок и портала *9* со сварочной аппаратурой и другими устройствами. Заготовки свариваемых деталей *12* укладывают на чугунные плиты *3* так, чтобы они опирались на вертикальные гидравлические домкраты *2*. Кроме того, предусмотрены гидравлические домкраты с горизонтальной осью, предназначенные для перемещения плит *3* в горизонтальной плоскости по стенду *1*.

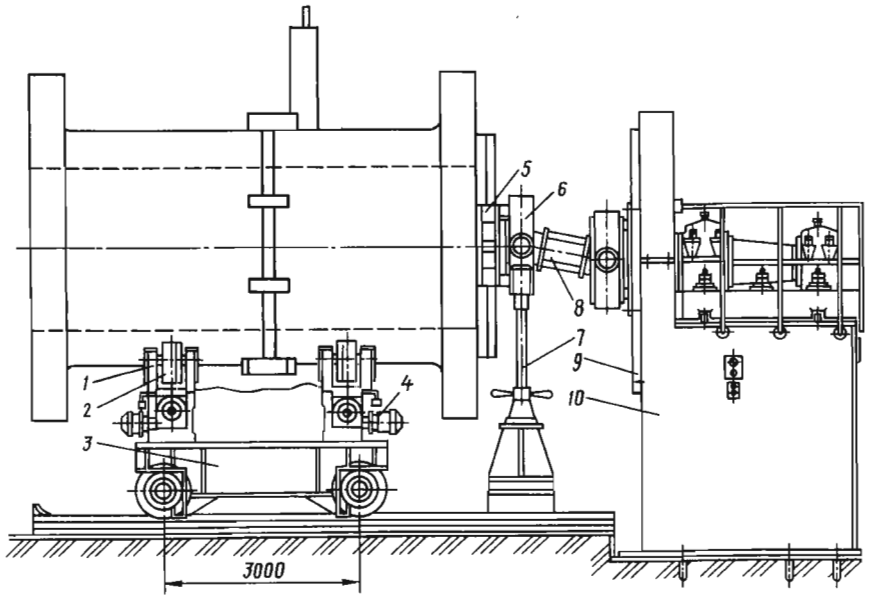
Плавящиеся мундштуки *4* крепятся к заготовке зажимом *5* через изоляционные прокладки. Сварочные головки *6* связаны с порталом *9* установки. Они расположены на тележках *7*, снабженных выдвижной штангой *10*. На портале имеется набор катушек *8* с электродной проволокой и две площадки *11* для обслуживания зоны сварки. Тележки *7* могут перемещаться по рельсовому пути поперечной балки портала при помощи ручного привода. Это обеспечивает точную фиксацию аппаратов против мундштука. Установка снабжена устройством для принудительного формирования шва *13*, прижимами *14* и другими приспособлениями.

На рис. 4.76 показан процесс ЭШС одновременно двух стыков станины прокатного стана. Этим же методом можно сваривать кольцевые швы с большой толщиной стенки, соизмеримой с диаметром кольца. В этом случае с помощью накладок, вырезанных из толстолистового проката, сечение стыка приводится к прямоугольной форме (рис. 4.77) и сваривается методом ЭШС плавящимся мундштуком.

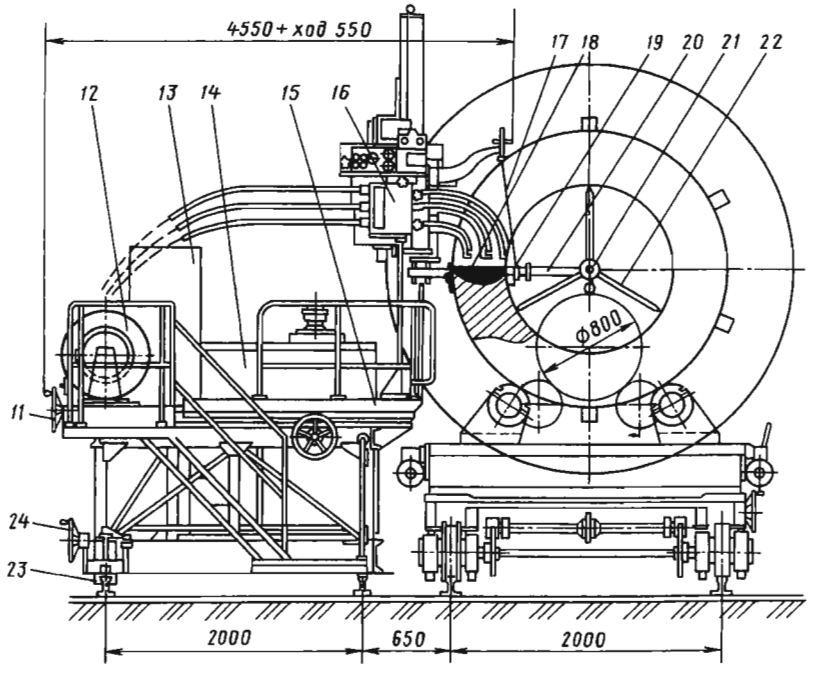
4.5.3.1. ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ

В связи с высокой тепловой инерцией шлаковой ванны требования к источникам питания для ЭШС менее жестки, чем для дуговой сварки. Источники питания, применяемые для дуговой сварки, могут быть использованы и для ЭШС. При этом наиболее целесообразны достаточно мощные источники питания, позволяющие регулировать их внешнюю характеристику для ведения процесса ЭШС при жесткой или пологопадающей характеристике.

ЭШС можно проводить как на переменном, так и на постоянном токе. При этом следует учитывать, что выбор рода и полярности тока во многом определяет степень очистки переплавляемого металла от вредных примесей за счет его взаимодействия со шлаком. Это обусловлено различием схем потоков шлака и металла в процессе ЭШС (рис. 4.78). При восходящем потоке шлака имеет место в несколько раз больший, чем в случае нисходящего потока, перегрев металла на конце электрода. Это приводит к появлению значительной разницы в размерах капель и степени их перегрева.



а)



б)

Рис. 4.74. Установка для ЭШС кольцевых швов:

1 – свариваемое изделие; *2* – роликовая опора; *3* – тележка опоры; *4* – механизм раздвижки роликов; *5* – патрон; *6* – фланец карданного вала; *7* – опорный домкрат; *8* – шарнирный поводок; *9* – планшайба; *10* – вращатель; *11* и *24* – корректировочные устройства; *12* – катушки с проволокой; *13* – аппаратура управления; *14* – источник питания сварочным током; *15* – тележка; *16* – сварочный аппарат на колонне; *17* – тяга переднего ползуна; *18* – передний ползун; *19* – балансирная подвеска заднего ползуна; *20* – штанга подвески заднего ползуна; *21* – корректор подвески заднего ползуна; *22* – распорка подвески заднего ползуна; *23* – захват-фиксаторы тележки

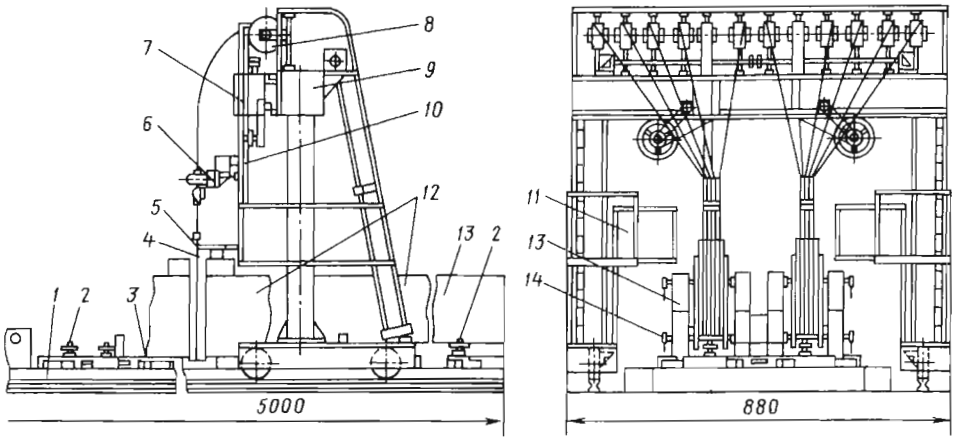


Рис. 4.75. Установка для ЭШС массивных деталей плавящимся мундштуком

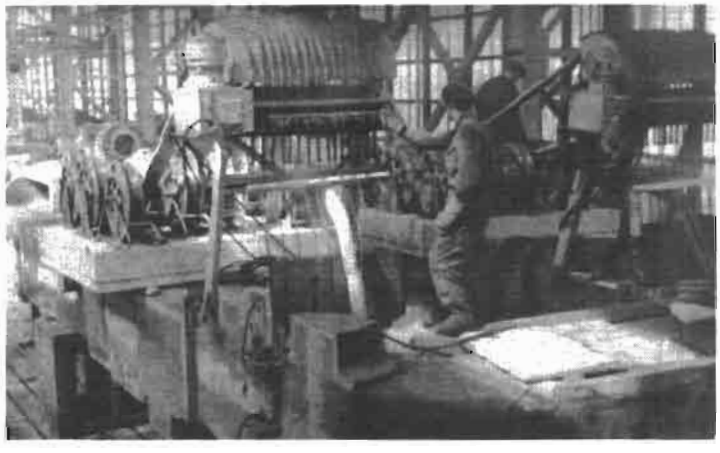


Рис. 4.76. Процесс ЭШС одновременно двух стыков станины прокатного стана

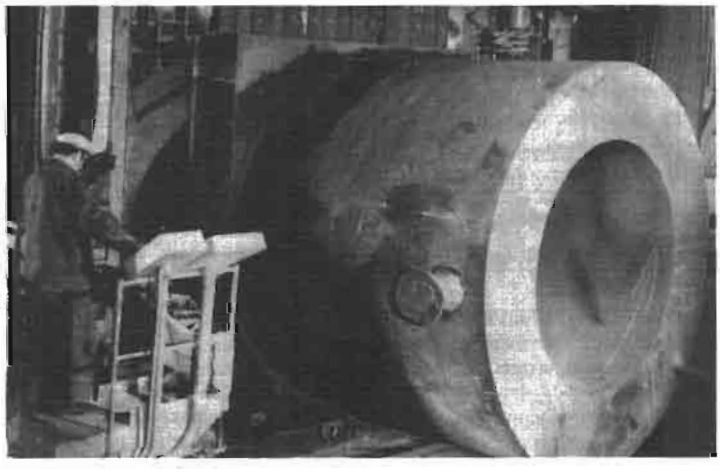


Рис. 4.77. Процесс ЭШС плавящимся мундштуком цилиндра пресса

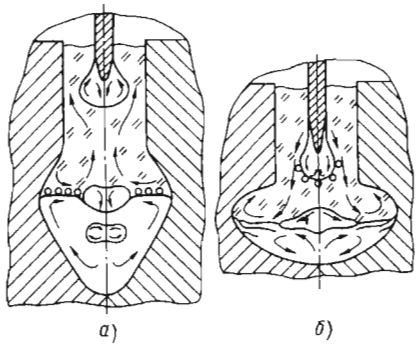


Рис. 4.78. Схема потоков шлака и металла в процессе ЭШС:
а – постоянный ток при прямой полярности;
б – постоянный ток при обратной полярности и переменный ток с выпрямляющим эффектом преимущественно при обратной полярности

Перегретые капли получают значительный импульс вследствие пинч-эффекта, который способствует быстрому прохождению капель через шлаковую ванну и их глубокому проникновению в металлическую ванну. В результате образуется более глубокая металлическая ванна с преимущественно радиальным характером затвердевания. Примеси переносятся такими каплями непосредственно к фронту кристаллизации и захватываются дендритами. Получающиеся в этом случае швы характеризуются повышенным содержанием неметаллических включений и малым проваром. Наиболее благоприятные условия создаются при сварке на постоянном токе обратной полярности или переменном токе с выпрямляющим эффектом в основном при обратной полярности (см. рис. 4.78).

Так как при использовании переменного тока электрошлаковый процесс протекает достаточно устойчиво, для ЭШС чаще всего используют трансформаторы. В качестве источников постоянного тока можно применять генераторы или выпрямители, в которых предусмотрена возможность регулировки вольт-амперной характеристики (ВАХ).

При сварке электродами большого сечения применяют трансформаторы с номинальным сварочным током до 10 000 А.

Хотя начальным этапом ЭШС является дуговой процесс для расплавления флюса, нет необходимости устанавливать для этого периода падающую ВАХ источника тока, так как необходимый результат обеспечивается и при неустойчивом дуговом процессе.

Трансформаторы, предназначенные для ЭШС, имеют малое сопротивление короткого замыкания (0,05...0,15 $U_{х.х}$ / $I_н$, где $U_{х.х}$ – напряжение холостого хода; $I_н$ – номинальный ток) и отличаются широким диапазоном регулирования напряжения. Регулировать напряжение следует под нагрузкой, чтобы можно было установить требуемый режим непосредственно в начале сварки, поддерживать его в дальнейшем неизменным или изменять по какой-либо программе, если это требуется по технологическим соображениям.

В источниках питания для ЭШС получили распространение три способа регулирования напряжения под нагрузкой: изменением числа включенных витков первичной обмотки трансформатора (ступенчатое регулирование); применением управляемых вентилей – тиристоров, включаемых встречно-параллельно в цепь первичной обмотки трансформатора (плавное регулирование); использованием специальных трансформаторов с магнитной коммутацией, обеспечивающих плавное изменение напряжения в достаточно широких пределах.

Самое широкое применение в настоящее время получили трансформаторы со ступенчатым регулированием напряжения (рис. 4.79, *а* и *б*). Это одно- и трехфазные трансформаторы ТШС-1000-1, ТШС-1000-3, ТШС-3000-1 и ТШС-3000-3. Схема трансформатора ТШС-1000-3 показана на рис. 4.80. Для грубого регулирования напряжения в этих трансформаторах служат три отпайки от вторичной обмотки. Более тонко напряжение регулируют дистанционно с помощью контакторов K_1 – K_4, встроенных в первичную цепь трансформатора. Вместо контакторов в трансформаторе этого типа может быть применен контроллер с ограниченными сопротивлениями, позволяющий изменять напряжение без разрыва первичной цепи трансформатора.

Схема с управляемыми вентилями (рис. 4.79, *в*) позволяет плавно регулировать напряжение сварки, что достигается путем изменения угла проводимости управляемых вентилей, включенных встречно-параллельно в цепь первичной обмотки сварочного трансформатора.

В источниках тока с магнитной коммутацией сварочное напряжение регулируют путем подмагничивания постоянным током (с помощью управляющих обмоток w_{yI} и w_{yII}) двух ярм трансформатора и перераспределения основного магнитного тока между ними

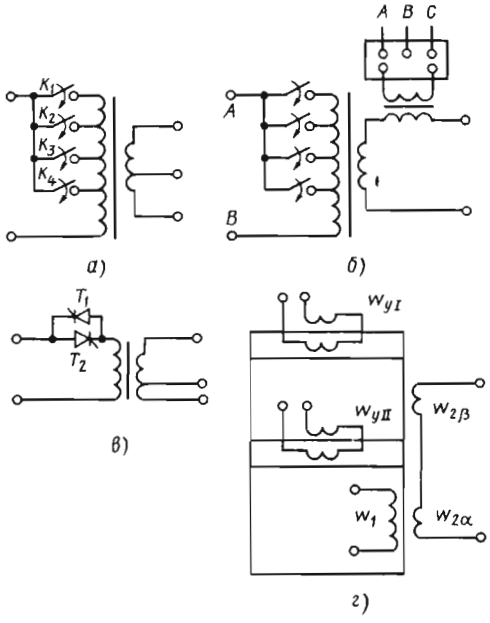


Рис. 4.79. Электрические схемы сварочных трансформаторов с различными способами регулирования напряжения сварки

(рис. 4.79, *г*). Трансформаторы, регулируемые магнитной коммутацией (ТРМК-1000-1, ТРМК-3000-1), по энергетическим и другим показателям близки к нерегулируемым. По сравнению с управляемыми вентилями трансформаторы с магнитной коммутацией надежнее (так как не боятся короткого замыкания и разрыва) и имеют более высокий коэффициент мощности, но обладают пониженными динамическими свойствами.

Трехфазный трансформатор можно использовать как однофазный при удвоенном номинальном токе. Для этого выполняют параллельное соединение двух первичных обмоток и двух вторичных.

В табл. 4.34 приведены краткие сведения о сварочных трансформаторах, получивших наибольшее применение при ЭШС.

Помимо указанных трансформаторов, специально разработанных для ЭШС, могут использоваться и другие универсальные источники питания.

Так, для ЭШС металла толщиной до 250 мм может успешно применяться разработанный в ЦИНИТмаше универсальный сварочный выпрямитель ВДУ-1216. Он позволяет выбирать наиболее оптимальные настройки, отличается простотой эксплуатации. Конструкция и применяемая элементная база обеспечивают высокую ремонтопригодность и надежность в эксплуатации.

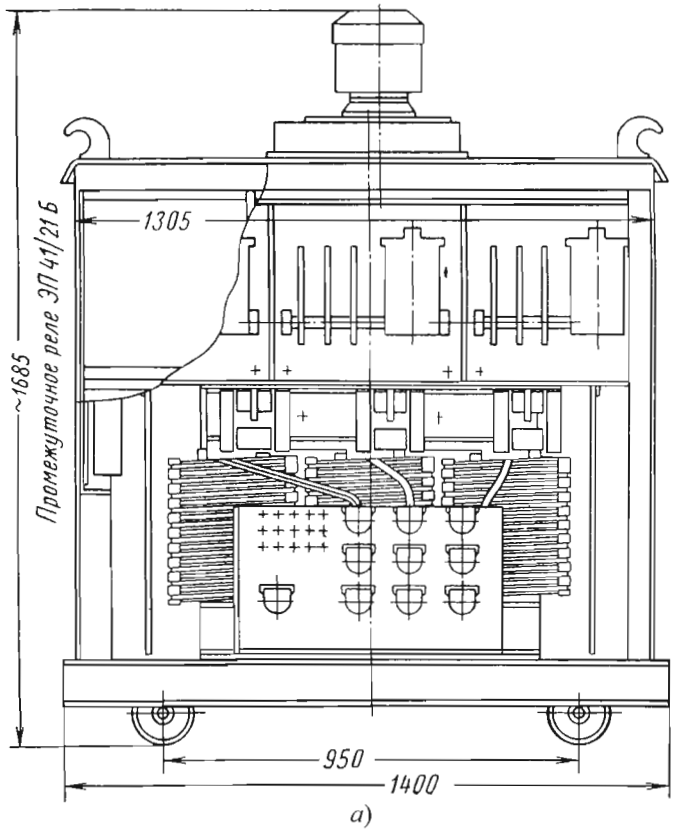
Технические характеристики выпрямителя ВДУ-1216

Номинальный сварочный ток, А	1250
Диапазон регулирования тока, А	250...1250
Напряжение, В:	
холостого хода	≤85
питания	3 × 380
Диапазон изменения напряжения питания, %	+10...–25
Продолжительность работы при номинальном токе, %	100
Диапазон рабочих температур, °С	–20...+45
Охлаждение	Воздушное
Расстояние от пульта управления до выпрямителя, м	150
Габаритные размеры, мм	720×740×1360
Масса, кг	780

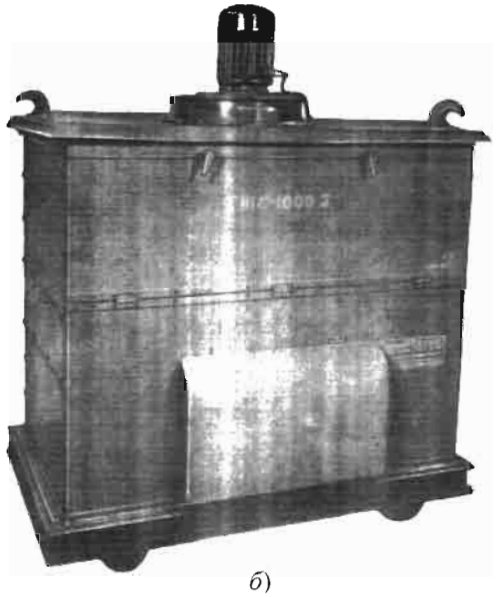
Выпрямитель представляет собой систему автоматического регулирования выпрямленного тока параметрического типа и построен в виде шести однофазных выпрямителей, включенных по дифференциальной схеме с суммированием выходных токов в нагрузке. Регулирование и стабилизация сварочного тока осуществляются электронным блоком управления. Выпрямитель позволяет реализовать практически любую ВАХ при управлении от компьютера или выбрать оптимальную из банка данных и выполнить точную настройку.

Предусмотрена совместная работа двух выпрямителей на одного потребителя, из которых один ведущий, а другой – ведомый.

Эффективным средством улучшения характера кристаллизации металла шва и его механических свойств является использование для сварки модулированного тока. В связи с отсутствием серийного выпуска таких источников предлагается применять устройства, которые могут быть относительно легко изготовлены в заводских условиях. На рис. 4.81 приведена электрическая схема устройства для модуляции тока при ЭШС, предназначенного для совместного использования с источниками



а)



б)

Рис. 4.80. Схема трансформатора ТШС-1000-3

4.34. Типы трансформаторов для ЭШС

Показатели	ТШС-1000-1	ТШС-1000-3	ТШС-3000-1	ТШС-3000-3	ТШС-10000-1	ТРМК-1000-1	ТРМК-3000-1
Напряжение, В:							
питающее сети	380…440		380				
вторичное	56		46	56	41	62	61
Число фаз	1	3	1	3	1		
Номинальная сила тока, А (в фазе / в однофазном исполнении)	1000	1000 / 2000	3000	3000 / 6000	10 000	1000	3000
Пределы регулирования напряжения, В	38…62		5…46	8…63	28,5…41	21…57	18…57
Число ступеней регулирования	18 ступенчатое		10 ступенчатое	48 ступенчатое	4 ступенчатое	3 плавное	
Номинальная мощность, кВ · А	56	170 / 112	138	500 / 340	410	70	190
Габаритные размеры, мм	980×690×1150	1470×900×1715	960×706×780	1360×1335×1505	1370×1300×900	950×730×1600	1220×950×1600
Масса, кг	510	1400	600	2200	1050	700	1300

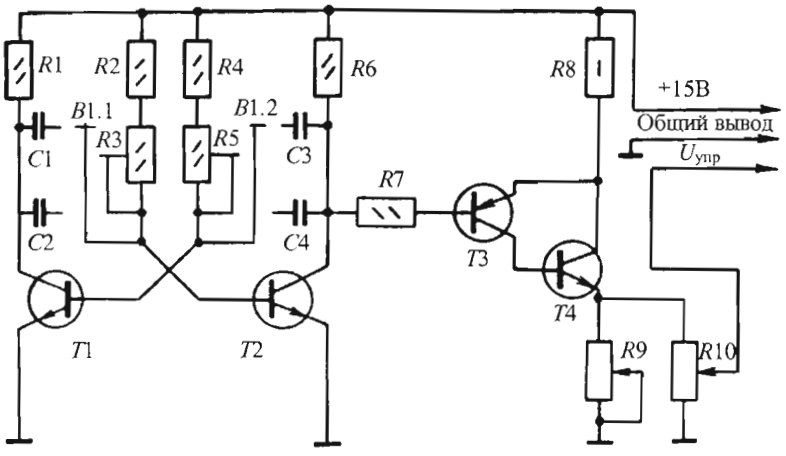


Рис. 4.81. Принципиальная схема для ЭШС модулированным током

сварочного тока типов ВДУ-201 и ВДУ-1601. Устройство может быть выполнено в виде приставки, подключаемой к разъему дистанционного управления в источнике сварочного тока, или как дополнительная плата, размещаемая внутри источника.

Основным элементом схемы является мультивибратор, выполненный на транзисторах *T*1 и *T*2 и служащий задающим генератором для модуляции напряжения. Изменение частоты и скважности модуляции тока осуществляется переменными резисторами *R*3 и *R*5 (плавно) и переключателем *B*1.

Время импульса определяется выражением $t_и = (R_4 + R_5)C$, где C – электрическая емкость конденсатора *C*3 или *C*4 (в зависимости от положения переключателя *B*1).

Время паузы определяется аналогично: $t_п = (R_2 + R_3)C'$, где C' – электрическая емкость конденсатора *C*1 или *C*2.

Сигналы прямоугольной формы, поступающие с коллектора транзистора *T*2, периодически включают (через резистор *R*7) электронный ключ, выполненный на транзисторах *T*3 и *T*4. Переменными резисторами *R*9 и *R*10 регулируются значения сварочного напряжения $U_{упр}$, подключаемого непосредственно к базе транзистора *T*1 в блоке управления источника сварочного тока типа ВДУ. Общий вывод и напряжение питания 15 В подключаются к соответствующим выводам стабилитрона, питающего схему управления источника.

Устройство обеспечивает: частоту модуляции 0,1…20 Гц, скважность 0,1…10, глубину модуляции 1…5.

4.5.3.2. АППАРАТЫ ДЛЯ СВАРКИ И НАПЛАВКИ

В СССР и за рубежом было разработано большое число типов аппаратов для ЭШС, которые нашли применение в промышленности. Они различаются функциональными признаками, технологическими возможностями и конструктивными особенностями.

Аппараты для ЭШС отличаются наличием:

– устройств для удержания сварочной ванны в зазоре между свариваемыми кромками (формирующих устройств);

– механизмов вертикального или наклонного перемещения;

– устройств для автоматического или ручного регулирования скорости вертикального перемещения аппарата;

– специальных механизмов для подачи пластин, стержней или лент при сварке электродами большого сечения;

– устройств для перемещения электродов вдоль зазора между кромками.

Распространение получили аппараты рельсового, безрельсового и подвесного типов для сварки вертикальных швов, обеспечивающих регулируемую подачу трех электродных проволок, удержание сварочной ванны в зазоре, вертикальное перемещение формирующих устройств по мере образования шва, возвратно-поступательное перемещение электродов вдоль ванны.

Большинство автоматов было разработано в ИЭС им. Е.О. Патона (А-535, А-612, А-1170 и др.), а также в Бельгии («Vertomatic S»), Чехословакии (VUZ-ETZ-450, VUZ-ENZ-700), Швеции, Японии и других странах (табл. 4.35).

4.35. Технические характеристики аппаратов для ЭШС

Аппарат	Разработчик	Толщина свариваемого металла, мм	Тип шва	Сила тока на один электрод, А	Число электродов	Диаметр электрода, мм	Скорость, м/ч		Габаритные размеры, мм	Масса, кг
							сварки	подачи проволоки		
А-820К	КЗЭСО	18…70	П	700	1	2,5…3	4…15	58…580	350 × 250 × 650	20
«Vertomatic Jp»	«Arcos»	До 32		500		2	До 1,5	Нет данных		
А-433Р	ИЭС	16…150		750		3	2,6…21	60…400	392 × 440 × 800	75
А-535	ИЭС	16…450	П и К	1000	3		0,4…9	60…480	350 × 250 × 650	380
AV-2-W	«British Oxigen»	100…250			1…3	3,2	–	75…230	–	–
AS-4	VUZ, «Arcos»	30…350		700	3	3	1,7…10	48…285		
VUZ-ETZ-450	VUZ	До 450	П	1000		3,15…4	До 2,5	80…400	2000×1900×4000	1260
«Vertomatic S»	«Arcos»	70…450		800		3,2	До 2,8	До 360	1750×850×1750	–
VUZ-ETZ-700	VUZ	До 700	П и К	1200	4…6	4	0,4…3	60…450	–	
А-1170-2	ИЭС	16…300		1500	2	3…5	0,4…9	14…500	780 × 530 × 1030	400
А-501М	ИЭС	16…100	П	750	1…2	2,5	1…9	96…300	220 × 280 × 420	25
ESM	ESAB	12…40		800	1	3	1,5…12	–	–	–
AS-9	ИС	40…120		1000			0,3…3,2			
SIM-21	«Osaka Transformer»	13…60		800		2,4…3,2	0,6…12			
А-1116	ИЭС	16…250	К	1000	2	3	–	14…500	700×2730×1650	352

Условные обозначения: П – продольные швы; К – кольцевые швы.

Примечание. ИЭС – Институт электросварки им. Е.О. Патона (Украина), ИС – Институт сварки (Польша), «Arcos» – Бельгия, VUZ – Институт сварки (Словакия), Osaka Transformer – Япония, КЗЭСО – Каховский завод электросварочного оборудования.

Наибольшее распространение в России получил трехэлектродный универсальный автомат А-535 (рис. 4.82). Он позволяет выполнять одновременно или в определенной последовательности такие операции:

– подачу в зазор между кромками электродного и дополнительного металла;

– подвод к электродам сварочного тока;

– удержание сварочной ванны в зазоре;

– вертикальное перемещение аппарата и формирующих устройств по мере образования шва;

– возвратно-поступательное передвижение электродов вдоль ванны и др.

Сварочная ванна размещена между формирующими ползунами *12*. Передний ползун связан с подвеской *13* и прижимается к кромкам свариваемого изделия пружиной, действующей на рычаг подвески. Задний ползун подвешен на тяге *8*, пропущенной через зазор между свариваемыми кромками, и прижимается к кромкам при помощи рычага *11* и подпружиненного стакана *10*.

В зону сварки через мундштуки *9* электродные проволоки подаются роликами, расположенными на механизме подачи *14*. Он смонтирован на корпусе *2*, который связан с ходовой тележкой *3*. Тележка снабжена электроприводом и коробкой скоростей. Она перемещается по жесткому вертикальному рельсу *4*. Для переключения скорости перемещения с рабочей на маршевую служит рукоятка *15*. В корпусе *2* находятся пульт управления *1*, механизм возвратно-поступательного перемещения, взаимодействующий с суппортом *19*, и корректоры – поперечный *18* и радиальный *20*.

В аппарате предусмотрены корректоры *7* для регулировки положения электродов в зазоре, корректоры *17* для настройки расстояния между электродами, корректор *21* для регулировки прижима переднего ползуна и др. Рельс *4* подвешен к изделию при помощи кронштейна *5* и прижима *6*. Он снабжен зубчатой рейкой, в зацеплении с которой находится выходная шестерня ходовой тележки. Катушки *16* с проволокой расположены стационарно рядом с рельсом.

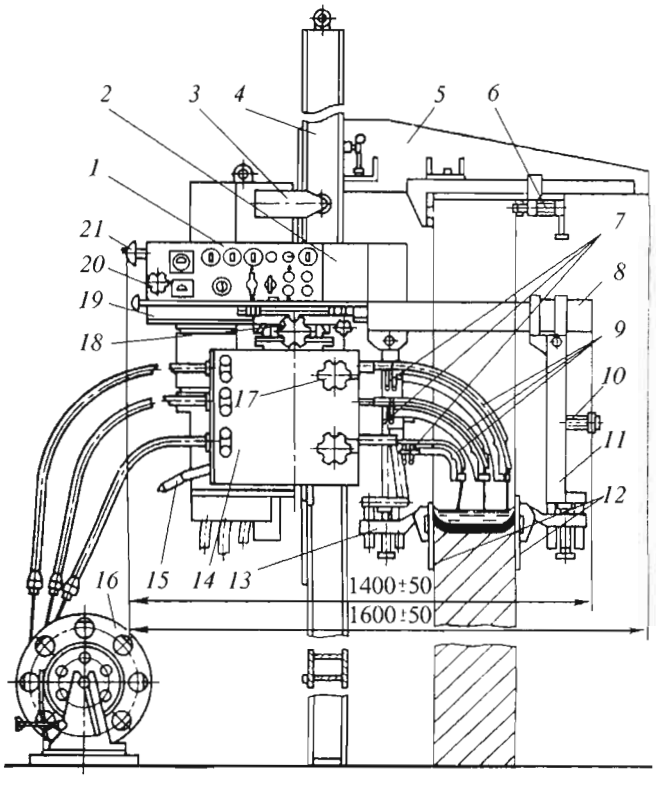


Рис. 4.82. Автомат А-535 рельсового типа для ЭШС проволочными электродами

Аппарат А-535 позволяет сваривать угловые и тавровые соединения (рис. 4.83). Для этого аппарат снабжен специальными удлинителями со специальной подвеской, обеспечивающими надежное прижатие формирующих ползунов одновременно к двум поверхностям соединения деталей. Данный аппарат может применяться и для сварки электродами большего сечения. Для этого на его суппорте устанавливается рама, к которой крепятся пластинчатые электроды, служащие для сварки.

Ниже приведены характеристики основных узлов и механизмов аппаратов для ЭШС.

Ходовые механизмы вертикального движения. Механизм вертикального движения является необходимым узлом аппаратов для ЭШС проволочными электродами. Эти механизмы отличаются друг от друга степенью механизации ходового устройства (ручной или электропривод); способом перемещения вдоль свариваемых кромок (по рельсу, непосредственно по свариваемому изделию); конструкцией прижима к вертикальной стенке (пружиной, магнитом) и характеристикой прижимного устройства.

Механизмы рельсового типа осуществляют движение по жесткой или гибкой направляющей, установленной параллельно свариваемым кромкам. Как правило, они имеют жесткую связь между приводом ходовой тележки и рельсом (см. рис. 4.83).

Рельсовые аппараты обладают рядом преимуществ: позволяют отказаться от специальных устройств для выхода ходового механизма в конце шва, создавать наибольшее число комбинаций узлов при сварке различных швов и изделий, развивать значительные тяговые силы; отличаются надежностью в работе. Как правило, рельс представляет собой балку либо колонну с укрепленной на ней рейкой, или винтом, или гибкой тягой с приводом. Рельс может крепиться к изделию или рядом с ним.

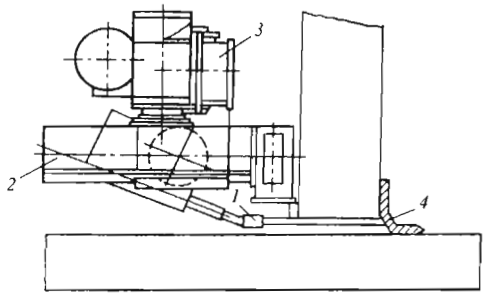


Рис. 4.83. Настройка автомата А-535 при сварке угловых швов:
1 – удлинитель; *2* – суппорт механизма перемещения головки с электродами; *3* – рельс; *4* – формирующая подкладка

Аппараты рельсового типа, в которых связь с рельсом осуществляется за счет трения ведущих роликов под действием пружины, позволяют использовать в качестве рельса угловой прокат (например, А-820К, А-1150 и др.). Недостатками такой системы являются ограниченная тяговая сила и необходимость применения электродвигателей повышенной мощности. При переменной ширине возникает опасность пробуксовки аппарата, приводящая к появлению дефектов сварного шва.

Наиболее надежна конструкция автомата АДК 335, предназначенного для вертикальной сварки с принудительным формированием листовых конструкций толщиной 8...30 мм, сварочной проволокой диаметром 1,6...3 мм. (рис. 4.84). Автомат имеет Г-образный корпус, состоящий из вертикальной стойки *1* и поперечной полки *2*, проходящей через сквозную разделку изделия. Внизу корпуса закреплен ходовой механизм *3* с коническим приводным ходовым колесом с насечкой *4*, а вверху корпуса – шарнир подпружиненного рычага *5*, на котором смонтировано верхнее направляющее гладкое коническое колесо *6*. На конце поперечной полки корпуса *2* с обратной стороны разделки неподвижно фиксируется обойма *7* со вторым направляющим коническим колесом *6*.

Подобная конструкция обеспечивает надежный прижим всех колес к кромкам разделки как за счет пружинного верхнего направляющего колеса *6*, так и в результате силы Q_2, возникающей как реакция на момент, образуемый массой тележки Q_1 и приложенный в центре тяжести *ЦТ*, с катушкой *8*, с приводом *9*, механизмом подачи *10* и мундштуком *11*. Подвеска *12* водоохлаждаемых ползунов *13*, выполненная в виде одноплечного рычага, закреплена на корпусе тележки на одном шарнире *14* и снабжена пружинным устройством *15*.

Автомат АДК 335 может успешно применяться не только для ЭШС, но и для вертикальной дуговой сварки с принудительным формированием шва в широком диапазоне технологических возможностей и при большой номенклатуре свариваемых изделий.

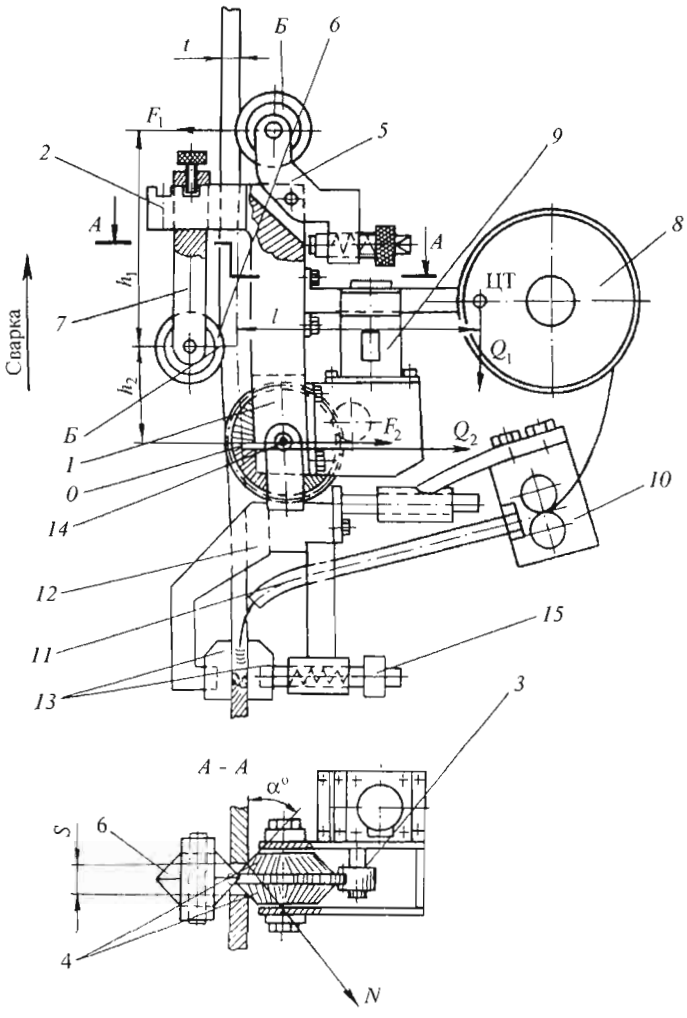
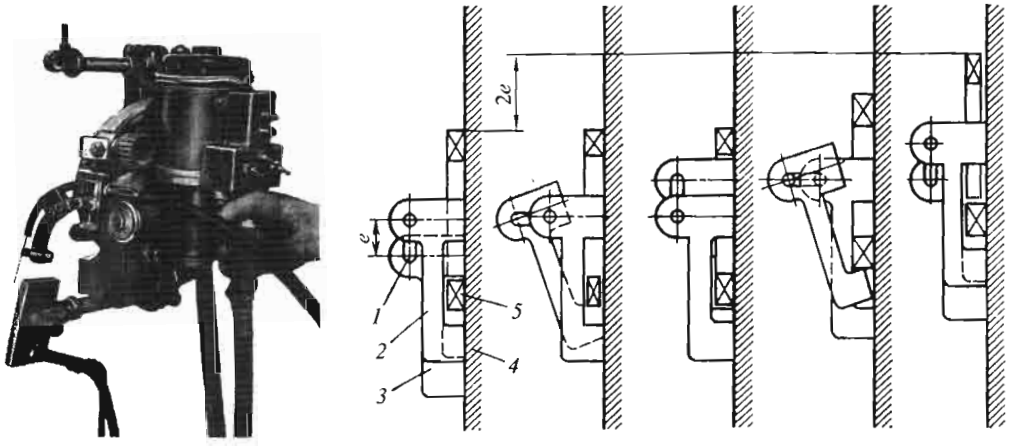


Рис. 4.84. Кинематическая схема автомата АДК 335

Сила для перемещения тележки аппарата в вертикальной плоскости может обеспечиваться отдельно расположенным приводом, закрепленным на свариваемом изделии при помощи струбцины и связанным с аппаратом тросом или шарнирной цепью.

Применяются ходовые механизмы, основанные на магнитном сцеплении рабочего органа с изделием. Такая схема использована в магнитошагающем аппарате А-501М (рис. 4.85, *а*).

На рис. 4.85, *б* показаны четыре стадии полного цикла перешагивания, выполняемого аппаратом А-501М. При вращении коленчатого вала *1* передняя часть магнитов *2* и *3* попеременно отрывается от поверхности *4* свариваемого изделия и "шагает". За полный цикл (два перемещения при одном обороте вала *1*) ходовой механизм перемещается на величину, равную $2e$, т.е. двойному эксцентриситету вала *1*. Для снижения веса сварочной головки и упрощения магнитной коммутации оба магнита находятся в магнитном поле общей электромагнитной катушки *5*. Таким образом, при перешагивании, по крайней мере, один из магнитопроводов всегда прижимается обоими полюсами к поверхности свариваемого изделия, а другой стремится прижаться, так как сила отрыва одного магнитопровода передается в виде реакции другому магнитопроводу и, значит, не снижает полезную силу сцепления с поверхностью изделия.



а) *б*)

Рис. 4.85. Схема работы магнитошагающего аппарата

При сварке стыковых швов, как правило, параллельно стыку укладывают направляющую линейку, закрепляя ее короткими швами-прихватками. Кроме того, к аппарату крепится специальная подвеска для заднего ползуна. Аппаратом можно сваривать угловые швы.

Электрическая схема аппарата А-501М позволяет плавно изменять эффективную скорость вертикального движения. Для надежного перешагивания через различные препятствия имеется возможность кратковременной перегрузки магнитов и электродвигателя. Кроме того, предусмотрены меры безопасности, препятствующие падению головки при случайном или аварийном выключении питания сети.

Одним из важных элементов механизмов вертикального перемещения являются регуляторы скорости перемещения сварочного аппарата при ЭШС. Автоматы для ЭШС, как правило, укомплектованы механизмом подачи электродной проволоки с постоянной скоростью. При несоответствии скоростей сварки и перемещения сварочного аппарата возникает необходимость ручного регулирования скорости передвижения сварочного аппарата. Это требует непрерывного наблюдения за процессом сварки.

Известны способы регулирования перемещения на основе применения датчиков уровня металлической ванны: электрического контактного (внутри шлаковой ванны), радиоизотопного, индукционного, теплового и др. Однако эти датчики не нашли применения вследствие их сложности или низкой надежности. Наиболее надежен регулятор скорости перемещения сварочного аппарата, основанный на применении датчика, контактирующего с поверхностью шлаковой ванны (рис. 4.86). Датчиком служит вольфрамовый стержень *8* диаметром 3...4 мм. Датчик закрепляют на формирующем устройстве *5* через изолирующую прокладку *7*.

Электрическая схема регулятора (рис. 4.87) включает выпрямительный мост *VD1 – VD4*, промежуточное реле *K1*, управляющее реле *K2*, переменные резисторы *R1*, *R2*, сигнальную лампу *H*, тумблер *S1*, кнопку ручной настройки *S2* и обмотку управления *L*.

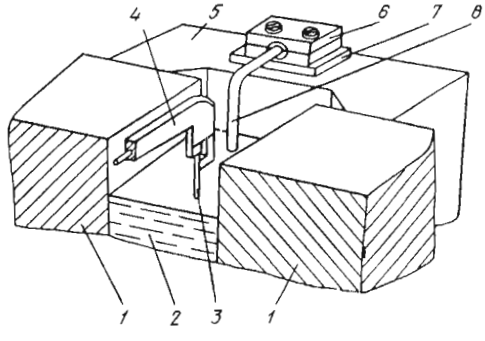


Рис. 4.86. Схема размещения датчика при ЭШС:
1 – свариваемые детали; *2* – шлаковая ванна; *3* – электродная проволока; *4* – токоподводящий мундштук; *6* – крепление датчика (остальные обозначения пояснены в тексте)

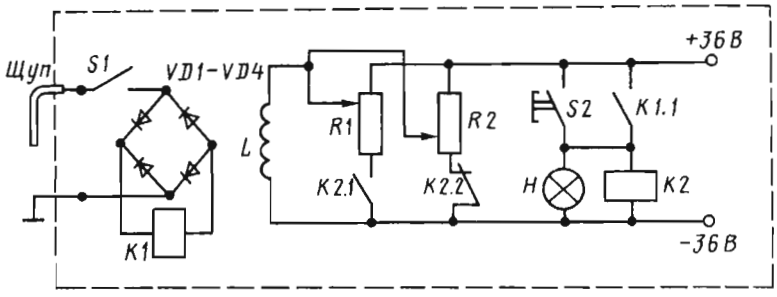


Рис. 4.87. Принципиальная электрическая схема регулятора перемещения сварочного аппарата при ЭШС

В случае увеличения скорости сварки при неизменной скорости движения аппарата конец вольфрамового стержня приходит в соприкосновение с поверхностью шлаковой ванны. Между стержнем и свариваемыми деталями возникает разность потенциалов, которая обеспечивает срабатывание промежуточного реле *K1*. При замыкании контактов *K1.1* срабатывают реле управления *K2* и сигнальная лампа *H*. В результате замыкания контактов *K2.1* и размыкания контактов *K2.2* включается в цепь переменный резистор *R1*. При этом в обмотке управления *L* разность потенциалов возрастает до первоначально заданного значения. Это обусловливает увеличение скорости перемещения аппарата в течение всего времени, пока конец вольфрамового стержня касается поверхности шлаковой ванны. При отсутствии контакта между стержнем и шлаковой ванной включаются реле *K1* и *K2*, аппарат начинает перемещаться с прежней скоростью.

Механизмы подачи электродов. В зависимости от типа применяемых электродов различают механизмы для подачи в сварочную ванну проволок, лент, пластин и стержней.

Механизмы для подачи проволок практически ничем не отличаются от применяемых в аппаратуре для дуговой сварки, и представляют собой привод и вращаемую им систему подающих роликов, которые сжимают проволоку и проталкивают ее в зону сварки. Проволока может подаваться в зону сварки устройством, расположенным непосредственно на подвижной части сварочного аппарата, или через гибкий направляющий канал механизмом, размещенным отдельно от аппарата. Проволока может также подаваться по каналам плавящегося мундштука. Учитывая высокие требования к надежности работы аппаратуры для ЭШС, особые меры необходимо принимать для увеличения усилия проталкивания механизмов подачи электродов.

Важнейшими элементами автоматов для сварки проволочными электродами являются мундштуки для подачи сварочной проволоки. Они обеспечивают ввод электрода в зазор между кромками, нужное расположение конца электрода у поверхности шлаковой ванны и подвод к электроду сварочного тока.

Наиболее надежной для подачи сварочной проволоки оказалась конструкция мундштука, показанная на рис. 4.39. В целях повышения срока службы и уменьшения сопротивления проталкиванию направляющую трубку снабжают сменной спиралью и специальной масленкой для подачи дисульфида молибдена. Медная токоподводящая шина имеет контактную вилку. Для повышения срока службы вилки в нее запрессовывают износостойкие штыри. В процессе эксплуатации по мере износа контактной вилки нарушается ее электрический контакт с мундштуком. Восстановить контактное давление позволяют корректоры.

При сварке сравнительно тонкого металла для уменьшения зазора между кромками применяют мундштуки, расположенные вне сварочного зазора.

Механизм возвратно-поступательного перемещения электродов (*колебания*). Механизм колебания электродов должен обеспечивать следующие элементы режима сварки: скорость колебания электродов, размах их колебания и положение крайних точек его траектории относительно ползунов, длительность остановки ползунов в крайних точках.

Наиболее распространены механизмы колебания электродов с постоянной скоростью, так как они удобны в эксплуатации и обеспечивают необходимый диапазон настройки. Эти механизмы содержат винтовой или реечный

привод, пусковые реле *РП4 – РП6* и конечные переключатели, изменяющие при каждом полуцикле направление вращения электродвигателя *1* (рис. 4.88). При вращении винта *3* гайка перемещает в горизонтальной плоскости головку *4* с мундштуком по суппорту *5*. С головкой *4* связана штанга *6*, которая через упор *10*, плавающий винт *9* и рычаг *12* воздействует на один из конечных переключателей *11*. Это служит сигналом для изменения направления вращения электродвигателя *1*. После изменения направления его вращения электрод некоторое время продолжает находиться в крайней точке колебания. Это достигается благодаря реле времени в схеме электродвигателя. Размах колебания электрода настраивают винтами *8*, закрепленными в ползунах *7*.

В механизмах с переменной скоростью перемещения электрода в течение одного цикла скорость головки изменяется от минимальной у ползунов до максимальной в средней части толщины свариваемого металла. Характер изменения скорости колебания может задаваться кулачковым или кривошипным механизмом. Этот механизм применим главным образом для сварки металла толщиной до 120 мм.

При ЭШС сталей большой толщины (190...450 мм) двумя и тремя электродами в ряде случаев возникает необходимость изменять по заданной программе мощность, выделяемую под каждым электродом, с целью достижения равномерной ширины проплавления металла и увеличения коэффициента формы шва.

Такая возможность появляется при использовании аппаратов для ЭШС, оснащенных тремя независимыми регулируемыми приводами подачи электродов и тремя независимыми плавно регулируемыми источниками питания. Это может быть осуществлено с помощью устройства, показанного на рис. 4.89. Устройство работает следующим образом. После включения привода возвратно-поступательного перемещения электродов напряжением $U_я$ с якоря

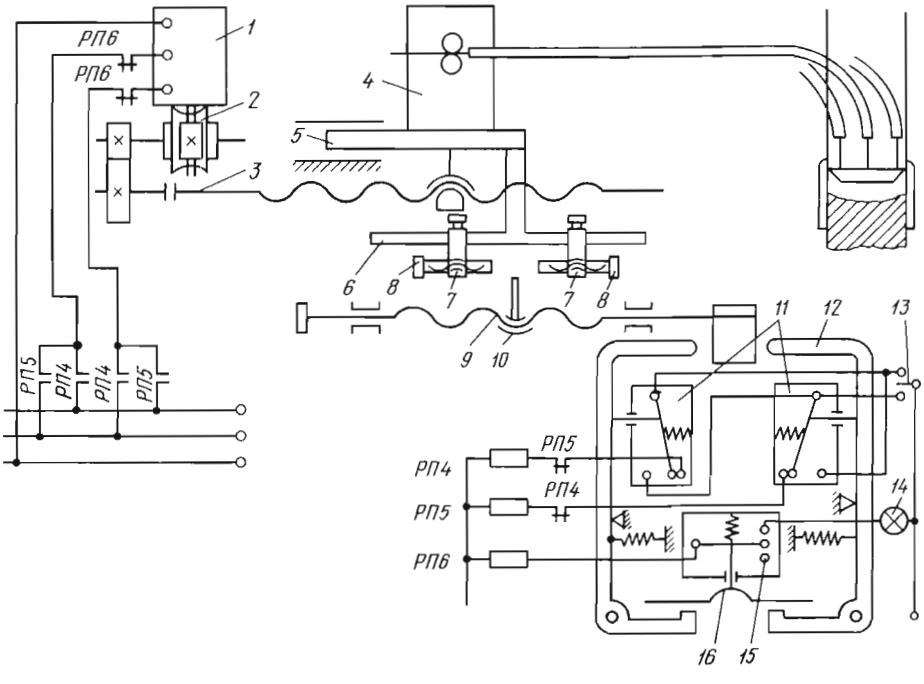


Рис. 4.88. Схема механизма колебания электродов с постоянной скоростью и реверсивным электродвигателем:

1 – электродвигатель; *2* – редуктор; *3* – ходовой винт; *4* – сварочная головка; *5* – суппорт; *6* – штанга; *7* – ползуны; *8* – упорные винты; *9* – плавающий винт; *10* – упор; *11* и *13* – переключатели; *12* – рычаг; *14* – сигнальная лампа; *15* – аварийный выключатель; *16* – пружина

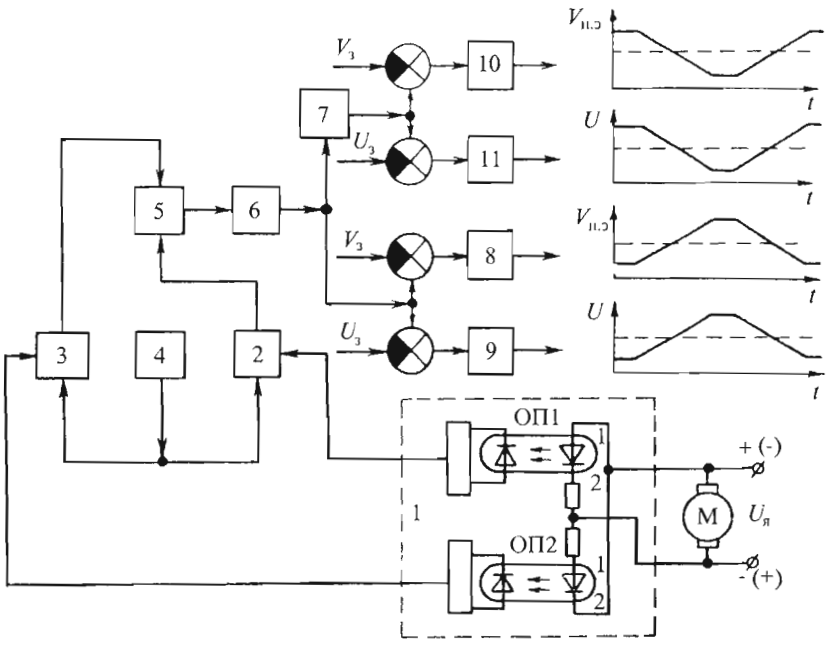


Рис. 4.89. Структурная схема устройства для модуляции мощности

двигателя *M* подается на вход звена полярности и направления счета *1*. Оно выполнено так, что при одной полярности напряжения последнее через оптопару, например *ОП1*, открывает ключ *2* или через *ОП2* ключ *3*; при этом импульсы заданной частоты, вырабатываемые генератором *4*, поступают на суммирующий вход реверсивного счетчика *5*, который осуществляет прямой счет импульсов во время перемещения электродов из одной точки в другую.

Цифровой код с реверсивного счетчика поступает на цифроаналоговый преобразователь *6*, на выходе которого формируется постоянное напряжение, пропорциональное количеству импульсов, поступивших на реверсивный счетчик *5* за время перемещения электродов. Таким образом, цифроаналоговый преобразователь формирует линейно возрастающее напряжение, которое подается на регуляторы скорости подачи *8* и напряжения *9* крайнего электрода. Это же напряжение, но с противоположным знаком через инвертор *7* поступает на регуляторы скорости подачи *10* и напряжения *11* крайнего электрода, перемещающегося в это время от накладки.

После реверсирования привода возвратно-поступательного перемещения электродов на якоре двигателя *M* появляется напряжение противоположного знака. Соответственно, скорость подачи электрода, движущегося от формирующей накладки, и напряжение на нем линейно уменьшаются, а скорость подачи электрода, движущегося к накладке, и напряжение на нем линейно увеличиваются.

Формирующие устройства. К ним относятся детали, обеспечивающие удержание сварочной ванны в зазоре между кромками. В комплект формирующих устройств входят приспособления, обеспечивающие плотное прижатие формирующих деталей к свариваемым кромкам и принудительное охлаждение этих деталей.

При ЭШС проволочными электродами, как правило, для формирования шва применяют подвижные ползуны, представляющие собой медные пластины или набор нескольких пластин, охлаждаемых водой. Различные типы формирующих ползунов показаны на рис. 4.90.

При хорошем качестве сборки заготовок (отсутствии перекоса сопрягаемых кромок) могут применяться жесткие ползуны (см. рис. 4.90). При большом превышении одной из кромок над другой применяют составные, надрезные или шарнирные ползуны.

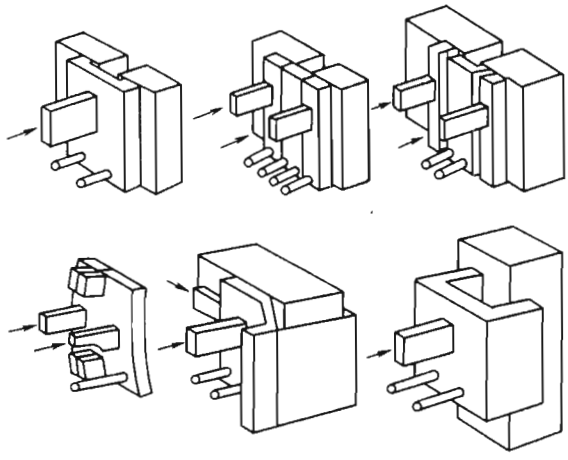


Рис. 4.90. Формирующие ползуны для ЭШС

Надрезной ползун представляет собой пластину с двумя глубокими надрезами. В местах надрезов пластина может принудительно изгибаться в зависимости от положения кромки изделия. Составной ползун состоит из частей, соединенных таким образом, что они могут перемещаться друг относительно друга.

Наиболее часто для формирования шва при ЭШС проволочными электродами применяется конструкция шарнирного ползуна с балансирной подвеской, позволяющего удерживать шлаковую ванну при значительном превышении одной кромки над другой и обеспечивать оптимальное распределение силы прижатия ползуна (см. рис. 4.39).

Шарнирный ползун состоит из трех секций: двух боковых и вставки. В боковых секциях имеются продольные пазы для крепления ползуна на вилке шарнирной подвески аппарата. Боковые секции скреплены между собой верхней и нижней планками. Они охватывают вставку таким образом, что могут перемещаться друг относительно друга вокруг винтов. Подвеска ползуна выполнена в виде параллелограмма с двумя горизонтальными балансирами, что обеспечивает равномерное распределение силы прижатия от пружинного стакана через плавающее основание на боковые секции даже при значительном превышении одной кромки над другой. Кроме того, на ножах имеются вертикальные балансиры, обеспечивающие оптимальное распределение силы прижатия ползуна, большее в верхней части и меньшее внизу.

При ЭШС электродами большого сечения ползуны редко применяются для формирования шва, так как это требует установки дополнительных устройств с механизмами вертикального перемещения, не связанными со сварочным аппаратом. Редко применяются и остающиеся металлические накладки.

Обычно в этих случаях швы формируют с помощью сменных формирующих устройств (накладки, пластины, кокили), которые в процессе сварки остаются неподвижными относительно свариваемых кромок (рис. 4.91). Как правило, с одной стороны стыка устанавливается неподвижная накладка на всем протяжении шва, с другой размещают переставные, наращиваемые в процессе работы накладки. Их прижимают к кромкам по мере подъема сварочной ванны.

Обычно накладки изготовляют из медных пластин толщиной 4...5 мм с выштампованной канавкой для формирования выпуклости шва. К тыльной стороне накладки латунью припаивают две медные трубки диаметром 10...12 мм, соединенные таким образом, что вода по ним течет параллельно.

Для установки формирующих накладок могут использоваться сборочные скобы и клинья, а для наращиваемых чаще всего применяют Г-образные скобы с винтами, приваренные к изделию вдоль стыка (рис. 4.91).

Для формирования шва при сварке угловых, тавровых, нахлесточных и других соединений служат фасонные накладки, повторяющие поверхность шва. Профиль сечения накладок должен быть выбран таким образом, чтобы исключить вероятность затекания шлака и расплавленного металла в узкий зазор с образованием наплывов.

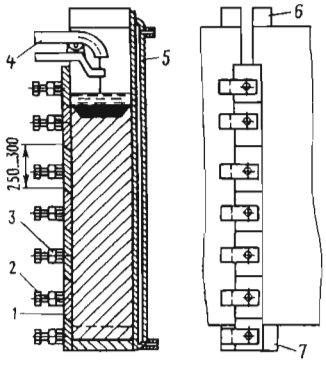


Рис. 4.91. Формирование шва неподвижными переставными накладками:
1 – наращиваемая накладка; *2* – прижимной винт; *3* – Г-образная скоба; *4* – мундштук сварочного аппарата; *5* – неподвижная накладка; *6* – выходной карман; *7* – начальный карман

Аппараты для ЭШС электродами большого сечения применяют при ЭШС сравнительно коротких швов. Конструкция этих аппаратов по сравнению с проволочными значительно упрощена. Она может ограничиться только механизмом вертикального перемещения электрода с регулируемой скоростью. Простейшая схема такого аппарата (А-495) показана на рис. 4.92.

Разработаны специализированные конструкции аппаратов для сварки пластинчатыми электродами: А-550, А-1504, А-1517 и др. Сварку пластинчатыми электродами можно выполнять, используя рельсовые аппараты для сварки электродными проволоками, поскольку скорость сварки и скорость подачи пластинчатых электродов соизмеримы. И, наконец, сварку пластинчатым электродом можно осуществить при наличии соответствующего источника питания с помощью любого механизма, обеспечивающего вертикальное перемещение установленной на нем пластины с требуемой скоростью. Подключение электродов к источникам питания при этом может проводиться по одно- и трехфазной (см. рис. 4.23), а также бифилярной схемам (см. рис. 4.24).

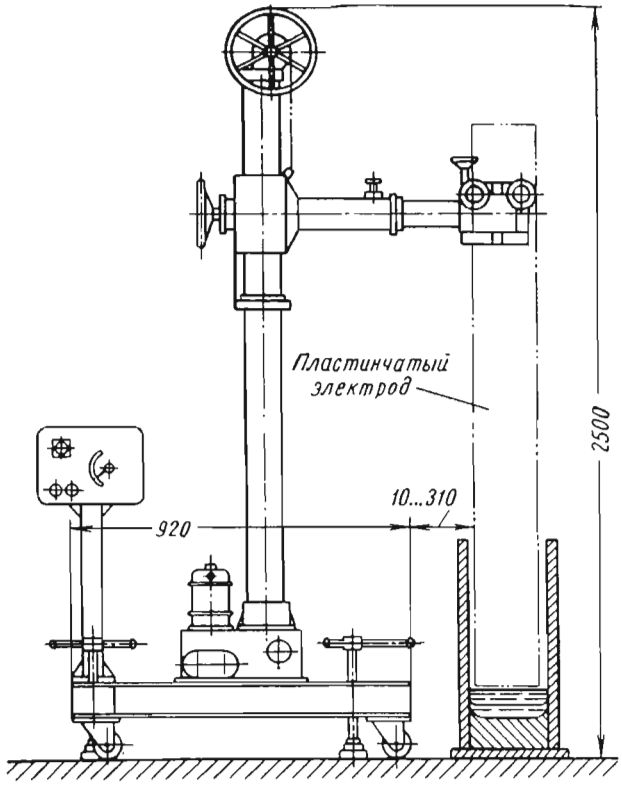


Рис. 4.92. Аппарат для сварки пластинчатым электродом

Аппараты для сварки плавящимся мундштуком. Сварка плавящимся мундштуком – наиболее универсальный процесс ЭШС, позволяющий выполнять самые разнообразные швы, в том числе криволинейной формы, переменного сечения, большой (практически неограниченной) толщины, тавровые, крестообразные соединения и т.д. Оборудование для ЭШС плавящимся мундштуком также является наиболее простым, так как включает в себя помимо источников питания только подающие механизмы для подачи соответствующего числа сварочных проволок и токоподводы к мундштуку.

За рубежом широкое распространение получили одноэлектродные аппараты, предназначенные для сварки металла толщиной до 60 мм (табл. 4.36). Эти аппараты состоят практически из двух блоков: механизма подачи с пультом управления и подвески плавящегося мундштука с токоподводом и системой корректоров. В качестве плавящегося мундштука в этих аппаратах, как правило, используется стальная трубка, покрытая изоляционным шлакообразующим слоем.

Недостатком этих аппаратов является ограниченная толщина свариваемого металла и довольно дорогостоящие плавящиеся мундштуки.

Для ЭШС плавящимся мундштуком получили распространение полуавтоматы А-645М и А-1304, которые крепятся на изделии, обеспечивая подачу соответственно шести и четырех проволок. При необходимости обеспечить подачу большего числа сварочных проволок на изделии устанавливают несколько полуавтоматов, работающих одновременно. С использованием подающих механизмов этого типа была создана специализированная 36-электродная установка А-1374 (рис. 4.93), оснащенная нагревательными индукционными устройствами мощностью 1500 кВт для предварительного и сопутствующего подогрева свариваемых частей и освоенная Ижорским заводом для электрошлаковой сварки заготовок роторов турбогенераторов сечением 2000 × 2650 мм.

4.36. Одноэлектродные аппараты для сварки металла

Аппарат	Разработчик-изготовитель	Толщина свариваемого металла, мм	$I_{св}$, А	n, шт.	d_e, мм	Примечание
ES	«Daiden» (Япония)	10…60	600	1	2,4	Трубчатый мундштук
SES	«YWE» (Япония)	12…60	780			
A6	«ESAB» (Швеция)	15…60	550		3	
«Owen 11»	«Rubery Owen» (Великобритания)	12…60	800		3,2	
CNIW	«British Oxigen» (Великобритания)	19…76				
EN-1	«Union Carbide» (США)	35…50				
«Porta Slag»:	«Hobart» (США)				2,4…3,2	Трубчатый мундштук, с колебаниями
w, x		12,5…60	750			
w, y		60…125				
w, z		125…300	1500	2		
A-645	ИЭС (Украина)	До 400	3000	6	3	Плоский мундштук
A-1304	ИЭС, КЗЭСО (Украина)			4	3…5	
A-1126	ИЭС (Украина)	До 300	2000	4…6	3	
A-1374		До 2500	2000 × 3	18		

Условные обозначения: $I_{св}$ – сварочный ток; n – число электродов; d_e – диаметр электрода.

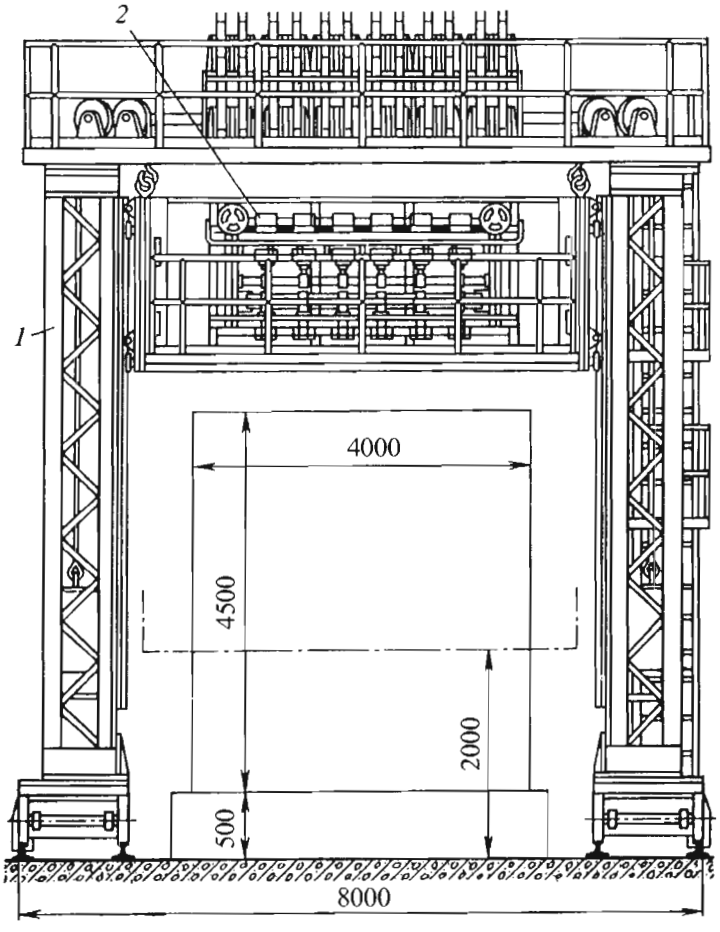


Рис. 4.93. Схема трехфазного подключения к источнику питания электродов большого сечения

На общей раме *1* этой установки смонтировано шесть механизмов подачи *2* от одной до шести проволок. Мундштуки подключают к трехфазному источнику питания или к трем однофазным источникам, включенным по трехфазной схеме.

Аппарат А-1374 рассчитан на выполнение сварки с подачей в каналы плавящегося мундштука до 18 проволок (по три проволоки на каждом механизме подачи). Остальные проволоки резервные, и их подают в тех случаях, когда одна из основных проволок перестает поступать в сварочную ванну вследствие прихватывания в канале мундштука или по другой причине. Поскольку следить за равномерностью подачи многих проволок затруднительно, аппарат снабжен специальной системой сигнализации.

В правильных механизмах каждая из подаваемых проволок увлекает за собой два холостых ролика (ведомый и прижимной). Ведомый ролик имеет кулачок, который периодически нажимает на выключатель. Последний своими контактами разряжает конденсатор в цепи сигнальной лампочки. Если подача отсутствует, конденсатор продолжает заряжаться до тех пор, пока не загорится сигнальная лампочка.

Перспективной разновидностью ЭШС плавящимся мундштуком является сварка с введением металлической крупки. Схема ЭШС с подачей крупки и конструкции мундштуков показаны на рис. 4.94 и 4.95. При наличии мощного источника тока и надежно работающих дозаторов можно при осуществлении этого процесса полностью отказаться от применения дополнительной подачи электродных проволок.

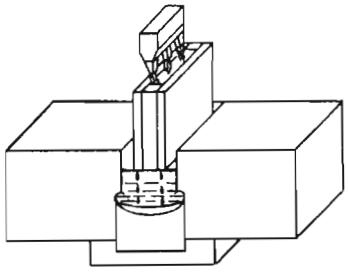


Рис. 4.94. Схема ЭШС плавящимся мундштуком с подачей крупки

Аппараты для электрошлаковой наплавки. Электрошлаковую наплавку выполняют аппаратами, используемыми для сварки, или на специализированных установках. При наплавке на сварочных аппаратах снимают заднюю подвеску, а передний ползун заменяют специальным.

Для наплавки цилиндрических изделий целесообразно применение секционных токоподводящих кристаллизаторов. При наплавке в них отсутствует электрическая связь между наплавляемым изделием и присадочным металлом, что позволяет использовать в качестве наплавочных материалов порошки, дробь, жидкий металл, проволоку, стружку. Возможно осуществление вращения шлаковой ванны в горизонтальной плоскости. Время пребывания присадочного металла в перегретом вращающемся шлаке увеличено в сравнении с традиционным электрошлаковым процессом, что дает возможность повысить эффективность металлургической обработки металла шлаком, получить разнообразные композиции наплавленного металла, выбрать оптимальную схему плавления присадочного металла и управлять тепловыделением в различных зонах кристаллизатора.

Для электрошлаковой наплавки плоских изделий рекомендуется схема ленточной или многоэлектродной наплавки на горизонтальной поверхности. Для осуществления этого процесса следует применять флюс, шлак которого должен иметь достаточную электропроводность. Флюс насыпают только с одной стороны – перед лентой. Процесс, начинающийся как дуговой, быстро переходит в электрошлаковый. За электродом остается длинная сварочная ванна, покрытая расплавленным, медленно остывающим шлаком. Для управления течением расплавленного металла предложено использовать управляющие магниты, например два автономных электромагнита, сердечники которых направлены на края ленты так, чтобы южный полюс всегда был слева, а северный – справа относительно направления наплавки (рис. 4.96).

Недостатками этого процесса являются наличие за электродом открытой, раскаленной, медленно остывающей шлаковой ванны и необходимость подбирать и тщательно контролировать режим магнитного управления в каждом конкретном случае.

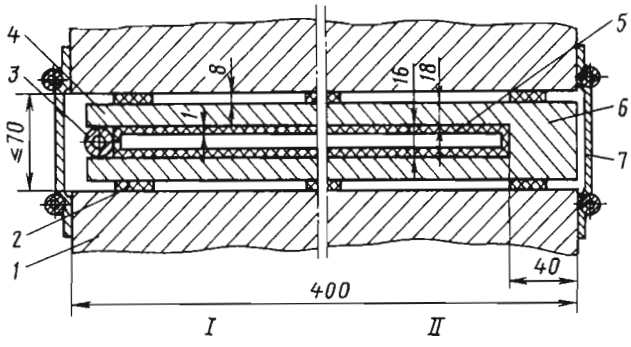


Рис. 4.95. Конструкция плавящихся мундштуков для ЭШС с использованием дополнительной присадки в виде крупки:

I – с подачей электродных проволок в районе формирующих устройств; *II* – без подачи электродных проволок; *1* – свариваемое изделие; *2* – изолятор; *3* – канал для подачи электродной проволоки; *4* – пластина плавящегося мундштука; *5* – изоляционный слой; *6* – коробчатый плавящийся мундштук; *7* – формирующее устройство

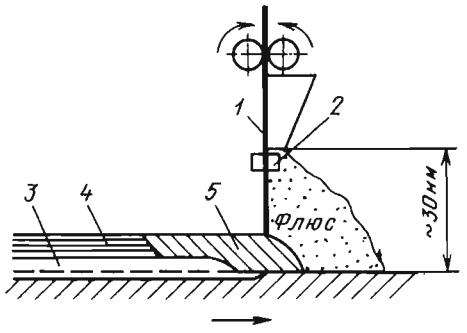


Рис. 4.96. Схема электрошлаковой горизонтальной наплавки:
1 – электродная лента; *2* – токоподвод; *3* – наплавленный металл; *4* – затвердевающий шлак; *5* – жидкий шлак

4.5.3.3. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УНИВЕРСАЛЬНОГО СВАРОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ЭШС

Специализированное оборудование для ЭШС создавалось главным образом в 60 – 80-е годы, в период широкого внедрения этого процесса на предприятиях тяжелого машиностроения. В настоящее время серийного производства этого оборудования практически нет и оснащение предприятий необходимыми установками выполняется по индивидуальным заказам.

При относительно небольших объемах применения ЭШС целесообразно использовать сварку плавящимся мундштуком, для осуществления которой могут служить универсальные сварочные аппараты, обеспечивающие подачу необходимого числа сварочных проволок.

Например, для этих целей могут быть использованы разработанные и изготавливаемые в ЦНИИТмаше головки «Парс» для автоматической сварки в модульном исполнении. Модульная система оборудования, предназначенная для создания сварочных установок любой сложности, обеспечивает высокую гибкость, эксплуатационную надежность и выполнение требований, предъявляемых к оборудованию.

В соответствии с конкретными задачами и потребностями предприятия может быть спроектирован соответствующий аппарат на базе имеющихся модулей, необходимых вспомогательных устройств, а также поставляемого комплексного оборудования, в состав которого могут быть включены источники питания, колонны для монтажа сварочных автоматов, манипуляторы и роликовые вращатели для производства сосудов, модули линейного перемещения – как стандартные, так и изготовленные по специальному заказу. Может быть осуществлена техническая помощь в освоении этого оборудования применительно к конкретным задачам, стоящим перед предприятием.

4.5.4. ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ ДЛЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ

Источники питания для сварки плавящимся электродом – наиболее распространенный и многообразный вид сварочного оборудования, неотъемлемая часть любого поста дуговой сварки.

Различают источники питания для ручной дуговой сварки (РДС) штучным электродом, для полуавтоматической и автоматической сварки сплошной или порошковой проволокой в защитных газах или под слоем флюса; одно- или многопостовые, использующие энергию электрической сети или двигателей внутреннего сгорания; источники общепромышленного назначения и специализированные, созданные для решения конкретных технологических задач.

Ниже приведены основные сведения об источниках питания для дуговой сварки плавящимся электродом общего назначения: принятая терминология, содержание и обозначение базовых технологических характеристик, требования, которым должны соответствовать источники питания для многолетней высококачественной и безопасной работы. Рассмотрены наиболее распространенные, апробированные практикой технические решения, даны элементы инженерного расчета сварочных трансформаторов, выпрямителей, инверторов и постовых регуляторов тока.

Номинальный режим работы источника – заданный изготовителем режим, при котором источник питания сохраняет работоспособность в течение всего установленного срока службы. Номинальному режиму работы соответствует установившееся тепловое состояние источника. В правильно сконструированном аппарате температура его активных компонентов – обмоток трансформаторов и дросселей, магнитопроводов, электронных приборов – в номинальном режиме близка к допустимым значениям, но не превышает их. Основной параметр номинального режима – номинальный сварочный ток $I_{2ном}$. Напряжение на выходных зажимах источника при нагрузке его номинальным сварочным током называется номинальным рабочим напряжением $U_{2ном}$.

Значения $I_{2ном}$ и $U_{2ном}$ даются как действующие для переменного тока и средние для постоянного тока.

Номинальные значения сварочного тока и рабочего напряжения, как и любые значения сварочного тока и рабочего напряжения, во всем диапазоне регулирования источника питания связаны соотношениями:

– РДС штучными электродами:

при I_2 до 600 А $U_2 = (20 + 0{,}04\ I_2)$ В,

при I_2 >600 А $U_2 = 44$ В;

– сварка проволокой сплошного сечения в инертных или активных газах и сварка самозащитной порошковой проволокой:

при I_2 до 600 А $U_2 = (14 + 0{,}05\ I_2)$ В,

при I_2 >600 А $U_2 = 44$ В;

– дуговая сварка под флюсом:

при I_2 до 1000 А $U_2 = (19 + 0{,}037 I_2)$ В,

при $I_2 = (1000...2000)$ А $U_2 = (13 + 0{,}0315\ I_2)$ В.

Номинальный ток источника питания связан с номинальным режимом работы, на который рассчитан данный источник. Нагрузка источника для дуговой сварки, как правило, переменна – процесс сварки состоит из ряда повторяющихся циклов длительностью $T_ц$, в которых рабочий период $T_р$ чередуется с паузой $T_ц$, необходимой для смены электрода, подготовки к наложению последующего шва и т.п.

Согласно стандартам на сварочные источники различают три типовых режима работы.

1. Продолжительный – режим работы при неизменной нагрузке.

2. Перемежающийся – режим, при котором работа с неизменной нагрузкой чередуется с работой в режиме холостого хода. Режим характеризуется относительной продолжительностью нагрузки ПН = $T_р$ / $T_ц$, или в процентах ПН = ($T_р$ / $T_ц$) 100 %.

3. Повторно – кратковременный режим, при котором рабочие периоды чередуются с периодами отключения силовой цепи источника от сети. Режим характеризуется относительной продолжительностью включения ПВ = $T_р$ / $T_ц$, или в процентах ПВ = ($T_р$ / $T_ц$) 100 %.

На продолжительный режим работы рассчитаны, как правило, источники для автоматической сварки на номинальный ток >630 А. Источники для сварки штучным электродом, согласно стандартам на трансформаторы и выпрямители для ручной дуговой сварки, предназначены для перемежающегося режима с $T_ц$ = 5 мин, источники для полуавтоматической сварки работают в повторно-кратковременном режиме с циклом $T_ц$ = 10 мин.

В технической документации на источник и на заводском щитке указано номинальное значение ПН или ПВ, соответствующее работе при $I_2 = I_{2ном}$, $U_2 = U_{2ном}$. Длительно допустимый по нагреву ток источника $I_{2дл}$ связан с номинальным током и номинальным режимом работы соотношением: $I_{2дл} = I_{2ном}\sqrt{ПН}$ или $I_{2дл} = I_{2ном}\sqrt{ПВ}$.

Нередко возникает необходимость определить конкретное значение ПН, соответствующее сварочному току $I_2 \neq I_{2ном}$, или значение тока I_2, отвечающее заданной ПН, ПН $\neq$ $ПН_{ном}$. Задача решается из условия непревышения допустимого длительного тока:

$$ПН = ПН_{ном}(I_{ном} / I_2)^2;$$

$$I_2 = I_{2нно}\sqrt{ПН_{ном} / ПН}.$$

Например, источник питания на номинальный ток 315 А с $ПН_{ном}$ = 60 % может работать с ПН = 80 % при токе $I_2 = 315\sqrt{60/80} =$ = 273 А, а сварочному току I_2 = 350 А соответствует ПН = $60(315/350)^2$ = 48 %.

Номинальные значения сварочного тока, рабочего напряжения и режима работы определяют производные параметры источника: коэффициент полезного действия η, коэффициент мощности cos φ и потребляемый от сети (первичный) ток I_1. Эти параметры измеряют при работе источника на активную нагрузку в установившемся тепловом режиме. Мощность источника $P_{ном} = U_{2ном}I_{2ном}$, Вт; входная мощность для однофазных источников $S_{ном} = U_{1ном}I_{1ном}$, В · А и $S_{ном} = \sqrt{3}\ I_{1ном}U_{1ном}$, В · А для источников с трехфазным питанием, где $I_{1ном}$ – среднее значение линейных токов трех фаз питающей сети. Потребляемая мощность $P_{1ном}$ измеряется ваттметрами, номинальные значения коэффициентов полезного действия и мощности определяются соотношениями

$$\eta_{ном} = P_{2ном} / P_{1ном}; \quad \cos\varphi_{ном} = P_{1ном} / S_{1ном}.$$

К номинальным параметрам источника относятся также класс его изоляции по нагревостойкости, характеристика климатических условий его эксплуатации, категория размещения, масса и габаритные размеры.

Понятное стремление изготовителя источника питания снизить расход активных материалов (обмоточных проводов, шин, трансформаторной стали) приводит к повышению рабочей температуры узлов источника, прежде всего обмоток силовых трансформаторов и дросселей. Изоляция обмоточных проводов, межслоевая изоляция обмоток, пластмассовые детали их крепления и другие детали, соприкасающиеся с токоведущими частями конструкции источника, должны выдерживать нагрев без изменения своих свойств в течение всего срока службы источника (как правило, 5 лет *при двухсменной работе*). Большинство промышленных источников питания изготовляют по классам нагревостойкости B, F и H с допустимым превышением температуры обмоток над температурой окружающего воздуха соответственно 85, 110 и 135 °С. Для однослойных обмоток допускается увеличение этих значений на 10 °С.

Источники общего назначения производят для работы в умеренном (У) или умеренно-холодном (УХЛ) климате. Тропическое (Т) исполнение предусмотрено для поставок на экспорт, в страны с тропическим климатом.

В зависимости от вида помещений, в которых предстоит работать источникам, они выпускаются по четырем категориям размещения. По категории 1 оборудование может использоваться на открытом воздухе, категория 2 требует навеса или палатки, категории 3 соответствует работа в закрытом, но сыром и неотапливаемом помещении с колебаниями температуры от –40 до +40 °С. По категории размещения 4 оборудование должно размещаться в закрытом отапливаемом помещении с колебаниями температуры от 1 до 35 °С. Источники для дуговой сварки плавящимся электродом изготовляются, в основном, в климатическом исполнении У категорий размещения 2 и 3. Исключение составляют источники, работающие в составе автоматов и полуавтоматов с водяным охлаждением (УХЛ4), и агрегаты с двигателями внутреннего сгорания (У1).

Техника безопасности. По способу защиты человека от поражения электрическим током промышленные источники питания относятся к классам 0I и I. Они имеют рабочую изоляцию и элемент для заземления (зануления), надежно связанный со всей оболочкой источника. Бытовые сварочные источники относятся к классу II, они снабжены двойной изоляцией и не содержат элемента для заземления.

Выполнение требований по заземлению источника питания является важнейшим требованием безопасности сварочных работ. Заземлению подлежит не только оболочка источника, но и так называемый обратный провод – провод, соединяющий источник со свариваемым изделием. Для этой цели в сварочных трансформаторах для РДС должен быть элемент заземления на одном из выходных зажимов, а в выпрямителях возможность заземления должны иметь оба выходных зажима, поскольку сварка может проводиться как на прямой, так и на обратной полярности. Выполнение данного требования обязательно, так как это защищает сварщика от поражения электрическим током при возможном пробое первичного контура источника на вторичный, соединенный с электрододержателем, находящимся в руке сварщика.

При сварке одного изделия двумя или более дугами источники сварочного тока должны включаться синфазно, чтобы исключить возможность появления на электрододержателях двух работающих рядом сварщиков удвоенного значения напряжения холостого хода источника Это требование относится как к источникам переменного тока, так и к сварочным выпрямителям: нельзя сваривать одно изделие одновременно на прямой и обратной полярностях.

Допустимое напряжения холостого хода источников питания определено ГОСТ 12.2.007.8–75 и ПУЭ: 80 В (действующее значение) – трансформаторы для ручной сварки, 140 В (действующее значение) – трансформаторы для автоматической сварки и 100 В (среднее значение) – сварочные выпрямители.

Конструкция всех источников сварочного тока должна удовлетворять требованиям безопасности по ГОСТ 12.2.007.0–75, 12.2.007.8–75 и 12.1.003–83.

Требования безопасности, относящиеся к оболочке (корпусу) источника, определены ГОСТ 14254–96.

Оболочка источника должна иметь степень защиты (IP – index protection) IP21 или IP22. Первая цифра индекса означает, что обеспечена защита от попадания внутрь оболочки пальцев или предметов длиной ≤80 мм и от проникновения твердых тел размером >12 мм. Вторая цифра обозначает степень защиты от попадания воды. Все источники для дуговой сварки, кроме трансформаторов для автоматической сварки под флюсом, имеют

степень защиты IP22, допускающую падение водяных капель под углом 15° к вертикали.

Каждому источнику присваивается условное обозначение типа изделия, которое состоит из буквенной и цифровой частей. Первая буква означает вид изделия (Т – трансформатор, В – выпрямитель, У – установка), вторая – вид сварки (Д – дуговая), третья – способ сварки (Ф – под флюсом, Г – в защитных газах, отсутствие буквы означает ручную дуговую сварку); четвертая дает дальнейшее пояснение исполнения изделия (Ж или П – с жесткими или падающими внешними характеристиками, М или Э – с механическим или электрическим регулированием). Две или три цифры после дефиса указывают значение номинального сварочного тока, округленного в десятках ампер, последующая цифра – регистрационный номер изделия. Следующая цифра – это номер модификации (если таковая имеется), а последующие буква и цифра – климатическое исполнение и категория размещения. Так, наименование изделия ТДМ-317-1У2 читается следующим образом: трансформатор для РДС с механическим регулированием на ток 315 А, регистрационный номер 7, модификация 1 (с ограничителем напряжения холостого хода), исполнение У, категория размещения 2.

Пример записи обозначения изделия при его заказе: трансформатор сварочный ТДМ-317-1У2, 380 В, 50 Гц, ГОСТ 95–77.

Сварочные свойства источников питания. Качество процесса дуговой сварки плавящимся электродом определяется множеством факторов. При сварке штучным электродом большое значение имеют правильный выбор типа и диаметра электрода, силы тока, подготовка поверхности изделия к сварке и мастерство сварщика. При полуавтоматической сварке в среде защитных газов важно обеспечить хорошую защиту шва, равномерную подачу электрода, надежный контакт электрода с наконечником сварочной горелки. Сварка под слоем флюса требует поддержания постоянства длины дуги и полноценной флюсовой защиты.

Однако и квалифицированный сварщик, используя хорошие сварочные материалы и исправное оборудование, не получит удовлетворительных результатов, если источник питания не обладает необходимыми сварочными свойствами. Источник должен способствовать легкому возбуждению дуги, стабильному ее горению, равномерному, без больших брызг, переносу электродного металла, высококачественному формированию сварного шва.

Оценка сварочных свойств источника выполняется в соответствии с ГОСТ 25616–83 «Источники питания для дуговой сварки. Методы испытания сварочных свойств». В табл. 4.37 изложена методика оценки источников для ручной дуговой сварки. Оценка ведется по пятибалльной системе, оцениваются пять сварочных свойств источника.

4.37. Методика оценки источников для РДС

Сварочное свойство	Критерий оценки	Балл	Оценка свойства	Количественная и качественная характеристики свойств
Надежность зажигания	Число попыток до первой успешной	1	Плохая	Редкое зажигание или отсутствие зажигания
		2	Низкая	Зажигание после многократных соприкосновений электрода с изделием и привариваний электрода
		3	Удовлетворительная	Зажигание после трех-четырех соприкосновений
		4	Хорошая	Зажигание после легкого движения по металлу
		5	Высокая	Зажигание сразу после прикосновения электрода к изделию

Продолжение табл. 4.37

Сварочное свойство	Критерий оценки	Балл	Оценка свойства	Количественная и качественная характеристики свойств
Устойчивость и стабильность процесса сварки	Частота обрывов, вибрация дуги, звуковой эффект	1	Плохая	Неустойчивое горение дуги с частыми обрывами
		2	Низкая	Неравномерно горящая, вибрирующая дуга с редкими обрывами
		3	Удовлетворительная	То же, без обрывов
		4	Хорошая	Равномерно горящая дуга с незначительной вибрацией и хрустящим шумом (треск)
		5	Высокая	Спокойно, равномерно горящая дуга без вибраций (мягкое шипение)
Устойчивость при значительном удлинении дуги	Разрывная длина дуги, реакция на растяжение дуги	1	Плохая	При попытке удлинения дуга сразу обрывается
		2	Низкая	Приходится постоянно поддерживать короткую дугу при незначительном удлинении дуги
		3	Удовлетворительная	Дуга удлиняется до двойного диаметра стержня электрода при заметном изменении интенсивности расплавления электрода
		4	Хорошая	Дуга удлиняется до тройного диаметра стержня при небольшом изменении интенсивности расплавления электрода
		5	Высокая	Дуга удлиняется до тройного (или более) диаметра стержня электрода при практически неизменной интенсивности расплавления электрода
Характер переноса электродного металла	Разбрызгивание металла, размер и число капель	1	Плохая	Очень много крупных, трудноудаляемых брызг вблизи шва
		2	Низкая	Много крупных, трудноудаляемых брызг вблизи шва
		3	Удовлетворительная	Умеренное число крупных и мелких, легкоудаляемых брызг вблизи шва
		4	Хорошая	Мелкие брызги, равномерно распределенные вблизи шва
		5	Высокая	Мало мелких брызг на поверхности образца

Окончание табл. 4.37

Сварочное свойство	Критерий оценки	Балл	Оценка свойства	Количественная и качественная характеристики свойств
Качество формирования шва	Равномерность валика по ширине и высоте, чешуйчатость, наличие шлаковых включений и пор	1	Плохая	Валик, неравномерный по ширине и высоте, крупночешуйчатый, с видимыми шлаковыми включениями и порами
		2	Низкая	Валик, неравномерный по ширине и высоте, крупночешуйчатый
		3	Удовлетворительная	Валик крупночешуйчатый с отдельными неровностями по высоте и превышениями по кромке шва
		4	Хорошая	Валик мелкочешуйчатый с редкими небольшими неровностями по высоте и небольшими превышениями по кромкам
		5	Высокая	Валик равномерный, гладкий или мелкочешуйчатый с плавным переходом к основному металлу

Источники питания для сварки в защитных газах оцениваются по трем свойствам: надежности зажигания, характеру переноса металла (разбрызгивание) и по качеству формирования сварного шва. Зажигание, которое устанавливается после не более трех коротких замыканий, считается удовлетворительным. Характер переноса металла признается удовлетворительным, если коэффициент потерь на угар и разбрызгивание ≤5…12 %. Качество формирования шва будет удовлетворительным, если отношение высоты валика к его ширине ≤0,3…0,6, длина подрезов <1 мм, а их число ≤3 на 250 мм валика шва.

Внешние характеристики источников. Сварочные качества источника питания определяются его статическими и динамическими внешними характеристиками. Статической внешней характеристикой источника питания называют зависимость напряжения на его выходных зажимах от сварочного тока. Традиционно внешние характеристики разделяют на падающие (ПВХ) и жесткие (ЖВХ). Внешнюю характеристику источника считают падающей, если в диапазонах регулирования сварочного тока при возрастании тока на 100 А напряжение падает более чем на 7 В. Внешнюю характеристику называют жесткой, если в пределах диапазона регулирования тока при его возрастании на 100 А напряжение падает менее чем на 7 В или возрастает менее чем на 10 В.

Вид внешней характеристики источника определяется его назначением (для РДС, для сварки под слоем флюса или в среде защитных газов) и способом подачи электродного металла: сварка штучным электродом, сварка с независимой скоростью подачи электродной проволоки, сварка со скоростью подачи, зависящей от выходного напряжения. Источники с ПВХ используют для сварки штучным электродом и механизированной сварки под флюсом, если автомат (полуавтомат) имеет независимую скорость подачи электродной проволоки. В последнее время нашли применение источники с комбинированной внешней характеристикой, имеющей участок с ПВХ и участок с ЖВХ.

Типовые внешние характеристики показаны на рис. 4.97. Источники для РДС – сварочные трансформаторы, выпрямители и генераторы – обычно имеют крутопадающую характеристику (рис. 4.97, *а*; кривая *1*). Слабовыраженная зависимость сварочного тока от напряжения дуги позволяет обеспечить сравни-

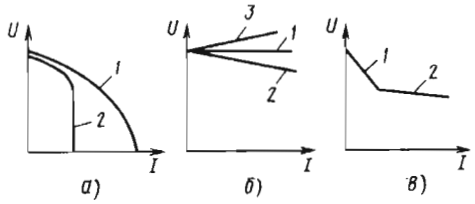


Рис. 4.97. Типовые внешние характеристики источников:
а – падающая (*1* – крутопадающая; *2* – вертикальная); *б* – жесткие (*1* – жесткая; *2* – пологопадающая; *3* – возрастающая); *в* – комбинированная (*1* и *2* – круто- и пологопадающий участки соответственно)

тельно постоянное значение тока и, следовательно, устойчивость процесса при неизбежных изменениях длины дуги, связанных с колебаниями руки сварщика и изменениями конфигурации свариваемой детали. Полную стабильность тока в зоне возможных значений напряжения дуги обеспечивает «штыковая», или «вертикальная», характеристика (см. рис. 4.97, *а*; кривая *2*). Однако в ряде случаев конкретных сварочных работ слишком крутопадающая характеристика препятствует нормальному процессу сварки. Например, при выполнении вертикальных и потолочных швов сварщик периодически удлиняет дугу с тем, чтобы уменьшить ток, снизить тепловложение и удержать таким образом ванну расплавленного металла. При этом необходимо, чтобы внешняя характеристика была более пологой и изменения длины дуги давали заметное изменение силы тока. Крутизну характеристики источника с ПВХ в рабочей ее части определяют отношением тока короткого замыкания сварочной цепи $I_{2кз}$ к сварочному току I_2 (рис. 4.98, *а*). Обычно принимают значение $I_{2кз} = (1{,}3\ldots1{,}5)\ I_2$. Крутизна такого порядка позволяет управлять состоянием сварочной ванны, обеспечивает форсированный ток при зажигании дуги касанием электрода об изделие.

При больших значениях $I_{2кз} / I_2$ увеличивается разбрызгивание металла, возможны прожоги свариваемой детали.

Статическими внешними характеристиками задана область возможных режимов сварки, называемая диапазоном регулирования источника. Для источника с ПВХ, внешние характеристики которого приведены на рис. 4.98, *а*, диапазон регулирования сварочного тока заключен между значениями I_{2min} и I_{2max}. Отношение I_{2max} / I_{2min} называют кратностью регулирования сварочного тока.

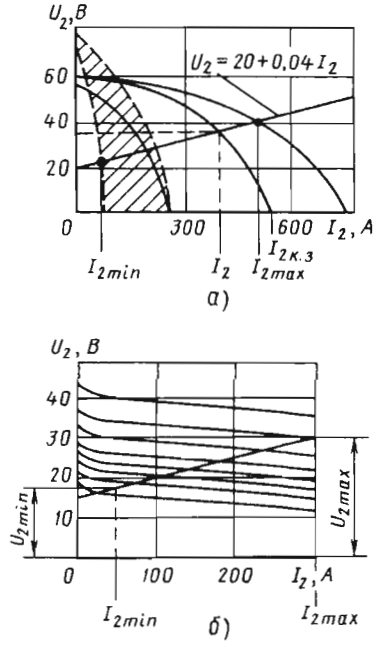


Рис. 4.98. Внешние характеристики источников:
а – сварочного трансформатора на ток 400 А (заштрихованная часть соответствует диапазону малых сварочных токов); *б* – выпрямителя со ступенчатым регулированием для механизированной сварки в защитном газе

Внешние характеристики, обозначенные на рис. 4.98, *а* пунктирными линиями, определяют область, или ступень, малых токов; сплошные линии ограничивают ступень больших токов. Внутри ступени можно, используя механизм плавного регулирования токов, получить любое количество промежуточных внешних характеристик. Такое регулирование называется плавно-ступенчатым, оно позволяет, используя экономически разумные возможности плавного регулирования, существенно расширить полный диапазон регулирования источника.

Ступени регулирования, которых бывает обычно две или три, получают переключением обмоток силовых трансформаторов источника. Иногда вообще отказываются от плавного регулирования, увеличивая число ступеней (ступенчатое, или витковое регулирование). На рис. 4.98, *б* приведены характеристики источника питания с ЖВХ, имеющего восемь фиксированных внешних характеристик. Теоретически такой источник обеспечивает только восемь режимов сварки, определенных точка-

ми пересечения характеристик с линией нагрузки $U_2 = 14 + 0{,}05I_2$. Диапазон регулирования рабочего напряжения заключен между значениями U_{2min} и U_{2max}, сила тока задается подбором скорости подачи электродной проволоки.

Если статические внешние характеристики отражают реакцию источника питания на сравнительно медленные, измеряемые секундами изменения длины дуги, то динамические внешние характеристики источника определяют скорость изменения сварочного тока и напряжения источника при быстрых, измеряемых сотыми и тысячными долями секунды возмущениях дугового промежутка. При мелкокапельном или струйном процессе сварки капли электродного металла периодически снижают дуговое напряжение. При сварке с крупнокапельным переносом металла дуга много раз в секунду полностью гаснет и возбуждается вновь. Скорость нарастания тока в моменты короткого замыкания и скорость нарастания напряжения на дуговом промежутке должны быть оптимальны для обеспечения устойчивости процесса, для спокойного, без взрывов, переноса расплавленного металла.

4.5.4.1. СВАРОЧНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ С МЕХАНИЧЕСКИМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ

Трансформатор служит для гальванической развязки напряжения питания сети от сварочной цепи, что является непременным требованием безопасности, и для снижения напряжения до значений, требуемых при сварке. Трансформатор содержит две электрически не связанные между собой обмотки, размещенные на замкнутом магнитопроводе из листовой электротехнической стали. В современных отечественных трансформаторах применяется преимущественно холоднокатаная изотропная сталь марки 2212 толщиной 0,5 мм и холоднокатаная анизотропная сталь марок 3404, 3405 толщиной 0,35 мм, 3414 толщиной 0,35 и 0,5 мм. Для изотропной стали рекомендуемые значения магнитной индукции $B_{max} = 1{,}5\ldots1{,}6$ Тл, для анизотропной $B_{max} = 1{,}6\ldots1{,}7$ Тл.

Обмотки трансформаторов выполняют медным или алюминиевым проводом с двойным, пропитанным лаком покрытием из стекловолокна (провод марки ПСД или АПСД). Во вторичных обмотках мощных трансформаторов обычно используют голую медную или алюминиевую шину. Для трансформаторов на ток до 500 А класса изоляции Н могут быть рекомендованы следующие значения плотности тока: для первичных обмоток из алюминиевого провода $j_1 = 2{,}4\ldots2{,}8$ А/мм^2, для первичных обмоток из медного провода $j_1 = 3{,}0\ldots3{,}5$ А/мм^2. Плотность тока вторичных обмоток выбирается на 10…15 % ниже. В последнее время отечественная промышленность освоила выпуск обмоточных проводов с эмалевым покрытием и температурным индексом 130…200 °С.

По устройству магнитопровода различают трансформаторы броневого и стержневого типов, по устройству обмоток – трансформаторы с цилиндрическими и дисковыми обмотками. В источниках сварочного тока основное распространение получили трансформаторы со стержневыми магнитопроводами как с цилиндрическими, так и с дисковыми обмотками; трансформаторы работают с воздушным естественным или принудительным охлаждением.

Трансформаторы с цилиндрическими обмотками (рис. 4.99), в которых первичная *1* и вторичная *2* обмотки наматываются концентрически одна поверх другой, относятся к группе трансформаторов с нормальным электромагнитным рассеянием и являются полным аналогом силовых воздушных трансформаторов идентичной мощности. Внешняя характеристика таких трансформаторов жесткая, с падением рабочего напряжения ~7…12 % при изменении тока вторичной обмотки от нуля до номинального значения. Напряжение холостого хода (напряжение на зажимах вторичной обмотки при отсутствии тока нагрузки) определяется отношением числа витков W_1 первичной и W_2 вторичной обмоток: $U_{2xx} = U_1 W_2 / W_1$, где U_1 – напряжение питающей сети.

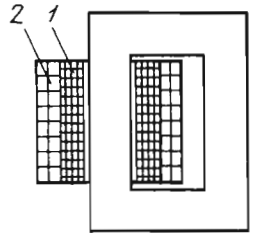


Рис. 4.99. Трансформатор с цилиндрическими обмотками

Ручная дуговая сварка от трансформатора с нормальным рассеянием возможна только с применением специальных устройств, формирующих ПВХ источника. Если последовательно со вторичной обмоткой трансформатора включить активное балластное сопротивление, например балластный реостат $R_б$ (рис. 4.100, *а*), то увеличение сварочного тока будет снижать рабочее напряжение (ПВХ). Такой источник не обеспечивает устойчивого горения дуги, поскольку синусоидальное напряжение вторичной обмотки трансформатора в моменты времени, близкие к смене полярности тока, недостаточно для поддержания дугового разряда (рис. 4.100, *б*).

Хорошие результаты дает использование вместо балластного реостата дросселя с отпайками (отводами) от витков обмотки и с переменным воздушным зазором в магнитной цепи (рис. 4.101, *а*). Значение сварочного тока определяется напряжением дуги и индуктивным сопротивлением дросселя $X_{др} = 2\pi f L_{др}$, Ом, где f – частота напряжения сети, Гц; $L_{др}$ – индуктивность дросселя, Г.

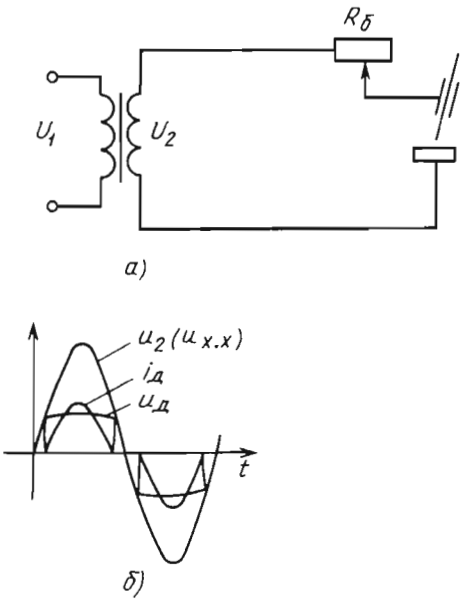


Рис. 4.100. Цепь дуги переменного тока с балластным реостатом:
а – электрическая схема; *б* – кривые напряжения холостого хода $u_{х.х}$, тока $i_д$ и напряжения дуги $u_д$

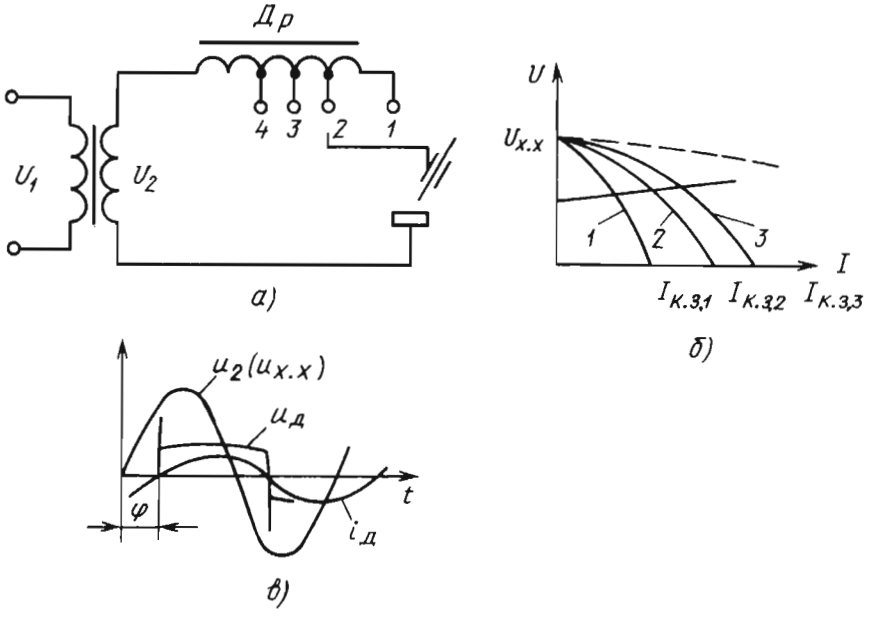


Рис. 4.101. Цепь дуги переменного тока с дросселем:
а – электрическая схема; *б* – внешние характеристики; *в* – кривые напряжения холостого хода $u_{х.х}$, тока $i_д$ и напряжения дуги $u_д$

Индуктивность дросселя выражается приближенной формулой:

$$L_{др} \approx \frac{\mu_0 W^2 S}{l_{ст}/\mu_{ст} + \delta},$$

где W – число витков обмотки дросселя; S – сечение стали магнитопровода, м^2; $l_{ст}$ – средняя длина магнитной силовой линии в магнитопроводе, м; δ – суммарный воздушный зазор, м; $\mu_{ст}$ – относительная магнитная проницаемость стали; $\mu_0 = 0{,}4\pi \cdot 10^{-6}$ Г/м – магнитная постоянная.

Регулирование индуктивного сопротивления дросселя может осуществляться ступенчато – изменением числа витков обмотки, плавно – изменением воздушного зазора или плавно-ступенчато. На рис. 101, *б* приведены внешние характеристики источника, состоящего из трансформатора с нормальным рассеянием и дросселя. Характеристики *1*, *2* и *3* соответствуют трем значениям индуктивности дросселя: $L_1 > L_2 > L_3$. Они исходят из одной точки на оси напряжений – точки напряжения холостого хода трансформатора. Точки пересечения характеристик с осью токов соответствуют токам короткого замыкания сварочной цепи: пунктиром на рисунке обозначена внешняя характеристика трансформатора.

Наличие индуктивности в сварочной цепи вызывает фазовый сдвиг между напряжением трансформатора и током нагрузки (угол φ на рис. 4.101, *в*). Переход тока через нулевое значение происходит при достаточно большом, близком к амплитудному, значении напряжения трансформатора. Сварочный ток непрерывен, дуга горит устойчиво.

Трансформаторы с дисковыми обмотками (рис. 4.102), в которых первичные W_1 и вторичные W_2 обмотки разнесены относительно друг друга, относятся к группе специальных сварочных трансформаторов с увеличенным или развитым магнитным рассеянием. Источники питания этой группы совмещают функции собственно трансформатора и дросселя-регулятора в единой конструкции. В режиме холостого хода напряжение на выходных зажимах трансформатора, как и у трансформаторов с нормальным рассеянием, определяется коэффициентом трансформации: $U_2 = U_1 W_2 / W_1$. Магнитный поток, вызванный намагничивающим током первичной обмотки, замыкается по магнитопроводу и целиком пронизывает витки вторичной обмотки.

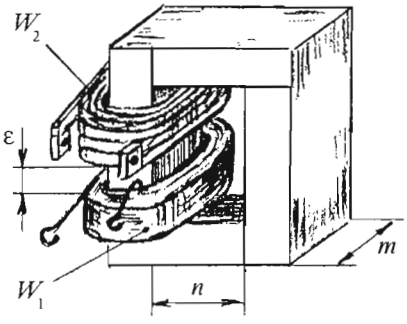


Рис. 4.102. Трансформатор с дисковыми обмотками

Под нагрузкой по мере роста тока вторичной обмотки I_2 магнитный поток этой обмотки как бы «вытесняет» первичный магнитный поток из зоны вторичной обмотки в пространство между обмотками по воздушному «коридору» ε m n. При замкнутой накоротко вторичной обмотке практически весь первичный поток замыкается по воздуху от стержня к стержню. Чем меньше сопротивление на пути потока рассеяния, тем меньше значение установившегося тока короткого замыкания вторичной цепи. Сопротивление «коридора» рассеяния, как и сопротивление любого проводника, определяется соотношением $R = \frac{1}{\mu_0}\frac{n}{S}$, где μ_0 играет роль удельной проводимости; $S = \varepsilon m$ – сечение проводника, а n – его длина.

Следовательно, чем больше расстояние между обмотками и толщина набора магнитопровода, чем ближе друг к другу расположены стержни магнитопровода, тем меньше ток короткого замыкания трансформатора, тем больше его индуктивное сопротивление $X_{тр} = U_{х.х} / I_{к.з}$.

Методика расчета индуктивного сопротивления трансформатора с полностью разнесенными обмотками разработана достаточно подробно.

Для оценочных расчетов, допускающих ошибку в 10…15 %, может быть рекомендовано соотношение

$$X_{тр} = KW_2^2\left(1{,}5 + 1{,}2\frac{m}{n}\right) \times$$

$$\times\left(1{,}33\sum h + 4\varepsilon\right)10^{-6} \text{ Ом}.$$

Здесь W_2 – число витков вторичной обмотки трансформатора (с одной вторичной катушкой); m – набор магнитопровода, см; n – ширина окна, см; $\sum h$ – сумма высот катушек первичной и вторичной обмоток, см; ε – расстояние между обмотками, см ; K – расчетный коэффициент, Ом/см.

При расчете индуктивного сопротивления трансформаторов с «нормальной» геометрией, когда $\left(\sum h+\varepsilon\right)/n<3$, следует принимать K = 2,4 Ом/см. Для трансформаторов с очень высоким окном магнитопровода, при $\left(\sum h+\varepsilon\right)/n>3$ результаты расчета точнее при K = 2 Ом/см. Для трансформатора с двумя первичными и двумя вторичными катушками (рис. 4.103) значение $X_{тр}$ уменьшается в 2 раза в случае параллельного соединения катушек вторичной обмотки и увеличивается в 2 раза при их последовательном соединении.

Для расширения диапазона регулирования сварочного тока нередко используют частичное разнесение обмоток трансформатора. Это означает, что часть витков вторичной обмотки намотана концентрично (например, поверх первичной обмотки). При этом в выражение для определения $X_{тр}$ вводится дополнительный сомножитель $K_р^2$. Коэффициент $K_р$ называется коэффициентом разнесения, $K_р = W_{22}/W_2$, где W_{22} – часть витков вторичной обмотки, полностью разнесенная с первичной; $W_2 - W_{22} = W_{21}$ – часть витков вторичной обмотки, имеющая жесткую магнитную связь с первичной обмоткой. При полностью разнесенных обмотках $K_р$ = 1. Естественно, эти положения справедливы и для размещения части витков первичной обмотки поверх вторичной.

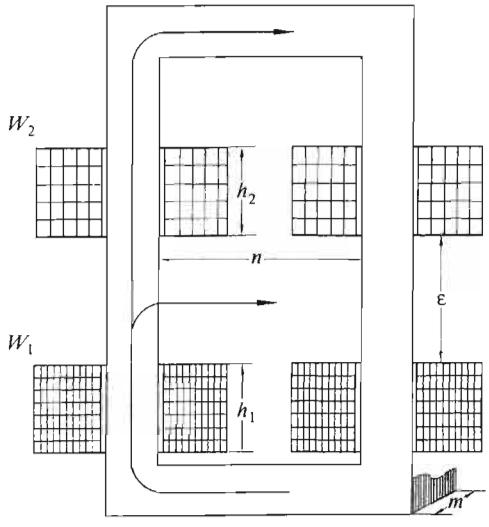


Рис. 4.103. Сварочный трансформатор со стержневым магнитопроводом и подвижными обмотками

Сварочные трансформаторы малой мощности иногда выполняют с расположением первичной и вторичной обмоток на разных стержнях (рис. 4.104, *а*). В такой конструкции поток рассеяния идет не от стержня к стержню, а между обмотками, от ярма к ярму. Приведенное выше соотношение для определения индуктивного трансформатора остается в силе, однако параметр n означает в этом случае не ширину, а высоту окна магнитопровода, а расстояние между обмотками ε – зазор в окне между обмотками *1* и *2*.

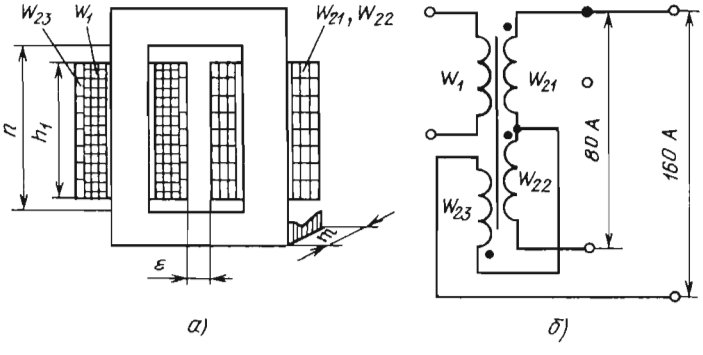


Рис. 4.104. Сварочный трансформатор с обмотками на разных стержнях магнитопровода:
а – эскиз конструкции; *б* – электрическая схема

В трансформаторах такой конструкции, особенно бытового назначения, часто используют частичное разнесение обмоток как средство для ступенчатого регулирования сварочного тока.

Пример 1. Переносной трансформатор[1], рассчитанный на номинальный сварочный ток 160 А при ПН = 20 %, имеет стержневой магнитопровод и две обмотки (см. рис. 4.103, *а*). Вторичная обмотка содержит три секции: W_{21} и W_{22}, расположенные на одном стержне магнитопровода, и W_{23}, намотанную поверх первичной обмотки. При сварке на малых токах используются обмотки W_{21} и W_{22} (см. рис. 4.104, *б*), а при работе на больших токах секция W_{22} заменяется на W_{23}. Определим токи короткого замыкания трансформатора в двух вариантах его работы. Параметры конструкции: m = 6,5 см; n = 13 см; $h_1 = h_2$ = 11 см; ε = 1 см; W_1 = 220 витков; W_{21} = = 38 витков; $W_{22} = W_{23}$ = 19 витков. Напряжение сети U_1 = 220 В.

Р е ш е н и е .

1. Для малых токов обмотки разнесены полностью, $K_р$ = 1. Поскольку $\left(\sum h + \varepsilon\right)/n = 23/13 < 3$,

$$X_{тр1} = 2{,}4\left(38+19\right)^2\left(1{,}5+1{,}2\frac{6{,}5}{13}\right)\times$$

$$\times\left(1{,}33\cdot 22+4\cdot 1\right)10^{-6} = 0{,}54 \text{ Ом}.$$

2. Для больших токов $K_р$ = 38 / (38 + 19) = 0,67,

$$X_{тр2} = K_р^2 X_{тр1} = (0{,}67)^2 \cdot 0{,}54 = 0{,}24 \text{ Ом}.$$

3. Напряжение холостого хода для первого и второго режимов одинаково: $U_{х.х} = U_1(38 + 19)/220 =$ = 57 В. Токи короткого замыкания $I_{к.з} = U_{х.х} / X_{тр}$ для первой и второй ступеней регулирования трансформатора: $I_{к.з1}$ = 106 А, $I_{к.з2}$ = 237 А.

Трансформатор с частичным разнесением обмоток может иметь любое число ступеней. Однако ступенчатое регулирование помимо невозможности точного выбора требуемой внешней характеристики имеет и другой существенный недостаток: при работе трансформатора в режиме максимальной мощности часть витков его обмоток не используется, расход трансформаторной стали и обмоточных проводов оказывается завышенным. Большинство промышленных сварочных трансформаторов выполняется с плавно-ступенчатым регулированием. Используется достаточно экономичная конструкция с двухстержневым магнитопроводом, на каждом стержне которого расположено по одной первичной и одной вторичной катушке (см. рис. 4.103). Такое исполнение позволяет снизить среднюю длину витка обмоток, наматывать вторичные катушки проводом вдвое меньшего сечения; разбиение обмотки на две части дает возможность перехода с параллельного на последовательное включение их частей.

Плавное механическое регулирование сварочного тока осуществляется двумя способами: перемещением обмоток вдоль стержней магнитопровода трансформатора (подвижные обмотки) или перемещением магнитного шунта между неподвижно закрепленными первичной и вторичной обмотками (подвижные шунты).

Трансформаторы с подвижными обмотками выпускаются в передвижном или переносном исполнении. Трансформаторы на номинальные токи 160 и 250 А обычно переносные, а на токи 315, 400 и 500 А – передвижные. У переносных трансформаторов первичные обмотки выполнены подвижными, а вторичные неподвижно закреплены у верхнего ярма магнитопровода. Первичные обмотки передвижных трансформаторов закреплены у нижнего ярма, а вторичные обмотки подвижные. Основные узлы трансформаторов – стержневой магнитопровод, обмотки, винтовой механизм перемещения подвижных обмоток, токоуказательный механизм, переключатель диапазонов тока и корпус. На рис. 4.105 приведены схемы включения обмоток и регулировочная характеристика трансформаторов с подвижными обмотками.

Индуктивное сопротивление трансформатора растет практически пропорционально расстоянию между обмотками ε, сварочный ток изменяется обратно пропорционально ε (см. рис. 4.105, *г*). При большом раздвижении обмоток эффективность регулирования тока снижается при непрерывном увеличении массы магнитопровода. Поэтому большой диапазон плавного регулирования нецелесообразен, для расширения пределов регулирования сварочного тока применяется плавно-ступенчатое регулирование путем одновременного переключения числа витков первичной и вторичной обмоток с сохранением постоянства напряжения холостого хода или повышением его в диапазоне малых токов.

[1] В примерах расчета использованы серийные источники питания без указания предприятия-изготовителя.

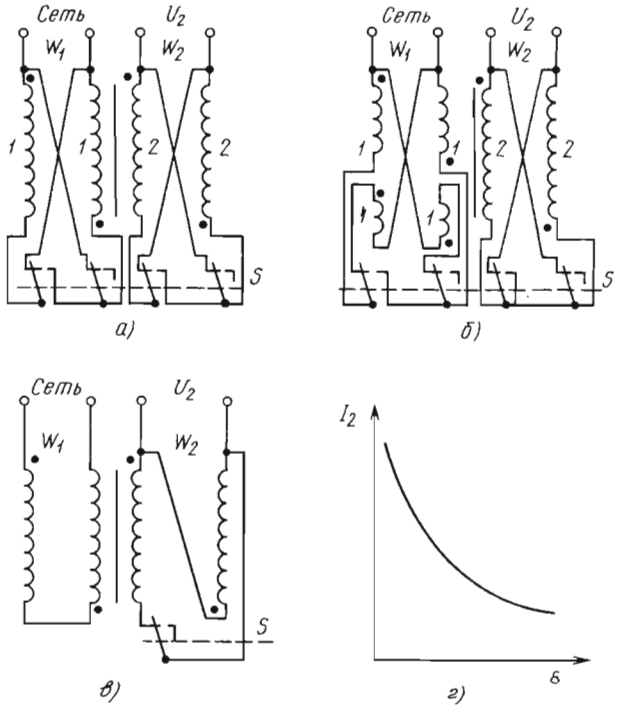


Рис. 4.105. Схемы трансформаторов с плавно-ступенчатым регулированием (*а – в*) **и регулировочная характеристика трансформатора** (*г*)

В переносных трансформаторах диапазон малых токов получают отключением одной из катушек вторичной обмотки (см. рис. 4.105, *в*), что дает практически двойное увеличение индуктивного сопротивления трансформатора. В передвижных трансформаторах вторичные и первичные обмотки включают параллельно в диапазоне больших токов и последовательно для работы на малых токах (см. рис. 4.105, *а*). Такое переключение обмоток обеспечивает четырехкратное изменение сопротивления трансформатора; чтобы получить стыковку между двумя диапазонами токов при раздвижении обмоток в разумных пределах, число витков катушек первичной обмотки снижают в диапазоне малых токов (см. рис. 4.105, *б*), поднимая значение напряжения холостого хода и увеличивая тем самым максимальный ток нижнего диапазона.

Для трансформаторов с подвижными обмотками характерна некоторая зависимость напряжения холостого хода от расстояния между обмотками. При максимальном раздвижении обмоток вследствие роста потока рассеяния, замыкающегося по воздуху в окне между стержнями, напряжение холостого хода снижается на ~5 % относительно значения, полученного при сдвинутых обмотках.

Пример 2. Передвижной трансформатор на номинальный ток 400 А при ПН = 60 % изготовлен по схеме, представленной на рис. 4.105, *б*. Параметры трансформатора: набор магнитопровода m = 11,5 см; расстояние между стержнями (ширина окна) n = 10,6 см; высота катушек h_1 = 8,8 см; h_2 = 13,2 см; число витков вторичной обмотки W_2 = 26; расстояние между полностью сведенными обмотками ε_{min} = 2 см; максимальное расстояние ε_{max} = 26 см; число витков первичной обмотки: $W_1 = W_{11} + W_{12} = 124 + 30 = 154$.

1. Определить токи короткого замыкания крайних внешних характеристик каждого диапазона регулирования сварочного тока при значении U_1 = 380 В.

Р е ш е н и е .

В диапазоне больших токов обмотки соединены параллельно, при сведенных обмотках $\left(\sum h + \varepsilon\right)/n = (22 + 2)/10{,}6 < 3$.

$$X_{тр1} = 1{,}2 \cdot 26^2 \left(1{,}5 + 1{,}2\frac{11{,}5}{10{,}6}\right) \times$$

$$\times \left(1{,}33 \cdot 22 + 4 \cdot 2\right)10^{-6} = 0{,}0846 \text{ Ом}.$$

2. При максимально раздвинутых обмотках $\left(\sum h + \varepsilon\right)/n = (22 + 26)/10{,}6 > 3$

$$X_{тр1} = 1{,}0 \cdot 26^2 \left(1{,}5 + 1{,}2\frac{11{,}5}{10{,}6}\right) \times$$

$$\times \left(1{,}33 \cdot 22 + 4 \cdot 26\right) 10^{-6} = 0{,}252 \text{ Ом}$$

3. Для диапазона больших токов при сведенных обмотках

$$U_{х.х} = U_1 W_2 / (W_{11} + W_{12}) = 380 \cdot 26 / 154 = 64 \text{ В};$$

$$I_{к.з\,max1} = 64 / 0{,}0846 = 758 \text{ А}.$$

При максимально раздвинутых обмотках $U_{х.х} = 0{,}95 \cdot 64 = 61$ В; $I_{к.з\,min1} = 61 / 0{,}252 = 242$ А.

4. В диапазоне малых токов обмотки соединены последовательно, $X_{тр.min2} = 4X_{тр.min1} = 0{,}338$ Ом; $X_{тр.max2} = 4X_{тр.max1} = 1{,}0$ Ом.

5. Для диапазона малых токов при сдвинутых обмотках

$$U_{х.х} = U_1 W_2 / (W_{11} + W_{11}) =$$
$$= 380 \cdot 52 / (124 + 124) = 80 \text{ В};$$

$$I_{к.з\,max1} = 80 / 0{,}338 = 237 \text{ А};$$

при максимально раздвинутых обмотках

$$U_{х.х} = 0{,}95 \cdot 80 = 76 \text{ В}; \quad I_{к.з\,max1} = 76 / 1 = 76 \text{ А}$$

Токи короткого замыкания предельных внешних характеристик реального трансформатора (см. рис. 4.98, *а*) практически совпадают с вычисленными значениями.

Трансформаторы с подвижными магнитными шунтами выполняются на броневых (рис. 4.106, *а*) и стержневых (рис. 4.106, *б*) магнитопроводах. На среднем стержне магнитопровода броневого типа *1* неподвижно установлены первичная *2* и вторичная *3* обмотки. В окнах магнитопровода, между обмотками, расположены два магнитных шунта *4*. Шунт состоит из штампованных листов трансформаторной стали, конструктивно оформленных в виде монолитного пакета. Между собой шунты связаны специальным винтовым механизмом, позволяющим перемещать шунтовую пару в плоскости, перпендикулярной к плоскости магнитопровода. При полностью выведенных из зоны обмоток трансформатора шунтах индуктивное сопротивление трансформатора определяется числом витков вторичной обмотки и геометрическими соотношениями конструкции, как и у любого трансформатора с повышенным магнитным рассеянием. По мере введения шунтов в межобмоточное пространство все большая часть магнитного потока, создаваемого первичной обмоткой, замыкается от среднего стержня к крайним по шунтам, поскольку магнитная проницаемость стали шунтов много выше проницаемости воздуха.

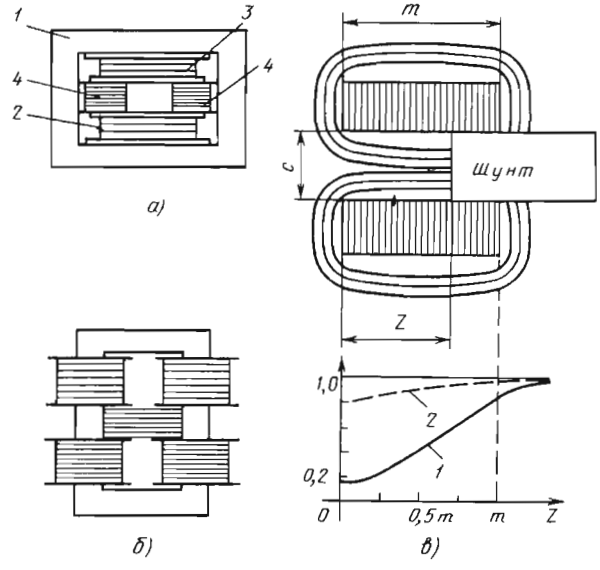


Рис. 4.106. Трансформатор с подвижным магнитным шунтом:
а – броневой магнитопровод; *б* – стержневой магнитопровод; *в* – зависимость от положения шунта в окне магнитопровода относительных значений тока $I_2 / I_{2\,max} = f(z)$ (кривая *1*) и напряжения холостого хода $U_{х.х} / U_{х.х\,max} = f(z)$ (кривая *2*)

Обмотки трансформатора со стержневым магнитопроводом расположены симметрично относительно плоскости шунта (рис. 4.106, *б*). Катушки первичной и вторичной обмоток могут быть соединены параллельно или последовательно, разнесение обмоток относительно магнитного шунта может быть полным или частичным. При полном разнесении первичные и вторичные обмотки находятся по разные стороны от шунта. При частичном разнесении часть витков первичной обмотки размещается в зоне вторичной обмотки или наоборот. Опыт конкретных конструкций показал, что более целесообразно разносить вторичную обмотку, причем коэффициент разнесения $K_р$ следует выбирать ≤0,5:

$$K_р = W_{22}/W_2 \le 0{,}5,$$

где W_{22} – витки вторичной обмотки, полностью разнесенные с первичной обмоткой; W_2 – полное число витков вторичной обмотки.

Полное реактивное сопротивление трансформатора с магнитным шунтом можно представить как сумму постоянной составляющей рассеяния по воздуху X_0 и переменной составляющей рассеяния по шунту $X_ш$:

$$X_{тр} = X_0 + X_ш.$$

Расчет X_0 аналогичен расчету трансформатора с подвижными обмотками. Составляющая $X_ш$ является функцией от положения шунта относительно магнитопровода и параметрически связана с конструкцией трансформатора: числом витков W_2, набором шунта, воздушным зазором между шунтом и стержнями магнитопровода. Максимальное значение $X_ш$, соответствующее полностью введенному шунту, определяет минимальный сварочный ток и диапазон плавного регулирования трансформатора. На рис. 4.106, *в* представлены зависимости относительных значений сварочного тока и напряжения холостого хода трансформатора от положения шунта относительно магнитопровода; набор шунта равен ширине пластины стержня, суммарный воздушный зазор между шунтом и стержнями δ = 0,8…1,0 мм, толщина набора магнитопровода равна m. Анализ зависимостей $I_2/I_{2\,max} = f(z)$, $U_{2x.x}/U_{2x.x\,max} = f(z)$, где $I_{2\,max}$ и $U_{2x.x\,max}$ соответственно сварочный *ток и напряжение холостого хода трансформа*тора без магнитного шунта; z – координата перемещения шунта, выраженная в долях толщины набора m, позволяет сделать следующие заключения:

1) полное перекрытие шунтом пакета магнитопровода нецелесообразно, поскольку при изменении z от 0 до $0{,}1m$ индуктивное сопротивление трансформатора не меняется;

2) максимальному току сварки ($X_{тр} = X_{тр\,min}$) соответствует «вынос» шунта из магнитопровода на расстояние $(1{,}25…1{,}3)m$;

3) в диапазоне перемещения шунта от $0{,}25m$ до $1{,}1m$ сварочный ток растет практически линейно;

4) отношение I_{2max} / I_{2min}, т.е. кратность плавного регулирования сварочного тока, достигает значений 5,0…6,0.

Высокая кратность плавного регулирования часто является решающим фактором при выборе между трансформатором с подвижными обмотками или подвижным шунтом, поскольку позволяет избавиться от сложного и ненадежного узла – переключателя диапазонов сварочного тока. Трансформатор с подвижными обмотками с равной кратностью регулирования имел бы неприемлемую высоту магнитопровода. Напряжение холостого хода такого трансформатора составило бы в режиме максимального тока ~85 % от максимального значения – так же, как у трансформатора с подвижным шунтом.

Сварочные трансформаторы ведущих фирм мира выпускаются в основном с подвижным шунтом. В нашей стране такие трансформаторы долгие годы не имели широкого применения, что объясняется технологической сложностью изготовления шунтового механизма, обеспечивающего малый воздушный зазор δ и стойкого к вибрации. Шунт испытывает большие электромагнитные усилия, втягивающие его в окно магнитопровода (осевые усилия) и разворачивающие шунт (вращательные усилия), стремящиеся повернуть шунт таким образом, чтобы один его конец прижимался к левому стержню, а другой – к правому. Для снижения вибрации применяют различные средства: устанавливают в зазорах между шунтами и магнитопроводом специальные прокладки из изоляционного материала или немагнитной стали, используют компенсационные пружины, отжимающие шунт к одному из *стержней, или определенный, контролируемый* перекос шунта.

В последние годы разработан и успешно используется новый, клиновой механизм магнитного шунта, работу которого поясняет рис. 4.107. Шунт выполнен в виде двух клиновидных призм *1* и *2*, закрепленных на общей тяге *3* таким образом, что тяга может поворачиваться вокруг своей оси. Призма *2* установлена на тяге с помощью кронштейна *4*, другой конец которого снабжен неподвижной гайкой *5*, зафиксированной на резьбовом участке тяги. Свободный конец тяги снабжен рукояткой *6*. Сварщик с помощью тяги *3* перемещает шунт в окне магнитопровода, устанавливая его в положение, соответствующее требуемому току, и заклинивает шунт между стержнями магнитопровода поворотом рукоятки *6*.

При шаге резьбы 5 мм достаточно одного оборота рукоятки для увеличения «ширины» шунта в окне на 1 мм. При необходимости изменить значение тока сварщик поворотом рукоятки в обратную сторону освобождает шунт, устанавливает его в новое положение и снова заклинивает. Клиновой механизм практически не подвержен вибрации и работает бесшумно, переход от режима к режиму занимает несколько секунд. Недостаток механизма заключается в трудности установки требуемого значения тока без прекращения сварки: освобожденный шунт вибрирует и втягивается магнитным полем нагруженного трансформатора.

Трансформаторы с электрическим регулированием. Основной признак трансформаторов с механическим регулированием – наличие подвижных частей – является и основным недостатком этой группы источников питания. Помимо неизбежных вибрационных нагрузок, ограничивающих срок службы трансформаторов, существенный недостаток состоит в инерционности регулирования, невозможности стабилизации режима сварки, осуществления дистанционного и программного управления. Для электрического регулирования тока и напряжения в сварочных трансформаторах используются магнитные и тиристорные регуляторы. Магнитные регуляторы – дроссели насыщения (магнитные усилители) и трансформаторы с подмагничиваемым постоянным током шунтом – для сварки плавящимся электродом не применяются уже много лет и здесь не рассматриваются.

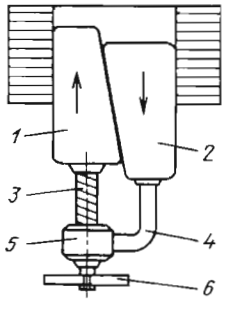


Рис. 4.107. Клиновой магнитный шунт

Тиристорные устройства, позволяющие наиболее просто и экономично решать задачи стабилизации, программирования и дистанционного регулирования режима сварки, формирования требуемой внешней характеристики и ограничения напряжения холостого хода, получили распространение при РДС и автоматической сварке под флюсом.

Тиристорные трансформаторы (ТТ) могут быть подразделены по двум основным признакам: способу обеспечения непрерывности горения дуги и месту установки тиристорного фазорегулятора – в первичной или вторичной цепи.

По первому признаку ТТ делятся на две группы. В трансформаторах одной группы сварочный ток i_2 (рис. 4.108, *а*) прерывистый. Длительность протекания тока θ определяется углом включения φ, который здесь является также углом сдвига между током i_2 и напряжением холостого хода трансформатора $u_{2x.x}$. Для надежного повторного возбуждения применена импульсная стабилизация горения дуги: в момент φ окончания бестоковой паузы на дугу налагается стабилизирующий импульс тока.

В трансформаторах другой группы стабильность процесса сварки обеспечивается непрерывностью сварочного тока (рис. 4.108, *б*). Для заполнения бестоковых пауз в интервале непроводимости тиристоров использована специальная цепь, называемая цепью подпитки дуги, по которой проходит минимально необходимый для устойчивого горения дуги ток (ток подпитки i_{20}). Сдвиг между током i_{20} и напряжением $u_{2x.x}$ здесь определяется углом ψ, зависящим от соотношения напряжений дуги $U_д$ и цепи подпитки: $\cos\psi = \pi U_д / 2U_m$, где U_m – амплитудное значение напряжения холостого хода цепи подпитки.

Размещение тиристорного фазорегулятора в первичную цепь трансформатора кроме уменьшения габаритных размеров регулятора и потерь в тиристорах позволяет снизить потери холостого хода трансформатора, обеспечивает

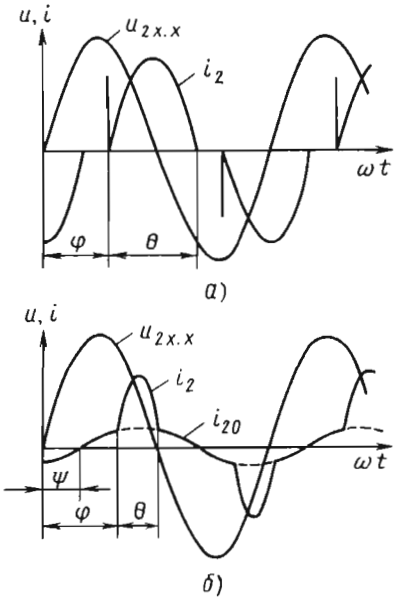


Рис. 4.108. Диаграммы напряжений и токов трансформатора с импульсной стабилизацией (*а*) **и цепью подпитки** (*б*)

оперативное отключение его от сети. Одновременно повышаются требования к симметрии импульсов управления тиристорами, к надежности и электрической прочности цепей управления.

Трансформаторы с цепью подпитки. По данным многочисленных экспериментов значение тока подпитки, достаточное для стабильного горения дуги, составляет 10...15 А для РДС штучными электродами; 20...30 А для автоматической сварки под флюсом.

На рис. 4.109, *а – в* представлены упрощенные схемы ТТ с цепью подпитки и тиристорным регулятором в цепи вторичной обмотки трансформатора. Схемы ТТ, приведенные на рис. 4.109, *б*, *в*, позволяют повысить напряжение холостого хода источника питания без заметного увеличения его мощности за счет дополнительной слаботочной обмотки трансформатора. Напряжение цепи параллельной подпитки U'_2 должно быть выше напряжения основной вторичной обмотки U_2, чтобы исключить возможность включения тиристоров в режиме холостого хода источника. На рис. 4.109, *г*, *д* представлены схемы ТТ с подпиткой и фазорегулятором в цепи первичной обмотки силового трансформатора. Непосредственное шунтирование тиристоров дросселем снижает напряжение первичной обмотки трансформатора *Т1* при закрытых тиристорах, что отрицательно влияет на устойчивость горения дуги. Для устранения этого явления используется вспомогательный трансформатор *Т2* (см. рис. 4.109, *г*) или автотрансформаторная схема с дросселем (см. рис. 4.109, *д*).

Трансформаторы с прерывистым питанием дуги. На рис. 4.109, *е – з* приведены схемы ТТ без подпитки. В ТТ, выполненном по схеме на рис. 4.109, *е*, параллельно первичной обмотке силового трансформатора включена цепь, состоящая из конденсатора и дополнительной импульсной обмотки трансформатора, расположенной в зоне вторичной обмотки и имеющей с нею хорошую магнитную связь. При включении любого из тиристоров зарядный ток конденсатора трансформируется во вторичную цепь трансформатора и вызывает в дуговом промежутке импульс напряжения, достаточный для повторного возбуждения дуги. Для той же цели может быть использован отдельный трансформатор (см. рис. 4.109, *ж*), вторичная обмотка которого включена через разделительный конденсатор параллельно вторичной обмотке сварочного трансформатора. Оптимальный коэффициент трансформации цепи стабилизирующего импульса равен единице. Емкость конденсатора составляет 10 мкФ в трансформаторах для автоматической сварки под флюсом на 1000 и 2000 А, а в трансформаторах для РДС может быть снижена до 2 мкФ. Амплитуда стабилизирующего импульса 50...100 А, длительность 40...200 мкс. Для подавления высокочастотных колебаний в цепь импульсной стабилизации необходимо включить резистор с сопротивлением 1...2 Ом. Импульсная стабилизация дуги может быть реализована и при установке фазорегулятора во вторичной цепи трансформатора. На рис. 4.109, *з* дана схема ТТ с устройством генерации высоковольтных импульсов, обеспечивающих первоначальное зажигание и повторное возбуждение дуги. В момент включения тиристора зарядный ток конденсатора C наводит во вторичной обмотке высоковольтного трансформатора *Т2* импульс высокого напряжения, достаточный для пробоя межэлектродного промежутка. Конденсатор $C_ф$ защищает источник питания от перенапряжений.

На рис. 4.110 приведены внешние характеристики ТТ с цепью подпитки (*а*) и без нее (*б*) для углов включения φ от 0 до 120°. Кривая *1* является внешней характеристикой цепи подпитки.

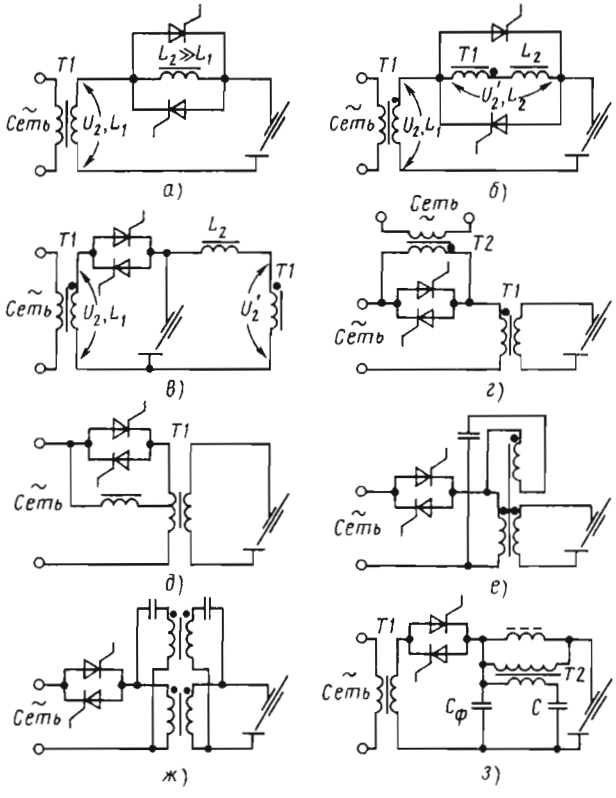


Рис. 4.109. Схемы ТТ с цепью подпитки (*а – д*) **и с импульсной стабилизацией** (*е – з*)

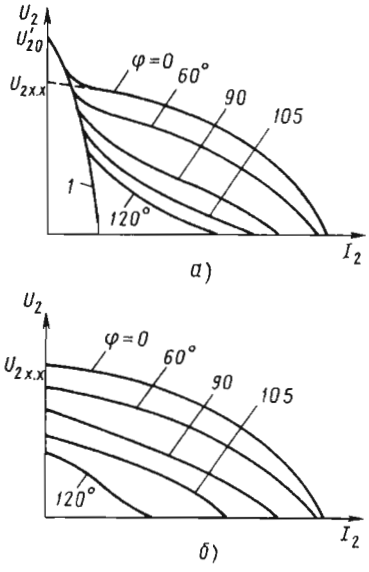


Рис. 4.110. Внешние характеристики ТТ:
а – с цепью подпитки (*1* – внешняя характеристика цепи подпитки); *б* – с прерывистым током нагрузки

Расчетные соотношения для токов, напряжений и мощности дуги при фазовом регулировании. Приводимые ниже расчетные соотношения позволяют произвести электрический расчет силового трансформатора, выбрать тиристоры фазорегулятора и оценить технологические возможности ТТ применительно к сварке плавящимся электродом. Соотношения даны для режима прерывистых токов и с допущениями, приемлемость которых экспериментально подтверждена: 1) импульсы сварочного тока имеют практически синусоидальную форму; 2) амплитуда и длительность импульсов тока не зависят от напряжения дуги при условии постоянства действующего значения тока:

$$I_{2\,\text{ср}} = \frac{2\theta}{\pi^2} I_{2m}; \qquad I_2 = \sqrt{\frac{\theta}{2\pi}} I_{2m},$$

где I_{2m} – амплитудное значение импульса тока.

Коэффициент π / θ характеризует скважность импульсов тока. Введя коэффициент $\alpha = \pi / \theta$, получим

$$I_{2\text{ср}} = \frac{2}{\pi\,\alpha^2} I_{2m};\ I_2 = \frac{1}{\sqrt{2}\cdot\alpha} I_{2m};\ k_\text{ф} = 1{,}11\alpha,$$

где $k_\text{ф}$ – коэффициент формы тока.

Практические расчеты удобно вести в относительных единицах, приняв за базовые величины действующие значения напряжения холостого хода и тока короткого замыкания вторичной цепи источника $U_{2\text{х.х}}$ и $I_{2\text{к.з}}$:

$$\varepsilon_\text{д} = \frac{U_\text{д}}{U_{2\text{х.х}}} \text{ (относительное напряжение дуги);}$$

$$\gamma_\text{д} = \frac{I_2}{I_{2\text{к.з}}} \text{ (относительный ток дуги).}$$

На графике рис. 4.111 приведены кривые зависимости основных параметров ТТ с прерывистым током (α, θ, $\gamma_\text{ср} = I_{2\text{ср}}/I_{2\text{к.з}}$, $\gamma_\text{m} = I_{2\text{m}}/I_{2\text{к.з}}$) в функции от $\gamma_\text{д}$. Пользуясь зависимостью $\alpha = f(\gamma_\text{д})$, легко по действующему значению напряжения дуги, которое предполагается постоянным в течение всего времени горения дуги, определить его амплитуду $E_\text{д} = \alpha U_\text{д}$.

Ниже даны примеры использования приведенных соотношений.

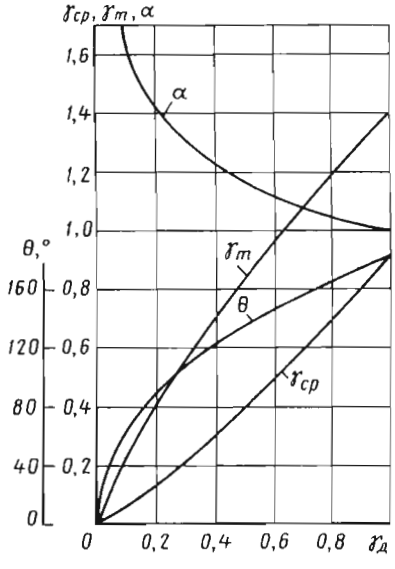


Рис. 4.111. Зависимость основных параметров ТТ от относительного значения тока нагрузки

Пример 3. Тиристорный трансформатор для РДС на номинальный ток 315 А имеет два диапазона регулирования с токами короткого замыкания: $I_{1\text{к.з}} = 480$ А и $I_{2\text{к.з}} = 240$ А. Сварка проводится током $I_\text{д} = 120$ А. Определить коэффициент формы тока, амплитуду и длительность импульсов тока в случае работы на первом и втором диапазонах.

Р е ш е н и е. По графику (см. рис. 4.111) находим для $\gamma_\text{д} = \frac{120}{480} = 0{,}25$ значение $\alpha = 1{,}35$; $k_\text{ф} = 1{,}11$; $\alpha = 1.5$; $\theta = 95°$; $I_{2\text{m}} = 0{,}5I_{2\text{к.з}} = 240$ А. Для второго диапазона: $\gamma_\text{д} = 0{,}5$; $\alpha = 1{,}15$; $k_\text{ф} = 1{,}28$; $\theta = 135°$; $I_{2\text{m}} = 0{,}85I_{2\text{к.з}} = 204$ А.

Пример 4. Трансформатор ТДФЖ-2002 использован для автоматической сварки в режиме $I_\text{д} = 675$ А; $U_\text{д} = 32$ В. Оператор ошибочно выбрал диапазон больших токов ($I_\text{к.з} = 4500$ А). Определить амплитуду дугового напряжения $E_\text{д}$.

Р е ш е н и е. По графику (см. рис. 4.111) для $\gamma_\text{д} = 675 / 4500 = 0{,}15$ находим $\alpha = 1{,}54$; $E_\text{д} = \alpha U_\text{д} = 49$ В. При использовании диапазона малых токов с $I_\text{к.з} = 1800$ А дуга будет значительно короче: $E_\text{д} = 40$ В.

В ТТ с цепью подпитки ток дуги практически синусоидален при полностью открытых и закрытых тиристорах. В промежуточных режимах $k_\text{ф}$ зависит как от относительной продолжительности включения тиристоров θ/π, так и от соотношения токов короткого замыкания вспомогательной и основной цепей: $n = I_{\text{к.з о}} / I_\text{к.з}$. Зависимость коэффициента формы тока от относительной продолжительности включения тиристоров $k_\text{ф} = f(\theta/\pi)$ для ряда значений n приведена на рис. 4.112, *а*. На рис. 4.112, *б* изображена зависимость $k_\text{ф} = f(\gamma_\text{д})$ ТТ, выполненного по схеме на рис. 4.111, с соотношением токов короткого замыкания подпиточной и основной цепей $n = 0{,}037$.

Мощность дуги. Активная мощность дуги переменного тока зависит от среднего тока и амплитуды дугового напряжения:

$$P = \frac{1}{\pi}\int_0^\pi i_\text{д}(t)U_\text{д}(t)dt = E_\text{д}\frac{1}{\pi}\int_0^\pi i_\text{д}(t)dt = E_\text{д}I_\text{ср}.$$

При поддержании постоянства длины дуги ($E_\text{д} = \text{const}$) и действующего значения сварочного тока мощность дуги с ростом коэффициента формы тока падает: $P = E_\text{д}I_\text{д}/k_\text{ф}$.

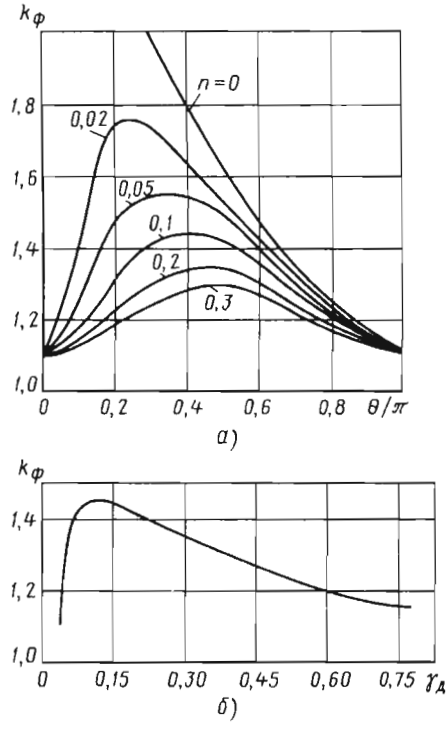


Рис. 4.112. Коэффициент формы сварочного тока при использовании ТТ:
а – зависимость $k_ф$ от относительной продолжительности включения тиристоров; *б* – зависимость $k_ф$ от относительного значения сварочного тока

При поддержании постоянства действующих значений дугового напряжения и тока (сварка под флюсом с независимой скоростью подачи электрода) мощность дуги не зависит от коэффициента формы тока: $P = \alpha U_д I_д / k_ф = 0{,}9 U_д I_д$, поскольку снижение среднего значения тока компенсируется ростом амплитуды напряжения дуги. Для дуги с подпиткой действующее значение напряжения дуги практически не зависит от коэффициента формы тока: $U_д \approx E_д$, соответственно $P = U_д I_д / k_ф$.

Технологические особенности ТТ. Сравнительные испытания ТТ для РДС показали, что при коэффициенте формы тока, не превышающем 1,4, сварочные свойства трансформаторов с прерывистым регулированием не ниже, чем у трансформаторов с механическим регулированием. Однако рост $k_ф$ при увеличении глубины регулирования неблагоприятно отражается на стойкости обмазки штучного электрода: дуга равной мощности при повышенном $k_ф$ требует большего диаметра электрода. В ТТ с прерывистым регулированием для выполнения условия $k_ф$ = 1,4 диапазон плавного регулирования должен быть ≤2. Если учесть, что максимальный ток дуги ~0,7$I_{к.з}$ ($γ_{д\ max}$ = 0,7), пределы регулирования тока дуги составляют $γ_д$ = 0,35…0,7.

В ТТ с цепью подпитки диапазон плавного регулирования значительно шире. Так, цепь подпитки с n = 0,1 позволяет плавно регулировать ток $γ_д$ = 0,1…0,7 с коэффициентом формы не выше 1,45 (рис. 4.112, *а*).

При автоматической сварке под флюсом с использованием ТТ на стандартных режимах из-за повышенной длины дуги $E_д = \alpha U_д$ появляется тенденция к образованию пор, что вынуждает разбивать полный диапазон регулирования тока на ступени, рекомендовать сварку на пониженных на 10…15 % значениях действующего напряжения дуги.

Краткий обзор промышленных трансформаторов. Промышленность России и стран СНГ выпускает сварочные трансформаторы самых разнообразных конструкций. Примерно в половине всех марок трансформаторов используется подвижный магнитный шунт как с винтовым механизмом перемещения, так и клиновой конструкции. Выпускается испытанная временем серия трансформаторов с подвижными обмотками типов ТДМ-317, ТДМ-401 и ТДМ-503. Для ремонтных и монтажных работ применяются многочисленные марки переносных трансформаторов с низкой продолжительностью нагрузки, часто со ступенчатым регулированием.

В небольших количествах выпускаются ТТ для РДС, выполненные с цепью подпитки по схемам, представленным на рис. 4.109, *а*, *в*.

Для автоматической сварки под флюсом и разнообразных технологических целей используются мощные ТТ ТДФЖ-1002 и ТДФЖ-2002 (см. рис. 4.109, *ж*).

В табл. 4.38 приведены технические характеристики некоторых трансформаторов для сварки плавящимся электродом. Таблица составлена по опубликованным ранее данным и проспектам предприятий-изготовителей.

4.38. Технические характеристики трансформаторов

Параметры	Марка трансформатора						
	ТСБ-103	ТДМ-121	ТС-152	ТДМ-169	ТДМ-163	ТДМ-180	ТДМ-181
Номинальный сварочный ток, А	100	125	150	160		180	
Напряжение питающей сети, В	220					220/380	220
ПН, %	20	15	20				
Пределы регулирования сварочного тока, А	65…100 (3 ступени)	50…125	40…150 (7 ступеней)	50…160	80…160 (2 ступени)	45…180	25…180
Способ регулирования	СТ	ПШ	СТ	ПШ	СТ	ПШ	
Номинальное рабочее напряжение, В	24	25	26			27	
Напряжение холостого хода, В	70	50	70	63	60	75	63
Габаритные размеры, мм	190×310×320	185×270×430	470×290×400	330×210×325	355×195×200	360×360×950	415×265×485
Масса, кг	23	25	40	26	18	55	40
Изготовитель	«Электрик»	СЭЛМА	«Электрик»	ЭТА	«Линкор»	СЭЛМА	ЭТА

Продолжение табл. 4.38

Параметры	Марка трансформатора						
	ТДМ-201	ТДМ-2510	ТДМ-259	ТДМ-3010	ТДМ-315	ТДМ-300	ТДМ-317
Номинальный сварочный ток, А	200	250		300	315	300	315
Напряжение питающей сети, В	220/380	380	220/380	220 или 380	380	220/380	220 или 380
ПН, %	25	50	35	35 (~220 В), 50 (~380 В)	20	25	60
Пределы регулирования сварочного тока, А	50...200	30...250 (2 ступени)	40...250	90...300	50...325 (2 ступени)	60...350	60...370 (2 ступени)
Способ регулирования	ПШ	ПО	ПШ	ПО	ПШ		ПО
Номинальное рабочее напряжение, В	28	30		32	33		
Напряжение холостого хода, В	65	80…62	63	60	65…75	63	80
Габаритные размеры, мм	410×800×410	650×460×920	610×455×320	395×310×650	360×360×930	610×455×320	585×555×820
Масса, кг	54	100	55	60		55	130
Изготовитель	«Искра»	«Электрик»	ЭТА	«Электрик»	СЭЛМА	ЭТА	ЭМЗ

Окончание табл. 4.38

Параметры	Марка трансформатора						
	ТДМ-401, ТДМ-402	ТДМ-403	ТДМ-505	ТДМ-501	ТДМ-504	ТДФЖ-1002	ТДФЖ-2002
Номинальный сварочный ток, А	400		500			1000	2000
Напряжение питающей сети, В	380						
ПН, %	60				40	100	
Пределы регулирования сварочного тока, А	70…460 (2 ступени)	80…420	40…530 (2 ступени)	90…560 (2 ступени)		Ток 300…1200, напряжение 30…56 В	Ток 600…2200, напряжение 32…76 В
Способ регулирования	ПО, ТДМ-402 со стабилизатором	ПШ		ПО		ТТ	
Номинальное рабочее напряжение, В	36		40			56	76
Напряжение холостого хода, В	64…79	65	75	65…80	63…75	120	
Габаритные размеры, мм	555×585×850	620×520×770	640×530×830	600×555×892	520×590×810	1400×750×1220	
Масса, кг	140	150	180	140	150	520	790
Изготовитель	«Искра»	СЭЛМА		Уралэлектросвар	Электросвар	«Вильнюс-Электросвар»	

Условные обозначения: СТ – ступенчатое регулирование; ПО – подвижные обмотки; ПШ – подвижные шунты.

Основные изготовители источников питания – ОАО «Завод "Электрик"» (г. Санкт-Петербург), ОАО «Симферопольский электромеханический завод» (СЭЛМА, Украина; до 1995 г. – СЭМЗ), ООО «Электротехнологическая аппаратура» (ЭТА, г. Санкт-Петербург), завод «Линкор» (г. Ставрополь), завод «Искра» (г. Первоуральск), «ФЭБ» (г. Санкт-Петербург), Электромашиностроительный завод (ЭМЗ, г. Коканд, Узбекистан), Уральский завод электросварочного оборудования (ОАО «Уралэлектросвар», г. Екатеринбург), завод «Электросвар» (г. Псков), «Вильнюс-Электросвар» (Литва), Завод электросварочного оборудования (ЭСВА, г. Калининград).

4.5.4.2. СВАРОЧНЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ

Сварочный выпрямитель состоит из следующих основных элементов: трансформатора, регулирующего устройства и полупроводниковых вентилей.

Обычно сварочные выпрямители классифицируются по следующим основным признакам:

– по числу фаз питания (с одно- и трехфазным питанием);

– схеме выпрямления;

– управляемости вентилей (управляемые, неуправляемые);

– способу регулирования напряжения и тока в выпрямителях с неуправляемыми вентилями;

– числу сварочных постов, которые могут быть одновременно подключены к выпрямителю (одно- и многопостовые).

В зависимости от статической внешней характеристики сварочные выпрямители подразделяются на выпрямители с падающими или жесткими (пологопадающими) внешними характеристиками. Выпрямители, сочетающие в себе оба вида характеристик, получили название «универсальные сварочные выпрямители».

Подавляющее большинство выпрямителей для сварки выпускается с питанием от трехфазной сети, что позволяет равномерно загрузить сеть и рационально использовать вентили.

Схемы выпрямления. Наиболее часто в трехфазных сварочных выпрямителях применяют трехфазную мостовую схему (схема Ларионова), шестифазную схему с уравнительным реактором (схема Кюблера) и шестифазную кольцевую схему (схема Горлова).

Рассмотрим основные соотношения в этих схемах, считая вентили идеальными ключами, а нагрузку активно-индуктивной, пренебрегая индуктивностью рассеяния и активным сопротивлением обмоток трансформатора.

Трехфазная мостовая схема. Схема (рис. 4.113) состоит из трехфазного трансформатора и шести вентилей.

Линейное напряжение вторичных обмоток трансформатора $E_л = \sqrt{3} \cdot E_2$, где E_2 – действующее фазное напряжение вторичной обмотки. Амплитуда выпрямленного напряжения $U_{d\,m} = \sqrt{2} \cdot E_л = \sqrt{6} \cdot E_2$, его среднее значение $U_d = \frac{3}{\pi} U_{d\,m} = 2{,}34\,E_2$ ($3/\pi$ – коэффициент, учитывающий пульсацию выпрямленного напряжения). Каждый вентиль проводит ток в течение 1/3 периода, амплитуда тока вентиля равна выпрямленному току: $I_{в\,m} = I_d$ (см. рис. 4.113).

Среднее значение тока вентиля $I_{в.ср} = k_з I_{в\,m} = \frac{1}{3} I_d$. Коэффициент заполнения $k_з$ показывает, какая часть периода занята

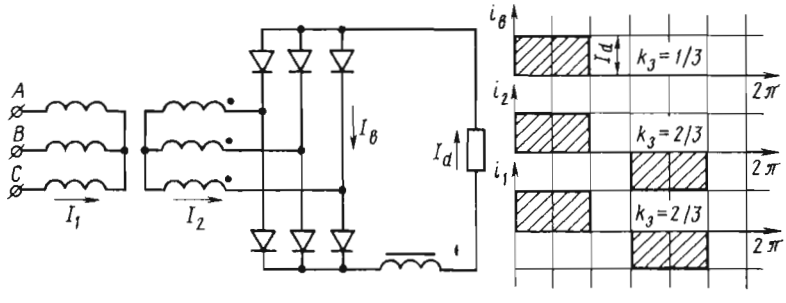


Рис. 4.113. Трехфазная мостовая схема выпрямления

проходящим по элементу схемы током. Действующий ток вентиля $I_{в} = \sqrt{k_з} \cdot I_{в\,m} = \frac{1}{\sqrt{3}} I_d$. Амплитуда тока вторичной обмотки $I_{2m} = I_d$; $k_з = 2/3$. Ток обмотки $I_2 = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot I_d$. Ток первичной обмотки совпадает во времени с током вторичной обмотки: $I_1 = \frac{1}{k_{тр}} \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot I_d$, где $k_{тр}$ – коэффициент трансформации – равен отношению витков первичной и вторичной обмоток.

Расчетные мощности обмоток равны между собой и равны расчетной мощности трансформатора:

$$S_{тр} = S_1 = S_2 = 3I_2E_2 = 3\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot I_d \frac{\pi}{3} \frac{U_d}{\sqrt{6}} = 1{,}05P_d,$$

где $P_d = I_dU_d$ – мощность нагрузки.

Шестифазная схема с уравнительным реактором. Схема (рис. 4.114) состоит из трехфазного трансформатора с двумя группами соединенных в звезду вторичных обмоток, уравнительного реактора L и шести вентилей.

Две полуобмотки реактора имеют равное число витков и намотаны с минимальным взаимным рассеянием на замкнутом магнитопроводе. Действие уравнительного реактора поясняет рис. 4.115. Разность двух неравных и встречно-направленных напряжений E_A и E_C делится полуобмотками уравнительного реактора пополам и выравнивает суммарные напряжения, действующие в левом и правом контурах схемы:

$$E_A - \frac{E_A - E_C}{2} = E_C + \frac{E_A - E_C}{2} = \frac{E_A + E_C}{2}.$$

Под действием равных напряжений в контурах протекают равные токи.

В схеме без уравнительного реактора (шестифазная звезда) напряжение нагрузки имело бы значение

$$U_d = \frac{3}{\pi}\sqrt{2} \cdot E_2 = 1{,}35E_2.$$

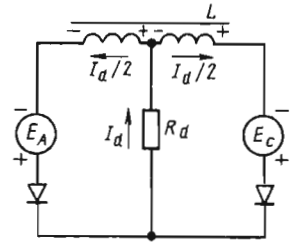


Рис. 4.115. Пояснение принципа действия уравнительного реактора: работа двух неравных по модулю и встречно-направленных напряжений на общую нагрузку R_d

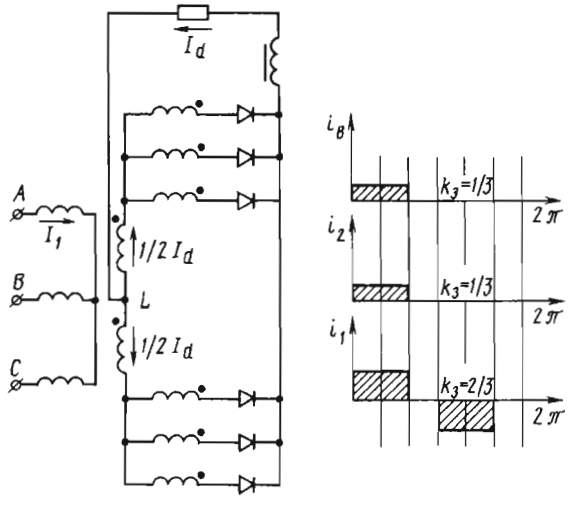


Рис. 4.114. Шестифазная схема с уравнительным реактором

В схеме с реактором выпрямленное напряжение ниже: $U_d = 1{,}17E_2$, но в любой момент времени работают два вентиля в параллель, по одному из каждой группы в течение 1/3 периода. Амплитуда тока вентиля равна половине выпрямленного тока. Амплитудное, среднее и действующее значения тока вентиля имеют вид

$$I_{\text{в m}} = \frac{1}{2} I_d; \quad I_{\text{в.ср}} = k_3 I_{\text{в m}} = \frac{1}{6} I_d;$$

$$I_{\text{в}} = \sqrt{k_3} \cdot I_{\text{в m}} = \frac{1}{2\sqrt{3}} I_d.$$

Ток вторичной обмотки равен току вентиля: $I_2 = \frac{1}{2\sqrt{3}} I_d$.

Кривая тока первичной обмотки (см. рис. 4.114) строится как разность токов двух вторичных обмоток, расположенных на одном стержне магнитопровода. Коэффициент заполнения для первичного тока равен 2/3, амплитуда тока равна $\frac{1}{k_{\text{тр}}} I_{2\text{m}} = \frac{1}{k_{\text{тр}}} \frac{I_d}{2}$; первичный ток $I_1 = \sqrt{k_3} \cdot I_{1\text{m}} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{1}{k_{\text{тр}}} \frac{I_d}{2} = \frac{1}{k_{\text{тр}}} \frac{1}{\sqrt{6}} I_d$.

Расчетная мощность первичных обмоток трансформатора

$$S_1 = 3 I_1 U_{1\text{ф}} = 3 \frac{1}{k_{\text{тр}} \sqrt{6}} I_d k_{\text{тр}} \frac{U_d}{1{,}17} = 1{,}05 P_d.$$

Расчетная мощность вторичных обмоток трансформатора

$$S_2 = 6 I_2 E_2 = 6 \frac{1}{2\sqrt{3}} I_d \frac{U_d}{1{,}17} = 1{,}48 P_d.$$

Расчетная мощность трансформатора

$$S_{\text{тр}} = \frac{S_1 + S_2}{2} = 1{,}26 P_d.$$

Расчетная мощность уравнительного реактора в схеме с неуправляемыми вентилями $S_L \approx 0{,}07 P_d$.

Шестифазная кольцевая схема. Схема состоит из трехфазного трансформатора с двумя группами соединенных в звезду вторичных обмоток и шести вентилей. Нулевые точки каждой звезды соединены с нагрузкой, начала обмоток подключены к вентилям так, как это показано на рис. 4.116, *б*. Выпрямленное напряжение в любой момент времени равно линейному напряжению двухфазных обмоток: $U_d = \frac{3}{\pi} \sqrt{6} \cdot E_2$. Продолжительность прохождения тока через вентиль равна 1/6 периода, т.е. $k_3 = 1/6$, амплитуда тока $I_{\text{в m}} = I_d$. Среднее значение тока вентиля $I_{\text{в.ср}} = k_3 I_{\text{в m}} = \frac{1}{6} I_d$, действующее значение $I_{\text{в}} = \sqrt{k_3} \cdot I_{\text{в m}} = \frac{1}{\sqrt{6}} I_d$. Поскольку каждая вторичная обмотка соединена с двумя последовательно вступающими в работу вентилями, длительность импульса тока в обмотках равна 1/3 периода, $k_3 = 1/3$, ток вторичной обмотки $I_2 = \sqrt{k_3} \cdot I_{2\text{m}} = \frac{1}{\sqrt{3}} I_d$. Амплитуда тока первичной обмотки: $I_{1\text{m}} = \frac{1}{k_{\text{тр}}} I_d$, $k_3 = 2/3$, первичный ток $I_1 = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{1}{k_{\text{тр}}} \cdot I_d$.

Расчетная мощность первичных обмоток трансформатора:

$$S_1 = 3 I_1 U_{1\text{ф}} = 3 \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{1}{k_{\text{тр}}} \cdot I_d \frac{\pi k_{\text{тр}}}{3\sqrt{6}} U_d = 1{,}05 P_d.$$

Расчетная мощность вторичных обмоток трансформатора:

$$S_2 = 6 I_2 E_2 = 6 \frac{1}{\sqrt{3}} I_d \frac{\pi}{3\sqrt{6}} U_d = 1{,}48 P_d.$$

Расчетная мощность трансформатора

$$S_{\text{тр}} = \frac{S_1 + S_2}{2} = 1{,}26 P_d.$$

Основные расчетные соотношения в относительных единицах для трех рассмотренных схем выпрямления приведены в табл. 4.39. За базовые величины приняты выпрямленный ток I_d, выпрямленное напряжение U_d и мощность нагрузки P_d. Частота пульсаций у всех схем одинакова и равна 300 Гц.

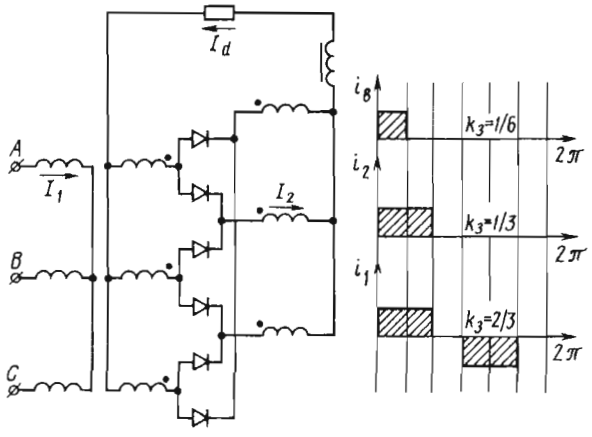


Рис. 4.116. Шестифазная кольцевая схема

4.39. Основные расчетные соотношения для рассмотренных схем выпрямления

Основной расчетный параметр	Схема выпрямления		
	мостовая	с уравнительным реактором	кольцевая
Среднее значение тока вентиля $I_{в.ср} / I_d$	0,333	0,167	
Действующий ток вентиля $I_в / I_d$	0,578	0,289	0,41
Амплитудное значение тока вентиля $I_{в\,m} / I_d$	1,0	0,5	1,0
Коэффициент формы тока вентиля $I_в / I_{в.ср}$	1,73		2,46
Амплитудное значение обратного напряжения на вентилях $U_{в\,m} / U_d$	1,045	2,09	
Действующее напряжение вторичных обмоток трансформатора E_2 / U_d	0,428	0,855	0,428
Действующий ток вторичных обмоток трансформатора I_2 / I_d	0,815	0,289	0,578
То же, первичных обмоток трансформатора I_1 / I_d	$0{,}6U_d / U_1$		
Расчетная мощность вторичных обмоток трансформатора S_2 / P_d	1,05	1,48	
То же, первичных обмоток трансформатора S_1 / P_d	1,05		
То же, трансформатора $S_{тр} / P_d$	1,05	1,26	
То же, трансформатора и уравнительного реактора $(S_{тр} + S_L) / P_d$:			
– при неуправляемой схеме	–	1,33	–
– при глубоком регулировании	–	1,47	–

Пример 5. Рассчитать три варианта нерегулируемого выпрямителя с жесткой внешней характеристикой для режима:

$I_d = 300$ А; $U_d = 70$ В; ПН = 60 %; $U_1 = U_{сети} = 380$ В.

Р е ш е н и е .

1. Для выбора числа витков первичной обмотки рекомендуется пользоваться эмпирической формулой $e_w = 0{,}55 + 0{,}095P_{дл}$, где $P_{дл}$ – мощность нагрузки с учетом ПН, кВ · А.

$$P_{дл} = I_d U_d \sqrt{ПН} = 300 \cdot 70\sqrt{0{,}6} \approx 16 \text{ кВ} \cdot \text{А};$$

$$e_w = 0{,}55 + 0{,}095 \cdot 16 \approx 2 \text{ В/виток}.$$

Число витков первичной обмотки при соединении в звезду $W_1 = \dfrac{380}{\sqrt{3} \cdot e_w} = 110$ витков.

Ток первичной обмотки для любой из трех схем выпрямления: $I_1 = 0{,}6 I_d \dfrac{U_d}{U_1} = \dfrac{0{,}6 \cdot 300 \cdot 70}{380} = 33$ А (см. табл. 4.39).

Мощность первичных обмоток $S_1 = 3I_1U_{1ф} = 3 \cdot 33 \ \ 220 = 22$ кВ · А.

2. Мостовая схема. Режим вентилей:

$$I_{в.ср} = 0{,}333 I_d = 100 \text{ А}, \quad I_в = 0{,}578 I_d = 173 \text{ А},$$

$$I_{в\,m} = 300 \text{ А}.$$

Напряжение вторичных обмоток

$$E_2 = 0{,}428 U_d = 30 \text{ В}, \ W_2 = E_2 / e_w = 15 \text{ витков}.$$

Ток вторичных обмоток $I_2 = 0{,}815 I_d = 245$ А.

3. Схема с уравнительным реактором. Режим вентилей:

$$I_{в.ср} = 0{,}167 I_d = 50 \text{ А}, \quad I_в = 0{,}289 I_d = 87 \text{ А},$$

$$I_{в\,m} = 0{,}5 I_d = 150 \text{ А}.$$

Напряжение вторичных обмоток:

$$E_2 = 0{,}855 U_d = 60 \text{ В}, \ W_2 = E_2 / e_w = 30 \text{ витков}.$$

Ток вторичных обмоток $I_2 = I_в = 87$ А; $S_{реактора} = 0{,}07 P_d = 1{,}47$ кВ А.

4. Кольцевая схема. Режим вентилей:

$$I_{в.ср} = 0{,}167 I_d = 50 \text{ А}, \ I_в = 0{,}41 I_d = 123 \text{ А}, \ I_{в\,m} = 300 \text{ А}.$$

Напряжение вторичных обмоток

$$E_2 = 0{,}428 U_d = 30 \text{ В}, \quad W_2 = E_2 / e_w = 15 \text{ витков}.$$

Ток вторичных обмоток $I_2 = 0{,}578 I_d = 173$ А.

Результаты расчета приведены в табл. 4.40.

При выборе схемы выпрямления разработчик должен исходить из стоимости вентилей, обмоточных материалов и трансформаторной стали. Необходимо учесть и себестоимость намоточных работ.

Выпрямители для РДС. Выпрямители для РДС штучным электродом выпускаются в основном на базе одно- и трехфазных трансформаторов с механическим регулированием и развитым магнитным рассеянием, с использованием переключения частично разнесенных обмоток, подвижных обмоток и подвижных магнитных шунтов. Однофазные выпрямители рассчитаны на сварочный ток до 160 А и помимо выпрямительного моста оснащены дросселем для сглаживания сварочного тока. Дроссель ограничивает пульсацию тока и, главное, поддерживает его текущее значение на уровне ≥10…15 А, что необходимо для устойчивого горения дуги.

Однофазные выпрямители АСУ-152, ВД-1210 и ВД-131 выполнены со ступенчатым регулированием (табл. 4.41). В выпрямителе ВД-131 использован подвижный магнитный шунт; АСУ-152 и ВД-131 помимо выхода на постоянном токе имеют выходные зажимы непосредственно от вторичной обмотки трансформатора, что позволяет проводить сварку как на постоянном, так и на переменном токе.

4.40. Результаты расчета нерегулируемых выпрямителей

Расчетный параметр	Схема выпрямления		
	мостовая	с уравнительным реактором	кольцевая
Средний ток вентиля, А	100	50	
Полное число витков вторичных обмоток	3 · 15 = 45	6 · 30 = 180	6 · 15 = 90
Ток вторичных обмоток, А	245	87	173
Полное число витков первичных обмоток	3 · 110 = 330		
Ток первичных обмоток, А	33		
Расчетная мощность реактора, кВ · А	–	1,47	–

4.41. Технические характеристики выпрямителей

Параметры	Марка выпрямителя						
	ВД-1210	ВД-121	ВД-131	АСУ-152	ВД-210	ВД-309	ВД-306Э
Номинальный сварочный ток, А	125		a.c. 180, d.c. 130	a.c. 150	200	300	315
Напряжение питающей сети, В	Однофазное, 220				–	Трехфазное, 380	
ПН, %	20				60	25	60
Способ регулирования	СТ		ПШ	СТ	ПО	ПШ	ПО
Пределы регулирования сварочного тока, А	75…125 (3 ступени)	40…125 (4 ступени)	a.c. 38…180, d.c. 35…130	40…150 (7 ступеней)	30…200 (2 диапазона)	60…300	45…125, 125…315
Номинальное рабочее напряжение, В	25		a.c. 27, d.c. 25	26	28	32	
Напряжение холостого хода, В	100	–	d.c. 100	70	71	70	
Габаритные размеры, мм	180×350×490	470×220×340	360×360×950	470×290×400	730×550×890	710×440×580	795×745×785
Масса, кг	30	29	65	43	114	86	150
Изготовитель	«Электрик»	«Искра»	СЭЛМА	«Электрик»	«Искра»	ЭТА	«Электрик»

Продолжение табл. 4.41

Параметры	Марка выпрямителя						
	ВД-306Д	ВД.Д-313	ВД-313	ВД-413	ВС-300Б	ВДГ-401	ВДГ-506
Номинальный сварочный ток, А	315	300	315	400	315	400	500
Напряжение питающей сети, В	Трехфазное, 380						
ПН (ПВ), %	60				85 (ПВ)	60 (ПВ)	100
Способ регулирования	Т	ПШ + Т	ПШ		СТ	Т	СТ
Пределы регулирования: тока сварки, А напряжения, В	5…315	45…300 ±30 А дистанци- онное	60…330	45…400	50…350 18…35	80…500 18…42	80…630 18…54
Номинальное рабочее напряжение, В	32			36	32	–	44
Напряжение холостого хода, В	100	70		90	45	75	70
Габаритные размеры, мм	550×400×600	770×515×620	770×400×770	750×450×750	830×400×710	750×605×950	830×550×840
Масса, кг	140	110	100	135	110	250	220
Изготовитель	СЭЛМА	ЭТА	ИС России	ЭТА	СЭЛМА		«Искра»

Окончание табл. 4.41

Параметры	Марка выпрямителя						
	ВДУ-251	ВДУ-3010	ВДУ-505	ВДУ-506	ВДУ-601Э	ВДУ-1202	ВДУ-1610
Номинальный сварочный ток, А	250	315	500		600	1250	1600
Напряжение питающей сети, В	Трехфазное, 380						
ПН (ПВ), %	60					100	
Пределы регулирования тока, А: ЖВХ ПВХ	40…315		60…500 50…500		65…630 60…630	250…1250 250…1250	300…1600 300…1600
Пределы регулирования напряжения, В: ЖВХ ПВХ	18...30 22...30	17...32 21...32	18...50 22...46		18...56 22...52	24...56 24...56	
Номинальное рабочее напряжение, В: ЖВХ ПВХ	30	32	50 46		56 52	56	
Напряжение холостого хода, В	80	60	80			85	80
Габаритные размеры, мм	680×320×865		750×650×1150		700×800×960	1080×685×885	
Масса, кг	200	192	300	260		500	660
Изготовитель	«Электрик»			ЭСВА, «Электрик», СЭЛМА	«Электрик»		

Условные обозначения: СТ – ступени; ПО – подвижные обмотки; ПШ – подвижные шунты; Т – тиристорное регулирование.

При переходе от переменного тока к постоянному верхнее значение диапазона регулирования источника снижается на ~1/3, поскольку внешняя характеристика однофазного выпрямителя более пологая, чем характеристика трансформатора.

Четыре вентиля однофазного выпрямительного моста по среднему току должны выдерживать половину сварочного тока: $I_{в.ср} > I_d / 2$. Сглаживающий дроссель выполняется с воздушным зазором. Хорошие сварочные качества выпрямителя достигаются увеличением индуктивности дросселя, расчетная мощность которого должна быть близка к мощности трансформатора. Особенности расчета однофазных выпрямителей подробно исследованы в работе.

Основными источниками питания для РДС на постоянном токе являются трехфазные передвижные выпрямители с механическим регулированием на номинальные токи 200…400 А. Выпрямители ВД-201 и ВД-306, разработанные ВНИИЭСО (ныне Институт сварки России, г. Санкт-Петербург) еще в начале 80-х годов, до сих пор выпускаются рядом заводов России и Украины (особенно широко распространены ВД-306). В основе этих выпрямителей – трехфазный трансформатор с подвижными обмотками. Схема выпрямления мостовая, регулирование тока плавно-ступенчатое: ступени малых токов соответствует соединение обмоток в звезду, в диапазоне больших токов обмотки соединены в треугольник. Одновременное переключение первичных и вторичных обмоток со звезды на треугольник уменьшает индуктивное сопротивление трансформатора в 3 раза без изменения напряжения холостого хода. Подвижные первичные обмотки трансформатора перемещаются вручную ходовым винтом. Технические характеристики выпрямителей приведены в табл. 4.41.

Внешние характеристики выпрямителя на номинальный ток 315 А для двух диапазонов регулирования даны на рис. 4.117.

Точки пересечения характеристик с осью токов – точки короткого замыкания выпрямителя. Ток короткого замыкания $I_{к.з} = U_{х.х} / X_{тр}$. Полное индуктивное сопротивление трансформатора $X_{тр}$ есть основной параметр расчета трехфазного трансформатора с развитым рассеянием. Методика расчета $X_{тр}$ для трансформаторов с полностью разнесенными обмотками опубликована.

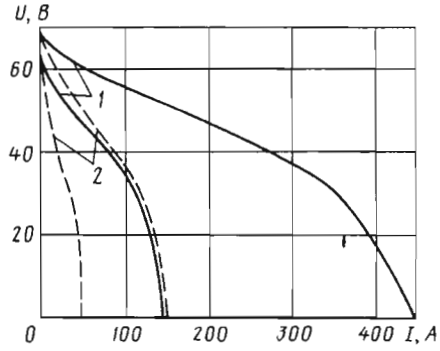


Рис. 4.117. Внешние характеристики выпрямителя на номинальный ток 315 А:
1 и *2* – граничные характеристики диапазонов больших и малых токов соответсвенно

Приведем упрощенную формулу для оценочного расчета, достаточно проверенную практикой и вносящую ошибку, как правило, ≤10 %. Сопротивление трансформатора представляется как производное от усредненного сопротивления фазы $X_ф$, Ом. При соединении вторичных обмоток в звезду $X_{тр} = \sqrt{3} \cdot X_ф$, при соединении в треугольник $X_{тр} = \dfrac{X_ф}{\sqrt{3}}$.

$$X_ф = 3{,}2 W_2^2 \left(1{,}5 + 1{,}2 \frac{m}{n}\right)\left(\sum h + 3\varepsilon\right) \cdot 10^{-6}.$$

Как и при расчете однофазных трансформаторов, здесь: W_2 – число витков одной катушки вторичной обмотки; m – набор магнитопровода, см; n – ширина окна магнитопровода, см; $\sum h$ – сумма высот катушек первичной и вторичной обмоток, см; ε – расстояние между первичной и вторичной обмотками вдоль стержня магнитопровода, см.

Пример 6. Определить токи короткого замыкания выпрямителя с подвижными обмотками на номинальный ток 315 А для крайних характеристик двух диапазонов регулирования. Напряжение холостого хода выпрямителя $U_{х.х}$ = 68 В. Параметры конструкции трансформатора: W_2 = 40 витков; h_1 = 7,9 см; h_2 = 6,8 см; m = 6,8 см; n = 13,6 см; ε_{min} = 2,5 см; ε_{max} = 20,4 см.

Р е ш е н и е .

1. При полностью сведенных обмотках

$$X_{\phi min} = 3{,}2 \cdot 40^2 (1{,}5 + 1{,}2\frac{6{,}8}{13{,}6}) \times$$

$$\times (7{,}9 + 6{,}8 + 3 \cdot 2{,}5) 10^{-6} = 0{,}239 \text{ Ом}.$$

2. При полностью раздвинутых обмотках

$$X_{\phi max} = 3{,}2 \cdot 40^2 (1{,}5 + 1{,}2\frac{6{,}8}{13{,}6}) \times$$

$$\times (7{,}9 + 6{,}8 + 3 \cdot 20{,}4) = 0{,}816 \text{ Ом}.$$

3. В диапазоне больших токов обмотки соединены в треугольник, $X_{тр min} = X_{ф min} / \sqrt{3} = 0{,}138$ Ом; ток короткого замыкания при сведенных обмотках $I_{к.з\,1max} = U_{х.х} / X_{тр\,min} = 68/0{,}138 = 493$ А.

$$X_{тр max} = X_{ф max} / \sqrt{3} = 0{,}472 \text{ Ом};$$

$$I_{к.з\,1min} = U_{х.х} / X_{тр\,max} = 68/0{,}472 = 144 \text{ А}.$$

В диапазоне малых токов обмотки соединены в звезду:

$$X_{тр min} = \sqrt{3} \cdot X_{ф min} = 0{,}413 \text{ Ом};$$

$$I_{к.з\,2max} = U_{х.х} / X_{тр\,min} = 68/0{,}413 = 164 \text{ А}.$$

$$X_{тр max} = \sqrt{3} \cdot X_{ф max} = 1{,}41 \text{ Ом};$$

$$I_{к.з\,2min} = U_{х.х} / X_{тр\,max} = 68/1{,}41 = 48 \text{ А}.$$

Значения токов короткого замыкания отличаются от экспериментально измеренных (см. рис. 4.117) менее чем на 10 %.

Выпрямители для РДС на базе трехфазного трансформатора с развитым магнитным рассеянием и с подвижными шунтами ранее в нашей стране не выпускались. Считалось, что в трехфазном трансформаторе с шунтом магнитная асимметрия, вообще свойственная трансформатору с тремя стержнями и плоским магнитопроводом, проявляется особенно ощутимо, приводя к асимметрии загрузки вентилей и обмоток.

Разработка клинового магнитного шунта и опыт эксплуатации созданных на его основе выпрямителей фирмы ЭТА ВД-309, ВД-313, ВД.Д-313 (с дистанционной регулировкой тока), ВДМ-2 × 313 (двухпостовый) и позднее ВД-413 дают основание считать проблему шунтового регулирования трехфазного сварочного выпрямителя решенной.

В номинальном режиме шунты выходят из магнитной системы трансформатора на 2,5...3 см, никак не влияя на симметрию фазных токов. Расчет трансформатора и режима работы вентилей можно проводить по методике расчета выпрямителя с подвижными обмотками. На минимальном токе при полностью введенных шунтах выпрямитель работает в режиме двухполупериодного однофазного моста, при этом постоянная составляющая сварочного тока приблизительно равна половине среднего значения тока нагрузки.

За последние три года реализовано, по меньшей мере, 3000 выпрямителей с клиновыми шунтами и не получено ни одного неблагоприятного отзыва потребителей о сварочных качествах выпрямителя. Выпрямитель ВД.Д-313 успешно эксплуатируется на сварке газопроводных труб, где требования к источникам питания дуги особенно высоки.

Выпрямитель с дистанционной подрегулировкой сварочного тока ВД.Д-313 состоит из двух параллельно включенных источников тока: трех- и однофазного (рис. 4.118).

Трансформатор с шунтовым регулированием *T1* и выпрямительный мост *VD1* образуют трехфазный выпрямитель на номинальный ток 240 А. Однофазный трансформатор с повышенным рассеянием *T2* и полууправляемый мост *VD2* обеспечивают плавное регулирование тока нагрузки от 0 до 60 А. Управляя дистанционно фазой включения тиристоров однофазного источника, сварщик может, не покидая места сварки, добавить или отнять 30 А от текущего значения тока, используя, таким образом, весь токовый диапазон электрода, что особенно важно при сварке неповоротных стыков труб.

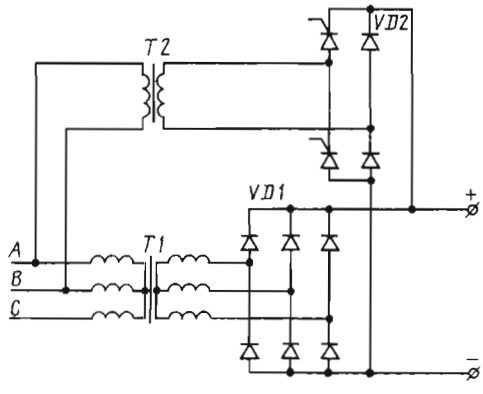


Рис. 4.118. Упрощенная схема выпрямителя ВД.Д-313

Выпрямители для механизированной сварки. Процесс сварки в защитных газах (или порошковой проволокой) требует жестких (пологопадающих) внешних характеристик источника питания, поэтому трансформаторы выпрямителей для сварки в защитных газах выполняются с нормальным рассеянием, с цилиндрическими обмотками. Регулируется рабочее напряжение ступенчато, плавно-ступенчато или плавно. Ступенчатое регулирование реализуют за счет отводов от первичной обмотки трансформатора.

На рис. 4.119 приведена упрощенная схема выпрямителя с «витковым» регулированием рабочего напряжения в двух диапазонах, каждый из которых имеет четыре ступени. Переключатель на два положения *S1* соединяет первичные обмотки трансформатора в звезду. В положении *I* переключателя к основной первичной обмотке $W_о$ добавляются витки дополнительной обмотки $W_д$, образуя первый диапазон регулирования – диапазон малых рабочих напряжений. Положение *II* переключателя *S1* соответствует второму диапазону регулирования – диапазону больших рабочих напряжений. Переключатель на четыре положения *S2* разбивает каждый диапазон на четыре части, прибавляя к виткам $W_о$ или ($W_о$ + $W_д$) еще одну, две или три секции с числом витков $W_с$. Общее число ступеней регулирования равно произведению чисел положений переключателей *S1* и *S2*. В рассматриваемом случае число ступеней $n = 2 \cdot 4 = 8$, положение переключателей на рис. 4.119 соответствует максимальному выпрямленному напряжению.

В выпрямителе использована трехфазная мостовая схема, поэтому выпрямленное напряжение $U_d = 2{,}34E_2$, где E_2 – напряжение вторичной обмотки W_2 (см. табл. 4.39).

Максимальное и минимальное значения выпрямленного напряжения определены коэффициентом трансформации и напряжением сети:

$$U_{d\max} = 2{,}34\frac{U_1}{\sqrt{3}}\frac{W_2}{W_о};$$

$$U_{d\min} = 2{,}34\frac{U_1}{\sqrt{3}}\frac{W_2}{(W_о + W_д + 3W_с)}$$

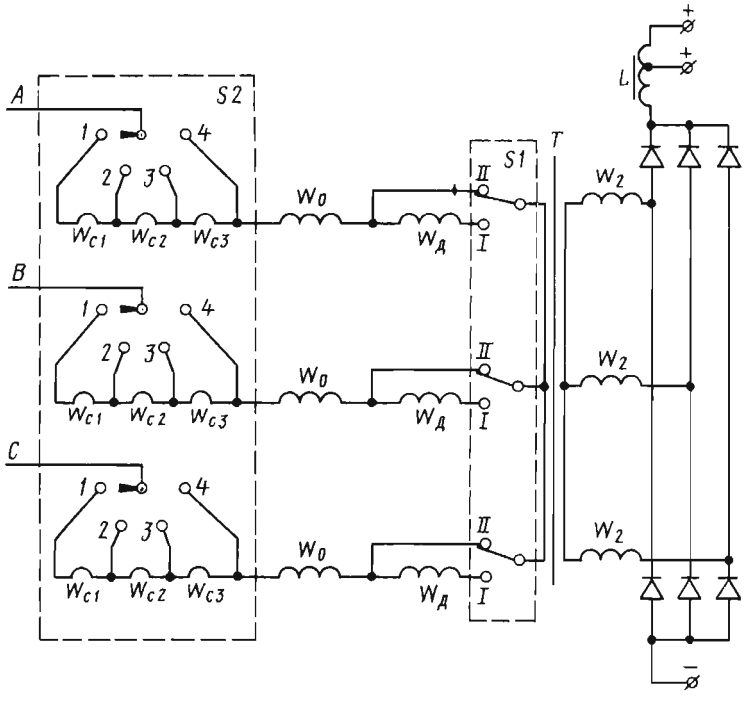


Рис. 4.119. Упрощенная схема выпрямителя с «витковым» регулированием рабочего напряжения

Пример 7. Рассчитать число витков обмоток трансформатора для выпрямителя, выполненного по схеме, показанной на рис. 4.119, для значений $U_{d\max} = 47$ В; $U_{d\min} = 20$ В. Сечение магнитопровода позволяет получать ≤2 В с одного витка обмоток ($e_w = 2$ В/виток). Напряжение сети $U_1 = 380$ В.

Решение.

1. Определим число витков вторичной обмотки:

$$E_{2\max} = \frac{U_{d\max}}{2{,}34} = 20 \text{ В};$$

$$W_2 = \frac{E_{2\max}}{e_w} = 10 \text{ витков}.$$

2. Число витков основной обмотки

$$W_o = \frac{W_1}{\sqrt{3}\cdot e_w} = \frac{380}{1{,}73\cdot 2} = 110 \text{ витков}.$$

3. Определим число витков первичной обмотки, соответствующее минимальному выпрямленному напряжению:

$$E_{2\min} = \frac{U_{d\min}}{2{,}34} = 8{,}58 \text{ В};$$

$$E_{2\min} = \frac{U_1}{\sqrt{3}} \frac{W_2}{(W_o + W_д + 3W_c)};$$

$$W_o + W_д + 3W_c = \frac{U_1 W_2}{\sqrt{3}\cdot E_{2\min}} = \frac{380\cdot 10}{1{,}73\cdot 8{,}58} = 256 \text{ витков}.$$

4. Принимая максимальное напряжение I диапазона равным минимальному напряжению II диапазона, имеем:

$$W_o + W_д = W_o + 3W_c; \quad W_д = 3W_c;$$

$$W_c = \frac{256 - W_o}{6} = 24 \text{ витка}; \; W_д = 72 \text{ витка}.$$

В современных выпрямителях со ступенчатым регулированием, например ВС-300Б, или Варио-Стар (см. табл. 4.41), переключатель *S2* имеет более сложное устройство: переход от ступени к ступени осуществляется в три приема. Так, при переходе от положения *1* к положению *2* (см. рис. 4.118) первым щелчком переключателя добавляются витки секции W_{c1} фазы *A*, вторым – витки W_{c1} фазы *B*, затем витки W_{c1} фазы *C*. В результате полное введение трех секций W_c происходит в девять переключений *S2*, что дает десять ступеней регулирования, общее число ступеней выпрямителя становится равным 20. Незначительная асимметрия выпрямленного напряжения не отражается на сварочных свойствах выпрямителя.

Статические внешние характеристики выпрямителей со ступенчатым регулированием имеют жесткость 2,5…3 В / 100 А (см. рис. 4.98, *б*). Динамические характеристики определяются в первую очередь индуктивностью дросселя L (см. рис. 4.119), ограничивающей скорость нарастания тока при замыкании сварочной цепи каплей расплавленного металла.

При токах сварки до 200 А индуктивность дросселя составляет 150…200 мкГ, при больших токах $L = 400…500$ мкГ.

Выпрямитель для полуавтоматической сварки в защитных газах ВДГ-303 в настоящее время является единственным выпрямителем с плавно-ступенчатым регулированием.

Ступенчатое регулирование осуществляется путем изменения коэффициента трансформации силового трансформатора, первичные обмотки которого включаются на диапазоне больших напряжений в треугольник с отводами, на диапазоне средних напряжений – в треугольник, а на диапазоне малых напряжений – в звезду с использованием отводов. Плавное регулирование напряжения выполнено за счет дросселя насыщения, шесть рабочих обмоток которого включены последовательно с шестью вентилями выпрямительного моста. Принцип работы дросселя насыщения и устройство выпрямителя ВДГ-303 известны из литературы.

Основной объем механизированной сварки выполняется с использованием универсальных тиристорных сварочных выпрямителей сер. ВДУ. Выпрямители этой серии имеют ЖВХ и ПВХ, обеспечивают плавное регулирование напряжения тока в достаточно широких пределах (см. табл. 4.41), стабилизацию режима сварки при колебаниях сетевого напряжения, дистанционное управление рабочим напряжением или сварочным током. В универсальных выпрямителях используются все рассмотренные выше схемы выпрямления: мостовая в источниках на номинальный ток 300 А, шестифазная с уравнительным реактором в ВДУ-505, -506, кольцевая в более мощных выпрямителях. Замена неуправляемых вентилей на управляемые (тиристоры) не изменяет расчетных соотношений, приведенных в табл. 4.39, поскольку в режиме максимальной мощности выпрямителя тиристоры полностью открыты и идентичны неуправляемым венти-

лям. Исключение составляет уравнительный реактор, напряжение на обмотке которого растет по мере увеличения глубины регулирования выпрямителя, вместе с ростом амплитуды переменной составляющей выпрямленного напряжения. Максимальное значение расчетной мощности реактора 21 % от мощности нагрузки.

Сер. ВДУ разработана в 80-е годы XX века, и с тех пор в выпрямителях изменялись только несущественные детали конструкции и комплектующие изделия. Статическим внешним характеристикам тиристорных выпрямителей можно придать практически любую форму: конструировать комбинированные характеристики (см. рис. 4.97), осуществлять «горячий пуск» (форсаж тока в момент касания электродом изделия) и т.п. Правильно выбранные внешние характеристики помогают решать такие конкретные задачи, как качественная наплавка деталей, сварка в среде углекислого газа вертикальных швов методом сверху вниз на достаточно больших токах и ряд других.

Прогресс тиристорных выпрямителей в части динамических характеристик ограничен природой собственно тиристора. Быстродействие выпрямителя не может быть >3,3 мс (1/6 периода сетевого напряжения), так как включенный тиристор остается в открытом состоянии до момента коммутации. Современные технологии сварки плавящимся электродом, отслеживающие каплю электродного металла на всех стадиях ее существования – формирования, образования шейки, касания сварочной ванны, отрыва от электрода и перехода в ванну, – требуют в сотни раз большего быстродействия. Такое быстродействие могут обеспечить только инверторы и транзисторные регуляторы.

Транзисторные инверторы. Публикаций по работам в области инверторов для сварки практически нет. Приводимые ниже основные соотношения параметров инвертора, экспериментальные зависимости и осциллограммы получены в процессе разработки в ИС России (б. ВНИИЭСО) однотактного инвертора УДГ-350 (Симферопольский электромашиностроительный завод, 1987 – 1998 гг.) и двухтактного инвертора ВДЧИ-252 (Воронежский авиаприборостроительный завод, 1991 – 1996 гг.).

Схема однотактного инвертора (рис. 4.120) содержит два силовых транзисторных ключа (СТК), *VT1* и *VT2*, высоковольтные диоды

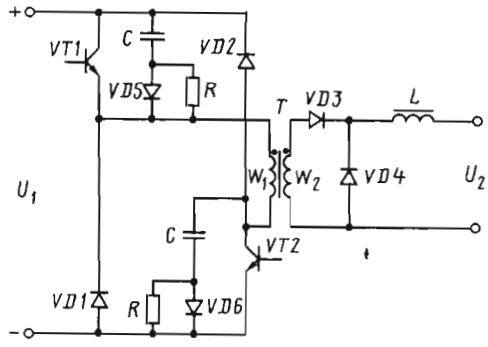


Рис. 4.120. Силовая схема однотактного инвертора

VD1 и *VD2* первичного контура и низковольтные *VD3* и *VD4* вторичного, силовой трансформатор *T* и сглаживающий дроссель *L*. Диод *VD3* служит для выпрямления тока вторичной обмотки трансформатора, диод *VD4* («обратный диод») поддерживает ток дуги при закрытых СТК. Для снижения потерь переключения СТК предусмотрены защитные цепи (конденсаторы *C*, диоды *VD5* и *VD6*, разрядные резисторы *R*).

Двухконтактный диод состоит из двух однотактных, включенных параллельно по питанию от выпрямленного сетевого напряжения U_1 и работающих на единую нагрузку через общий дроссель.

Естественная (без обратных связей) внешняя характеристика инвертора для конкретного значения $\gamma = \frac{t_и}{T}$ показана на рис. 4.121, *б* сплошной линией, штриховой линией обозначена идеальная характеристика, без учета внутренних индуктивностей и сопротивлений. На рис. 4.121, *в* представлена форма напряжения питания вторичного контура.

СТК. Максимальная мощность, коммутируемая СТК инвертора и определенная как произведение значения тока ключа до начала коммутации $I_{1\max}$ (рис. 4.121, *а*) на напряжение на ключе после коммутации, $P_к = I_{1\max}U_1$. Для однотактной схемы при идеальных условиях γ = 0,5; $U_{20} = U_{2ном} = \gamma U_{2\max}$ максимальная мощность $P_к = U_1 I_{1\max} = U_1 \frac{I_{2\max}}{K_{тр}} = 2P_{ном}$, где $P_{ном} = U_{2ном} I_{2ном}$ – номинальная мощность нагрузки, $K_{тр} = \frac{W_1}{W_2} = \frac{U_1}{U_{2\max}} = \frac{\gamma U_1}{U_{2ном}}$.

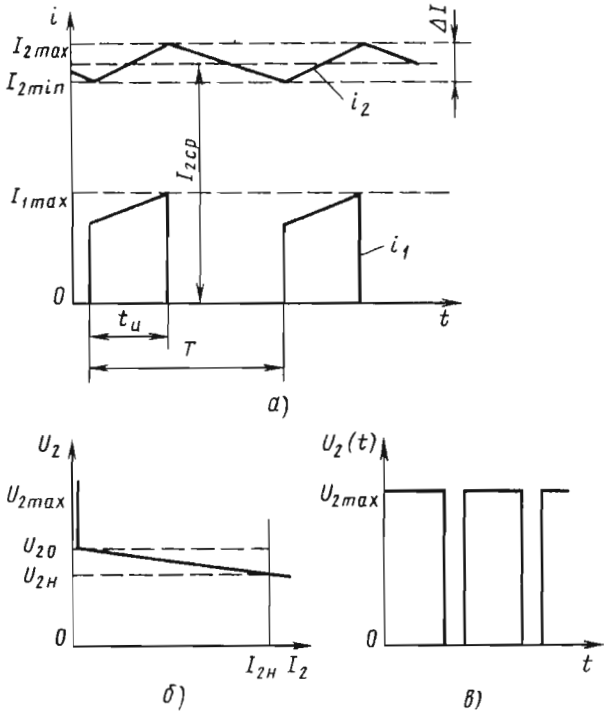


Рис. 4.121. К работе инвертора:
а – кривые первичного и вторичного тока $i_1 = f(t)$, $i_2 = f(t)$; *б* – внешняя характеристика; *в* – напряжение $U_2 = f(t)$ в режиме холостого хода

Коммутация ключом двойной мощности нагрузки объясняется тем, что в однотактных схемах энергия питающей сети передается в нагрузку не непрерывно, а лишь в течение половины периода работы инвертора.

Для двухтактной схемы при идеальном коэффициенте заполнения $\gamma = 1$ максимальное напряжение вторичных обмоток равно номинальному напряжению нагрузки и коммутируемая транзистором мощность $P_{к\max} = U_1 I_{1\max} = U_1 \dfrac{I_{2ном}}{K_{тр}} = P_{ном}$. Суммарная коммутационная мощность СТК в одно- и двухтактной схемах одинакова и равна $4P_{ном}$.

При включении и выключении транзистор находится под одновременным воздействием больших тока и напряжения. На рис. 4.122 приведены эпюры тока и напряжения ключа, коммутирующего ток 40 А при напряжении 520 В. Поскольку нагрузка СТК индуктивная, он включается практически без тока, мгновенная мощность ≤250...350 Вт.

При выключении транзистора, шунтированного конденсатором C = 0,01 мкФ, в транзисторе выделяется мгновенная мощность 2100...2300 Вт. Увеличение емкости до 0,1 мкФ затягивает процесс нарастания тока на 0,5 мкс, что позволяет почти в 5 раз уменьшить амплитуду всплеска мощности. Заряд конденсатора идет через диод защитной цепочки *VD5* (см. рис. 4.120), а разряд – через токоограничительное сопротивление R. Конденсатор должен разрядиться за время импульса, поэтому $3RC \le t_{и\min}$, где $t_{и\min}$ – минимальное значение длительности импульса во всех возможных режимах сварки. Мощность резистора $P_R = U_1^2 C f_к / 2$, где $f_к = \dfrac{1}{T}$ – частота коммутации ключа.

Силовой трансформатор. Расчетная мощность силового трансформатора, принятая как произведение действующего значения тока вторичной обмотки на максимальное значение напряжения обмотки, составляет: для однотактных

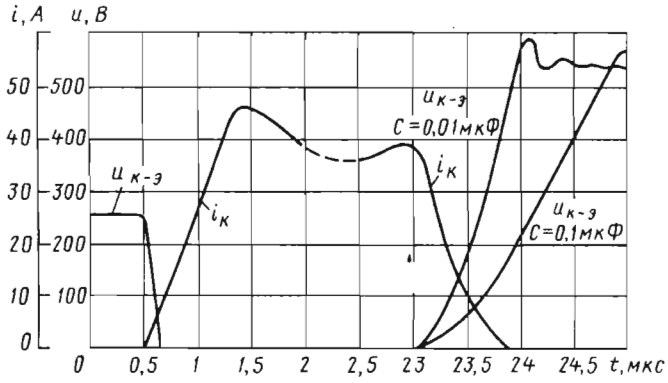


Рис. 4.122. Осциллограммы напряжения коллектор – эмиттер $u_{к-э}$ и тока $i_к$ коллектора при коммутации СТК

схем $P_{тр} = U_{2max} I_2 = \frac{U_{2ном}}{\gamma} \frac{I_{2ном}}{\sqrt{2}} = \sqrt{2} P_{2ном}$; для двухтактных $P_{тр} = \frac{\sqrt{2}}{2} P_{2ном}$ (для одного трансформатора). Экспериментальная зависимость e_w, В / виток, от расчетной мощности силового трансформатора с магнитопроводом из феррита марки 3000 НМС дана на рис. 4.123. Число первичных витков трансформатора $W_1 = U_1 t_и / S\Delta B$, где S – сечение магнитопровода, м^2; ΔB – изменение индукции в феррите за время импульса $t_и$. Безопасное значение $\Delta B = 0{,}25$ Тл.

Дроссель. При определении оптимального значения индуктивности дросселя необходимо учитывать, что пульсация сварочного тока увеличивает ток включения транзистора: $I_{1max} = \frac{I_{2ср}}{K_{тр}} + \frac{\frac{1}{2}\Delta I}{K_{тр}} + I_μ$, где $I_μ$ – ток намагничивания трансформатора в момент выключения СТК. Относительное увеличение тока выключения ключа, связанное с пульсацией тока нагрузки, $\beta = \frac{\frac{1}{2}\Delta I}{I_{2ном}}$.

На рис. 4.124 приведена зависимость $\beta = f(L)$ для двухтактного инвертора с параметрами $U_{2\,max} = 60$ В; $I_{2\,ном} = 250$ А; $f_н = 2f_к = 32$ кГц, позволяющая оценить влияние индуктивности на приращение тока выключения СТК. Очевидно, что при $L < 5 \cdot 10^{-6}$ Г ток включения резко возрастает, а увеличение индуктивности свыше $L = 15 \cdot 10^{-6}$ Г практически не снижает ток выключения СТК.

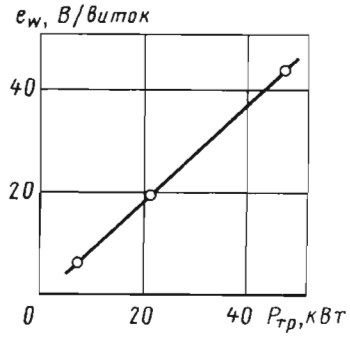


Рис. 4.123. Зависимость параметра e_w от расчетной мощности трансформатора

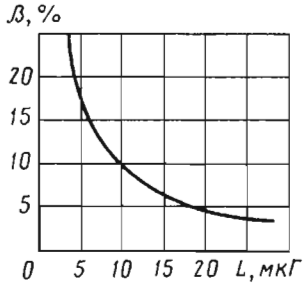


Рис. 4.124. Зависимость коэффициента пульсации β от индуктивности дросселя для двухтактного инвертора

Значение индуктивности сварочного контура определяет и динамические свойства инвертора. Известно, что для высококачественного управления процессом сварки в среде углекислого газа скорость нарастания сварочного тока должна быть $\geq 2 \cdot 10^6$ А/с. В рассматриваемом примере двухтактного инвертора такая скорость нарастания тока соответствует при напряжении дуги 30 В значению индуктивности $L = 15 \cdot 10^{-6}$ Г. С учетом индуктивности сварочных проводов (~1 мкГ/м) находим по графику рис. 4.124 для $L = 10$ мкГ значение $\beta = 10$ %, что при токе сварки $I_{2\,ном} = 250$ А соответствует размаху пульсации $\Delta I = 50$ А. Частота пульсации $f_н = \dfrac{U_{2max}}{4L\Delta I} = 30$ кГц, что отвечает частоте коммутации транзисторов $f_к = 15$ кГц.

Скорость нарастания тока нагрузки не зависит от того, по одно- или двухтактной схеме выполнен инвертор. При равных выходных параметрах и индуктивности цепи нагрузки ток на выходе однотактного инвертора возрастает под действием двойного по сравнению с двухтактным напряжения, однако это обстоятельство компенсируется вдвое меньшим коэффициентом заполнения. На рис. 4.125 даны эпюры нарастания тока короткого замыкания в нагрузке двух- (штриховая линия) и однотактного инверторов.

Индуктивность сглаживающего дросселя должна быть резко нелинейной. На рис. 4.126 приведена зависимость индуктивности дросселя инвертора ВДЧИ-252 от тока. Дроссель выполнен на ферритах 3000 НМС без воздушного зазора. Такая конструкция дросселя позволяет многократно уменьшить размах пульсаций

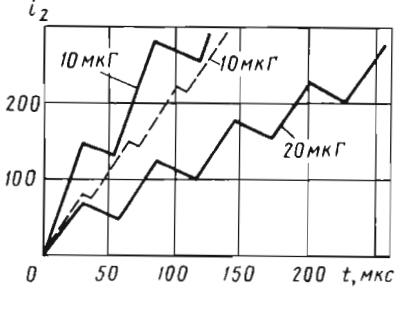


Рис. 4.125. Нарастание тока короткого замыкания в нагрузке двухтактного (штриховая линия) и однотактного инвертора

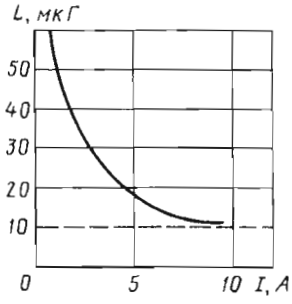


Рис. 4.126. Зависимость индуктивности дросселя инвертора от тока нагрузки

сварочного тока в диапазоне 2...5 А и обеспечить тем самым его непрерывность. На токах >10 А дроссель может рассматриваться как воздушная катушка индуктивности.

Технические характеристики отечественных инверторных источников питания для сварки приведены в табл. 4.42. Параметры тиристорных инверторов предприятия «ФЕБ» (г. Санкт-Петербург) предоставлены изготовителем.

Многопостовые выпрямители для РДС. Выпрямители с балластными реостатами предназначены для одновременного питания постоянным током через балластные реостаты нескольких сварочных постов. Выпрямители на номинальный ток 630 А выполнены по трехфазной мостовой схеме, на токи 1250 и 1600 А – по кольцевой. Силовые трансформаторы таких выпрямителей изготовляют с минимальным рассеянием, поэтому их внешние характеристики достаточно жесткие: допустимое падение рабочего напряжения при увеличении тока нагрузки от $\dfrac{1}{2} I_{ном}$ до $I_{ном}$ не должно превышать 4 В. Технические данные выпрямителей приведены в табл. 4.43.

Балластные реостаты типа РБ-302 служат для формирования падающей характеристики и регулирования тока каждого поста. Простые и надежные системы питания с балластными реостатами имеют два существенных недостатка:

1) более половины потребляемой в процессе сварки электроэнергии теряется в балластных реостатах;

2) изменения напряжения на зажимах выпрямителя, связанные с колебаниями нагрузки, вызывают влияние одного сварочного поста на другой (явление взаимовлияния).

4.42. Технические характеристики инвенторов

Параметры	Марка инвентора						
	ПИРС-160	ВДУЧ-16М	ФЕБ-200М	ФЕБ-350М	ТИР-МАГ-50	ДС140	ДС250
Номинальный сварочный ток, А	160	200		300	500	140	250
Напряжение питающей сети, В	Трехфазное, 380	Однофазное, 220		Трехфазное, 380		Однофазное, 220	Трехфазное, 380
ПН, %	60	40		60			70
Пределы регулирования сварочного тока, А	5...180	25...200	40...200	40...350	80…500	25...140	25...250
Номинальное рабочее напряжение, В	27	28		32	40	26	30
Напряжение холостого хода, В	65	36	55	60	70	65	
Габаритные размеры, мм	675×250×280	600×285×365	215×350×500	300×440×600	500×500×920	290×540×456	
Масса, кг	17	20	23	45	140	10	18
Изготовитель	«Кристалл» (г. Николаев)	«Коммунар» (г. Харьков)	ФЕБ (г. Санкт-Петербург)		НИКИМТ (Москва)	«Технотрон» (г. Чебоксары)	

4.43. Технические характеристики многопостовых выпрямителей

Параметры	Марка выпрямителя						
	ВДМ-6302	ВДМ-1201-1	ВДМ-1601	ВДМ-1202С	ВДМ-2 × 313	ВДМ-4 × 313	ВДМ-4 × 3010
Число сварочных постов	4	8	9	8	2	4	4
Номинальный ток поста, А	315						
ПН поста, %	60						
Номинальное рабочее напряжение, В	68	60		65	32		
Способ регулирования	Балластные реостаты				ПШ		ПШ + Т
Пределы регулирования тока поста, А	12…315				60…315		±30 А дистанционно, 45 …315
Габаритные размеры, мм	750×700×900	1000×690×890		850×700×900	660×505×710	770×1030×620	890×1250×860
Масса, кг	300	380	480	350	160	300	480
Изготовитель	«Электрик»			СЭЛМА	ЭТА	ИС России	«Электрик»

Пример 7. Два сварщика работают от четырехпостового выпрямителя на номинальный ток 630 А. Режим сварки: $I_{д1} = I_{д2} = 200$ А; $U_{д1} = U_{д2} = 28$ В. Внешняя характеристика выпрямителя линейная, $U_{х.х} = 68$ В; $U_{ном} = 60$ В (наклон характеристики 0,0133 В/А). Как повлияет на токи сварки начало работы на том же режиме третьего сварщика?

Решение.

1. Определим напряжение на зажимах выпрямителя при работе двух сварщиков:

$$U_2 = 68 - 0{,}0133 \cdot 400 = 63 \text{ В}.$$

2. Сопротивление каждого реостата, набранное рубильниками для обеспечения заданного режима сварки: $R_б = \dfrac{U_2 - U_д}{I_д} = \dfrac{63 - 28}{200} = 0{,}175$ Ом.

3. При замыкании электрода на изделие третьим сварщиком ток в третьем балластном реостате будет $I_3 = \dfrac{U_2}{R_б} = \dfrac{63}{0{,}175} = 360$ А. Напряжение на зажимах выпрямителя в момент возбуждения третьей дуги: $U_2 = 63 - 0{,}0133 \cdot 360 = 58$ В.

4. Считая, что напряжение первой и второй дуги в момент возбуждения третьей дуги не изменилось, определяем изменение тока сварки, вызванное скачком нагрузки. Напряжение на первом и втором реостатах $U_{R_б} = 58 - 28 = 30$ В, ток реостата и дуги

$$I_{д1} = I_{д2} = \frac{30}{0{,}175} = 171 \text{ А}.$$

«Провал» тока при возбуждении третьей дуги составил 29 А, или ~15 %.

5. После возбуждения третьей дуги $U_2 = U_{2\,ном} = 60$ В; $I_{д1} = I_{д2} = I_{д3} = 183$ А, что на 8,5 % меньше установленного первоначального значения.

Многопостовые выпрямители без балластных реостатов. В многопостовых выпрямителях, работающих без балластных реостатов, использованы трансформаторы с повышенным рассеянием и шунтовым регулированием тока поста. На рис. 4.127 представлен эскиз силового трехфазного трансформатора от двухпостового выпрямителя ВДМ-2 × 313. В средней части стержней магнитопровода установлены катушки первичной обмотки (W_1 на рис. 4.125). Трансформатор имеет две группы вторичных обмоток: одна группа у верхнего ярма, вторая – у нижнего, симметрично первой. Каждая группа вторичных обмоток имеет свой выпрямительный мост для питания сварочного поста постоянным током. Режим сварки для поста задан положением шунтовой пары *А* (первый пост) или *В* (второй пост) в окне магнитопровода (см. рис. 4.127). Отметим, что при одновременном коротком замыкании сварочных

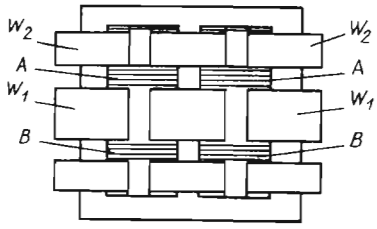


Рис. 4.127. Силовой трансформатор двухпостового выпрямителя

цепей первичный поток замыкается по воздуху или по шунтам, минуя как верхнее, так и нижнее ярмо. Влияние одного поста на другой в такой конструкции происходит только через активные падения напряжения в первичной обмотке трансформатора. Испытания показали, что взаимовлияние постов при работе выпрямителя ВДМ-2 × 313 ≤2…3 %. Расход электроэнергии в ~2 раза меньше, чем при питании двух постов от выпрямителя с жесткой характеристикой с применением балластных реостатов.

В корпусе четырехпостового выпрямителя ВДМ-4 × 313 установлены два двухпостовых трансформатора (см. рис. 4.127) и четыре выпрямительных моста.

В корпусе выпрямителя ВДМ-4 × 3010 размещены силовые узлы четырех однопостовых выпрямителей типа ВД.Д-313 с системой дистанционной подрегулировки режима сварки. Взаимовлияние постов в этом выпрямителе отсутствует. Каждый сварщик для корректировки значения сварочного тока использует свой пульт дистанционного управления.

Сварочные генераторы и агрегаты. За 15 лет, прошедших с момента издания справочника по оборудованию для дуговой сварки, в обильном когда-то семействе вращающихся сварочных машин произошли большие изменения.

На российском рынке остались изделия только завода «Искра» и вильнюсского завода «Велга», оборудования из Дагестана и Грузии практически нет. Почти полностью сняты с производства сварочные преобразователи, коллекторные генераторы и агрегаты с бензиновыми двигателями.

Завод «Искра» предлагает потребителю вентильные однопостовые генераторы для ручной сварки ГД-1601, ГД-2001, ГД-2507, ГД-316, ГД-4004 и ГД-5001 на номинальные токи соответственно 160, 200, 250, 315, 400 и

500 А, двухпостовый генератор ГД-2 × 2501 и преобразователь ПД-4001 на ток 400 А. Минимальный ток генераторов 35…50 А, ПН = 60 %, напряжение холостого хода 90…100 В. Двухпостовый агрегат АДД-2 × 2501 и однопостовый АДД-4004 могут поставляться в передвижном исполнении, на одноосном прицепе; для этих агрегатов указан расход дизельного топлива: 5,2 кг/ч. Возможна поставка агрегатов с дополнительным генератором на 220 В, мощностью 2 кВт, для питания печи сушки электродов, ручного инструмента и освещения.

Сварочные агрегаты для РДС производства завода «Велга» АДД-4004, АДД-4002 и АДД-4003 рассчитаны на ПН = 60 % при сварочном токе 400 А, минимальный ток 60 А (кроме агрегата АДД-4001Д, выполненного на ПН = 35 % и с нижним значением тока 15 А). Между собой агрегаты различаются конструктивным исполнением, расположением на шасси или прицепе, наличием дополнительного оборудования.

Агрегаты заводов «Велга» и «Искра» оснащены дизельными двигателями с воздушным охлаждением типов Д-120, Д-130 и Д-144.

4.5.4.3. ИНВЕРТОРНЫЕ ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ ДЛЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ

Сравнительные характеристики и тенденции развития инверторных выпрямителей ведущих зарубежных и отечественных фирм. В наши дни из-за бурного прогресса электронной и электротехнической промышленности достаточно большое количество различных фирм в Западной Европе и США занято выпуском разнообразных сварочных инверторных выпрямителей. Среди них – «Kemppi» (Финляндия), «Fronius» (Австрия), «Elma» (Германия), «ESAB» (Швеция), «SAF» (Франция), «Cebora» (Италия), «Lincoln» (США). Среди данных фирм следует выделить «Kemppi», «Fronius» и «ESAB». Первые две являются пионерами в технической разработке самих инверторных выпрямителей, последняя выделяется быстрым и успешным внедрением новейших разработок в серийное производство. Остальные фирмы, как правило, используют опыт и разработки данных компаний. Далее здесь будут рассмотрены сварочные инверторы именно этих трех фирм.

В современном сварочном инверторе можно выделить три основные части, которые определяют его возможности и области применения:

1) силовой агрегат – тиристорный или транзисторный инвертор, от которого зависят в основном энергетические характеристики сварочного инвертора и возможности его использования;

2) систему управления инвертором, задающую функциональные и технологические возможности сварочного инвертора и определяющую область его применения;

3) сервисные устройства, либо расширяющие область применения сварочного инвертора, либо упрощающие работу с ним.

Именно сочетание этих частей в конкретном инверторе и определяет его потребительскую и рыночную стоимость. Так, с увеличением энергетических характеристик инвертора, усложнением его системы управления, расширением состава сервисных устройств растет его потребительская стоимость, а значит, резко возрастает его цена, что связано с увеличением доли дорогостоящего электронного оборудования в составе инвертора. В связи с этим для сварочных инверторных источников питания проблема цена – качество стоит наиболее остро и требует от потребителя данных источников тщательного технико-экономического анализа на этапе выбора источника питания. Следует также учесть, что при росте функциональных возможностей инверторного источника питания, как правило, снижается его надежность и резко ужесточаются требования к условиям его эксплуатации. В частности, повышаются требования к стабильности его питания электрическим током и условиям окружающей среды (температура, влажность) для обеспечения надежной работы электронных схем управления. В настоящее время большинство инверторных источников питания не допускают колебания питающего напряжения >10 % от номинала и не работают при температуре <20 и >35 °С при относительной влажности >75 %.

В зависимости от номинального тока силового агрегата инвертора их можно разделить на:

- маломощные с $I_н \leq 160$ А;
- средней мощности с $I_н \leq 250$ А;
- мощные с $I_н \geq 400$ А.

Инверторы малой мощности, как правило, имеют однофазное питание, иногда без стабилизации напряжения питающей сети и предназначены для сварочных работ в быту или мелких подварочных работ при монтаже и

ремонте. Они предназначены только для сварки штучными покрытыми электродами диаметром 2...3 мм, имеют падающую ВАХ, максимально упрощенную систему управления, минимальный состав сервисных устройств и небольшие массогабаритные показатели. Это ограничивает их технологические возможности, однако резко снижает их стоимость (250...600 долл. США), повышает их надежность. Для промышленного использования данные инверторы, как правило, непригодны из-за низкого ПВ (<40 %) и поэтому нами не будут рассматриваться. Инверторы средней мощности и мощные имеют только трехфазное питание и обязательно со стабилизацией напряжения питающей сети. Эти инверторы различаются в основном системами управления, которые задают технологические возможности инвертора. В связи с этим инверторы можно разделить на:

– специализированные, предназначенные для сварки только одним способом (как правило, РДС);

– комбинированные, служащие для сварки двумя способами (как правило, РДС и неплавящимся электродом в защитном газе);

– универсальные, рассчитанные на все возможные способы сварки плавлением (РДС, плавящимся электродом в защитном газе и под флюсом, неплавящимся электродом в защитном газе с присадочной проволокой и без).

В качестве примера специализированного инвертора для сварки рассмотрим инвертор «Master» сер. 2800, 2850, 3500 и 5000 фирмы Kemppi. Данный источник обеспечивает РДС при $I_н$ = 280, 350 и 500 А и напряжении питающее сети 230, 400 или 460 В. Пример данного источника приведен на рис. 4.128. Источник имеет падающую ВАХ, обеспечивает РДС при диаметре электрода 1,5...6 мм, при плавном изменении тока от 15 до 280 (350, 500) А, ПВ = 60 % при $I_{св}$ = 213 А и напряжении холостого хода 75 В (мощность холостого хода до 25 Вт), масса источника 22...48 кг. Динамические характеристики дуги регулируются плавно, как и сварочный ток, с помощью потенциометра на передней панели источника питания (рис. 4.129). К инвертору можно подключить дистанционный пульт (рис. 4.130) для регулирования силы сварочного тока на рабочем месте или вольтамперметр (рис. 4.131) для настройки сварочных режимов через разъем на передней панели источника. Охлаждающий вентилятор источника работает под управлением

Рис. 4.128. Сварочный инвертор «Master» фирмы «Kemppi»

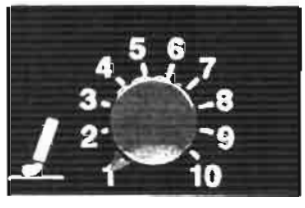


Рис. 4.129. Потенциометр для регулирования динамических характеристик дуги

Рис. 4.130. Дистанционный пульт для плавного регулирования силы сварочного тока

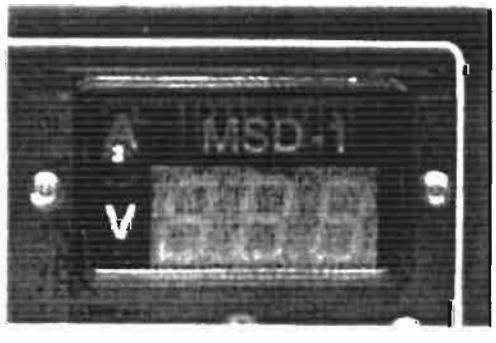


Рис. 4.131. Вольтамперметр с жидкокристаллическим дисплеем

термостата. На передней панели источника имеются сигнальная лампа температурного режима работы источника («Перегрев») и сигнальная лампа для индикации работы источника под напряжением. Источник обеспечивает сварку при использовании различных типов электродов с различными типами обмазки и полярности сварки.

«Master 5000» отличается от остальных источников этой серии. Он обладает адаптивной динамикой дуги, позволяющей оптимизировать характеристики дуги в зависимости от типа покрытия электрода и уменьшать разбрызгивание.

Комбинированные сварочные источники питания рассчитаны на РДС и сварку неплавящимся электродом (СНЭ) в среде инертного газа или смесях. Данное совмещение объясняется возможностью использования одной и той же ВАХ – падающей (или ее вариациями – крутопадающей или штыковой при использовании системы стабилизации силы сварочного тока в источнике) для осуществления данных способов сварки.

Применение рассматриваемых источников для СНЭ в защитных газах требует от источника осуществления функций контроля за подачей защитного газа в процессе сварки с целью исключения возможности СНЭ без газа. Кроме того, источник для соблюдения ряда технологических требований должен управлять длительностью продувки защитным газом перед началом процесса сварки и после ее окончания для защиты сварного соединения от окисления.

В отличие от специализированных инверторов комбинированные дополнительно оснащаются более сложной системой управления для реализации технологических режимов при СНЭ – импульсной сварки униполярными импульсами тонколистовых конструкций из углеродистых сталей и биполярными импульсами для сварки алюминия и алюминиевых сплавов и нержавеющих сталей. Кроме того, для осуществления зажигания дуги при СНЭ данные инверторы оснащаются сварочными осциллляторами.

В качестве примера данного комбинированного инвертора рассмотрим инвертор «Mastertig» сер. 1500, 2200, 2800, 3500, 3500 В фирмы «Kemppi» (рис. 4.132). Источник имеет падающую ВАХ при диаметре электрода для РДС 1,5…6 мм при плавном изменении тока от 15 до 280 (150, 220, 350) А, ПВ = 60 % при

Рис. 4.132. Сварочный инверторный источник питания «Mastertig»

$I_{св}$ = 213 А и напряжении холостого хода 70 В (мощность холостого хода до 25 Вт), масса источника 13,5…48 кг. Панели управления данного прибора и инвертора «Master» совпадают.

Передняя панель источника оснащена мнемосхемой для облегчения программирования его режимов работы (рис. 4.133).

Источник «Mastertig» позволяет регулировать:

– поддув газа перед началом сварки в течение 0,1…1,5 с;

– скорость спада тока по окончании сварки в продолжение 0,5…15 с;

– поддув газа после окончания сварки в течение 3…30 с;

– поддув газа после окончания сварки и скорость спада тока (они регулируются также автоматически в зависимости от значений сварочного тока);

– импульсный ток 150/220/280/350 А (в зависимости от марки источника);

– внутреннее соотношение импульса 10…75 %;

– длительность цикла импульса в течение 0,02…1,5 с (50…0,7 Гц);

– дежурный ток 20…40 % от импульсного тока.

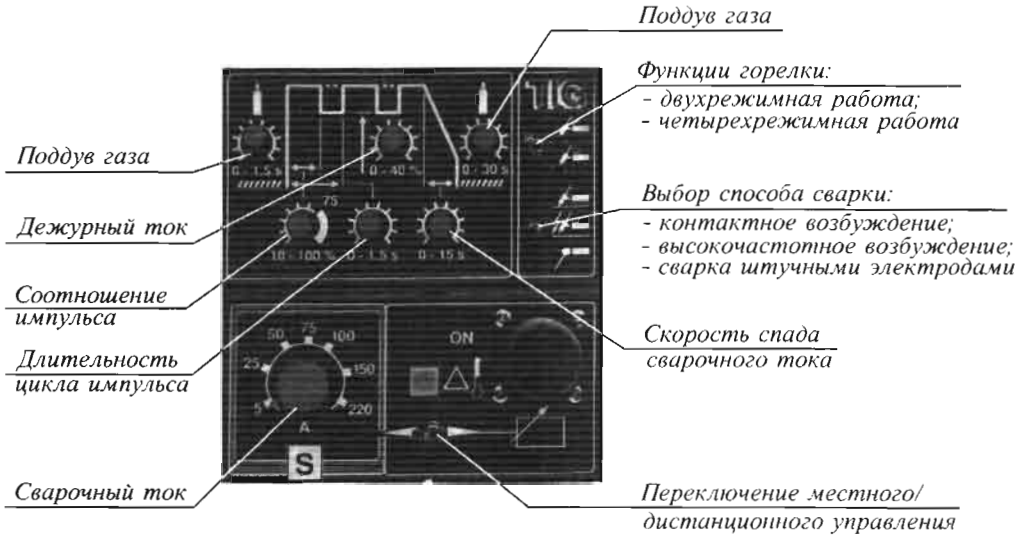


Рис. 4.133. Передняя панель сварочного источника питания «Mastertig»

Необходимость одновременного управления процессом подачи защитного газа, зажиганием дуги и наращиванием силы сварочного тока с помощью одной кнопки на сварочной горелке требует от сварочного источника наличия различных режимов начала и окончания сварки – в зависимости от навыков сварщика и типа свариваемого изделия. В инверторе «Mastertig» предусмотрено четыре различных режима, рассматриваемых ниже.

1. Двухрежимное зажигание от осциллятора: нажимается триггер на горелке, подается газ, и по истечении выбранного времени подачи газа зажигается дуга и сварочный ток повышается до установленного уровня в течение заданного времени нарастания. Освобождается триггер, и сварочный ток падает за установленное время, после гашения дуги газ еще подается в течение установленного времени.

2. Двухрежимное зажигание касанием: легко прижимается конец электрода к свариваемому изделию, нажимается триггер горелки вниз, спокойно поднимается электрод от свариваемой детали, дуга зажигается и сварочный ток повышается до установленного уровня в течение заданного времени нарастания. Освобождается триггер, и сварочный ток падает за установленное время, после гашения дуги газ еще подается в течение заданного времени. Время спада тока может быть прервано кратким нажатием триггера. Со спада тока можно обратно перейти на сварочный ток, нажимая триггер горелки вниз. Тогда ток поднимается со скоростью, соответствующей скорости спада тока.

3. Четырехрежимное зажигание от осциллятора: нажимается триггер на горелке вниз, подается газ, освобождается триггер и после истечения выбранного времени подачи газа дуга зажигается и сварочный ток повышается до установленного уровня в течение заданного времени нарастания. Нажимается триггер вниз. Сварка еще продолжается. Освобождается триггер, сварочный ток падает за установленное время, после гашения дуги газ еще подается в течение установленного времени.

4. Четырехрежимное зажигание касанием: легко прижимается конец электрода к свариваемому изделию, триггер горелки нажимается вниз на короткий момент, поднимается спокойно электрод от свариваемой детали, дуга зажигается и сварочный ток повышается до установленного уровня в течение заданного времени нарастания. Нажимается триггер вниз. Сварка еще продолжается. Освобождается триггер, и сварочный ток падает за установленное время, после гашения дуги газ еще подается в течение установленного времени. Время спада тока может быть прервано кратким нажатием триггера. Со спада тока можно снова перейти на сварочный ток, нажимая триггер горелки вниз. Тогда ток поднимается со скоростью, соответствующей спаду тока.

Источники питания типа «Mastertig» могут быть оснащены дополнительной системой управления «Minilog» и «Impuls», которые позволяют:

– регулировать баланс амплитуд биполярных импульсов (как на прямой, так и на обратной полярности);

– регулировать частоту тока при сварке на переменном токе 50…200 Гц;

– обеспечивать сварку заклепками (точечная сварка с глубоким проплавлением) с длительностью цикла сварки 0…10 с.

Весьма близким к данному типу источника является инвертор «Aristotig 250» фирмы «ESAB» (рис. 4.134).

Источник «Aristotig 250» имеет падающую ВАХ при плавном изменении тока от 5 до 250 А, ПВ = 60 % при $I_{св}$ = 250 А как для РДС, так и для СНЭ и напряжении холостого хода 90 В, масса источника от 32 кг. Источник позволяет регулировать:

– поддув газа перед началом сварки в течение 0…5 с;

– спад тока по окончании сварки в продолжение 0…10 с;

– поддув газа после окончания сварки в течение 0…30 с;

– поддув газа после окончания сварки и скорость спада тока (регулируются также автоматически в зависимости от значений сварочного тока);

– импульсный ток 250 А;

– длительность импульса и паузы 0,001…5;

– частоту пульсаций 0,3…300 Гц.

Помимо перечисленных функций инвертора «Mastertig» источник «Aristotig» обладает возможностью регулировать скорость нарастания и спада тока в импульсе (передний и задний фронты импульса). Это позволяет получать не только «жесткие» прямоугольные импульсы, но и «мягкие» трапециевидные, весьма эффективные при сварке тонкостенных конструкций.

Данный источник также можете быть оснащен дистанционным пультом управления (рис. 4.135).

На передней панели этого инвертора имеется жидкокристаллический дисплей для настройки токовых режимов сварки.

Также близок к рассматриваемым источникам и инвертор фирмы «Fronius» – «Magicwave 2000» (рис. 4.136).

Несмотря на то, что он питается однофазным напряжением, транзисторная схема инвертора позволяет получать сварочный ток до 200 А как для РДС, так и для СНЭ при минимальном значении тока до 3 А на постоянном токе и 5 А на переменном. Источник имеет ПВ = 60 % при токе 150 А и напряжение холостого хода 45 В. Эти показатели существенно ниже, чем у рассмотренных выше двух инверторов, что говорит об условной возможности объединения данных источников в одну группу. В то же время повышенная частота инвертирования (до 38 кГц) позволяет существенно снизить массу источника до 25 кг, что при названной силе сварочного тока – весьма неплохой показатель.

Рис. 4.134. Сварочный инвертор «Aristotig» фирмы «ESAB»

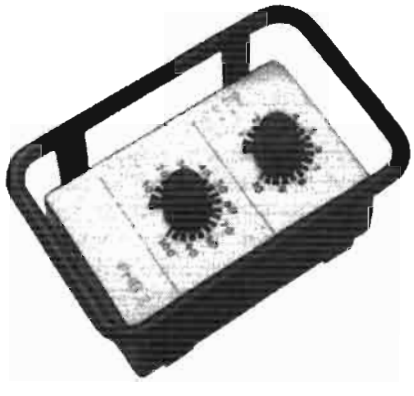


Рис. 4.135. Дистанционный пульт управления инвертора «Aristotig 250»

Рис. 4.136. Инверторный источник питания «Magicwave 2000»

Наиболее сложны и дорогостоящи универсальные инверторы, рассчитанные как на сварку РДС и СНЭ, так и на сварку плавящимся электродом в среде защитного газа и под флюсом (СПЭ).

Сложность данных источников, во-первых, объясняется необходимостью совмещения двух различных ВАХ источника: падающей, или штыковой, для РДС и СНЭ и жесткой (со стабилизацией напряжения источника) для СПЭ.

Во-вторых, помимо описанных выше функций комбинированного инвертора, включающего управление зажиганием дуги и подачей защитного газа, источник «Magicuwave 2000» чаще всего снабжают системой управления механизмом подачи присадочной проволоки при СПЭ, что необходимо для контроля процесса расплавления электродного металла путем управления параметрами режима сварки – «ток – скорость подачи проволоки». Эта схема управления также используется для зажигания дуги при СПЭ.

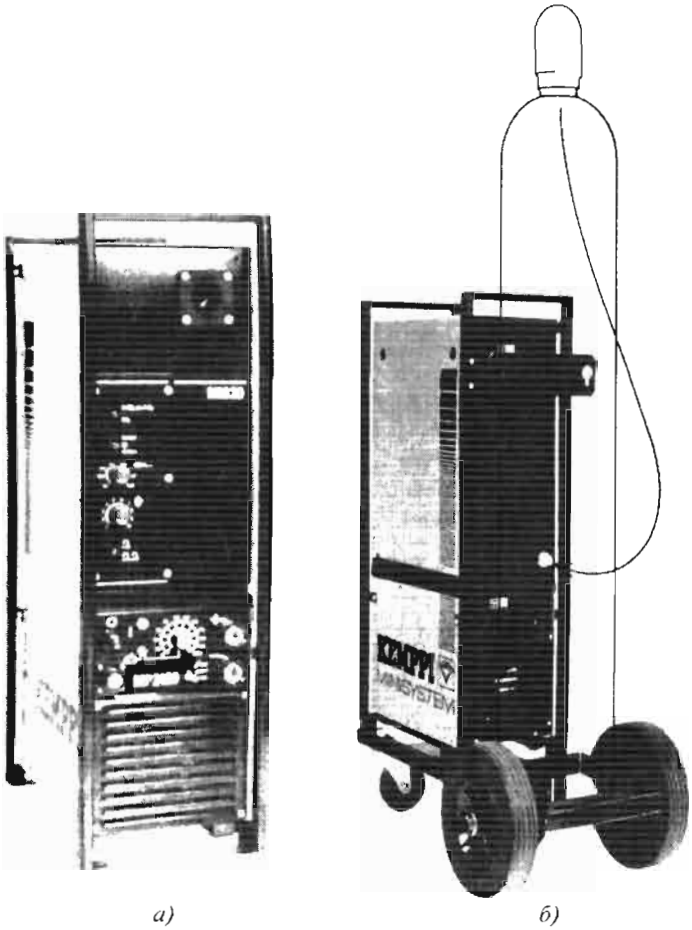
И, наконец, данный источник должен обеспечивать различные технологические режимы СПЭ, в том числе и с короткими замыканиями, и с различными видами переноса металла в дуге при сварке: крупно- и мелкокапельными и струйным.

Источники такого типа применяются только в профессиональных сварочных системах и не используются в быту или при мелких ремонтных или монтажных работах. Отсутствие на рынке сварочных инверторов для СПЭ, по всей видимости, объясняется их экономической эффективностью. Область применения системы специализированный инвертор для СПЭ + механизм подачи проволоки существенна уже по сравнению с универсальной системой, в то же время стоимость данных систем практически сравнима.

Универсальные сварочные инверторы входят в состав целого комплекса сварочного оборудования: источник питания – система газовой или флюсовой защиты – механизм подачи присадочной проволоки. Управление этим комплексом достаточно сложное и связано не только с необходимостью согласования работы всех его компонентов, но и с реализацией трудоемких технологических режимов сварки. В связи с этим система управления данным комплексом является вполне самостоятельным ее элементом.

В настоящее время существует две тенденции для реализации данной системы: 1) как отдельного блока, реализуемого чаще всего для мощных систем (мультисистемы), используемых на крупных производствах; 2) в виде встраиваемой в инверторный источник питания. В первом случае инвертор представляет собой традиционный силовой сварочный агрегат без сложной системы контроля и управления, во втором источник превращается в достаточно сложное техническое устройство, наделенное различными функциями. Именно последний вариант и представляет особый интерес. При этом следует отметить, что данный вариант конструктивного исполнения инверторного источника питания может включать как встроенный в источник (минисистема), так и внешний относительно автономный механизм подачи присадочной проволоки. Последний вариант исполнения не превращает полученную установку в мультисистему, так как система управления механизмом подачи присадочной проволоки размещается либо в механизме подачи, либо в инверторе, либо на обеих частях минисистемы.

К числу первых минисистем можно отнести «Minisystem MP 2400 Trio» фирмы «Kemppi» (рис. 4.137).



а) *б)*

Рис. 4.137. «Minisystem MP 2400 Trio»:
а – лицевая панель; *б* – схема установки на транспортную тележку и соединения с газовым баллоном

Данная система обеспечивает СПЭ при использовании присадочной проволоки диаметром 0,6...1,0 мм из стали и диаметром 1,0...1,2 мм из алюминия и его сплавов с использованием в качестве защитных газов аргона и углекислого газа, а также смесей газов – двух- (углекислый газ и аргон, аргон и кислород) и трехкомпонентных (углекислый газ, аргон, кислород). Скорость подачи присадочной проволоки 0...15 м/мин.

Схема инвертора позволяет получать сварочный ток 10 А при напряжении на дуге 14 В и плавно изменять его до 250 А при напряжении на дуге 26 В. Источник имеет ПВ = 25 % при токе 250 А и ПВ = 100 % при токе 110 А и мощности холостого хода 25 Вт, а также два способа регулирования СПЭ:

– однокнопочное – сварочный ток или подача проволоки в правильном соотношении с напряжением регулируются потенциометром выбора скорости подачи проволоки. При этом способе потенциометр регулирования сварочного тока на источнике тока должен быть установлен в минимальное положение. Иначе сварочное напряжение превышает правильное значение относительно сварочного тока;

– двухкнопочное – сварочное напряжение регулируется потенциометром источника тока. Сварочный ток или подача проволоки регулируется отдельным потенциометром.

Скорость подачи проволоки или сварочный ток регулируется по памятной шкале.

Источник имеет возможность выбора вида сварки:

– непрерывная сварка означает нормальную сварку, при которой напряжение и подача присадочной проволоки устанавливаются в заданном значении нажатием пуска горелки;

– в положении прерывистой сварки проволока подается циклически так, что перерыв между циклами неизменяем, ~0,3 с, но длительность цикла сварки регулируется потенциометром регулирования времени;

– в положении точечной сварки выполняется один цикл сварки, длительность которого выбирается потенциометром регулирования времени.

Другим наиболее характерным представителем минисистемы является «Aristo 315» фирмы «ESAB» (рис. 4.138). Данная система построена с использованием мощных металлокиселполупроводниковых транзисторов и микрокомпьютеров. Механизм подачи присадочной проволоки, так же как и в предыдущем инверторе, размещен в одном корпусе с силовой частью источника (рис. 4.139). Рассматриваемая система обеспечивает СПЭ с помощью

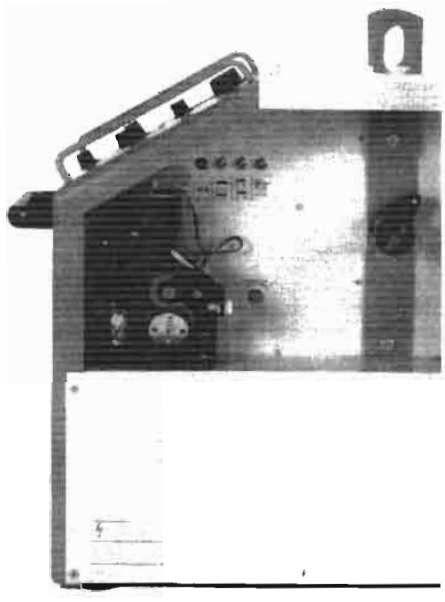


Рис. 4.139. Размещение механизма подачи проволоки в «Aristo 315»

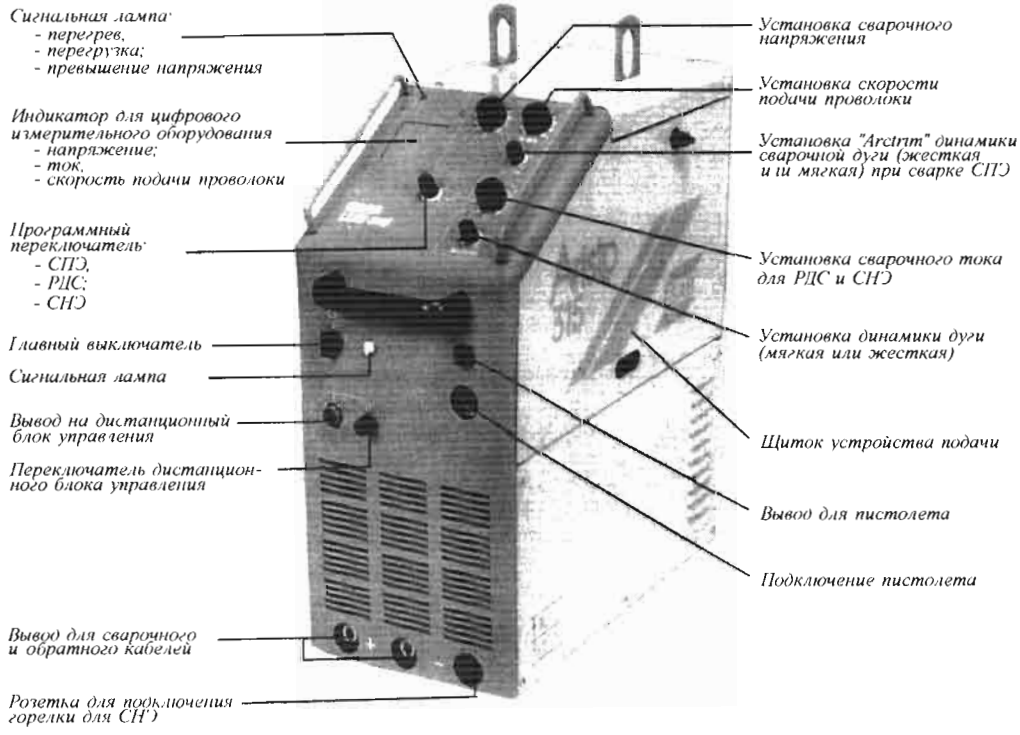


Рис. 4.138. Минисистема «Aristo 315»

присадочной проволоки диаметром 0,6…1,2 мм из стали и диаметром 1,0…1,2 мм из алюминия и его сплавов, 0,9…1,2 мм при использовании порошковой проволоки. Система оборудована электронно-управляемым устройством подачи присадочной проволоки для плавной подстройки скорости подачи проволоки от 0 до 18 м/мин. Электроника автоматически компенсирует отклонения скорости подачи, вызванные изменениями в сетевом напряжении, температуре, трении. Это обеспечивает возможность осуществления ползучего пуска, хода со скоростью в 2 раза ниже номинальной, регулирования времени перехода дуги с электрода на мундштук.

Для регулирования процесса сварки используется микрокомпьютер, поэтому сварочный агрегат обладает высокими сварочными характеристиками. Особыми его отличиями являются быстрое зажигание, низкое разбрызгивание и надежная стабильность дуги. Сравнительная средняя продолжительность зажигания дуги для данного аппарата и обычного полуавтомата с выпрямителем приведена на рис. 4.140. Продолжительность зажигания – это промежуток времени от момента прикасания электрода к детали до момента достижения стабильного процесса сварки.

Основные технические характеристики «Aristo 315»

Диапазон регулирования тока, А:	
для РДС	20…315
для СНЭ	8…315
для СПЭ	30…315
Подъем дуги (время зависит от тока), с:	
нарастание	1…2
спад	1,5…4,0
подача газа после сварки	3…15
Напряжение холостого хода, В	56
ПВ, %:	
при токе 250 А	100
при токе 315 А	60
Масса, кг	≤58

Главной особенностью рассмотренных инверторных источников является совмещение органов управления источника с его силовой частью и механизмом подачи присадочной проволоки. Для управления работой данных источников с рабочего места сварщика предусмотрено использование дистанционных пультов управления, весьма похожих на дистанционные пульты инверторных источников, рассчитанных на РДС и СНЭ. Однако, несмотря на возможность использования этих пультов, недостатком данных источников является необходимость размещения их весьма близко от места сварки. Это объясняется использованием в них механизмов подачи проволоки толкающего типа, что ограничивает расстояние, на которое они могут подать присадочную или электродную проволоку. Применение дополнительных механизмов подачи присадочной проволоки тяни-толкающего типа с целью увеличения расстояния подачи проволоки может существенно повысить стоимость такой системы и не всегда технически возможно.

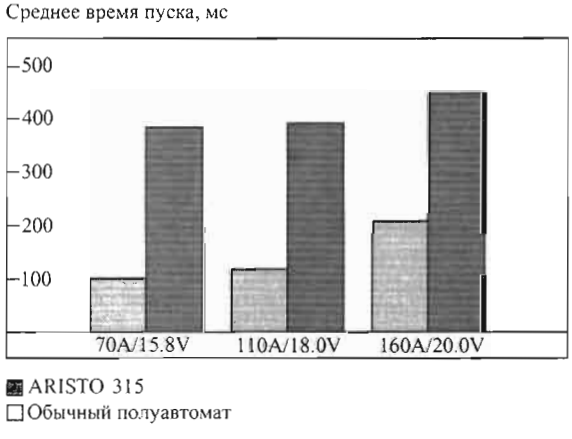


Рис. 4.140. Сравнительная характеристика по времени зажигания дуги «Aristo 315» и обычного полуавтомата на базе выпрямителя

С этих позиций использование мобильного или переносного механизма весьма перспективно, поскольку в данном случае только относительно небольшой и легкий механизм подачи проволоки необходимо подтянуть к месту сварки. При этом возможны два варианта размещения органов управления таким источником: на дистанционном пульте и на механизме подачи присадочной проволоки. Однако на практике чаще всего реализуется комбинированный способ. В качестве примера можно рассмотреть инверторный источник «T.I.M.E.-540» фирмы «Fronius» (рис. 4.141).

Данный источник рассчитан на сварку в четырехкомпонентной смеси защитных газов с вращающейся дугой, что обеспечивает повышенный коэффициент наплавки и требует увеличенной скорости подачи присадочной проволоки. Сварочный ток источника плавно изменяется от 3 до 500 А при изменении напряжения на дуге от 10 до 44 В, скорости подачи присадочной проволоки 0...50 м/мин, диаметре проволоки 0,8...1,6 мм. Источник имеет ПВ = 60 % при токе 500 А и массу ≤107,5 кг.

Главным недостатком всех рассмотренных источников является отсутствие надежного способа контроля и управления СПЭ при использовании импульсных режимов сварки. В то же время данный способ сварки представляется наиболее перспективным.

Рис. 4.141. Сварочный инверторный источник питания «T.I.M.E.-540»

В сварке плавящимся электродом перенос металла электрода в основном осуществляется двумя процессами: в диапазонах короткой и горячей дуги (рис. 4.142).

Рис. 4.142. Процесс переноса металла при различных режимах СПЭ

В процессе короткой дуги материал переносится крупными капельками в связи с короткими замыканиями. Благодаря низкой степени образования теплоты этот метод хорошо зарекомендовал себя при сварке тонких листовых материалов. Сварка также получается во всех пространственных положениях. Однако проблемами были образование брызг, непровары, валики невыгодной формы и – при сравнении со сваркой в диапазонах горячей дуги – низкая степень производительности.

В процессе горячей дуги материал переносится без коротких замыканий (капельный, мелкокапельный, струйный перенос) маленькими капельками, отделяющимися от наконечника присадочной проволоки усилиями значительно выше земного притяжения. Самое существенное преимущество метода – его высокая производительность. Недостатком здесь оказалось низкое качество сварки в вертикальном и потолочном положениях. Было обнаружено, что быстрым пульсированием сварочного тока достигается процесс, который помимо преимуществ короткой и горячей дуги обладает и другими положительными сторонами.

При этом методе сварки, названном импульсной СПЭ, во время электроимпульса материл переносится от присадочной проволоки в сварочную ванну в форме небольших капель. Во время низкого тока паузы материал не переносится, металл остается расплавленным и объем ванны достаточным, а это позволяет вести сварку в разных положениях.

Но этот метод имеет и свои недостатки. Чтобы хорошо владеть процессами импульсной СПЭ, необходимо регулировать всего пять разных сварочных параметров: ток паузы, ток импульса, время импульса, частоту импульса, скорость подачи присадочной проволоки. При работе в ручном режиме настройка правильных параметров, особенно на передвижном посту, окажется непреодолимой.

При детальном изучении переноса капельки металла было обнаружено, что импульсные параметры могут быть связаны со скоростью подачи присадочной проволоки. Импульсные параметры могут быть выбраны на каждую скорость подачи проволоки так, что с каждым импульсом будет переноситься только одна капелька присадочного материала (рис. 4.143).

В результате получается хорошо управляемая дуга без брызг во всех диапазонах тока, обеспечивающая прекрасную сварку в разных положениях с хорошей производительностью. Такое управление сварочным процессом называется синергетическим. Управление генерированием импульсов источника питания осуществляется согласно предварительному программированию относительно скорости подачи присадочной проволоки.

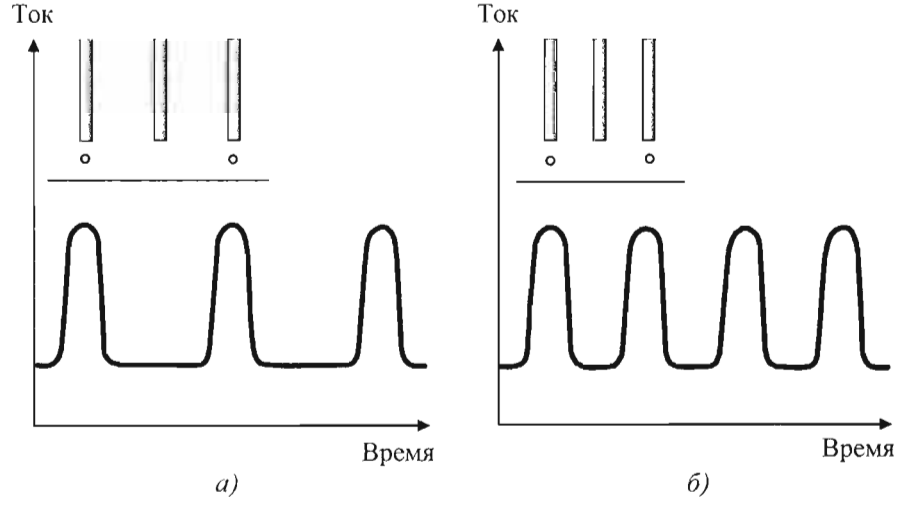


Рис. 4.143. Перенос металла при различных скоростях подачи присадочной проволоки в процессе импульсной СПЭ:

а – низкая скорость подачи проволоки и среднее значение тока – частота импульса низкая;
б – высокая скорость подачи проволоки и среднее значение тока – частота импульса высокая

После предварительного программирования параметров, требуемых для различных условий применения, число регулировок, выполняемых сварщиком, значительно уменьшается, даже до такой степени, что необходимые регулировки выполняются легче, чем при обычной СПЭ. Благодаря синергетическому управлению и многофункциональному источнику питания диапазон сварочного тока на каждый диаметр присадочной проволоки широкий. Следствием широкой области применения является возможность заменить СНЭ и РДС на СПЭ, которая позволяет повысить производительность труда, не ухудшая качества. Синергетическая импульсная СПЭ особенно подходит для сложных материалов, таких как алюминий, медь и нержавеющая сталь. Данный метод отлично годится также для точечной сварки в различных пространственных положениях и для сварки тонколистового материала.

Для обеспечения возможности синергетического управления во многих случаях достаточно добавить дополнительные блоки управления к уже существующим мини- или мультисистемам. В качестве примера можно привести инверторный источник питания PS 5000 MIG фирмы «Kemppi» (рис. 4.144).

В инверторный источник питания в данной системе встроены внутренний импульсный регулятор C120P и блок дополнительных функций PSM 11. В импульсном регуляторе предварительно запрограммированы оптимальные импульсные параметры для девяти разных комбинаций материала и диаметра присадочной проволоки. Управление пульсированием источника питания PS 5000 предварительно запрограммировано относительно скорости подачи проволоки, т.е. управление является синергетическим. Это значительно облегчает работу сварщика. Сварщик выбирает только диаметр проволоки и свариваемый материал, а установка уже автоматически выбирает оптимальные импульсные параметры. Сварочный ток и длина дуги регулируются ручным дистанционным управлением. Для каждого диаметра проволоки имеется широкий диапазон сварочного тока. Таким образом, все *толщины основного материала* свариваются проволокой одного диаметра, что снижает расходы на присадочный материал. Особенно при сварке алюминия применение более толстой проволоки сводит помехи подачи проволоки к минимуму. Сварка проводится без коротких замыканий, вызывающих брызги, благодаря чему трудоемкой операции шлифовки обычно не требуется. При сварке импульсным оборудованием сварочная ванна хорошо поддается управлению.

Рис. 4.144. Сварочная система PS5000 MIG

Источник PS 5000 обеспечивает сварку проволокой из углеродистой и нержавеющей сталей, из алюминия и его сплавов диаметром 1,0...1,6 мм при минимальной силе тока 35 А и максимальной 500 А, в том числе и в импульсных режимах. Скорость подачи присадочной проволоки 0...18 м/мин, частота пульсаций 25...340 Гц, ПВ = 60 % при токе 500 А и напряжении на дуге 40 В и 100 % при токе 390 А и напряжении на дуге 35,6 В. Сварка проводится в чистом углекислом газе или его смеси с аргоном, а также в чистом аргоне.

Расширение функций управления инверторным источником, объясняемое легкостью данного управления, привело к созданию сложных профессиональных сварочных систем. В данных системах реализуется сложное синергетическое управление не только для СПЭ, но и для СНЭ, а иногда и для РДС. В качестве примера можно привести инверторные источники питания сер. «Kemppi-PRO» (рис. 4.145).

Отличительной особенностью данных универсальных систем является расширение их функциональных возможностей за счет использования в них дополнительных систем управления. Данные системы обеспечивают РДС, СНЭ и СПЭ различных материалов, разнообразных толщин во всех пространственных положениях. В то же время за счет использования в управлении микрокомпьютерных систем,

Рис. 4.145. Инверторный источник питания сер. «Kemppi-PRO»

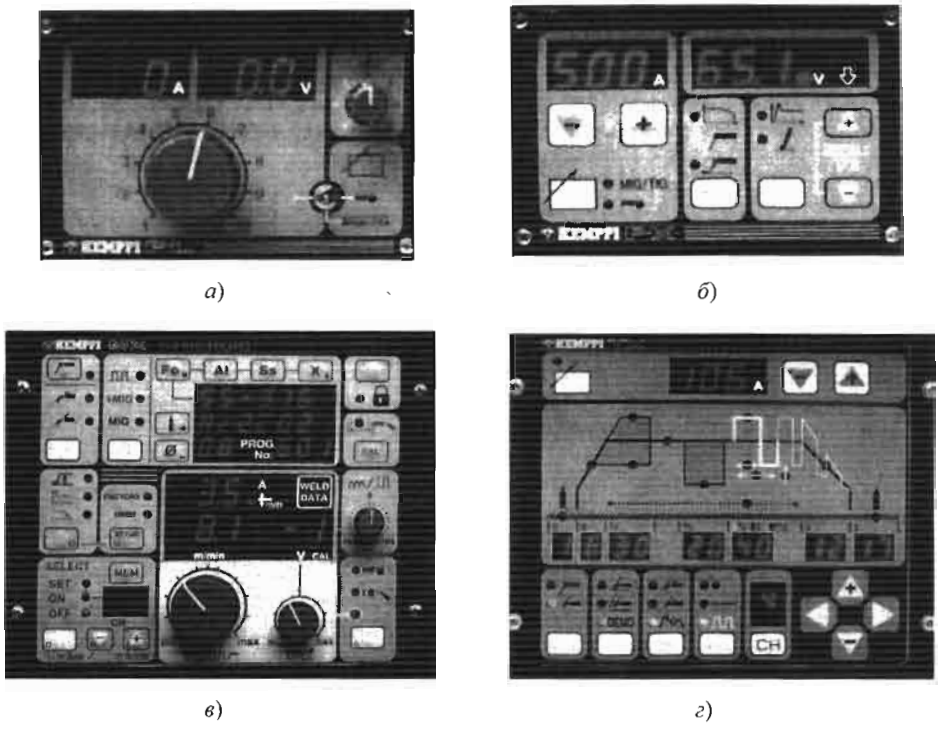
содержащих в своей памяти множество наборов сварочных параметров для сварки различных конструкций различными способами, программирование данных источников для сварщиков не представляет особой сложности. Большая часть необходимой для сварщика информации показана на передней панели в виде мнемонических схем и многофункциональных дисплеев. В большинстве случаев каждый способ сварки имеет свой отдельный пульт управления, что также облегчает сварщику задачу программирования работы инверторного источника питания. Примеры таких пультов управления приведены на рис. 4.146.

Насыщенность инверторного источника системами управления превращает его в уникальный производственный комплекс, который не только питает дугу электрическим током, защищает ее от воздействия атмосферного воздуха и поддерживает его непрерывное горение, но и управляет процессом сварки по заданному алгоритму, который для удовлетворения требований к качеству сварного соединения может быть достаточно сложным. В то же время сварщик не испытывает значительных трудностей при программировании рассматриваемого источника перед сваркой, благодаря использованию современных микропроцессорных систем с мощными базами данных.

Реализация и развитие синергетических принципов управления для СПЭ в активных газах позволили создать универсальные инверторные источники питания, рассчитанные на сварку разнообразных материалов различной толщины в разных пространственных положениях, заменив в них СНЭ на СПЭ в инертных газах и сохранив возможность РДС. Примером такого инвертора может служить сварочный инвертор «Kempo MIG» фирмы «Kemppi» (рис. 4.147).

Номинальный сварочный ток данных инверторов, как правило, 320 и 400 А. Четко организованная панель управления фактически инструктирует сварщика на предмет необходимого регулирования в правильном, логическом порядке. Для СПЭ предлагается нормальный способ управления с раздельным регулированием разных параметров либо синергетическое управление с одной кнопки. Сварщик может задать только толщину свариваемого материала, и установка сама выберет самый подходящий ток для данной толщины. Применяя любую из 20 готовых стандартных программ, можно регулировать механизм подачи присадочной проволоки с помощью лишь одной кнопки на панели. Посредством функции MIG Minilog сварщик может менять значение тока между двумя уровнями просто нажатием на триггер сварочной горелки. В отсеке катушки механизма подачи присадочной проволоки расположены переключатели для предварительной настройки синергетической СПЭ, управляемой одной кнопкой, а также аппаратура для осуществления функций: выбора диаметра присадочной проволоки, а также свариваемого материала и применяемого защитного газа; заварки кратера и настройки продолжительности включения тока после окончания сварки. Выбранная программа выводится на дисплей.

Диапазон сварочного тока регулируется от 10 А до номинального значения плавно. Скорость подачи присадочной проволоки 0...25 м/мин при напряжении на дуге 10...40 В. Напряжение холостого хода 75 В при ПВ = 60 % при токе-номинале и 100 % при токе, равном 60 % от тока-номинала. Используемая присадочная проволока диметром от 0,6 до 1,6 мм.



а) *б*) *в*) *г*)

Рис. 4.146. Панели управления инверторными источниками питания сер. «Kemppi-PRO»:
а – панель PL для контроля функций источника питания PRO при сварке штучными электродами (регулировка сварочного тока и динамики сварки, дисплей сварочных параметров);
б – панель PX для контроля функций источника питания PRO при сварке штучными электродами (регулировка сварочного тока, переключение способов точечной сварки штучными электродами или строжки угольным электродом, регулировка импульса возбуждения и динамики сварки штучным электродом, дисплей сварочных параметров);
в – панель MX для контроля функций (сварка штучными электродами, синергетическая и импульсная СПЭ 20 каналов запоминающих устройств для записи параметров регулировки специальных функций);
г – панель TX для контроля осциллятора «Protig» (регулировка и дисплей сварочных параметров, непрерывная точечная импульсная сварка, высокочастотное/контактное возбуждение дуги, автоматика управления «Minilog» двух- и четырехрежимная работа, программирование и введение в память сварочных параметров, инструктажные функции панели)

Инверторный источник «Kempo MIG» представляет собой практически последнюю разработку в области сварочных источников питания и весьма перспективен, так как повышает производительность труда и качество проводимых сварок одновременно.

Отечественные инверторы и их характеристики. В последние годы рядом предприятий в России и СНГ начаты разработки и выпуск инверторных источников питания для дуговой СНЭ и СПЭ, а также для дуговой сварки штучными электродами. Из российских можно назвать аппараты «Фора» производства ОАО «Рязанский приборный завод», предназначенные для ремонтных и монтажных работ в быту и на производстве. Источник обеспечивает ручную сварку штучными электродами, сварку проволокой в среде инертных газов и CO_2 в составе автоматизированных сварочных систем при наличии соответствующих аксессуаров.

Комплексное оборудование «Феб» научно-производственного предприятия «Феб» (г. Санкт-Петербург) – это тиристорные инверторные выпрямители «Феб-200М», «Феб-350М», рассчитанные на ручную сварку изделий из углеродистых и легированных сталей штучными электродами диаметром 1,5...6 мм; ручную СНЭ в среде защитных газов совместно с контроллером «Феб-11»; полуавтоматическую

Рис. 4.147. Сварочный инвертор «Kempo MIG 4000 W» с водяным охлаждением

сварку проволокой диаметром 0,8...2,0 мм (в том числе стальной, нержавеющей и алюминиевой) в среде активных и инертных газов, а также порошковой проволокой совместно с блоком подачи проволоки «ФЕБ-0,1, -02, -05». Диапазон токов источника 150...350 А. Сварочные токи плавно регулируются с помощью панели управления источника. Контроллер «ФЕБ-11» предназначен для управления источником питания и временными характеристиками процесса сварки в ручном режиме в соответствии с выбираемой программой.

Научно-производственное объединение «Технотрон» (г. Чебоксары) выпускает простые и надежные в эксплуатации транзисторные инверторы для полуавтоматической сварки – ДС 200 К.3 и ДС 400-3. Аппараты используются в производстве для монтажных работ и ремонта. ДС 200 К.3 представляет собой источник питания для полуавтоматически сварки в среде инертных и активных газов плавящимся электродом (СПЭ) со встроенным в источник механизмом подачи сварочной проволоки диаметром 0,6...1,2 мм. Имеется устройство дистанционного управления напряжением сварки и скоростью подачи электродной проволоки. Возможна сварка штучным электродом диаметром 4 мм простым переключением тумблера на панели управления источника путем изменения формы ВАХ источника из жесткой на падающую. Максимальный ток при ПВ = 100 % равен 150 А. Масса источника 35 кг.

Аппарат ДС 400 К.3 решает те же функциональные задачи, что и ДС 200 К.3, но имеет максимальный ток при ПВ = 100 % до 300 А и массу 45 кг. Падающий механизм ПМ-4 предназначен для подачи сплошной алюминиевой и порошковой проволоки. Механизм подачи проволоки в ПМ-4 четырехроликовый, финской фирмы «Cooptim Ltd». Режим подачи проволоки непрерывный и прерывистый (режим электрозаклепок). Оба источника автоматически отключаются при перегреве. Источники имеют схему стабилизации напряжения при колебании напряжения сети >15 %.

«Технотрон» выпускает также транзисторные инверторы ДС 200 А.3 и ДС 200 АУ.3 для сварки алюминия и его сплавов неплавящимся электродом в защитных газах (СНЭ), а также для сварки штучными электродами диаметром 4 мм. Обеспечивается режим контактного и бесконтактного зажигания дуги на малом токе, регулируется время нарастания тока, а также посредством панели управления источника – время спада тока по окончании сварки. Регулируется установка времени продува защитного газа. Предусмотрены контроль тока сварки встроенным в панель управления амперметром и контроль расхода защитного газа ротаметром.

Сварка штучными электродами может вестись в непрерывном и импульсном режимах. Импульсный режим сварки обеспечивает управление тепловой мощностью дуги путем изменения параметров импульсов во время импульса и во время паузы. Это, в свою очередь, позволяет изменить глубину проплавления (пульсирующий режим сварки), что особенно важно при выполнении корневого шва. При сварке алюминиевых сплавов предусмотрен режим на переменном токе с регулируемыми амплитудой, частотой и коэффициентом заполнения импульсов сварочного тока. Другими словами, имеется возможность увеличивать либо уменьшать долю сварочного тока прямой и обратной полярностей, что позволяет гибко управлять проплавляющей и очищающей

способностью сварочной дуги. Частота импульсов регулируется в пределах от 30 до 200 Гц на панели управления источником. Диапазоны рабочих токов в источниках ДС 200 А.З. = 5...200 А, ДС 200 АУ.3 = 10... 200 А. Масса источников соответственно 25 и 30 кг. Источники имеют схему стабилизации напряжения при колебании напряжения питающей сети.

Для сварки штучными электродами фирма также выпускает источники ДС 140.3, и ДС 250.3 с улучшенными технологическими свойствами в момент зажигания дуги за счет введения в системы «горячего старта». Рабочие диапазоны токов 25...140 и 25...250 А соответственно.

Можно назвать еще ряд фирм из России и СНГ, выпускающих инверторы: завод «Электрик» производит тиристорный инвертор ВД-91 и -122 на токи 90 и 125 А; НИКИМТ ТИР-ВЧ-125РС – тиристорный источник на ток до 125 А; николаевской завод «Кристалл» – источник тиристорный «Пульс-160» на ток до 180 А; предприятие СЭЛМА – источник ВДУЧ-161 на ток 160 А; харьковский завод «Коммунар» – источник ВДУЧ-16м на токи 25...200 А. Все они, по нашему мнению, уступают по техническим свойствам источникам питания на транзисторах, и здесь мы их подробно не описываем.

Исходя из приведенного материала, можно отметить серьезный положительный сдвиг в разработках инверторных источников питания для дуговой сварки за последние годы в России и СНГ. Отрадно, что при их реализации используются последние достижения электроники и цифровой техники. Однако в основном эти источники реализованы на тиристорах и не имеют в схемах управления микропроцессорной техники. Это снижает их рабочие качества по сравнению с подобной продукцией, выпускаемой зарубежными фирмами. А главное, у этих источников существенно снижены функциональные возможности, отражающие специфику технологии сварки на постоянном и переменном токе неплавящимся и плавящимся электродом.

Отмеченные отечественные источники не способны хранить в памяти наработанные режимы сварки для различных свариваемых материалов, пространственных положений, документировать режимы сварки. Трудно запрограммировать режимы сварки, отработанные опытными сварщиками, и использовать их при повторных работах. На панели управления источника плохо иллюстрирована или вообще отсутствует установка режимов «Баланс» при сварке на переменном токе и «Минилог» – переключения двух и более запрограммированных значений сварочного тока простым нажатием триггера горелки (кнопка на горелке), без прекращения работы.

Этот режим необходим при сварке с переменным зазором или изменением пространственного положения шва без обрыва дуги штучными электродами с управлением динамикой сварки. При этой функции характер дуги меняется автоматически с изменением сварочного тока. Режим «Память» гарантирует запись различных комбинации сварочные параметров в запоминающее устройство для будущего использования при серийном производстве. Функция «горячего» старта путем регулировки тока в начале сварки позволяет сварщику управлять тепловложением, а значит, достигать равномерного качества вне зависимости от обрывов дуги в работе, однако отсутствует цифровая индикация параметров режима на пульте управления источником питания и на сварочной горелке. Слабо проработаны в информационном плане дизайн панели управления и дистанционных регуляторов управления режимом сварки.

При СПЭ сварке в отечественных инверторах совершенно не использован режим синергетического управления, обеспечивающий при импульсной сварке оптимальный перенос капель в режиме короткой и длинной дуги при изменении скорости подачи проволоки за счет автоматического изменения параметров импульсов. Он же позволяет источнику работать с управлением от одной кнопки, если сварщик перед началом сварки на панели управления задал марку материала, толщину материала, защитный газ, способ сварки. Нет в отечественных инверторах и устройств документирования параметров режима в процессе сварки с целью получения паспорта на технологический процесс. Крайне ненадежны и нестабильны в работе механизмы подачи проволоки, работающие совместно с инверторными источниками при СПЭ сварке.

В заключение можно отметить, что разработчикам инверторных источников питания нужно расширить функции управления ими с учетом технологических особенностей всех фаз процессов сварки при СНЭ, РДС, СПЭ способах. Для решения этой задачи инверторы

должны реализовываться в силовой части на транзисторах, в схеме управления источником должен быть использован микропроцессор. Конечно, при проектировании таких источников питания нужно предварительно оценить технико-экономические показатели, особенно если при разработке источника будет использована заданная элементная база как силовой, так и управляющей части источника. Научный потенциал в России для решения этой проблемы имеется. Нужна только грамотная координация работ с привлечением специалистов в области технологии и электроники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Аладинский В.В., Павлович А.А., Винокуров В.А.** Исследование остаточных напряжений при электрошлаковой сварке плит // Матер. III Всес. Симпозиума «Технологические остаточные напряжения»: М.: АН СССР, 1988. С. 6 – 10.

2. **Бринберг И.Л., Мельбард С.Н., Рымкевич А.И.** Электрошлаковая сварка / Справочник по сварке. Т. 2. М.: Машгиз, 1961. С. 255 – 271.

3. **Винокуров В.А., Григорьянц А.Г.** Теория сварочных деформаций и напряжений. М.: Машиностроение, 1984. 280 с.

4. **Винокуров В.А., Мельников В.Л.** Определение перемещений деталей при электрошлаковой сварке путем решения задач неизотермической теории течения методом конечных элементов // Автоматическая сварка. 1982. № 7. С. 19 – 21.

5. **Герметизация** сваркой радиоизотопных изделий / Л.Н. Щавелев, А.В. Григорьев, Б.Б. Бутылкин и др. // Сварочное производство. 1993. № 9. С. 15 – 16.

6. **Гриненко В.И., Белоусов А.Н.** Развитие основных принципов создания дугового сварочного оборудования // Вопросы атомной науки и техники. Сер. «Сварка в ядерной технологии». 1985. Вып. 1 (14). С. 86 – 90.

7. **Гриненко В.И., Хаванов В.А.** О дифференциальном подходе к выбору трубосварочных автоматов по степени сложности // Автоматическая сварка. 1988. № 8. С. 66 – 68.

8. **Гуревич С.М. и др.** Сварка высокопрочных сплавов титана. М.: Машиностроение, 1975. 150 с.

9. **Дудко Д.А., Сущук-Слюсаренко И.И., Пальти А.М.** Особенности взаимодействия электродного металла со шлаком при электрошлаковой сварке // Автоматическая сварка. 1989. № 12. С. 9 – 11.

10. **Ерегин Л.П.** Расчет формы проплавления при электрошлаковой сварке плавящимся мундштуком // Сварочное производство. 1971. № 2. С. 5 – 8.

11. **Закс М.И., Каганский Б.А., Печенин А.А.** Трансформаторы для дуговой сварки. Л.: Энергоатомиздат, 1988. 135 с.

12. **Закс М.И.** Сварочные выпрямители. Л.: Энергоатомиздат, 1983. 93 с.

13. **Каганов И.Л.** Электронные и ионные преобразователи. Ч. 3. М.: Госэнергоатомиздат, 1956. 559 с.

14. **Казаков В.А., Борисов Е.М.** Эволюция оборудования для сварки неповоротных стыков трубопроводов в машиностроении // Сварочное производство. 1989. № 2. С. 25 – 26.

15. **Ковалев В.Д.** Автомат АДК 335 повышенной надежности для вертикальной сварки // Автоматическая сварка. 1999. № 3. С. 35 – 37.

16. **Лычко И.И., Илющенко В.М., Алексеев А.П.** Электрошлаковая сварка толстолистовой меди // Автоматическая сварка. 1967. № 10. С. 80.

17. **Милютин В.С., Коротков В.А.** Источники питания для сварки: Учеб. пособие. Челябинск: Металлургия Урала, 1999. 366 с.

18. **Новый** флюс для электрошлаковой сварки низколегированных сталей повышенной прочности / И.И. Сущук-Слюсаренко, И.И. Лычко, В.И. Галинич и др. // Автоматическая сварка. 1981. № 8. С. 65 – 67.

19. **Оборудование** для дуговой сварки: Справоч. пособие / Под ред. В.В. Смирнова. Л.: Энергоатомиздат, 1986. 655 с.

20. **Оборудование** и трубопроводы атомных энергетических установок ПН АЭТ-7-009-89. М.: Энергоатомиздат, 1991. 317 с.

21. **Орбитальной** сварке с автоопрессовкой автоматами ОДА – 35 лет / В.И. Гриненко, В.В. Рощин, В.А. Букаров и др. // Сварочное производство. 2000. № 1. С. 38 – 41.

22. **Особенности** электрошлаковой сварки плавящимся мундштуком с введением металлической крупки / И.И. Сущук-Слюсаренко, И.М. Коваль, С.М. Козулин и др. // Автоматическая сварка. 1985. № 3. С. 70 – 71.

23. **Пат.** 2136461 РФ. Регулируемый трансформатор / Б.А. Каганский, Г.А. Каганский, В.А. Турулев.

24. **Патон Б.Е., Лебедев В.К.** Электрооборудование для дуговой и шлаковой сварки. М.: Машиностроение, 1966. 360 с.

25. **Патон Б.Е., Медовар Б.И.** Новый способ электрошлаковой сварки крупнотоннажных заготовок большого сечения // Автоматическая сварка. 1971. № 6. С. 40 – 42.

26. **Потапьевский А.Г.** Сварка в защитных газах плавящимся электродом. М.: Машиностроение, 1974. 238 с.

27. **Рощин М.Б., Гельман А.С.** Технология изготовления сварных массивных подштампованных плит из стали 25ХН3МФ // Сварочное производство. 1975. № 7. С. 14 – 17.

28. **Рощин В.В., Хаванов В.А.** Сварочное оборудование НПО «НИКИМТ» // Сварочное производство. 1993. № 5. С. 8 – 9, 13.

29. **Рымкевич А.И., Тихомиров Н.В.** Технология изготовления крупных заготовок из стали 35ХН3МФА методом электрошлаковой сварки с последующей ковкой // Сварочное производство. 1973. № 3. С. 11 – 13.

30. **Самсонов И.Г.** Регулятор скорости перемещения сварочного аппарата при электрошлаковой сварке // Автоматическая сварка. 1986. № 2. С. 75 – 76.

31. **Сварка** в машиностроении: Справочник. В 4-х т. Т. 4 / Под ред. Ю.Н. Зорина. М.: Машиностроение, 1979. 512 с.

32. **Сварка** элементов активной зоны атомных реакторов / В.А. Виноградов, Л.Н. Щавелев, В.С. Попенко, В.А. Серьезнов // Сварочное производство. 1993. № 9. С. 11 – 14.

33. **Сварочное** оборудование и разработки: Каталог. М.: НИКИМТ, 1991. 141 с.

34. **Смирнов В.В., Темкин Б.Я., Дегтярев С.П.** Автоматы для аргонодуговой сварки неповоротных стыков трубопроводов на монтаже // Энергетическое строительство. 1989. № 3. С. 16 – 19.

35. **Современное** сварочное производство и паяльное оборудование: Каталог. М.: ЦНТИ «Поиск», 1991. 251 с.

36. **Сорокин В.Н., Козлов Б.И.** Пути усовершенствования систем бесшланговой подачи защитного газа в головках для сварки неповоротных стыков труб // Сварочное производство. 1973. № 12. С. 18 – 20.

37. **Столпнер Е.А., Филиппов М.А., Гриц В.В.** Сварочное оборудование, разработанное и выпускаемое РПО «Электромеханика» // Сварочное производство. 1993. № 7. С. 8 – 10.

38. **Сущук-Слюсаренко И.И., Лычко И.И.** Техника выполнения электрошлаковой сварки. Киев: Наукова думка, 1974. 95 с.

39. **Устройство** для модуляции мощности в отдельности у каждого электрода при электрошлаковой сварке / О.П. Бондаренко, Ю.Н. Ланкин, И.И. Лычко и др. // Автоматическая сварка. 1988. № 3. С. 73 – 75.

40. **Чвертко А.И., Патон Б.Е., Бельфор М.Г., Гологовский Г.М.** Аппаратура для механизированной дуговой и электрошлаковой сварки и наплавки. Киев: Наукова думка, 1978. 199 с.

41. **Хаванов В.А., Седов Ю.С., Полосков С.И.** Реализация принципов унификации при разработке оборудования для дуговой сварки в монтажном производстве // Сварочное производство. 1993. № 9. С. 26 – 28.

42. **Хаванов В.А, Седов Ю.С.** Сварочное оборудование с дистанционным управлением для регламентных и ремонтных работ в атомной энергетике // Сварочное производство. 1993. № 9. С. 31 – 33.

43. **Хакимов А.Н., Дарьяваш Н.Г., Захарова В.А.** Устройство для модуляции тока при электрошлаковой сварке // Автоматическая сварка. 1986. № 11. С. 75 – 76.

44. **Электросварочное** оборудование: Каталог-справочник. В 2-х ч. Ч. 1 / Под ред. В.И. Макарова. М.: ВНИИ «Стандартэлектро», 1991. 351 с.

45. **Электрошлаковая** сварка и наплавка / Под ред. Б.Е. Патона. М.: Машгиз, 1980. 511 с.

Глава 5

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ КОНТАКТНАЯ СВАРКА

5.1. ОПРЕДЕЛЕНИЯ И КРАТКАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ СПОСОБОВ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ

В соответствии с ГОСТ 2601–84 контактной сваркой называется сварка с применением давления, при которой используется теплота, выделяющаяся в контакте свариваемых частей при протекании электрического тока.

Так как для выполнения контактной сварки требуются нагрев и давление, то в общей системе классификации по ГОСТ 19521–74 она относится по указанным физическим признакам к термомеханическому классу. При контактной сварке используется нагрев теплотой, выделяющейся при протекании сварочного тока по сопротивлениям свариваемых частей деталей в соответствии с законом Джоуля – Ленца. По этой причине данный закон играет важнейшую роль при контактной сварке. По техническому способу получения соединения контактная сварка делится на точечную, шовную, рельефную и стыковую (рис. 5.1). Схема способа сварки содержит детали *1*, электроды *2*, *4*, *5*, источник сварочного тока *3*.

Точечная сварка (см. рис. 5.1, *а*) характеризуется получением сварного соединения между торцами электродов, которые к свариваемым деталям подводят ток и передают на них силу сжатия. В точечном соединении необходимым условием является образование литого ядра номинальных размеров, определяющего прочность соединения. Сварное соединение может выполняться одной точкой или группой точек, расположенных по заданному направлению.

При шовной сварке (см. рис. 5.1, *б*) получают сварное соединение между вращающимися дисковыми электродами, которые к свариваемым деталям подводят ток и передают на них силу сжатия. При шовной сварке также необходимо образование литого ядра в каждом месте сварки. Все точки (с перекрывающимися или неперекрывающимися литыми ядрами) образуют сварной шов прямо- или криволинейной формы.

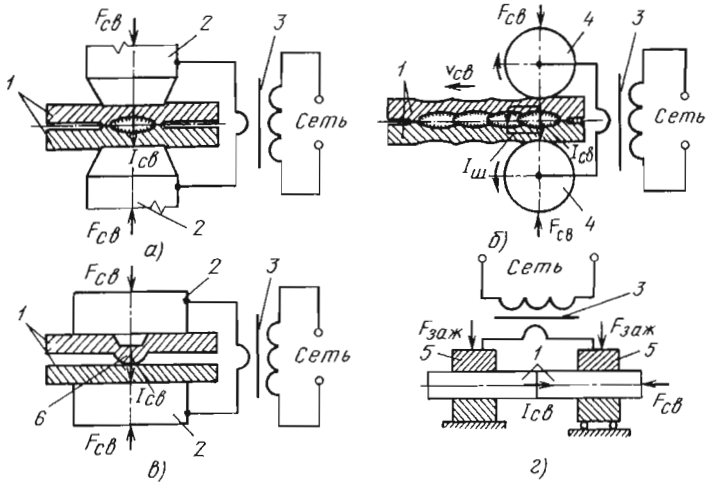


Рис. 5.1. Схемы основных способов контактной сварки:

а – точечной; *б* – шовной; *в* – рельефной; *г* – стыковой; $F_{св}$ – сила сжатия деталей при сварке; $F_{заж}$ – то же, в электродах; $I_{св}$ и $I_{ш}$ – сварочный ток и ток шунтирования; $v_{св}$ – скорость сварки

Рельефная сварка (см. рис. 5.1, *в*) характеризуется образованием сварного соединения на определенных участках, обусловленных их геометрической формой, в том числе по выступам *6*, с использованием специальных электродов *2*, подводящих к свариваемым деталям ток и передающих на них силу сжатия. При рельефной сварке необязательно получение литого ядра в сварном соединении. Рельефной сваркой можно выполнять соединение в одном месте или в нескольких местах одновременно по произвольному контуру.

Стыковая сварка (см. рис. 5.1, *г*) дает сварное соединение по всей стыкуемой поверхности торцов с использованием специальных электродов *5*, подводящих к свариваемым деталям ток и передающих на них силу сжатия в осевом направлении.

Стыковая сварка имеет две разновидности: сварку сопротивлением и сварку оплавлением. При сварке сопротивлением нагрев металла стыкуемых поверхностей торцов выполняют, как правило, до пластичного состояния и в очень редких случаях до расплавления, а при сварке оплавлением – до обязательного образования слоя расплавленного металла на торцах обеих деталей.

После нагрева при том и другом способах стыковой сварки детали подвергаются осадке (пластической деформации), в ходе которой формируется сварное соединение.

5.2. КОНСТРУКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ, ИХ ГРАФИЧЕСКОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ И УСЛОВНОЕ ОБОЗНАЧЕНИЕ

Конструктивные элементы точечных, шовных и рельефных сварных соединений определяются по ГОСТ 15878–79, а для соединений стыковой сварки подобного стандарта нет. Указанные сварные соединения выполняются из одно- и разнотолщинных одно- и разноименных металлов и сплавов. На рис. 5.2 – 5.4 приведены конструктивные элементы сварных соединений по названному стандарту, которые имеют следующие обозначения:

s и s_1 – толщины деталей;

d – расчетный (минимальный) диаметр литого ядра точки в соединениях точечной и рельефной сварки или ширина шва в соединениях шовной сварки;

h и h_1 – глубины (величины) проплавления деталей;

g и g_1 – глубины вмятин от электродов на деталях;

B – величина нахлестки;

t – расстояние (шаг) между центрами соседних точек в ряду;

l – длина литой зоны ядра;

l_1 – длина неперекрытой части литой зоны ядра;

f – величина перекрытия литых зон;

c – расстояние между осями соседних рядов точек при цепном расположении;

u – расстояние от центра точки или оси шва до края нахлестки.

Каждый из указанных конструктивных элементов влияет на качество сварного соединения. Диаметр или ширина шва d определяет прочность соединения, которая возрастает с увеличением d. Для каждого значения толщины металла установлено минимальное значение d.

От глубины проплавления h также зависит прочность соединения. Ее значение ограничивается минимальной и максимальной величинами, что связано с толщиной и типом металла.

Нахлестка B определяет условия протекания процесса сварки. При недостаточной нахлестке во время сварки происходят внутренние выплески, снижающие размеры ядра и прочность соединения. Минимальное значение нахлестки зависит от толщины металла.

Для многорядных швов величина нахлестки $B = 2u + c\ (n - 1)$, где n – число рядов точек. Расстояние от центра точки или оси однорядного шва u до края нахлестки должно быть $\geq 0{,}5B_{min}$ во избежание выплеска металла в зазор и раздавливания кромки из-за ее перегрева. При $s / s_1 > 2$ расстояние между центрами соседних точек в ряду (t) и расстояние между осями соседних рядов (c) следует увеличить на 20 %.

Величина шага t влияет на шунтирование сварочного тока через ранее сваренную точку. С уменьшением шага повышается ток шунтирования и снижается сварочный ток, что уменьшает диаметр ядра точки и прочность соединения. Минимальное значение шага диктуется толщиной металла.

Глубина вмятины g ухудшает внешний вид изделия, а при повышенном значении снижает прочность соединения. Максимальное значение вмятины ограничивается на уровне 20 % толщины металла.

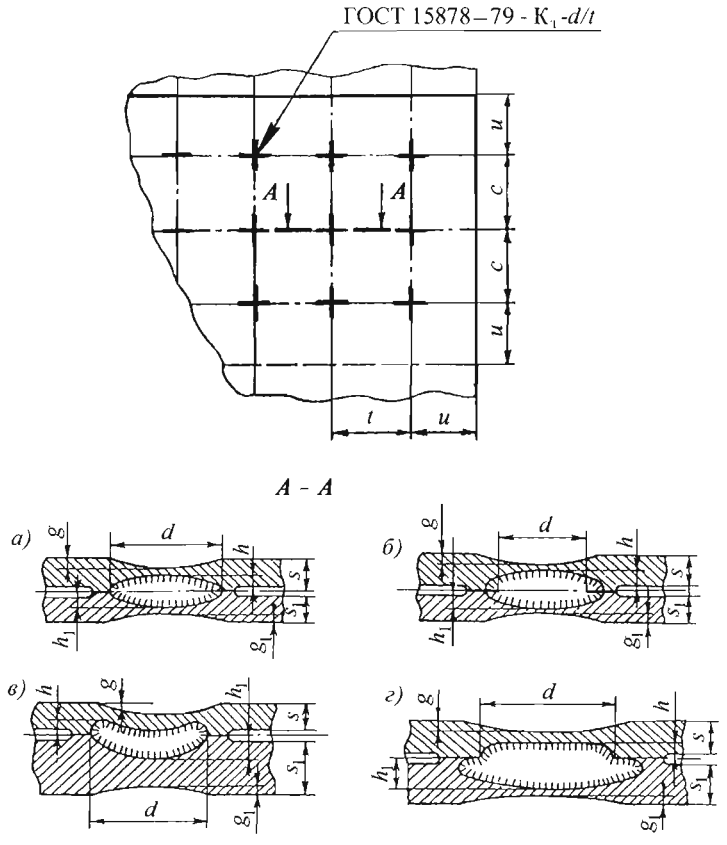


Рис. 5.2. Конструктивные элементы, графическое изображение и условное обозначение сварных соединений, выполненных точечной сваркой из однотолщинных и одноименных металлов (*а*), плакированного (*б*) и разноименного металла (*г*), деталей неравной толщины (*в*)

Степень перекрытия литых зон точек f при шовной сварке определяет герметичность и влияет на прочность сварного соединения, поэтому ее нижний предел не должен быть < 25 % для герметичного шва.

По количественным значениям d, B и t сварные соединения делятся на две группы: А и Б. Соединения группы Б имеют уменьшенные значения указанных величин (ГОСТ 15878–79).

Конструктивные элементы определяют по ГОСТ 15878–79 в зависимости от толщины, типа металла и группы соединения. При сварке разнотолщинных деталей конструктивные элементы определяют по меньшей толщине.

При сварке трех и более деталей (рис. 5.5) диаметр ядра точки следует устанавливать отдельно для каждой пары сопрягаемых деталей. Допускается сквозное проплавление средней детали. При сварке разноименных металлов размеры ядра определяют по толщине более тепло- и электропроводного металла.

Графическое изображение и условное обозначение соединений, полученных точечной, шовной и рельефной сваркой выполняют по ГОСТ 2.312–72. Видимая сварная точка на чертеже изображается знаком «+». Невидимые одиночные точки не показывают.

Совокупность точек, расположенных по заданной линии, образует сварной шов, выполненный точечной или рельефной сваркой (см. рис. 5.2 и 5.4). Видимый шов, полученный шовной сваркой, изображают сплошной линией (см. рис. 5.3), а невидимый – штриховой. По отношению к швам, образованным контактной сваркой, нет понятия «оборотная сторона», т.е. считают, что с обеих сторон шов имеет лицевую сторону.

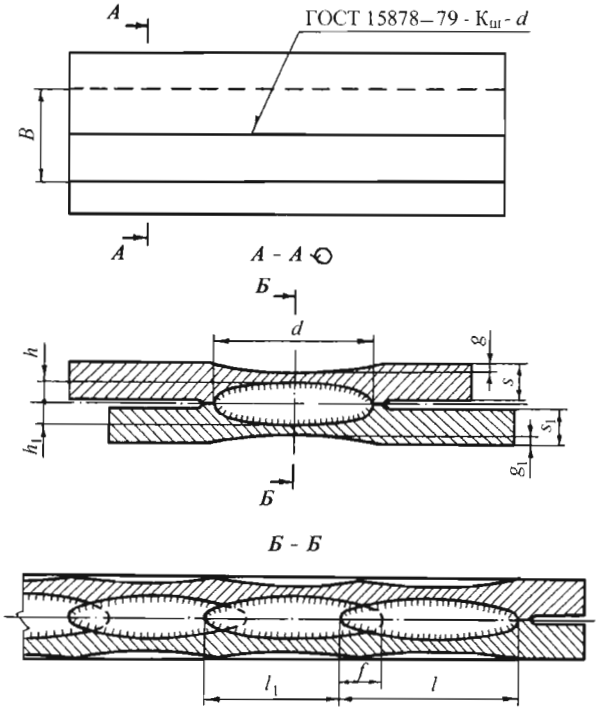


Рис. 5.3. Конструктивные элементы, графическое изображение и условное обозначение сварных соединений, выполненных шовной сваркой из однотолщинных и одноименных материалов

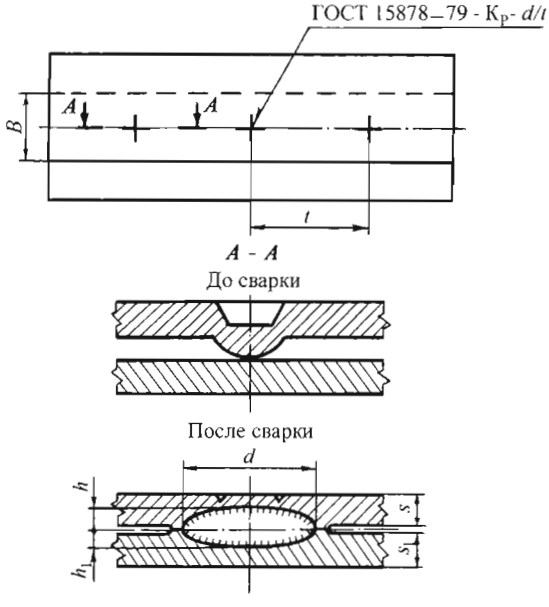


Рис. 5.4. Конструктивные элементы, графическое изображение и условное обозначение сварных соединений, выполненных рельефной сваркой из однотолщинных и одноименных материалов

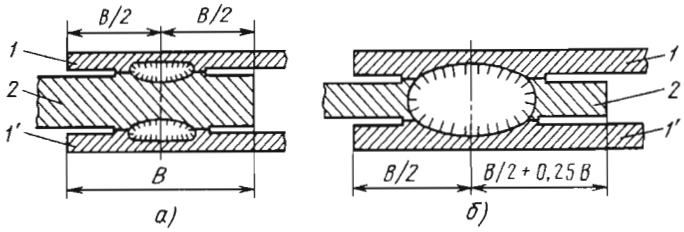


Рис. 5.5. Точечная сварка трех деталей:
а – раздельное формирование ядер; *б* – сквозное проплавление средней детали; *1*, *1′* – тонкие детали; *2* – толстая деталь

Для условного обозначения шва или отдельной точки от их графического изображения проводят линию-выноску с односторонней стрелкой и горизонтальной полкой (см. рис. 5.2 – 5.4). Линию-выноску ведут от видимого изображения шва или одиночной точки. Условное обозначение шва наносят на горизонтальной полке. Обозначение шва включает в себя ГОСТ 15878–79, условное обозначение способа сварки ($К_т$ – точечная, $К_ш$ – шовная, $К_р$ – рельефная), минимальное значение диаметра ядра точки или ширину шва d. Для точечного шва после d через косую черту пишут шаг t (см. рис. 5.2 и 5.4). При обозначении прерывистого шва шовной сварки после d пишут $\times - l / t$, где $\times$ – знак умножения; l – длина проваренного участка; t – шаг между проваренными участками. При наличии на чертеже одинаковых швов или точек им дают одинаковый номер и полное обозначение приводят на одном шве (точке) с указанием числа швов (точек) и их номера над линией-выноской, например 5 № 1. От остальных швов (точек) проводят линии-выноски, на полках которых пишут номер шва (№ 1). Если швы выполнены по одному стандарту, то его допускается не писать на полке линии-выноски, а указывать в технических требованиях чертежа.

Изображение и обозначение соединения стыковой сварки следует выполнять по примеру приложения 2 к ГОСТ 2.312–72 как нестандартное.

5.3. ФОРМИРОВАНИЕ СОЕДИНЕНИЯ ПРИ ТОЧЕЧНОЙ И ШОВНОЙ СВАРКЕ

Данные способы сварки не имеют принципиальных отличий по процессу формирования соединения, поэтому сущность процесса изложена на примере точечной сварки одно-толщинных и одноименных металлов.

Первой стадией процесса является сжатие деталей электродами с целью формирования сварочной цепи и создания оптимальных электрических контактов электрод – деталь и деталь – деталь в зоне сварки (рис. 5.6).

Основными характеристиками контакта являются его сопротивление и площадь. Сопротивление прямым образом влияет на выделение теплоты по закону Джоуля – Ленца, которое, например, для контакта деталь – деталь имеет выражение

$$Q_{дд} = I_{св}^2 R_{дд.ср}\, t\,, \qquad (5.1)$$

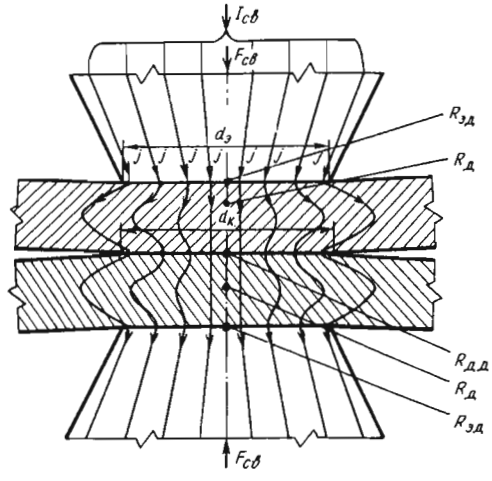


Рис. 5.6. Схема сопротивлений и растекание тока в деталях при точечной сварке:
$I_{св}$ – сварочный ток; j – плотность тока и ее распределение по объему зоны сварки; $R_{эд}$ и $R_{дд}$ – контактные сопротивления электрод – деталь и деталь – деталь; $R_д$ – сопротивление детали; $F_{св}$ – сила сжатия; $d_э$ и $d_к$ – диаметры рабочей поверхности электрода и контакта деталь – деталь

где $I_{св}$ и $R_{дл.ср}$ – сварочный ток и среднее сопротивление контакта деталь – деталь, меняющееся во времени; t – время существования контакта, которое, как правило, меньше длительности протекания сварочного тока (времени сварки).

Тепловыделение в контакте деталь – деталь должно быть оптимальным по интенсивности, а это во многом зависит от факторов, влияющих на указанное сопротивление.

Контактное сопротивление зависит от состояния контактирующих поверхностей и их силы сжатия:

$$R_{конт} = \frac{R_0}{F_{св}^{\alpha}}, \qquad (5.2)$$

где R_0 – сопротивление контакта при силе сжатия поверхностей в 1 даН с учетом их состояния; $F_{св}$ – сварочная сила; α – коэффициент, зависящий от типа металла деталей.

При условии хорошей очистки поверхностей можно принять для низкоуглеродистых сталей R_0 = 0,005...0,006 Ом/даН и α = 0,65... 0,75, а для алюминиевых сплавов R_0 = 0,001... 0,002 Ом/даН и α = 0,75...0,85.

Как видно из формулы (5.2), контактное сопротивление перед протеканием тока можно регулировать, что и применяется в практике контактной сварки. Значительно увеличивают контактные сопротивления шероховатость поверхности, поверхностные оксиды и другие загрязнения. Например, ржавчина и окалина на поверхности низкоуглеродистой стали создают контактное сопротивление $R_{дд}$ до 300 000 мкОм, в то время как оптимально значение $R_{дд} \approx$ 100...200 мкОм. Таким образом, очистка поверхностей деталей от оксидов и загрязнений является вторым фактором по оптимизации контактных сопротивлений.

На выделение теплоты влияет площадь контакта, которая определяет плотность протекающего через него тока. От последней, в свою очередь, зависит удельное выделение тепла в единице объема металла по закону Джоуля – Ленца. Правильный выбор диаметра рабочей поверхности электрода $d_э$ создает оптимальную площадь контакта электрод – деталь и оптимальную плотность тока на входе в зону сварки.

Площадь контакта деталь – деталь должна быть близка к площади контакта электрод – деталь, чтобы поддерживать оптимальную плотность тока в объеме зоны сварки.

Помимо количественной стороны необходимо обеспечить оптимальное распределение выделяемой теплоты по объему нагреваемого металла. Наибольшее количество теплоты должно выделяться в контакте деталь – деталь, так как там надо обеспечить плавление металла. В контакте электрод – деталь выделение теплоты должно быть минимальным, чтобы не вызывать сильного окисления металла, тем более его расплавления, что приводит к наружным выплескам, а также перегреву и повышенному износу электродов. Минимизацию выделения теплоты в контакте электрод – деталь обеспечивают очисткой поверхности деталей и электродов от оксидов и загрязнений, оптимальным выбором силы сжатия $F_{св}$ и нормальным режимом охлаждения электродов.

Таким образом, на первой стадии процесса сварки оптимальным выбором силы сжатия $F_{св}$, размера электрода $d_э$, состояния поверхности деталей и электродов создают условия для последующего нагрева и деформации металла в зоне сварки.

Вторая стадия процесса начинается с момента **протекания сварочного тока** через свариваемые детали. В начальный период протекания тока наибольшее количество теплоты выделяется в контакте деталь – деталь так как его сопротивление наибольшее. Это приводит к интенсивному нагреву приконтактных слоев металла и их пластическому деформированию под действием силы $F_{св}$. Смятие микрошероховатостей и частичное разрушение оксидных пленок на поверхностях деталей снижают контактное сопротивление $R_{дд}$, которое полностью исчезает при появлении в контакте жидкого металла.

После исчезновения сопротивления $R_{дд}$ действующими источниками выделения теплоты остаются сопротивления деталей $2R_д$, определяемые выражением

$$R_д = A\rho_т \frac{4s}{\pi d_э^2}, \qquad (5.3)$$

где $A < 1$ – коэффициент, отражающий расширение токоведущей зоны в деталях (см. рис. 5.6); $\rho_т$ – удельное сопротивление материала, зависящее от температуры нагрева.

Удельное сопротивление $\rho_т$ зависит от типа металла и температуры его нагрева. Наиболее низкое значение $\rho_т$ у алюминия ($2{,}8 \cdot 10^{-8}$ Ом · м), среднее – у низколегированных

и углеродистых сталей [(13...21) 10^{-8} Ом · м], повышенное – у высоколегированных сталей, титана и его сплавов [(75...160) 10^{-8} Ом · м]. При нагреве $\rho_т$ может многократно увеличиваться в зависимости от типа металла.

Тепловыделение на сопротивлении $R_{дд}$ значительно повышает удельное сопротивление металла в зоне бывшего контакта, поэтому «генератором» теплоты после исчезновения $R_{дд}$ остается металл центральной зоны, в которой накапливается теплота, чему способствует и меньший отвод последней в электроды из-за большего удаления центральной зоны от них.

При одинаковых толщинах деталей теплоотвод из зоны бывшего контакта в электроды носит симметричный характер, что в совокупности с тепловыделением обусловливает в данном месте накопление теплоты и образование жидкого ядра.

Появление жидкого ядра с повышенным удельным сопротивлением металла перераспределяет протекание сварочного тока: в объеме ядра плотность тока снижается, а за его пределами в зоне контакта твердого металла (уплотняющего пояска) увеличивается.

Возрастание плотности тока в периферийных с ядром зонах компенсирует потери теплоты в окружающий металл и способствует росту ядра в радиальном направлении.

При плавлении возрастает объем жидкого металла и его стремление к расширению может вызвать внутренний выплеск, если к моменту образования жидкого ядра по его периметру не была создана зона уплотнения. Выплеск снижает объем и уменьшает диаметр ядра, что в той или иной степени ослабляет прочность соединения.

Зона уплотнения вокруг жидкого ядра создается сварочной силой $F_{св}$ (см. рис. 5.6) за счет пластической деформации нагретого металла.

Нагретый и пластичный металл выдавливается под действием силы $F_{св}$ как из-под электрода, образуя венчик по периметру вмятины, так и в зазор между деталями, создавая при этом зону уплотнения вокруг жидкого ядра и одновременно расширяя величину зазора.

Расширение зазора между деталями снижает возможность шунтирования сварочного тока различными случайными контактами вблизи точки, например от искривленных поверхностей деталей, заусенцев по краям деталей и т.д. Отрицательным влиянием зазора может быть развитие щелевой коррозии из-за его заполнения реакционноспособными продуктами из окружающей среды в процессе эксплуатации.

Создание зоны уплотнения вокруг жидкого ядра устраняет выплеск, но не подавляет сам процесс теплового расширения металла. Под действием внутреннего давления жидкого металла твердые слои под электродами вспучиваются, раздвигая последние в осевом направлении. Перемещение от расширения металла осуществляет подвижный электрод машины.

Перемещение подвижного электрода под действием теплового расширения металла, особенно при образовании жидкого ядра, используется на практике для контроля и регулирования диаметра ядра точки с помощью специальных систем.

Наличие зоны уплотнения вокруг жидкого ядра обеспечивает его замкнутость и защиту от воздуха, что исключает окисление расплавленного металла. В совокупности с предварительной очисткой детали от оксидов и загрязнений это гарантирует высокую чистоту металла ядра и идентичность его химического состава составу основного металла. Заканчивается вторая стадия образованием жидкого ядра номинальных размеров.

Третьей стадией процесса сварки является кристаллизация жидкого металла ядра, которая начинается после выключения сварочного тока. Кристаллизация протекает в условиях замкнутости объема ядра под действием сжатия и охлаждения со стороны электродов. Сила сжатия на стадии кристаллизации ядра называется ковочной.

При кристаллизации атомы металла в пределах отдельных зерен или кристаллов располагаются упорядоченно в кристаллической решетке, вступая при этом в химическое взаимодействие друг с другом, следствием которого является образование металлических связей между ними. Таким образом, при точечной и шовной сварке сварное соединение формируется из жидкой фазы при кристаллизации.

При кристаллизации кристаллиты растут в направлении обратном теплоотводу, т.е. от поверхности ядра внутрь, образуя столбчатую литую структуру.

В центральной зоне ядра кристаллиты сращиваются вершинами, и здесь возможно образование усадочных раковин или рыхлот, что усиливается замкнутостью объема ядра и увеличением его размеров.

Кроме того, в центральной зоне ядра возможно накопление ликвирующих примесей (серы, фосфора, углерода), причастных к образованию горячих трещин. Для устранения в ядре усадочных рыхлот и горячих трещин применяют повышенную силу сжатия (ковочную силу) на стадии кристаллизации, которая в несколько раз превышает силу сжатия на стадии протекания сварочного тока.

Повышенная ковочная сила за счет пластической деформации сжатия компенсирует усадку металла при кристаллизации и охлаждении, устраняя усадочные раковины, и снижает поля растягивающих напряжений в ядре, предупреждая этим образование в нем горячих трещин. В некоторой степени повышенной ковочной силой можно также измельчить крупнозернистую структуру ядра.

Таким образом, анализ трех стадий процесса точечной и шовной сварки показывает роль нагрева и давления в формировании сварного соединения. С позиций образования металлических (межатомных) связей ведущим фактором является нагрев. Он обеспечивает образование жидкого ядра, в объеме которого при кристаллизации формируется сварная точка.

При отсутствии литого ядра возможно образование металлической связи между атомами в отдельных зонах контакта деталь – деталь. Такими зонами являются места пластической деформации микровыступов на поверхностях деталей при условии, что величина деформации обеспечивает разрушение поверхностных оксидов и сближение активированных теплотой атомов до параметра кристаллической решетки, после чего между атомами образуется металлическая связь. Такое соединение называют «склейкой», оно имеет низкую и очень нестабильную прочность и непригодно для работы, особенно при переменных нагрузках.

5.4. ФОРМИРОВАНИЕ СОЕДИНЕНИЯ ПРИ СТЫКОВЫХ СПОСОБАХ СВАРКИ

5.4.1. СТЫКОВАЯ СВАРКА ОПЛАВЛЕНИЕМ

Сущность процесса изложена на примере сварки круглых стержней из одноименных металлов (рис. 5.7).

Первой стадией процесса сварки является установка деталей в электродных губках (электродах) сварочной машины. Детали прижимаются к поверхностям токоподводящих электродов повышенными силами $F_{заж}$, чтобы в контакте электрод – деталь создать необходимые силы трения, которые должны удерживать детали от проскальзывания в электродных губках под действием осевых сил, вызванных давлениями $p_{опл}$ и $p_{ос}$. Из-за больших сил $F_{заж}$ контактное сопротивление электрод – деталь становится незначительным ($R_{эд} \approx 0$).

Установочную длину $l_у$ необходимо выбирать оптимальной, поскольку она влияет на сопротивление зоны сварки через сопротивление деталей $R_д$, на деформационную способность деталей – через возможность их искривления от потери устойчивости при сжатии и на отвод теплоты в электродные губки от зоны стыка – при нагреве. Сопротивление детали $R_д$ определяется выражением

$$R_д = \rho_т \frac{l_у}{S}, \qquad (5.4)$$

где S – поперечное сечение детали; $\rho_т$ – удельное сопротивление металла, зависящее от температуры.

После зажатия деталей в электродных губках между их торцами должен оставаться минимально возможный зазор для устранения электрического контакта между деталями перед подачей на них напряжения от источника сварочного тока. Поэтому контактное сопротивление деталь – деталь $R_{дд}$ создается не перед пропусканием тока, как при точечной и шовной сварке, а в процессе его протекания.

Вторая стадия процесса сварки – оплавление – начинается с подачи напряжения от источника сварочного тока на разомкнутые детали, после чего подвижная плита машины с закрепленной деталью начинает перемещаться к неподвижной детали со скоростью $v_{п.п}$.

Электрический контакт торцов деталей начинается с их легкого касания под давлением ~0,01 МПа, которое сохраняется на таком уровне в течение всего времени оплавления.

Из-за малого давления $p_{опл}$ между торцами деталей создается один, реже два локальных электрических контакта, по которым протекает весь ток, называемый током оплавления $I_{опл}$.

Высокая плотность тока вызывает быстрое расплавление металла в зоне контакта и образование жидкого мостика или жидкой перемычки. Теплота, выделяющаяся в жидкой перемычке при протекании тока, частично отводится в торцы деталей, нагревая их, что необходимо для последующей деформации металла, а оставшаяся часть накапливается, вызывая дальнейший нагрев перемычки.

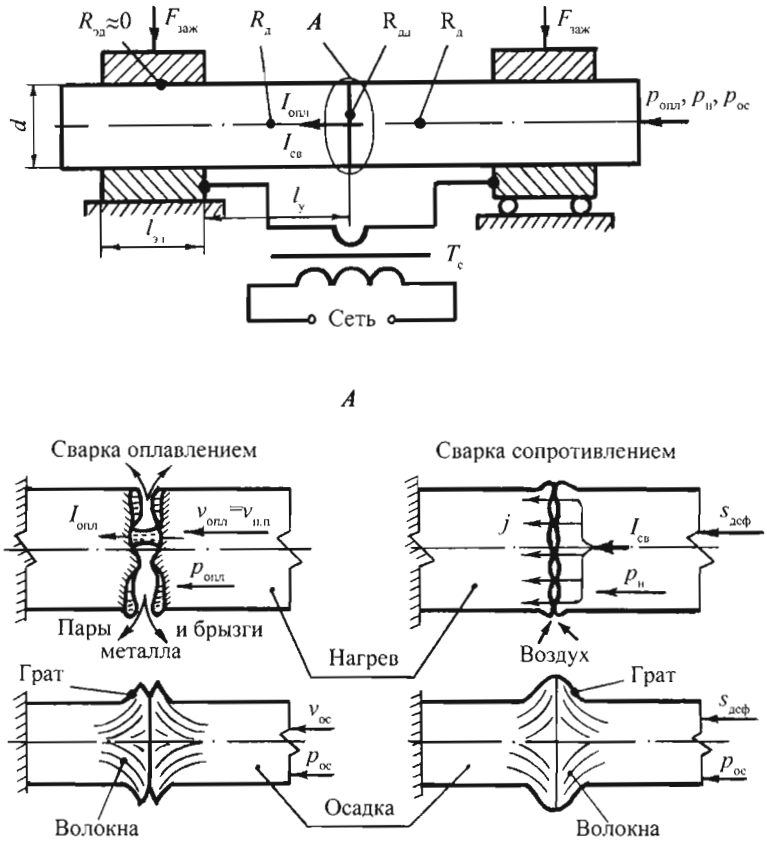


Рис. 5.7. Схема процесса стыковой сварки:

$l_у$ – установочная длина; $l_{э.г}$ – длина электродной губки; $T_с$ – сварочный трансформатор; $R_д$, $R_{дд}$, $R_{эд}$ – сопротивления деталей, деталь – деталь, электрод – деталь; $I_{опл}$ и $I_{св}$ – ток оплавления и сварочный ток; $P_{опл}$, $P_н$, $P_{ос}$ – давления на стадиях оплавления, нагрева и осадки соответственно; $F_{заж}$ – сила зажатия деталей в электродных губках; $v_{п.п}$, $v_{опл}$ – скорость подвижной плиты машины с деталью и скорость оплавления; $S_{деф}$ – перемещение от деформации металла

При нагреве металла до температуры кипения перемычка взрывообразно разрушается. Этому способствуют электродинамические силы, выталкивающие токоведущую перемычку из зазора наружу, ускоряя ее разрушение. Время существования жидкой перемычки составляет 0,001…0,005 с.

При разрушении перемычки металл частично выбрасывается из зазора в виде пара и мелких высокотемпературных капель, а частично остается на торцах деталей. Давление паров металла в зазоре достигает 30 ати, а скорость разлета капель металла – до 60 м/с.

Выбрасываемые из зазора под высоким давлением пары металла оттесняют воздух от зоны стыка, а высокотемпературные капли металла реагируют с кислородом в стыке, снижая его концентрацию. Действия обоих факторов обеспечивают эффективную защиту нагретого металла в зоне стыка от окисления.

Из-за индуктивности сварочной цепи на месте разрушенной перемычки образуется дуговой разряд, горящий преимущественно в парах металла. Теплота от горения дуги частично расплавляет металл на торцах, а частично идет на нагрев торцов деталей в глубину, как и теплота от жидкой перемычки.

Дуга горит до образования нового твердого электрического контакта между торцами, так как подвижная деталь с момента начала оплавления продолжает перемещаться с определенной скоростью к неподвижной.

Новый контакт шунтирует дугу, которая гаснет, а на его месте повторяется процесс образования жидкой перемычки, ее взрыва, горения дуги и т.д. многократно по поверхностям торцов в течение времени оплавления.

Таким образом, сопротивление деталь – деталь $R_{дд}$ имеет сложную физическую природу. По величине оно остается примерно постоянным в течение всего времени оплавления и создает своим действием источник нагрева преимущественно плоского характера.

Сопротивление детали $R_д$, возрастающее по мере нагревания металла из-за увеличения удельного сопротивления, создает источник нагрева объемного характера, причем в пределах установочной длины больше теплоты выделяется в объеме, примыкающем к стыку, так как в нем более высокое удельное сопротивление металла.

Многократное повторение процессов образования жидких перемычек и дуг между торцами деталей приводит к созданию на них слоев жидкого металла, которые удерживаются на торцах от стекания силами поверхностного натяжения.

За время оплавления слои жидкого металла на торцах обновляются, что устраняет накопление на поверхности жидкого металла толстых оксидных пленок и в совокупности с защитой зоны стыка на стадии оплавления повышает качество соединения. Слой жидкого металла на торце необходим и для эффективного выдавливания из стыка оксидов на стадии осадки. Он должен быть равномерным по поверхности торца и без очагов кристаллизации. Это достигается непрерывным и интенсивным процессом оплавления.

Непрерывность оплавления обеспечивается поддержанием равенства

$$v_{п.п} = v_{опл}, \qquad (5.5)$$

где $v_{п.п}$ – скорость перемещения подвижной плиты машины с деталью, $v_{опл}$ – скорость оплавления деталей.

Скорость оплавления обусловливается физическими процессами нагрева и плавления металла, а скорость подвижной плиты машины задается механическим приводом. Поэтому имеются определенные трудности в согласовании данных скоростей. В дальнейшем будем считать, что равенство (5.5) выполняется в течение всего времени оплавления, и при дальнейшем изложении материала станем использовать только параметр $v_{опл}$.

Интенсивность оплавления зависит от изменения взаимосвязанных параметров $I_{опл}$ и $v_{опл}$. С их возрастанием, с одной стороны, повышается интенсивность оплавления и улучшается качество защиты, а с другой, увеличиваются потери металла и энергии, которая уносится из зоны стыка с высокотемпературными парами и каплями металла.

Таким образом, в конце стадии оплавления на торцах деталей должен образоваться слой расплавленного металла с минимальным окислением, торцы должны быть прогреты в глубину, а их поверхности выровнены.

Третья стадия процесса сварки – осадка – начинается с ускоренного перемещения подвижной детали. Вместе с повышенной скоростью осадки, примерно на порядок превышающей скорость оплавления, резко возрастает сила осадки.

Высокая скорость осадки позволяет быстро захлопнуть зазор между торцами, предупредив этим окисление и кристаллизацию расплавленного металла из-за прекращения процесса оплавления вследствие нарушения условия (5.5).

В первый момент осадки торцы соприкасаются через жидкий металл, что создает начальный физический контакт. Дальнейшее перемещение под действием возросшей силы осадки сопровождается пластической деформацией нагретого металла торцов. При осадке для дополнительного прогрева металла в глубину некоторое время продолжает протекать ток, называемый током осадки $I_{ос}$, который по величине в несколько раз больше тока оплавления $I_{опл}$ из-за прекращения действия сопротивления $R_{дд}$.

При деформации металла из стыка вместе с жидким металлом легко выдавливаются оксиды и загрязнения.

Оксидные пленки, если через них образовались межатомные связи, не позволяют получить хорошее соединение из-за их высокой твердости и хрупкости, что резко снижает прочность и пластичность соединения.

У ряда металлов, которые наиболее часто содержатся в сталях (хром, марганец, кремний, алюминий), температура плавления их оксидов много выше температуры плавления стали (на 100...500 °С). Тугоплавкие оксиды находятся в твердом состоянии на поверхности расплавленного металла, и только наличие последнего позволяет их либо выдавить из стыка, либо раздробить и этим ослабить вредное влияние на качество соединения.

Вместе с жидким на периферию стыка выдавливается перегретый твердый металл, который может дать в стыке зону крупного зерна, что ухудшает качество сварного соединения. После осадки выдавленный металл образует по периметру стыка грат (см. рис. 5.7).

Для эффективного выдавливания из стыка перегретого и расплавленного металла с оксидами пластическая деформация при осадке должна локализоваться в околостыковой зоне, а не распределяться равномерно по установочной длине. Для этого необходимо оптимизировать ширину зоны нагрева и градиент температуры внутри нее.

При пластической деформации после выдавливания оксидов и загрязнений происходит сближение активированных теплотой атомов на соединяемых поверхностях до параметра кристаллической решетки с последующим их химическим взаимодействием и образованием металлических связей.

Окончательное формирование соединения заканчивается рекристаллизацией металла, при которой через плоскость стыка из одного торца в другой прорастают зерна, что обеспечивает объемное упрочнение соединения. Для этого после осадки в зоне стыка должен оставаться металл, нагретый до температуры рекристаллизации.

5.4.2. СТЫКОВАЯ СВАРКА СОПРОТИВЛЕНИЕМ

Первая стадия процесса сварки – *установка деталей в электродных губках машины и их зажатие* – аналогична подобной стадии при сварке оплавлением. Установочная длина $l_у$ оптимизируется из тех же соображений, что и при сварке оплавлением, сопротивление деталей $R_д$ определяется выражением (5.4). Особенностью процесса сварки является сжатие деталей перед пропусканием сварочного тока в отличие от сварки оплавлением, когда перед пропусканием тока детали не имеют электрического контакта.

Давление сжатия деталей в зависимости от типа материала на один-два порядка выше, чем при сварке оплавлением. При таком давлении, называемом давлением нагрева $p_н$ (см. рис. 5.7), в контакте деталь – деталь образуется сопротивление $R_{дд}$, которое в несколько раз меньше, чем при сварке оплавлением, но в 1,5…2 раза больше, чем при точечной сварке. Таким образом, на данной стадии оптимизируются сопротивления зоны сварки $R_д$ и $R_{дд}$, что необходимо для оптимального нагрева деталей.

Вторая стадия процесса сварки – нагрев – начинается с пропускания сварочного тока $I_{св}$ через зону сварки. Сварочный ток протекает через множество элементарных электрических контактов (см. рис. 5.7) аналогично точечной сварке.

Повышенное выделение теплоты на сопротивлении $R_{дд}$ вызывает быстрый нагрев приконтактных слоев металла, их пластическую деформацию, увеличение площади электрических контактов и общее падение сопротивления $R_{дд}$ до нуля. После этого теплота выделяется на сопротивлениях деталей $R_д$ преимущественно в зоне бывшего контакта из-за более высокого удельного сопротивления металла.

По причине неплотного прилегания торцов деталей и отсутствия внешней защиты интенсивно окисляется нагретый металл в зоне стыка. Этим сварка сопротивлением отличается в худшую сторону от сварки оплавлением.

При сварке сопротивлением нагрев металла, как правило, проводится до температуры $(0{,}8…0{,}9)T_{пл}$, где $T_{пл}$ – температура плавления металла, поэтому оксиды находятся на поверхности твердого металла и их выдавливание возможно вместе с твердым металлом, что протекает весьма сложно и не в полной мере.

Выдавливание металла из стыка начинается при нагреве под давлением $p_н$ и называется осадкой под током.

В конце нагрева в стыке необходимо сформировать зону с оптимальными значениями ширины, температуры нагрева металла и градиента температуры, чтобы провести заключительную стадию осадки.

Третья стадия процесса сварки – осадка без тока – начинается с момента выключения сварочного тока.

Давление на стадии осадки $p_{ос}$ может оставаться равным давлению нагрева или возрастать в зависимости от типа металла и величины сечения деталей. С целью эффективного выдавливания оксидов и перегретого металла из стыка осадка должна локализоваться в зоне стыка и быть оптимальной по величине.

Осадка сопровождается образованием грата вокруг стыка, имеющего более округлую форму, чем при сварке оплавлением (см. рис. 5.7).

Металлические связи формируются под действием пластической деформации, когда активированные теплотой поверхностные атомы на обоих торцах деталей, сближаясь до параметра кристаллической решетки, вступают в химическое взаимодействие с образованием металлических связей.

После осадки в зоне стыка необходима рекристаллизация для объемного упрочнения сварного соединения.

Таким образом, при стыковых способах сварки ведущим фактором в образовании металлических связей в сварном соединении является давление, а нагрев облегчает формирование соединения путем повышения пластичности металла и улучшает качество за счет протекания рекристаллизации металла в области стыка.

5.5. ФОРМИРОВАНИЕ СОЕДИНЕНИЯ ПРИ РЕЛЬЕФНОЙ СВАРКЕ

Сущность процесса изложена на примере сварки листов одинаковой толщины из одноименных металлов. Перед сваркой на одной детали делают штамповкой один или несколько выступов – рельефов определенных размеров $h_р$ и $d_р$ в зависимости от толщины листов (рис. 5.8).

Сварку, как правило, выполняют по всем рельефам одновременно, для чего используют специальные электроды, которые своей увеличенной рабочей поверхностью накрывают и сжимают все рельефы.

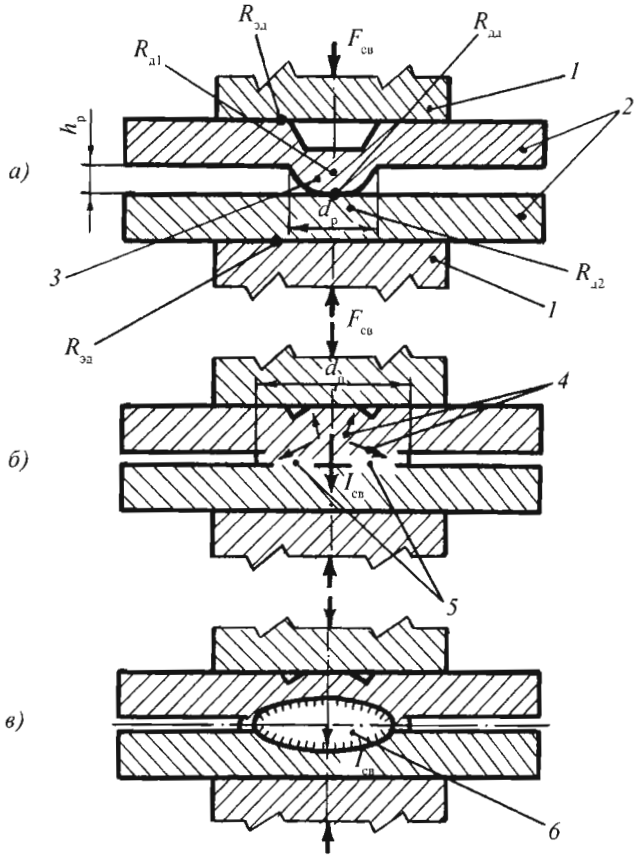


Рис. 5.8. Схема процесса рельефной сварки:

1 – электроды; *2* – детали; *3* – рельеф; *4* – направления растекания металла при деформации; *5* – кольцевая зона сварки в пластическом состоянии металла; *6* – ядро точки; $I_{св}$ – сварочный ток; $F_{св}$ – сила сжатия; $R_{д1}$ и $R_{д2}$ – сопротивления деталей; $R_{эд}$ и $R_{дд}$ – контактные сопротивления электрод – деталь и деталь – деталь; $d_п$ – диаметр пятна контакта

Первой стадией процесса сварки является сжатие деталей перед пропусканием сварочного тока (см. рис. 5.8, *а*). При этом создается электрический контакт между вершиной рельефа и второй деталью. Рельеф должен сохранить свою форму, для чего сжатие должно быть безударным и с оптимальной силой $F_{св}$.

Перед протеканием тока зона сварки имеет сопротивления, аналогичные сопротивлениям при точечной сварке. Отличиями являются повышенное сопротивление деталь – деталь $R_{дд}$ из-за локальности контакта и невозможность определения начальных сопротивлений $R_{д1}$ и $R_{д2}$ по формуле (5.3) из-за наличия рельефа и большой рабочей поверхности электродов.

Вторая стадия процесса сварки – пластическая деформация (сжатие) рельефа – начинается с момента включения сварочного тока (см. рис. 5.8, *б*). Высокая начальная плотность тока в контакте деталь – деталь может вызвать подплавление рельефа, выплеск расплавленного металла и преждевременную потерю формы и размеров рельефа.

Металл выплесков, застревая в зазоре между деталями, вызывает шунтирование сварочного тока, что совместно с изменением формы и размеров рельефа может существенно нарушить ход сварки. По этим причинам импульс сварочного тока следует делать плавно нарастающим.

При протекании сварочного тока металл рельефа нагревается и при достижении пластического состояния начинает деформироваться под действием силы сжатия $F_{св}$. Деформация рельефа сопровождается перемещением металла в полость лунки и вытеканием его в зазор между деталями (см. рис. 5.8, *б*).

Вытекание металла в зазор сопровождается растеканием его по нижней детали. При этом между движущимся металлом рельефа и неподвижной поверхностью нижней детали образуются силы трения, разрушающие поверхностные оксиды, которые выносятся на периферию потоком металла.

Атомы, находящиеся на очищенных от оксидов поверхностях, сближенные до параметра кристаллической решетки за счет пластической деформации металла и активированные теплотой, взаимодействуют с образованием металлических связей. Таким образом, в кольцевой зоне *5* (рис. 5.8, *б*) образуется сварное соединение без расплавления металла за счет его пластической деформации.

В центральной зоне из-за отсутствия или недостаточного тангенциального растекания металла сварное соединение не образуется.

Соединение, полученное на стадии пластической деформации рельефа, имеет достаточно высокую прочность при статических и переменных нагрузках. Этим свойством рельефная сварка отличается от точечной, при которой работоспособное соединение получается только при наличии литого ядра.

Для достижения максимальной прочности соединения процесс сварки надо довести до образования литого ядра. Наличие ядра повышает предел выносливости соединения до 30 % и снижает разброс прочностных характеристик.

Третьей стадией процесса сварки является формирование ядра точки (см. рис. 5.8, *в*). К данному времени диаметр пятна контакта $d_п$ между деталями достигает величины, необходимой для образования жидкого ядра требуемых размеров и окружающей его зоны уплотнения.

Начало образования ядра сопровождается увеличением теплового расширения металла в зоне сварки, которое при рельефной сварке создает соответствующие условия для протекания процесса.

В отличие от точечной сварки при рельефной электроды, имея большую рабочую поверхность, не могут создать локальный контакт деталь – деталь с окружающим его зазором, который исключает шунтирование сварочного тока случайными контактами между поверхностями деталей. Поэтому образование гарантированного зазора вокруг контакта деталь – деталь при рельефной сварке осуществляется тепловым расширением металла в зоне сварки.

Образование и развитие жидкого ядра происходят за счет теплоты, выделяющейся на сопротивлениях деталей, как и при точечной сварке.

Проплавление деталей при равных толщинах получается неодинаковым. Ядро смещается в деталь с рельефом из-за меньшего отвода от нее теплоты в электрод.

Повышенное охлаждающее действие электродов снижает вероятность прожогов и конечных выплесков при формировании ядра.

Четвертой стадией процесса сварки является кристаллизация ядра. Она протекает в условиях замкнутого объема и ориентированного теплоотвода в электроды. Ядро имеет столбчатую структуру, как и при точечной

сварке, но с более выраженными усадочными раковинами.

Повышенная вероятность образования усадочных раковин и горячих трещин в ядре при рельефной сварке обусловлена тем, что большая рабочая поверхность электродов не позволяет приложить локально к точке ковочную силу, как это делается при точечной сварке.

Ведущий фактор в формировании металлических связей при рельефной сварке зависит от типа получаемого соединения. Если соединение содержит литое ядро, как при точечной сварке, то ведущим фактором в формировании металлических связей между атомами является нагрев, а если соединение формируется без ядра, т.е. за счет пластической деформации, как при стыковой сварке, то ведущим фактором является давление.

5.6. ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ КОНТАКТНОЙ СТЫКОВОЙ СВАРКИ

5.6.1. ПРИМЕНЕНИЕ КОНТАКТНОЙ СТЫКОВОЙ СВАРКИ

Контактная стыковая сварка относится к высокопроизводительным способам соединения, выполняется, как правило, автоматически и не требует сварочных материалов. Данный способ сварки позволяет соединять практически все известные металлы и сплавы, обеспечивая высокие стабильность и качество соединения. Это делает данный вид сварки перспективным для создания современных конструкций ответственного назначения из новых материалов. Развитие контактной стыковой сварки идет по пути расширения области применения за счет увеличения как номенклатуры, так и площади свариваемых сечений.

В металлургическом производстве стыковой сваркой соединяют полосы или ленты, которые затем используют при производстве труб, последующей прокатке или термической обработке, а также проволоку для обеспечения непрерывного процесса волочения.

В инструментальном производстве с применением стыковой сварки изготовляют сверла, фрезы и т.д., режущую часть которых делают из дорогой инструментальной стали, а хвостовую – из дешевой углеродистой.

В энергетическом машиностроении стыковую сварку применяют для соединения труб при изготовлении котлов и другого нагревательного оборудования.

Широкое применение нашла стыковая сварка при производстве изделий круглой формы: ободьев автомобильных и велосипедных колес, колец, цепей, бочек и т.д.

Стыковая сварка распространена при изготовлении длинных плетей рельсов для железнодорожного транспорта. При строительстве магистральных трубопроводов она была применена для соединения труб диаметром 1420 мм. Для этих целей Институтом электросварки им. Е.О. Патона (Украина) был разработан комплекс «Север-1», позволяющий сваривать один стык трубы за 5 мин.

В строительстве стыковая сварка служит для соединения арматурных стержней при изготовлении арматурных сеток.

Кроме общего машиностроения стыковую сварку применяют в приборостроении для соединения тонких проволочек при изготовлении радиодеталей.

В тяжелом машиностроении стыковая сварка применена для изготовления картеров мощных дизельных двигателей из унифицированных элементов, что позволило высвободить ~300 высококвалифицированных сварщиков и повысить производительность труда в 70 раз.

5.6.2. КОНСТРУИРОВАНИЕ И ПОДГОТОВКА ДЕТАЛЕЙ К СВАРКЕ

На принципиальную возможность применения стыковой сварки влияет длина деталей. Минимальная длина должна обеспечить зажатие деталей в электродных губках машины, оптимальную установочную длину $l_у$ (см. рис. 5.7) и иметь припуск, связанный с укорочением деталей осадкой или оплавлением и осадкой. Максимальная длина деталей для выполнения процесса сварки не ограничена.

Часть длины деталей, необходимую для зажатия в электродных губках машины $l_{эг}$, можно определить посредством предназначенной для сварки машины или оценить по выражению

$$l_{эг} = kd, \qquad (5.6)$$

где d – диаметр прутка или трубы; k = 3…4 при сварке прутков, 2…2,5 при сварке труб диаметром 20…57 мм и 1…1,5 при сварке труб диаметром 200…300 мм.

При сварке полос или листов можно принять

$$l_{эг} = 10s, \qquad (5.7)$$

где s – толщина полосы или листа, мм.

В отношении форм и размеров поперечных сечений, как было сказано ранее, стыковая сварка допускает их большое разнообразие.

В процессе осадки детали должны в равной степени пластически деформироваться для более полного удаления оксидов из стыка. Протекание равновеликой деформации при осадке нарушается в случае сварки деталей с разными формами и размерами поперечных сечений (рис. 5.9, *а*). Пластическая деформация массивных деталей затрудняется их меньшим нагревом и увеличенным поперечным сечением. Поэтому торец массивной детали необходимо обработать на длине l_0 по размерам другой свариваемой детали (рис. 5.9, *б*). Допускается сваривать детали, если их различие в диаметрах не превышает 15 %, а по толщине – 10 %.

При сварке деталей с другими формами и размерами поперечных сечений выравнивать последние нужно с учетом рекомендаций рис. 5.9, *б*, принимая значения l_0 с приближением к указанным.

Подготовка торцовой поверхности детали во многом зависит от разновидности стыковой сварки.

Стыковой сваркой оплавлением сваривают детали после механической резки на ножницах, пилах, токарных и строгальных станках, а также после плазменной и другой термической резки с очисткой места реза от грата.

Более тщательная подготовка торцовых поверхностей требуется при сварке сопротивлением (рис. 5.10).

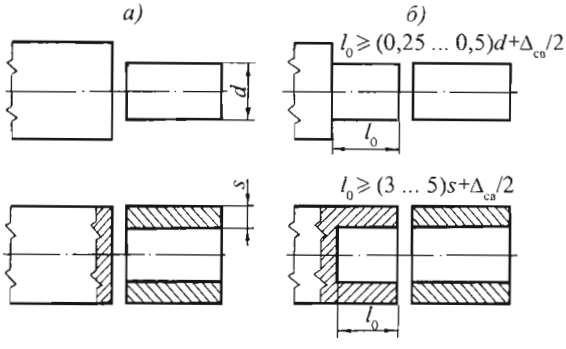


Рис. 5.9. Формы нерациональной (*а*) и рациональной (*б*) подготовки торцов деталей к стыковой сварке:
d и *s* – диаметр прутка и толщина стенки трубы; $\Delta_{св}$ – суммарное упрочнение деталей при сварке за счет осадки или оплавления и осадки

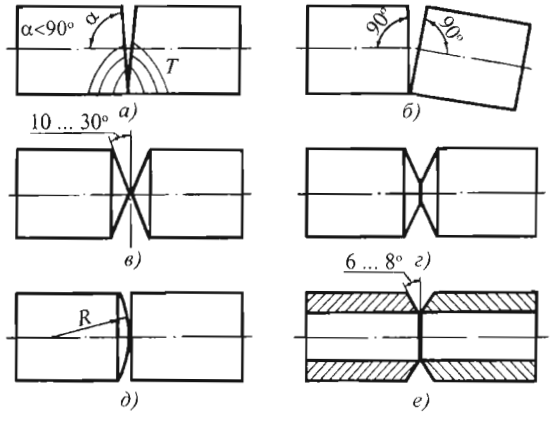


Рис. 5.10. Формы нерациональной (*а*, *б*) и рациональной (*в* – *е*) поверхностей торцов деталей для стыковой сварки сопротивлением:
T – изотермы температурного поля, °С

Стыковой сваркой сопротивлением соединяют проволоку и прутки из углеродистых сталей всех марок диаметром до 20 мм, из высоколегированных сталей диаметром до 6…8 мм, из цветных металлов (алюминия, меди, латуни и т.д.) диаметром до 10…12 мм, а также трубы из низкоуглеродистых и низколегированных сталей (котельных) диаметром до 32 × 5,5 мм.

При плоской форме торцов контакт между ними при сжатии образуется, как правило, не по всей поверхности, а в отдельной зоне из-за неточной обработки (см. рис. 5.10, *а*) или перекоса осей деталей после их установки и осевого сжатия в электродных губках (см. рис. 5.10, *б*).

Это вызывает несимметричное относительно осей деталей выделение теплоты, неравномерный нагрев по сечению и неодинаковый нагрев по длине торцов.

Выравнивание температурного поля по сечению и длине торцов выполняется в процессе теплопроводности, полнота протекания которого зависит от теплопроводности материала, величины поперечного сечения деталей и времени нагрева до начала осадки.

С учетом указанных факторов плоскую поверхность торцов следует использовать при сварке прутков диаметром до 10 мм. При большем диаметре обработку надо проводить на конус или сферу (см. рис. 5.10, *в – д*).

В деталях из высоколегированных сталей, имеющих пониженную теплопроводность, обработку торцов на конус нужно выполнять, начиная с диаметра 6 мм и более.

Более сложен процесс сварки труб. Стенки трубы перед осадкой необходимо равномерно нагреть по периметру торцов и их длине. Это достигается обработкой торца трубы на конус (см. рис. 5.10, *е*).

Таким образом, рациональная форма (см. рис. 5.9) и подготовка поверхности торцов (см. рис. 5.10) создают условия для одинакового нагрева свариваемых деталей, что обеспечивает их одинаковую деформационную способность при осадке.

В подготовку поверхностей входит также очистка боковых поверхностей деталей от ржавчины, окалины и прочих загрязнений на длине, начиная от торца до окончания поверхности, зажимаемой в электродных губках. Это необходимо для создания надежного электрического контакта, что снижает износ электродных губок и исключает повреждение поверхностей деталей (пригар). Очистку выполняют механическим путем (абразивным инструментом, стальной щеткой и т.д.) или травлением после обезжиривания (в смесях кислот HCl, H_2SO_4, HNO_3).Наиболее тщательно очищают поверхность труб. Внутри трубу очищают на длине 20 мм от торца.

5.6.3. ПАРАМЕТРЫ РЕЖИМА И ТЕХНИКА СТЫКОВОЙ СВАРКИ СОПРОТИВЛЕНИЕМ

Параметрами режима стыковой сварки сопротивлением являются установочная длина $l_у$, плотность тока j, время протекания тока $t_{св}$, начальное давление или давление нагрева $p_н$, давление осадки $p_{ос}$ и величина осадки $\Delta_{ос}$.

Установочная длина $l_у$ зависит от формы деталей (пруток, труба) и тепло- и электропроводности материала. Для материалов с повышенной теплопроводностью требуется увеличенная установочная длина для снижения потерь теплоты в электродные губки машины и создания оптимальной зоны нагрева деталей.

Для прутков диаметром $d > 8$ мм оптимальные значения установочной длины $l_у$ составляют: для стальных $(0{,}7…1)d$, алюминиевых и латунных $(1{,}5…2)d$, медных $(2{,}5…4)d$. Для проволоки из сталей диаметром $d < 8$ мм указанные значения необходимо увеличить на 20…60 %, при этом степень увеличения возрастает с уменьшением диаметра.

Установочную длину для труб при сварке сопротивлением следует принимать в пределах $(5…6)s$, где s – толщина стенки трубы.

При сварке сопротивлением медных шин сечением 1,8 × 12,1…4,5 × 12,5 мм, которые используются для изготовления обмоток электрических машин, установочную длину принимают в пределах $(2…3)s$, где s – толщина шины.

Чтобы детали не искривлялись при осадке из-за повышенной установочной длины, например при сварке меди, применяют специальные неэлектропроводные вставки (рис. 5.11, *г*). Данные вставки, совмещенные с ножами, позволяют локализовать пластическую деформацию в зоне стыка, что обеспечивает более полное выдавливание окислов и срезание грата.

Установочная длина влияет на ширину зоны нагрева деталей, потери теплоты в электродные губки машины, устойчивость к искривлению при осадке нагретых деталей и величину вторичного напряжения сварочного трансформатора.

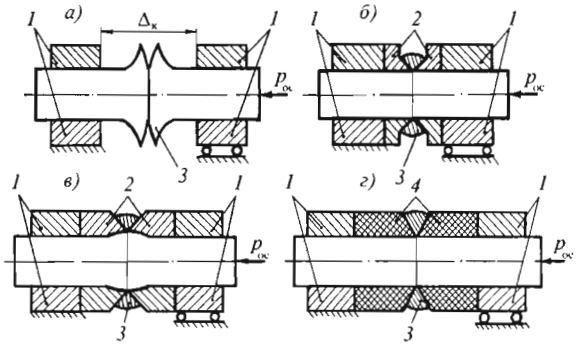


Рис. 5.11. Схемы осадки при стыковой сварке:
а – свободная деформация; *б* – деформация со срезанием грата; *в* – деформация с принудительным формированием и срезанием грата; *г* – деформация со срезанием грата при увеличенной установочной длине; *1* – электродные губки; *2* – ножи для срезания грата; *3* – грат; *4* – неэлектропроводные вставки с ножами для срезания грата; $\Delta_к$ – конечное расстояние между электродными губками; $p_{ос}$ – давление осадки

Уменьшенная установочная длина снижает ширину зоны нагрева и увеличивает градиент температуры по оси детали, что затрудняет пластическую деформацию при осадке и не обеспечивает полного выдавливания оксидов из стыка. При этом также возрастают потери теплоты в электродные губки машины.

Увеличенная установочная длина дает широкую зону нагрева, что снижает локальность пластической деформации в зоне стыка и эффективность выдавливания из него оксидов и загрязнений. При этом возможно искривление деталей при осадке и требуется повышенное вторичное напряжение сварочного трансформатора.

Правильный выбор установочной длины очень значим при сварке разнородных сталей и разноименных металлов. В данном случае свариваемые детали могут иметь большие различия по тепло- и электропроводности, сопротивлению пластической деформации и температуре плавления. Если у материалов деталей близкие температуры плавления, то для обеспечения одинакового нагрева свариваемых деталей необходимо, чтобы деталь из более тепло- и электропроводного металла имела бóльшую установочную длину, т.е. для обеих деталей ее необходимо выбирать с учетом их материала по ранее приведенным рекомендациям. Это выравнивает как выделение теплоты в обеих деталях, так и ее потери в электродные губки.

При больших различиях в температурах плавления материалов деталей оптимизацию их установочных длин следует проводить экспериментально.

При сварке сопротивлением для снижения окисления металла требуется минимизировать время сварки $t_{св}$. Это наиболее важно для металлов, дающих трудноудаляемые оксиды (легированные стали, цветные металлы). В табл. 5.1 приведены оптимальные значения времени сварки стержней из углеродистых сталей.

Увеличение времени сварки кроме интенсификации окисления может вызывать рост зерна металла в стыке от перегрева.

Сварка труб требует большей длительности нагрева, чем сварка стержней. Для труб из сталей 20Т и 15ХМ диаметром 32 × 5,5 мм оптимальное время сварки $t_{св}$ составляет 5...7 с, что в 2–3 раза больше времени сварки прутков равновеликих сечений. При сварке цветных металлов время сварки $t_{св}$ возрастает в 2–3 раза по сравнению со сталью.

5.1. Плотность тока и длительность его протекания при сварке стержней из углеродистых сталей

Сечение, мм^2	Диаметр, мм	Плотность тока, А/мм^2	Время сварки, с
25	5,5	200	0,6
50	8	160	0,8
100	11	140	1,0
250	18	90	1,5
500	25	60	2,5
1000	35	40	4,5

Плотность тока j при сварке сопротивлением имеет широкий диапазон изменения в зависимости от величины поперечных сечений, формы и материала деталей.

Ориентировочно значения плотности тока j определяют по выражению

$$j\sqrt{t_{св}} = k \cdot 10^3, \qquad (5.8)$$

где j – плотность тока, А/см^2; $t_{св}$ – время сварки, с; k – коэффициент, равный для сталей 8…10, для алюминия 20, для меди 27.

Сочетание величин плотности тока и времени сварки определяет тип режима. При малом времени сварки и повышенной плотности тока имеет место жесткий режим, а при обратном – мягкий. Есть и промежуточные типы режимов.

Тип режима зависит от свойств материала деталей (тепло- и электропроводности, окисляемости, степени упрочнения или разупрочнения при нагреве и т.д.), а также от величины поперечного сечения деталей.

При сварке сопротивлением тип режима смещается в направлении к жесткому из-за минимизации времени сварки.

В табл. 5.1 приведены значения плотности тока для стержней диаметром 5,5…35 мм из углеродистых сталей. Для проволоки из углеродистых сталей диаметром d < 3 мм плотность тока j достигает 250…700 А/мм^2.

При сварке труб из углеродистых и низколегированных сталей из-за повышенного времени сварки и пониженного отвода теплоты в электродные губки по сравнению со стержнями оптимальная плотность тока меньше и составляет j = 30…35 А/мм^2.

Повышенная установочная длина при сварке медной проволоки, прутков и ранее упомянутых обмоточных проводов (шинки), снижающая потери теплоты в электродные губки, в сочетании с пониженным давлением сжатия деталей позволяет использовать при нагреве умеренные значения плотности тока j в пределах от 110…180 А/мм^2 для шин до 260…290 А/мм^2 для проволоки и прутков диаметром 3,5…8 мм.

На стадии нагрева большое влияние на выделение теплоты оказывает давление нагрева $p_н$, с которым детали сжимаются при протекании сварочного тока. Пониженное значение $p_н$ создает увеличенное значение контактного сопротивления деталь – деталь, чем и вызывает повышенный нагрев деталей. Отрицательными факторами при снижении $p_н$ являются возможные выплески от расплавления металла и его повышенное окисление в стыке.

Давление осадки $p_{ос}$ должно создать необходимую пластическую деформацию металла, обеспечивающую выдавливание оксидов из стыка. Его величина зависит от материала и схемы осадки (см. рис. 5.11).

Осадка со срезанием грата или с принудительным формированием обеспечивает благоприятную структуру металла, снижает припуск на осадку, но требует повышенного давления $p_{ос}$. Значения давлений $p_н$ и $p_{ос}$ приведены в табл. 5.2.

Завершающей операцией стыковой сварки является осадка, характеризующаяся необходимой величиной пластической деформации металла, называемой величиной осадки $\Delta_{ос}$. При сварке сопротивлением осадка начинается под действием давления $p_н$ с момента включения сварочного тока и начала нагрева металла и заканчивается после выключения тока при воздействии давления осадки $p_{ос}$. Таким образом, полная осадка состоит из осадки под током $\Delta_{ос\ п/т}$ и осадки без тока $\Delta_{ос\ б/т}$.

При малой величине осадки $\Delta_{ос}$ в стыке остаются оксиды, дающие непровар. Большая величина осадки искривляет волокна (см. рис. 5.7) в зоне стыка, которые всегда содержатся во всех типах продукции прокатного производства, используемой для изготовления сварных конструкций. Искривление волокон снижает прочность стыка на растяжение. Из-за большой осадки не получает развития процесс рекристаллизации металла в стыке по причине выдавливания высоконагретого металла, что также снижает качество соединения. Поэтому величину осадки необходимо оптимизировать. При сварке проволоки и прутков рекомендуются следующие значения величины осадки в зависимости от диаметра: для стали $\Delta_{ос}$ = (0,8…1,5)d; для алюминия и латуни $\Delta_{ос}$ = (1,7…2,5)d; для меди $\Delta_{ос}$ = (2,5…4)d.

При свободной деформации (см. рис. 5.11, *а*) требуемая осадка всегда больше, чем при деформации со срезанием грата или с принудительным формированием (см. рис. 5.11, *б – г*). При осадке со срезанием грата расстояние между ножами *2* и *4* (см. рис. 5.11) в исходном состоянии после сжатия торцов деталей перед пропусканием тока должно быть равно величине осадки.

5.2. Значения давлений нагрева $p_н$ и осадки $p_{ос}$ при стыковой сварке сопротивлением

Материал	Форма поперечного сечения деталей	Значения $p_н$ и $p_{ос}$ при сварке с постоянным давлением $p_н = p_{ос}$, МПа	Значения $p_н$ и $p_{ос}$ при сварке с переменным давлением		
			$p_н$, МПа	$P_{ос}$, МПа	Условия сварки
Низкоуглеродистые и низколегированные стали	Проволока, прутки	15…40	5…10	100…150	Внешняя защита не требуется
	Трубы	С постоянным давлением не сваривают	10…15	40…50	Сварка в защитной атмосфере
Легированные стали	Проволока	20…50	10…30	300…400	Внешняя защита не требуется
Алюминий	Проволока, прутки	10…15	Нет данных		
Медь		15…20	5…9	120…170	Сварка с неэлектропроводными вставками и срезанием грата
	Обмоточный провод (шинка) 1,8 × 12,1… 4,5 × 12,5 мм	С постоянным давлением не сваривают	3…8	350…450	

Рассмотренные параметры режима сварки, их согласованное включение, изменение в ходе процесса сварки и выключение изображаются с помощью циклограммы. На рис. 5.12 представлены типовые циклограммы стыковой сварки сопротивлением.

Циклограмму, показанную на рис. 5.12, *а*, используют при сварке различных материалов, когда требуется повышенное давление осадки. Простейшая циклограмма (см. рис. 5.12, *б*) рекомендуется для сварки тонкой проволоки, когда не нужно повышенное давление осадки. При сварке цветных металлов используют циклограммы типов, приведенных на рис. 5.12, *в* и *г*, причем циклограмму типа *г* следует использовать при сварке повышенных сечений, так как пульсация сварочного тока позволяет лучше прогреть металл в глубину детали.

Техника сварки включает в себя совокупность операций и условий, необходимых для выполнения сварного соединения.

Сварка проволоки и прутков из низкоуглеродистых сталей сечением до 300 мм^2 трудностей не вызывает. При сварке деталей с повышенным поперечным сечением (>300 мм^2) и особенно труб необходима внешняя защита стыка от кислорода воздуха. Для углеродистых и низколегированных сталей в качестве защитных газов используют азот и водород.

Технические газы (азот и водород) содержат в исходном состоянии 0,02…0,2 % кислорода и 10…25 г/м^3 влаги, что при сварке указанных сталей недопустимо.

Перед сваркой азот и водород осушают от влаги [до точки росы (– 60 °С)] с помощью алюмогеля и фосфорного ангидрида и очищают от кислорода путем пропускания газа через нагретый до 1000 °С ферросилиций. Защитный газ подают внутрь трубы с расходом 0,5… 0,7 л/с.

Нагревать зону сварки необходимо до оптимальной температуры. Применительно к сталям оптимальную температуру нагрева следует принимать с учетом их температуры плавления $T_{пл}$: в пределах $(0{,}75…0{,}85)T_{пл}$. Для низкоуглеродистых сталей оптимальная температура нагрева 1100…1200 °С. С увеличением содержания углерода она снижается из-за снижения температуры плавления. Например, при содержании углерода 1,2 % оптимальная температура нагрева стали 1050…1100 °С.

Допускается вести нагрев до образования в контакте деталь – деталь тонкого слоя жидкого металла при условии, что он вместе с сильно перегретым металлом, который может находиться в состоянии пережога, должен быть выдавлен в грат при осадке.

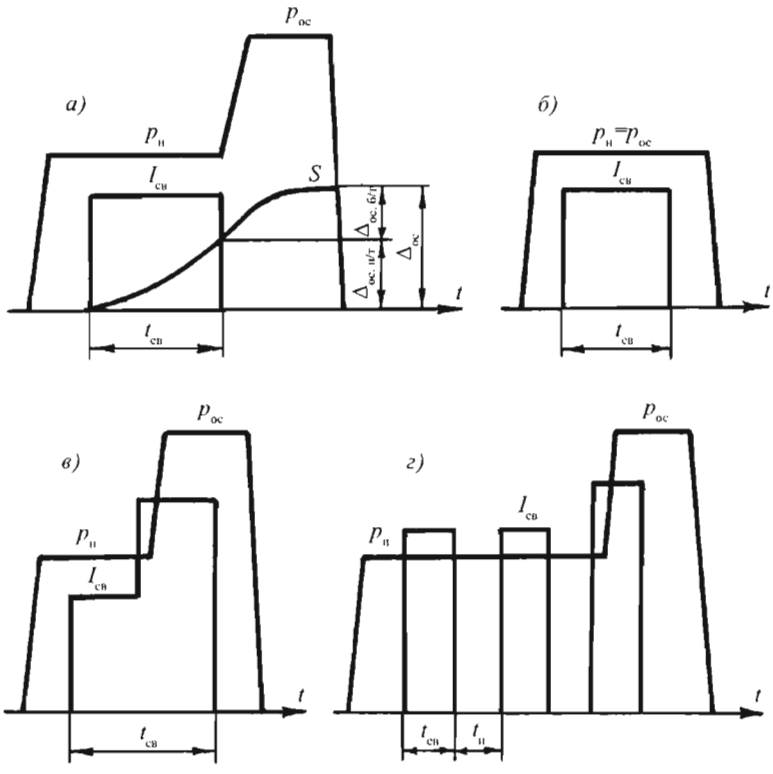


Рис. 5.12. Типовые циклограммы стыковой сварки сопротивлением:
а – сварка с повышенным ковочным давлением; *б* – сварка с постоянным давлением;
в – сварка с повышенным ковочным давлением и протеканием тока на стадии осадки;
г – многоимпульсная сварка с повышенным ковочным давлением;
$p_н$ и $p_{ос}$ – давления нагрева и осадки; S – перемещение подвижной плиты машины с деталью;
$\Delta_{ос}$, $\Delta_{ос.п/т}$, $\Delta_{ос.б/т}$ – полная осадка, осадка под током и без тока соответственно;
$I_{св}$ – сварочный ток; $t_{св}$ и $t_п$ – время сварки и паузы

Наиболее точно необходимо контролировать нагрев при сварке меди, так как она быстро переходит из твердого состояния в жидкое, что приводит к расплавлению большого объема металла, который под действием своего веса выпадает из стыка, приводя к невозможности получения сварного соединения.

Для контроля нагрева металла до оптимальной температуры используют два фактора: 1) величину осадки под током или 2) дозирование времени протекания сварочного тока.

В первом случае момент достижения оптимального нагрева металла определяется по достижению заранее установленной величины осадки под током $\Delta_{ос.п/т}$, после чего выключается сварочный ток по команде от путевого выключателя, связанного с подвижной губкой машины, и начинается осадка без тока $\Delta_{ос.б/т}$.

Во втором случае момент достижения оптимального нагрева определяется по истечению установленного времени пропускания сварочного тока, после чего последний выключается и начинается осадка без тока.

Указанные методы контроля нагрева металла имеют свои погрешности, поэтому для более точного контроля температуры нагрева следует использовать специальные измерительные приборы (например, пирометры).

После сварки возможна термообработка сварного соединения или удаление грата. Термообработку целесообразно проводить в электродных губках машины, выполняя нагрев пропусканием импульса тока. Полученный после сварки грат имеет плавные очертания, и его можно не удалять, если он не мешает работе детали. Например, при сварке труб не требуется как внутренней, так и наружной обработки стыка от грата.

5.6.4. ПАРАМЕТРЫ РЕЖИМА И ТЕХНИКА СТЫКОВОЙ СВАРКИ НЕПРЕРЫВНЫМ ОПЛАВЛЕНИЕМ

Для сварки необходимо определить оптимальную установочную длину l_y, которая зависит от размера и формы поперечного сечения и материала деталей.

Для прутков из стали диаметром d значение установочной длины $l_y = (0{,}7\ldots1{,}0)d$, а из алюминия и латуни $(2{,}5\ldots3{,}5)d$.

Для стальных труб диаметром D и толщиной стенки s установочную длину принимают в пределах $(4\ldots7)s$, причем при отношении $D / s > 8$ она принимается ближе к нижнему пределу, а при $D / s < 8$ – ближе к верхнему.

При сварке полос и листов из стали толщиной s принимают $l_y = (3\ldots5)s$, а из алюминия и латуни $(4{,}5\ldots8)s$.

Пониженная установочная длина уменьшает ширину зоны нагрева и повышает градиент температуры по оси детали, что затрудняет пластическую деформацию металла и выдавливание оксидов из стыка.

При повышенной установочной длине возможно искривление деталей при осадке и необходимо увеличенное вторичное напряжение сварочного трансформатора из-за большего сопротивления вторичного контура с деталями. При существенных различиях в теплопроводностях материалов деталей и примерно равных температурах их плавления (низкоуглеродистые и высоколегированные стали) деталь из более теплопроводного материала (низкоуглеродистая сталь) должна иметь бóльшую установочную длину для обеспечения симметричного температурного поля относительно плоскости стыка.

Для материалов с большим различием в температурах плавления и в коэффициентах теплопроводности, например для низкоуглеродистой стали и меди, установочную длину для стали следует принимать равной $2{,}5d$, а для меди равной d, при этом оплавляется главным образом сталь.

Сварка непрерывным оплавлением протекает по циклограмме рис. 5.13, содержащей две стадии: оплавление и осадку.

На стадии оплавления параметрами режима являются давление $p_{опл}$, скорость оплавления $v_{опл}$, ток оплавления (плотность тока) $I_{опл}$ ($j_{опл}$) и припуск на оплавление $\Delta_{опл}$.

Давление $p_{опл}$ имеет малую величину (~0,01 МПа) и обеспечивает в контакте деталь – деталь условия, необходимые для выделения теплоты.

Оптимальное значение скорости оплавления $v_{опл}$ зависит от типа материала, размера и формы поперечного сечения деталей.

Материалы, дающие при окислении тугоплавкие и трудноудаляемые при осадке оксиды хрома, кремния, алюминия, марганца, необходимо сваривать при повышенных скоростях оплавления для обеспечения лучшей защиты зоны сварки выделяющимися парами металла и быстрого обновления расплавленного металла на торцах деталей.

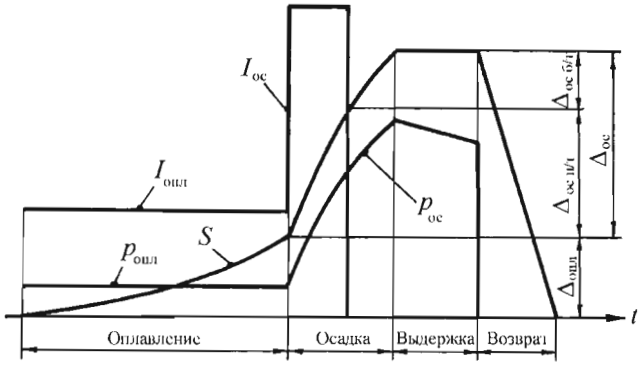


Рис. 5.13. Циклограмма стыковой сварки непрерывным оплавлением:

$I_{опл}$ и $I_{ос}$ – токи оплавления и осадки; $p_{опл}$ и $p_{ос}$ – давления на стадии оплавления и осадки;

S – перемещение подвижной плиты машины с деталью; $\Delta_{опл}$ и $\Delta_{ос}$ – припуски на оплавление и осадку;

$\Delta_{ос}$, $\Delta_{ос.п/т}$ и $\Delta_{ос.б/т}$ – полная осадка, осадка под током и без тока соответственно;

«Возврат» – возвращение подвижной плиты машины в исходное положение

Повышенная теплопроводность материала требует повышенной скорости оплавления для предупреждения кристаллизации жидкого металла на торцах перед осадкой.

Недостатком высоких скоростей оплавления является образование глубоких кратеров на оплавляемых поверхностях от интенсивных взрывов жидких перемычек, что затрудняет выдавливание жидкого металла из стыка при осадке, приводя к его захлопыванию в замкнутых объемах, в которых после кристаллизации образуются усадочные раковины или трещины. Широкий интервал плавления сплавов в сочетании с высокой скоростью оплавления усиливает образование глубоких кратеров.

Развитая форма поперечного сечения деталей (труба, полоса, лист) требует более высокой скорости оплавления.

Скорость оплавления меняется от малых значений в начале оплавления (сотые и десятые доли миллиметра в секунду) из-за холодного состояния металла до повышенных значений перед осадкой (примерно на порядок по сравнению со средними).

Средние скорости оплавления по основным типам материалов имеют следующие значения, мм/с: для низкоуглеродистых сталей 1…3,5; для высокоуглеродистых сталей и чугуна 0,5…1,5; для высоколегированных сталей 2,5…3,5 при $v_{опл.кон}$ до 8 мм/с; для алюминия 3…5 при $v_{опл.кон}$ до 20 мм/с; для меди и латуни 6…8 при $v_{опл.кон}$ до 25 мм/с. При сварке полос и листов средние скорости оплавления соответствуют верхним пределам.

Ток оплавления $I_{опл}$ обеспечивает нагрев и оплавление металла на торцах деталей в соответствии с выбранной скоростью оплавления. Более универсальной характеристикой является плотность тока $j_{опл}$.

Плотность тока $j_{опл}$ возрастает с увеличением тепло- и электропроводности металла и повышением скорости оплавления. Для основных групп материалов применяются следующие средние значения плотности тока $j_{опл.ср}$, А/мм^2: для низкоуглеродистых и низколегированных сталей 8…30; для высоколегированных сталей 5…10; для алюминия и его сплавов 20…50; для меди и ее сплавов 50…80.

Непрерывное оплавление обеспечивается оптимальным соотношением между плотностью тока и скоростью перемещения подвижной плиты машины (скоростью оплавления) с закрепленной деталью (рис. 5.14).

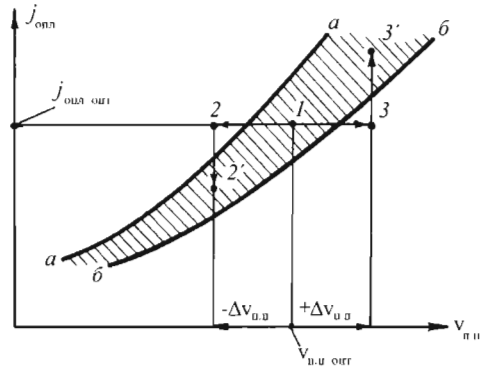


Рис. 5.14. Область устойчивого непрерывного оплавления в зависимости от плотности тока оплавления $j_{опл}$ и скорости перемещения подвижной плиты машины $v_{п.п}$:
выше линии *а – а* – область оплавления с перерывами; ниже линии *б – б* – область короткого замыкания деталей; *1* – устойчивое непрерывное оплавление при $j_{опл.опт}$ и $v_{п.п.опт}$; *2* – оплавление с перерывами; *3* – переход в сварку сопротивлением; *2′* и *3′* – устойчивое непрерывное оплавление

При настройке машины на сварку скорость подвижной плиты $v_{п.п}$ выбирают по требуемой скорости оплавления $v_{опл}$. Затем для скорости $v_{п.п}$ подбирают плотность тока $j_{опл}$ так, чтобы оба параметра находились в области устойчивого непрерывного оплавления (точка *1* на рис. 5.14). В данных условиях выполняется равенство скоростей сближения деталей $v_{п.п}$ и их укорочения от оплавления $v_{опл}$.

Отклонение скорости $v_{п.п}$ за пределы устойчивого оплавления при неизменной плотности тока вызывает либо прерывистое оплавление (точка *2* на рис. 5.14), либо короткое замыкание торцов деталей (точка *3* на рис. 5.14). Соответствующим регулированием плотности тока (точки *2′* и *3′* на рис. 5.14), принудительным или саморегулированием, процесс переводится в состояние непрерывного оплавления.

Припуск на оплавление $\Delta_{опл}$, зависящий от типа материала и формы поперечного сечения деталей, необходим для прогрева деталей в глубину, выравнивания торцовых поверхностей деталей и создания на них слоя расплавленного металла перед осадкой.

Для стержней диаметром d из сталей припуск на оплавление $\Delta_{опл}$ обеих деталей составляет $(0{,}3…0{,}5)d$, а из латуни $(0{,}7…1{,}2)d$.

При сварке стальных труб он принимается в пределах (2…4)s, где s – толщина стенки трубы.

Для полос и листов толщиной s припуск на оплавление в зависимости от типа материала принимается следующим: для сталей (2…6)s, для алюминия (4…10)s. К выбранному значению припуска необходимо добавить величину

$$\Delta = 0{,}003B, \qquad (5.9)$$

где B – ширина полосы или листа, мм, связанную с не перпендикулярностью обрезанной под сварку кромки к продольной оси полосы.

Для стержней, полос и листов бóльшие значения $\Delta_{опл}$ принимаются для меньших диаметров (d = 5…20 мм) и толщин (s = 1…4 мм) и наоборот.

При уменьшенном значении $\Delta_{опл}$ получается недостаточный прогрев металла в глубину, что не позволяет при осадке полностью выдавить оксиды из стыка.

Увеличенное значение $\Delta_{опл}$ вызывает лишние потери металла и энергии и может привести к перегреву металла с последующим ростом зерна и ухудшением механических свойств соединения.

После оплавления выполняется завершающая операция по формированию сварного соединения – осадка. Параметрами режима при осадке являются скорость осадки $v_{ос}$, ток осадки $I_{ос}$, припуск на осадку $\Delta_{ос}$ и давление осадки $p_{ос}$.

Скорость осадки $v_{ос}$ должна иметь высокое значение, особенно в начальный момент, чтобы быстро захлопнуть зазор между торцами деталей и не допустить этим окисления и преждевременной кристаллизации расплавленного металла. Значения скорости осадки возрастают с ростом склонности металла к окислению.

Для прутков из низкоуглеродистых сталей используют сравнительно небольшие скорости осадки: 15…30 мм/с, а для полос и труб из данных сталей 30…80 мм/с.

Для высоколегированных сталей (прутки, трубы, полосы) применяются повышенные скорости осадки: 50…120 мм/с, причем верхние пределы используют при сварке полос.

Наиболее высокие скорости осадки необходимы при сварке цветных металлов и сплавов: для алюминия и его сплавов до 150 мм/с, а для меди и латуни до 250 мм/с.

После захлопывания зазора и деформации металла на ~30 % от требуемой величины скорость осадки следует снижать в 2–3 раза, так как высокие скорости пластической деформации металла, не улучшая качественной стороны осадки, требуют высоких давлений, что нецелесообразно с позиции необоснованного увеличения мощности привода осадки контактной машины.

Протекание тока $I_{ос}$ на стадии осадки необходимо для дополнительного прогрева металла в глубину. Величина тока осадки в несколько раз больше тока оплавления из-за резкого снижения сопротивления вторичного контура при исчезновении сопротивления деталь – деталь. Длительность протекания тока осадки дозируют, чтобы не вызывать перегрев металла, могущий довести его до расплавления в зоне стыка.

Припуск на осадку $\Delta_{ос}$ включает в себя зазор между деталями и величину пластической деформации по выравниванию поверхностей торцов и удалению из стыка окисленного и перегретого металла.

Величина осадки зависит от формы поперечного сечения и материала деталей. Металлы, характеризующиеся повышенной склонностью к окислению и ускоренной кристаллизацией, требуют повышенного припуска на осадку.

Для стержней из сталей диаметром d < 50 мм $\Delta_{ос}$ = (0,1…0,4)d, а из латуни диаметром d = 12…21 мм $\Delta_{ос}$ = (0,8…1,2)d, причем у сталей бóльшие значения припусков соответствуют диаметрам d = 5…20 мм, а у латуни – диаметрам d = 10…12 мм.

При сварке полос и листов из сталей толщиной s припуск на осадку определяется значением $\Delta_{ос}$ = (1…1,5)s, а из алюминия – $\Delta_{ос}$ = (2…4)s, где бóльшие значения соответствуют меньшим толщинам: 1…2 мм.

Для труб из углеродистых и низколегированных сталей с толщиной стенки s = 3…10 мм припуск на осадку определяется значением (1…1,6)s, а из высоколегированных сталей (1,2…1,4)s.

Общий припуск на осадку $\Delta_{ос}$ делится на осадку под током $\Delta_{ос.п/т}$ = (0,5…1)$\Delta_{ос}$ и осадку без тока $\Delta_{ос.б/т}$. Припуск на осадку $\Delta_{ос}$ определяет качество сварного соединения.

При уменьшенном припуске в стыке остаются оксиды, дающие непровар, а также возможно образование очагов литой структуры с

усадочными дефектами, образовавшимися при кристаллизации жидкого металла в кратерах, не выдавленных из стыка при осадке.

Повышенный припуск на осадку приводит к чрезмерному выдавливанию из стыка нагретого металла, что исключает последующую рекристаллизацию в стыке, и к искривлению волокон, имеющихся в любом сортаменте прокатной продукции. Оба фактора снижают качество соединения.

Внешним признаком хорошего качества соединения является равномерное распределение грата по периметру стыка после осадки.

В местах малого грата или его отсутствия с высокой вероятностью образуются непровары из-за оставшихся оксидов.

После свободной осадки (см. рис. 5.11, *а*) между электродными губками остается зазор $\Delta_к$, равный приблизительно установочной длине. Примерно другая установочная длина затрачивается на припуски при оплавлении и осадке.

При сварке полос и труб минимальный зазор $\Delta_к$ определяется количеством грата. При малом $\Delta_к$ грат впрессовывается в электродные губки, приводя их в негодность.

Давление осадки $p_{ос}$ должно обеспечивать требуемую пластическую деформацию металла при осадке.

В зависимости от типа материала и вида осадки (см. рис. 5.11) давление осадки $p_{ос}$ имеет следующие значения, МПа: для низко- и среднеуглеродистых сталей при свободной осадке 60…100; для низколегированных сталей при свободной осадке 100…110; для высоколегированных сталей при свободной осадке 150…220; для меди со срезанием грата 250…400; для латуни при свободной осадке 140…180; для алюминия и его сплавов со срезанием грата 130…200.

Процесс стыковой сварки оплавлением характеризуется определенной техникой. Детали с обработанными торцами и зачищенными боковыми поверхностями зажимают в электродных губках машины силами в 1,5–2 раза большими, чем силы осадки, для создания необходимых сил трения, удерживающих детали от проскальзывания при осадке. Применение специальных упоров для деталей позволяет снизить силу зажатия до $0{,}5p_{ос}$, необходимого только для создания электрического контакта между электродными губками и деталями.

Сварку тонких листов, а также труб и стрежней диаметром до 30…40 мм выполняют с односторонним токоподводом к электродным губкам (см. рис. 5.7). При сварке стержней и труб большего диаметра надо обеспечить равномерный по периметру детали токоподвод со стороны электродных губок.

Сварка тонких листов ($s < 1$ мм) возможна при отношении их ширины B к толщине s в пределах $B / s < 500$. Тонкие листы ($s < 1$ мм) следует сваривать в профилированных электродных губках, которые при зажатии изгибают листы так, что их торцы контактируют не по прямой линии, а по кривой (см. разд. 5.13). Изгиб листов придает им устойчивость при осадке. Несовпадение кромок листов и полос по высоте допускается ≤0,1…0,15 мм. После сварки листов грат снимают инструментом, перемещающимся вдоль стыка (резец, абразивный круг и т.д.).

При сварке труб из-за возможной потери устойчивости стенкой максимальный диаметр должен быть $<20s$ при $s < 2$ мм, $25s$ при $s = 2{,}5…5$ мм и $30s$ при $s > 6$ мм.

Грат внутри трубы необходимо снимать до остывания стыка путем пробивки дорном, продувкой сжатой смесью (80 % кислорода и 20 % воздуха), прогонкой специальным снарядом с режущей кромкой.

После сварки возможна термообработка соединения в электродных губках машины путем его нагрева импульсом тока.

5.6.5. ДЕФЕКТЫ И КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА СТЫКОВОЙ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ

Дефекты стыковых соединений подразделяются на дефекты размеров и формы соединения, дефекты макро- и микроструктуры.

Дефекты размеров и формы соединения, а также состояния поверхности деталей в местах их зажатия в электродных губках включают в себя отклонение размеров от номинальных значений, смещение и перекос (перелом) осей деталей и подгар их поверхностей.

Отклонение линейного размера соединения обусловливается неточной установкой деталей в электродных губках, отклонением припуска на осадку, неправильной установкой ограничителей хода плиты машины, люфтами в направляющих.

Смещение и перекос осей деталей вызываются износом электродных губок, люфтами в направляющих подвижной плиты, неправиль-

ной формой торцов деталей, большой установочной длиной.

После сварки труб возможно образование овальности из-за большой силы зажатия.

На деталях в местах их зажатия в электродных губках может наблюдаться подгар из-за износа и загрязнения губок, малой рабочей поверхности последних, малой силы зажатия деталей. Указанные дефекты выявляются внешним осмотром с применением мерительного инструмента.

К дефектам макроструктуры относятся непровар, трещины, расслоения между волокнами в прокате, рыхлоты.

Непровары, как правило, создаются толстыми оксидными пленками (>200 мкм) и представляют собой дефекты монолитной структуры.

Причинами непроваров являются повышенное окисление на стадии оплавления из-за малых значений $v_{опл}$ и $\Delta_{опл}$, а также недостаточные значения скорости осадки и припуска на осадку.

Горячие трещины могут образовываться при общем перегреве металла на всех участках сварного соединения. Наличие легкоплавкой фазы по границам зерен в сочетании с растягивающими напряжениями, возникающими от упругих деформаций механизмов зажатия и осадки или от отхода подвижной плиты назад с зажатыми деталями, – это основные причины появления горячих трещин.

Расслоения образуются между волокнами проката при наличии между ними легкоплавких ликвационных прослоек в сочетании с повышенной деформацией осадки, вызывающей искривление волокон и образование между ними растягивающих напряжений.

Рыхлоты и поры наиболее часто образуются в объемах закристаллизовавшегося металла, захлопнутого в глубоких кратерах при осадке и невыдавленного из стыка из-за недостаточной деформации.

Контроль дефектов макроструктуры выполняется неразрушающими и разрушающими методами. Внешним осмотром можно выявить поверхностные трещины и места возможных непроваров, где отсутствует грат.

Из неразрушающих методов используют рентгеновский и ультразвуковой контроль, а также магнитные методы контроля для магнитных материалов.

Рентгеновский (радиационный) контроль выявляет грубые непровары, рыхлоты, трещины, поры. Плоские дефекты (трещины, расслоения и т.д.) обнаруживаются при условии, если их плоскость отклоняется от направления луча не более чем на 12°.

Ультразвуковой контроль также позволяет определить трещины, раковины, непровары в виде оксидных пленок и несплошностей. К общим трудностям ультразвукового контроля относится появление помех от крупнозернистой структуры металла, а к частным при стыковой сварке – необходимость удаления грата и ввод колебаний в изделие с круглой формой поперечного сечения.

Неразрушающие методы контроля дают возможность определить засоренность сварного соединения дефектами.

Методы разрушающего контроля позволяют определить количественные характеристики показателей качества (прочность, пластичность, твердость) путем механических испытаний сварных образцов или выборочного испытания сварных соединений штатных изделий. При испытаниях образцов или изделий выявляются дефекты в местах разрушения.

Определение механических свойств сварных соединений выполняют по ГОСТ 6996–66. По данному стандарту для соединения стыковой сварки предусмотрены следующие виды механических испытаний: ударный изгиб, измерение твердости, статическое растяжение сварного соединения для определения наиболее слабого участка, испытание только зоны стыка на статическое растяжение, испытание на статический изгиб.

К дефектам микроструктуры относятся образование светлой полоски в стыке при сварке низкоуглеродистых и низколегированных сталей, пережог металла, образование видманштеттовой структуры.

Светлая полоска, образующаяся в центре стыка при сварке низкоуглеродистых сталей, является следствием выгорания углерода на стадии нагрева, что приводит к образованию в указанной зоне однородного феррита, имеющего низкую травимость.

Светлая полоска снижает однородность механических свойств сварного соединения, но не относится к недопустимым дефектам. Длительная термическая обработка позволяет устранить неравномерное распределение углерода и светлую полоску.

Пережогом металла является окисление границ зерен при нагреве, близком к температуре солидуса. Пережог снижает прочность

соединения и относится к недопустимым и неустранимым дефектам.

Перегрев металла в стыке доэвтектоидной стали при охлаждении образует видманштеттовую структуру, которая характеризуется тем, что избыток феррита выделяется в остывающей стали не в виде сетки по границам зерен аустенита, а внутри их параллельными пластинками. Данная структура имеет грубое строение, что снижает пластичность сварного соединения. Устраняется видманштеттова структура нормализацией или отжигом.

Допустимость или недопустимость данного дефекта структуры определяется уровнем требований к качеству сварного соединения.

5.6.6. МЕТОДЫ ИНТЕНСИФИКАЦИИ НАГРЕВА ПРИ СТЫКОВОЙ СВАРКЕ ОПЛАВЛЕНИЕМ

Сварку непрерывным оплавлением используют для соединения деталей с поперечным сечением до 5000 мм^2. При сварке деталей бóльших поперечных сечений требуется непропорциональное увеличение времени оплавления, припуска на оплавление и мощности источника сварочного тока для нагрева свариваемых деталей до оптимальной температуры. Поэтому в целях расширения границ применения стыковой сварки оплавлением при соединении деталей с повышенными поперечными сечениями используют следующие методы интенсификации нагрева: предварительный подогрев деталей перед оплавлением в контактной машине; программное регулирование вторичного напряжения источника сварочного тока и скорости оплавления; импульсное оплавление.

Сваркой непрерывным оплавлением с предварительным подогревом соединяют детали с поперечным сечением 5000... 10 000 мм^2. Способы подогрева указаны на рис. 5.15, *а*, *б*. Подогрев осуществляют импульсами тока от источника сварочного тока машины после зажатия деталей в электродных губках.

В первом случае (см. рис. 5.15, *а*) детали, находящиеся под вторичным напряжением от источника сварочного тока, периодически замыкаются накоротко путем возвратно-поступательного перемещения подвижной плиты машины с закрепленной на ней деталью. Детали подогреваются импульсами тока короткого замыкания длительностью 0,5...2 с примерно с такими же паузами в количестве 3...20 импульсов. Общее время подогрева – от нескольких секунд до 2 мин. После подогрева проводят оплавление деталей с последующей их осадкой.

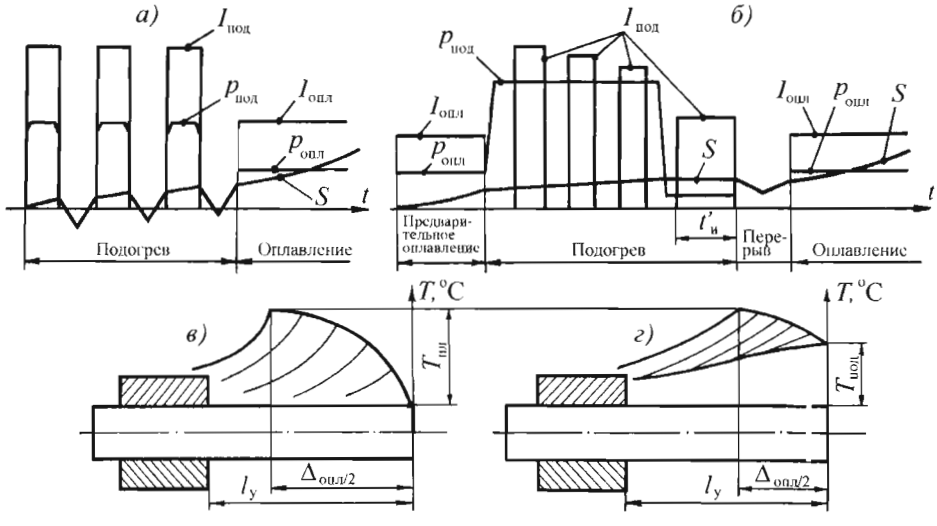


Рис. 5.15. Способы подогрева деталей перед стыковой сваркой непрерывным оплавлением:
а – подогрев периодическими короткими замыканиями торцов деталей, находящихся под напряжением; *б* – подогрев импульсами тока после замыкания торцов деталей; *в* и *г* – распределение температуры в деталях при оплавлении без подогрева и с подогревом соответственно; $I_{опл}$, $p_{опл}$, $\Delta_{опл}$ – ток, давление и припуск при оплавлении; $I_{под}$ и $p_{под}$ – ток и давление подогрева; S – перемещение подвижной плиты машины

Во втором случае (см. рис. 5.15, *б*) детали предварительно оплавляют для выравнивания поверхностей торцов и затем сжимают невысоким давлением $p_{под} = 0{,}3p_{ос}$, где $p_{ос}$ – давление осадки. Далее через замкнутые детали пропускают импульсы тока с программным регулированием их длительности и пауз между ними. Последний подогревающий импульс тока длительностью $t'_{и}$ (см. рис. 5.15, *б*) пропускают при снятом давлении $p_{под}$, чтобы не вызывать большой деформации металла в зоне стыка и этим предупредить сваривание деталей. После выключения тока подогрева детали разводят и с перерывом ≤0,5 с начинают их новое сближение, выполняя при этом процессы оплавления и осадки.

Температура подогрева зависит от материала и составляет для углеродистых сталей 800…900 °С, а для труднодеформируемых аустенитных сталей 950…1050 °С.

Подогрев снижает плотность тока последующего оплавления, что позволяет сваривать детали с большей площадью поперечного сечения, расширяет зону нагрева, снижая этим давление осадки, замедляет кристаллизацию жидкого металла на торцах, что дает возможность снизить скорость осадки, снижает припуск на оплавление в 1,5–3 раза, а вместе с этим – потери металла и энергии.

Подогрев благоприятно сказывается на сварке закаливающихся сталей, снижая скорость их охлаждения и степень закалки, что повышает пластичность сварного соединения.

Одновременно с достоинствами при сварке с подогревом имеют место следующие недостатки: трудность ведения процесса оплавления при пониженной плотности тока из-за сужения области устойчивого оплавления (см. рис. 5.14) и неравномерность температуры подогрева при повышенных сечениях деталей, как при сварке сопротивлением.

Программное регулирование вторичного напряжения источника сварочного тока U_{20} и скорости оплавления $v_{опл}$ позволяет в ходе процесса оплавления интенсифицировать нагрев деталей за счет увеличения длительности существования контактов (жидких перемычек) в зазоре между торцами деталей до их разрушения. С возрастанием длительности существования контактов увеличивается количество теплоты, отводимой от них в глубь металла деталей, и снижаются потери теплоты, связанные с выбросом расплавленного металла контактов при их разрушении.

Длительность существования контактов повышается с уменьшением скорости оплавления. При сварке сталей наиболее эффективная интенсификация нагрева достигается при скорости оплавления $v_{опл} = 0{,}2…0{,}25$ мм/с.

В начале оплавления, когда металл достаточно холодный, даже при низкой скорости оплавления требуется повышенное напряжение источника сварочного тока U_{20} (рис. 5.16). После прогрева металла напряжение U_{20} снижают, чтобы сохранить низкую скорость оплавления.

Снижение вторичного напряжения U_{20} увязывается с критическим значением напряжения на контакте $U_{к.кр}$, ниже которого твердый контакт не расплавляется. Значения критических напряжений $U_{к.кр}$ зависят от теплофизических характеристик и температуры нагрева металла. Для стальных контактов при температуре металла 20 °С напряжение $U_{к.кр} = 1{,}15$ В, а при температуре 1200 °С оно равно 0,65 В.

Оптимальное увеличение теплоты, передаваемой в глубь металла, при сохранении устойчивого оплавления достигается в случае снижения напряжения U_{20} до $(1{,}5…2{,}5)U_{к.кр}$. Однако при этом требуется быстродействующая аппаратура для регулирования напряжения и скорости перемещения подвижной плиты контактной машины.

Оплавление на пониженной скорости проводится до оптимального нагрева металла. Перед осадкой скорость оплавления, а следовательно, и плотность тока оплавления необходимо повысить, чтобы обновить окисленный из-за мало-интенсивного предыдущего оплавления слой жидкого металла на торцах деталей, что осуществляется повышением вторичного напряжения U_{20}.

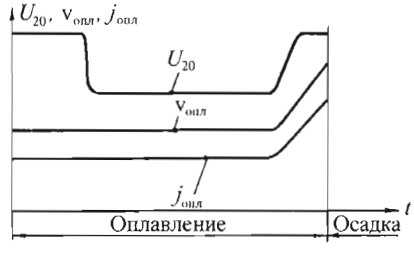


Рис. 5.16. Программа изменения вторичного напряжения U_{20} источника сварочного тока, скорости оплавления $v_{опл}$ и плотности тока оплавления $j_{опл}$

Программное регулирование вторичного напряжения и скорости оплавления позволяет сваривать детали сечением >10 000 мм^2. При этом в несколько раз снижаются припуск на оплавление, время оплавления и потребляемая мощность.

Недостатками данного способа являются недоиспользование мощности источника сварочного тока в интервале времени оплавления с пониженным вторичным напряжением и зависимость программного регулирования напряжения и скорости оплавления от поперечного сечения деталей и полного сопротивления вторичного контура контактной машины.

Импульсное оплавление интенсифицирует нагрев деталей за счет изменения характера разрушения контактов между торцами деталей в процессе оплавления.

Естественное взрывообразное разрушение контактов от перегрева и действия электродинамических сил, характеризующееся большими потерями нагретого металла и теплоты, заменяется в основном на их принудительное разрушение преимущественно в твердом состоянии до расплавления. Это сокращает потери теплоты и позволяет полнее использовать теплоту, накопленную в металле нагретых контактов, для прогрева металла деталей вглубь.

Принудительное разрушение контактов выполняется механическим путем. Для этого на поступательное перемещение $S_{пост}$ подвижной детали, перемещающейся со скоростью подвижной плиты $v_{п.п}$, налагается колебательное движение с амплитудой A и частотой f (рис. 5.17, *в*).

Колебательное движение подвижной плиты $S_к$ периодически меняет величину зазора между торцами деталей. На стадии минимального зазора (рис. 5.17, *а*) в твердых и жидких контактах аккумулируется теплота, выделяющаяся при протекании через них тока. При разведении деталей (рис. 5.17, *б*) контакты разрушаются с минимальным выбросом нагретого металла. Оставшийся почти весь нагретый металл контактов передает свою теплоту в глубь деталей, ускоряя этим их нагрев.

Эффективное механическое разрушение контактов происходит при скорости разведения деталей ≥50 мм/с. При этом твердый контакт не успевает выплавиться.

Для интенсификации нагрева используют частоты f = 10…100 Гц при амплитудах колебания A = 0,1…0,8 мм.

При импульсном оплавлении в 3–4 раза снижается время оплавления, необходимое для нужного нагрева деталей, в 2–2,5 раза сокращается расход электроэнергии, в 3–4 раза уменьшается припуск на оплавление. На всей стадии оплавления используется полная мощность источника сварочного тока.

Импульсное оплавление позволяет сваривать детали сечением 1000…100 000 мм^2. Недостатками данного способа являются сложность и высокая стоимость оборудования.

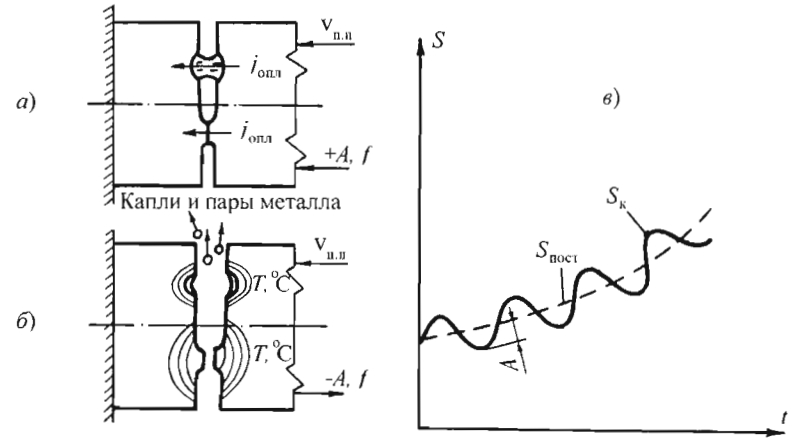


Рис. 5.17. Схема импульсного оплавления при стыковой сварке:
а – стадия минимального зазора между деталями; *б* – стадия максимального зазора и механического разрушения контактов; *в* – характер перемещения подвижной плиты;
A и f – амплитуда и частота колебания подвижной плиты; $j_{опл}$ – плотность тока оплавления;
T, °С – температурное поле, обусловленное передачей теплоты от контактов

5.7. ТЕХНОЛОГИЯ ТОЧЕЧНОЙ СВАРКИ

5.7.1. ПРИМЕНЕНИЕ ТОЧЕЧНОЙ СВАРКИ

Точечная сварка получила широкое распространение в промышленности, особенно при массовом производстве штампосварных конструкций в автомобиле- и авиастроении, космической технике, сельскохозяйственном и транспортном машиностроении, строительстве, а также в приборостроении при создании миниатюрных и прецизионных узлов и изделий электронной техники, средств связи и управления.

Большое значение и широкое применение контактной точечной сварки обусловлены следующими ее достоинствами:

– высокой производительностью и степенью автоматизации вследствие кратковременности самого процесса сварки и возможностью использования высокопроизводительных многоточечных машин, сборочно-сварочных поточных машин, агрегатов и роботизированных комплексов контактной сварки;

– возможностью получения сварных соединений высокого и стабильного качества для рациональной конструкции соединения при соблюдении оптимальных значений параметров режима и условий выполнения сварки;

– практическим отсутствием необходимости использования присадочных материалов, флюсов и газов;

– относительно высокими санитарно-гигиеническими условиями труда и культурой производства.

Перечисленные достоинства можно отнести ко всем видам контактной сварки.

Точечной сваркой можно сваривать детали из большинства известных конструкционных материалов: низко- и среднеуглеродистых, а также низколегированных, легированных коррозионно-стойких и жаропрочных сталей, алюминиевых и магниевых сплавов, титана и его сплавов, некоторых медных сплавов и ряда других материалов.

Лучше всего свариваются между собой однородные металлы и сплавы, построенные на одной основе или имеющие разную основу, но образующие между собой ряд твердых растворов. Например, аустенитные стали хорошо свариваются с конструкционными, коррозионно-стойкие стали – с жаропрочными. Никель сваривают с низколегированными и коррозионно-стойкими сталями. Однако в ряде случаев контактная точечная сварка деталей из разнородных металлов и сплавов затруднена или невозможна, что обусловлено следующими основными факторами:

– различием теплофизических и механических свойств свариваемых пар металлов и зависимостью их от термического цикла сварки, что вызывает смещение электротеплового поля относительно плоскости свариваемого стыка;

– существенной химической и структурной неоднородностью металла литого ядра вследствие несимметричного проплавления *деталей и незавершенности процессов перемешивания* металла в ядре;

– образованием интерметаллических фаз и механических смесей, обладающих большой твердостью и хрупкостью, что приводит к низким механическим свойствам соединения.

Все чаще точечной сваркой соединяют металлы с антикоррозионными и декоративными покрытиями. Свариваемость таких металлов зависит от свойств покрытия и его толщины. Удовлетворительно свариваются металлы с электропроводными металлическими покрытиями толщиной 7…30 мкм. В машиностроении используют стали, покрытые цинком, свинцом, алюминием, никелем и хромом, в приборостроении детали покрывают также оловом, оловянно-висмутовым сплавом, кадмием, золотом, серебром и никелем. Наибольшие трудности возникают при сварке металлов с неэлектропроводными оксидными и фосфатными покрытиями из-за таких дефектов, как выплески и непровары. Точечной сваркой обычно соединяют детали, собранные внахлестку, однако возможны и другие типы соединений.

Наиболее широко этим способом соединяют детали и заготовки, выштампованные из листового и вырезанные из профильного проката, а также детали, изготовленные резанием. Точечную сварку можно использовать для создания комбинированных конструкций, в которых заготовки из листового проката необходимо сваривать с деталями, изготовленными методами литья, ковки и высадки.

Как правило, точечной сваркой соединяют детали толщиной 0,5…6,0 мм. На специальных машинах возможна сварка стали толщиной до 30,0 мм, при микросварке толщина привариваемых элементов составляет 20…50 мкм.

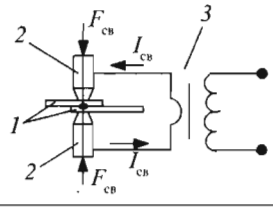
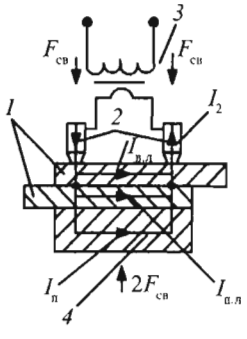
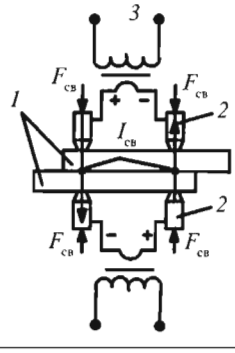
Обычно в машиностроении сваривают детали равных толщин или с соотношением толщин не более 1 : 6 (при толщине тонкой детали 0,5… 1,5 мм), в приборостроении соотношение толщин соединяемых элементов может быть более чем 1 : 100.

Точечная сварка может быть дву- и односторонней. При сварке компактных деталей и узлов открытого типа с отбортовкой применяют двустороннюю сварку, при ограниченном доступе к зоне сварки и для крупногабаритных узлов – одностороннюю. При сварке в массовом производстве для повышения производительности используют многоточечную сварку.

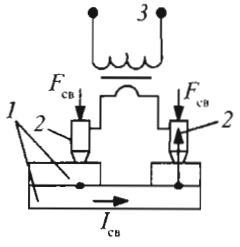
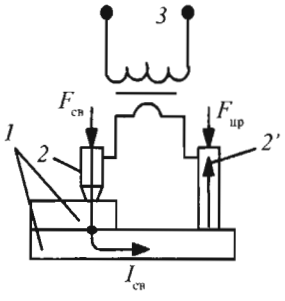
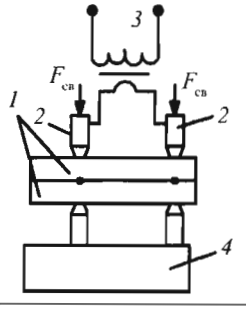
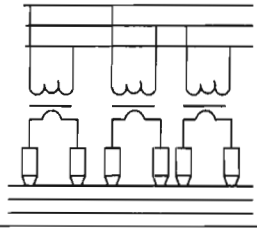
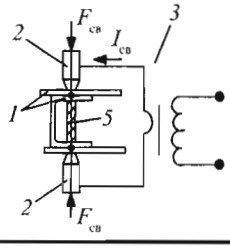
Основные схемы точечной сварки, их характеристики и области применения приведены в табл. 5.3.

Двусторонняя сварка двумя встречными электродами (табл. 5.3, схемы 1, 8) получила наибольшее распространение и реализована в универсальных машинах для точечной сварки. Односторонняя сварка (схемы 2–4, 6, 7) выполняется с помощью специальных автономных головок со встроенным сварочным трансформатором или на двухточечных ручных пистолетах, снабженных выравнивающими устройствами для обеспечения одинаковой силы сжатия на электродах.

5.3. Основные схемы точечной сварки

Номер по порядку	Наименование схемы	Эскиз	Толщина листа, мм	Характеристика и область применения
1	Двусторонняя одноточечная сварка: *1* – детали; *2* – электроды; *3* – источник сварочного тока		≤6	Основной способ сварки. Применяется во всех отраслях машиностроения
2	Односторонняя двухточечная сварка на токопроводящей подкладке *4*		1,5…2,0	Сварка крупных узлов. Ток I_2 распределяется между верхней и нижней деталями и медной подкладкой $I_2 = I_{в.л} + I_{н.л} + I_п$, где I_2 – вторичный ток; $I_{в.л}$ – ток в верхнем листе; $I_{н.л}$ – ток в нижнем листе; $I_п$ – ток в подкладке
3	Двусторонняя двухточечная сварка со встречным токоподводом		≤5	Сварка деталей большой толщины, крупногабаритных узлов. Высокие производительность и качество. Ток протекает от верхней детали к нижней без заметного шунтирования

Окончание табл. 5.3

Номер по порядку	Наименование схемы	Эскиз	Толщина листа, мм	Характеристика и область применения
4	Односторонняя двухточечная сварка без шунтирования		≤2,5	Приварка обшивки к крупногабаритным каркасам. Весь ток протекает через контакт между свариваемыми деталями
5	Односторонняя одноточечная сварка с холостым электродом *2'*. $F_{пр}$ – сила прижатия		≤0,8	Сварка вручную одно- или двухточечным пистолетом в автомобилестроении
			≤1,5	Механизированная приварка панелей и обшивки в автомобилестроении
6	Односторонняя двухточечная сварка на токопроводящей подкладке с контрэлектродами		≤2,0	Сварка деталей с шагом ≥100 мм. Малая потребляемая мощность, высокая производительность
7	Многоточечная сварка от нескольких трансформаторов			Сварка жестких узлов в автомобилестроении. Высокая производительность, малая деформация конструкции
8	Двусторонняя двухточечная сварка с токопроводящей вставкой *5*		≤1,5	Сварка деталей, одна из которых тонкостенная и полая. Применяется для крепления обшивки на профиль. Вставка *5* может быть жесткой или раздвижной

5.7.2. КОНСТРУИРОВАНИЕ И ПОДГОТОВКА ДЕТАЛЕЙ К СВАРКЕ

При проектировании сварной конструкции, выполняемой точечной сваркой на универсальном оборудовании с использованием простейших сборочных приспособлений, желательно обеспечить:

– минимальную и неизменную массу деталей из ферромагнитного материала, вводимую в контур сварочной машины, так как наличие магнитной стали в сварочном контуре ведет к увеличению его сопротивления и снижению силы сварочного тока; конструкция *а* на рис. 5.18 более предпочтительна, чем конструкция *б*;

– необходимые жесткость и прочность электродов и хоботов из сплавов с твердостью ≥120 НВ, передающих требуемую силу сжатия при сварке внутри узлов коробчатой формы, обечаек и труб (см. рис. 5.18, *в*), при этом размеры отверстия (в мм) свариваемых узлов прямоугольного или круглого сечения должны отвечать следующим зависимостям:

$$d \geq \sqrt[3]{1{,}2LF_{\text{сж}}} \quad \text{и} \quad bh^2 \geq 0{,}8LF_{\text{сж}},$$

где $F_{\text{сж}}$ – сила сжатия электродов, даН, определяемая толщиной и материалом, подлежащим сварке; L – длина детали (или вылет электрода), мм; при невозможности введения электрода внутрь полого тонкостенного профиля целесообразно использовать медные раздвижные вставки (см. рис. 5.18, *г*) или удаляемый после сварки легкоплавкий материал;

– свободный доступ электродов к месту сварки с тем, чтобы использовать прямые электроды с внутренним охлаждением, поэтому конструкция узла на рис. 5.18, *д* предпочтительнее узла, показанного на рис. 5.18, *е*;

– свободную деформацию деталей в зоне сварки, узел *ж* на рис. 5.18 полностью отвечает этому требованию, узел *з* на этом рисунке – частично;

– минимально возможные зазоры между деталями за счет повышения точности заготовок, фиксирующих приспособлений и качества сборки деталей в местах их сопряжения под сварку.

Наиболее часто точечная сварка применяется для нахлесточных соединений с обязательным получением литого ядра. Качество металла литого ядра, зоны термического влияния и размеры сечения ядра определяют прочность сварной точки. Основным геометрическим параметром точечного соединения является диаметр литого ядра. ГОСТ 15878–79 регламентирует основные размеры конструктивных элементов сварных соединений для групп А и Б (табл. 5,4; рис. 5.2). Соединения группы А имеют большие диаметры литого ядра и обладают более высокой прочностью по сравнению с соединениями группы Б.

Фактический диаметр сварной точки должен быть не менее указанного в табл. 5.4. При отработке технологии сварки выбранные параметры режима должны обеспечивать диаметр ядра $d_{\text{ном}}$ на 15…25 % больше табличного для компенсации технологических возмущений при сварке.

Величина проплавления h мало влияет на прочность точки и может изменяться в пределах 20…80 % толщины каждой детали. При проплавлении <20 % не удается обеспечить стабильные размеры литого ядра и отсутствие в нем дефектов, при проплавлении >80 % наблюдается перегрев металла в околошовной зоне и в контакте электрод – деталь, что снижает коррозионную стойкость соединения, повышает изнашивание электродов и вероятность образования выплесков.

Обычно минимальное значение проплавления (20 %) достигается в тонкой детали при сварке деталей неравной толщины, максимальное проплавление (до 95 %) характерно для титановых сплавов ввиду их низкой теплопроводности.

Бесследная сварка, когда отсутствует заметная вмятина на поверхности одной из деталей, достигается при односторонней сварке на медной подкладке (см. табл. 5.3, п. 2) или при сварке с холостым плоским электродом большого диаметра (см. табл. 5.3, п. 5).

При сварке деталей неодинаковой толщины (см. рис. 5.2, *в*) конструктивные элементы соединения выбирают по более тонкой детали. Если соотношение толщин свариваемых деталей $s / s_1 > 2$, величины B, t, u, c увеличивают на 20…30 %. При двусторонней сварке трех деталей (в исключительных случаях четырех) диаметр литого ядра, измеренный в плоскости сопряжений каждой пары деталей, должен соответствовать государственному стандарту (при односторонней сварке число одновременно свариваемых деталей не может быть более двух). Если при сварке пакета из трех деталей образуются два литых ядра (см. рис. 5.5, *а*), то величина нахлестки B устанавливается по тонкой детали *1*, *1'*. В случае образования общей литой зоны (см. рис. 5.5, *б*) нахлестка со стороны края средней детали должна быть увеличена на 20…30 % с тем, чтобы предотвратить возможное раздавливание края детали *2*.

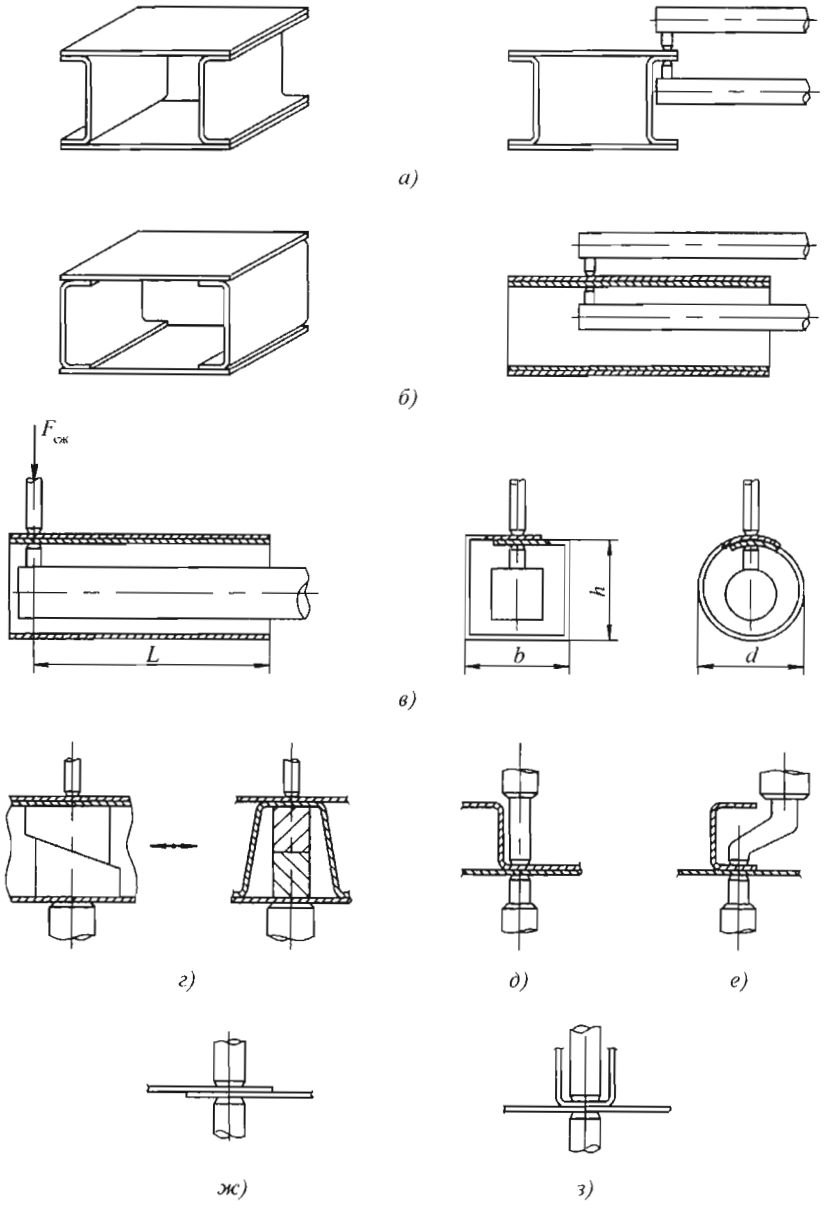


Рис. 5.18. Примеры узлов, соединяемых точечной (шовной) сваркой

Минимальный шаг точек при сварке пакета из трех стальных деталей увеличивают в ~1,5 раза по сравнению с шагом для пакета из двух деталей. Желательно, чтобы отношение толщин деталей в пакете не превышало трех.

Технологический процесс производства сварной конструкции состоит из следующих основных операций: изготовления заготовок и деталей; подготовки поверхности деталей под сварку; сборки и прихватки; собственно сварки; правки и механической доработки; антикоррозионной защиты и контроля качества. В зависимости от серийности производства, его технического уровня, ответственности узлов и условий их эксплуатации последовательность и число операций могут корректироваться

5.4. Размеры конструктивных элементов точечных соединений по ГОСТ 15878–79

<table>
<tr><td rowspan="3">Толщина деталей s, мм, свыше</td><td colspan="5">Параметр соединений, мм, не менее</td></tr>
<tr><td colspan="3">Группа А</td><td colspan="2">Группа Б</td></tr>
<tr><td rowspan="2">d</td><td colspan="2">B</td><td rowspan="2">t</td><td rowspan="2">c</td><td rowspan="2">d</td><td colspan="2">B</td><td rowspan="2">t</td><td rowspan="2">c</td></tr>
<tr><td>Черные металлы и сплавы</td><td>Цветные металлы и сплавы</td><td>Черные металлы и сплавы</td><td>Цветные металлы и сплавы</td></tr>
<tr><td>0,3</td><td>2,5</td><td>6</td><td rowspan="3">10</td><td rowspan="2">8</td><td rowspan="2">9</td><td>1,5</td><td>4</td><td>6</td><td rowspan="2">7</td><td rowspan="2">8,5</td></tr>
<tr><td>0,3…0,4</td><td>2,7</td><td>7</td><td>1,7</td><td>5</td><td>7</td></tr>
<tr><td>0,4...0,5</td><td rowspan="2">3</td><td rowspan="2">8</td><td rowspan="2">10</td><td rowspan="2">12</td><td>2</td><td>6</td><td>8</td><td rowspan="2">8</td><td rowspan="2">10</td></tr>
<tr><td>0,5...0,6</td><td>2,2</td><td>7</td><td>9</td></tr>
<tr><td>0,6...0,7</td><td>3,3</td><td>9</td><td rowspan="2">12</td><td>11</td><td>13</td><td rowspan="2">2,5</td><td rowspan="2">8</td><td rowspan="2">10</td><td rowspan="2">10</td><td rowspan="2">12</td></tr>
<tr><td>0,7...0,8</td><td>3,5</td><td>10</td><td>13</td><td>15,5</td></tr>
<tr><td>0,8...1</td><td>4</td><td>11</td><td>14</td><td>15</td><td>18</td><td>3</td><td>9</td><td>12</td><td>12</td><td>15</td></tr>
<tr><td>1...1,3</td><td>5</td><td>13</td><td>16</td><td>17</td><td>20,5</td><td>3,5</td><td>10</td><td>13</td><td>14</td><td>16</td></tr>
<tr><td>1,3...1,6</td><td>6</td><td>14</td><td>18</td><td>20</td><td>24</td><td>4</td><td>11</td><td>14</td><td>16</td><td>18</td></tr>
<tr><td>1,6...1,8</td><td>6,5</td><td>15</td><td>19</td><td>22</td><td>26</td><td>4,5</td><td>12</td><td>15</td><td>18</td><td>19,5</td></tr>
<tr><td>1,8...2,2</td><td>7</td><td>17</td><td>20</td><td>25</td><td>30</td><td>5</td><td>13</td><td>16</td><td>20</td><td>24</td></tr>
<tr><td>2,2...2,7</td><td>8</td><td>19</td><td>22</td><td>30</td><td>36</td><td>6</td><td>15</td><td>18</td><td>23</td><td>27</td></tr>
<tr><td>2,7...3,2</td><td>9</td><td>21</td><td>26</td><td>35</td><td>42</td><td>7</td><td>17</td><td>20</td><td>26</td><td>31</td></tr>
<tr><td>3,2...3,7</td><td>10,5</td><td>24</td><td>28</td><td>40</td><td>48</td><td colspan="5" rowspan="6">Не рекомендуется</td></tr>
<tr><td>3,7...4,2</td><td>12</td><td>28</td><td>32</td><td>45</td><td>54</td></tr>
<tr><td>4,2...4,7</td><td>13</td><td>31</td><td>36</td><td>50</td><td>60</td></tr>
<tr><td>4,7...5,2</td><td>14</td><td>34</td><td>40</td><td>55</td><td>66</td></tr>
<tr><td>5,2...5,7</td><td>15</td><td>38</td><td>46</td><td>60</td><td>72</td></tr>
<tr><td>5,7...6</td><td>16</td><td>42</td><td>50</td><td>65</td><td>78</td></tr>
</table>

и окончательно определяются рабочим технологическим процессом (маршрутной технологией и операционными картами). Большинство из перечисленных операций являются типовыми для точечной, шовной и рельефной сварки.

Качество металла и точность изготовления заготовок и деталей существенно влияют на процесс образования и качество сварных соединений. Раскрой заготовок из листа осуществляется на гильотинных и дисковых ножницах, реже – в штампах или с использованием кислородной резки (для низкоуглеродистых сталей с содержанием до 0,25 % С и толщиной 2…6 мм). Для механизированного раскроя листов из цветных металлов, высоколегированных сталей и титана используют микроплазменную и лазерную резку, так как при этом достигаются наилучшие показатели скорости и качество реза. Заготовки из профильного проката нарезают пилами, пресс-ножницами, реже кислородной резкой.

Формообразование деталей из листовой заготовки и профильного проката выполняют различными видами холодного деформирования (штамповкой, вытяжкой, выдавливанием, гибкой и т.п.). Хрупкие металлы деформируют с подогревом. Детали, изготовленные резанием, должны иметь шероховатость поверхности не грубее Rz 20 по ГОСТ 2789–73. Реже в сварных узлах используют детали, изготовленные литьем и ковкой, при этом в металле заготовки должны отсутствовать дефекты типа трещин, пор, рыхлот, раковин и т.п.

Подготовка поверхности деталей проводится с целью предупреждения и устранения вредного влияния оксидов и загрязнений в междуэлектродной зоне на процесс сварки и качество сварного соединения. Наличие загрязнений и поверхностных оксидных пленок в зоне сварки может вызвать:

– загрязнение сварного соединения неметаллическими включениями;

– образование раковин, пор и трещин в металле ядра и на поверхности деталей;

– недопустимые выплески металла из зоны сварки;

– подгар и подплавление поверхности деталей;

– повышение уровня нагрева электродов и, соответственно, снижение стойкости их рабочей части.

Прямым следствием указанных дефектов является понижение прочности и коррозионной стойкости соединения.

Выбор способа подготовки поверхности деталей зависит от марки свариваемого материала, исходного состояния поверхности заготовки, толщины металла и размера детали, а также от типа производства и требований к качеству соединений.

Подготовка поверхности деталей двусторонняя (общая или местная) включает в себя следующие последовательно выполняемые операции: обезжиривание, механическую обработку или химическое травление, пассивирование, нейтрализацию, промывку, сушку и контроль.

В большинстве случаев объективной характеристикой качества подготовки поверхности деталей под сварку является величина электросопротивления холодных деталей $r_{эл}$ (табл. 5.5). Сопротивление измеряют микроомметром или методом амперметра – вольтметра, используя специальный пресс или непосредственно в электродах сварочной машины с изоляцией одного из электродов. Материал электродов, форма и размеры их рабочей поверхности и сила сжатия должны соответствовать условиям сварки данных деталей. Измерение $r_{эл}$ и сравнение с допускаемыми значениями для разных пар материалов (см. табл. 5.5) необходимо выполнять на стадии отработки технологии подготовки поверхности деталей. В сомнительных случаях, когда возможны нарушения технологии подготовки или условий хранения деталей после обработки, также проводят измерения.

5.5. Химические способы подготовки поверхности деталей (по данным НИАТ)

Металл	Порядок основных операций обработки, состав и температура 1 л водного раствора	Обработка после основной операции	Допустимое значение $r_{эл}$, мкОм
Конструкционные низко- и среднелегированные и хромистые стали после термообработки	**Обезжиривание** Тринатрийфосфат, г ..... 40…60 Кальцинированная сода, г .. 20…35 Едкий натр, г ..... 30…50 Температура раствора, °С .. 60…80	**Промывка** В горячей воде (45…50 °С), затем в проточной холодной воде	800
	Травление Серная кислота, г ..... 125…250 Хлористый натрий, г ..... 20…30 Присадка 4М, г ..... 5…8 Температура раствора, °С ..... 50…60	**Нейтрализация** В водном растворе едкого натра или калия (50…70 г), при температуре (20…25 °С)	
Коррозионностойкие и жаропрочные стали, никелевые сплавы	**Обезжиривание** Тринатрийфосфат, г ..... 50…70 Жидкое стекло, г ..... 25…30 Жидкое мыло, г ..... 3…5 Температура раствора, °С .. 50…60	**Промывка** В горячей воде (40…50 °С), затем в проточной холодной воде	1000

Продолжение табл. 5.5

Металл	Порядок основных операций обработки, состав и температура 1 л водного раствора	Обработка после основной операции	Допустимое значение $r_{эк}$, мкОм
Коррозионно-стойкие и жаропрочные стали, никелевые сплавы	**Рыхление окалины** Едкий натр, г ..... 700…800 Азотнокислый натрий, г ..... 200…300 Температура раствора, °С ..... 60…80	**Промывка** В горячей воде (40…50 °С)	1000
	Травление Серная кислота, г ..... 70…100 Соляная кислота, г ..... 180…220 Азотная кислота, г ..... 10…20 Температура раствора, °С ..... 50…70		
Титановые сплавы после термообработки	**Травление** Соляная кислота, г ..... 300…350 Азотная кислота, г ..... 50…90 Фтористый натрий, г ..... 40…60 Температура раствора, °С ..... 40…50		1500
Медные сплавы (латунь, бронза)	**Обезжиривание** Едкий натр, г ..... 15…25 Кальцинированная сода, г .. 15…25 Тринатрийфосфат, г ..... 15…25 Температура раствора, °С .. 40…50	**Промывка** В горячей воде (40…50 °С), затем в проточной холодной воде	300
	Травление Серная кислота, г ..... 100…150 Температура раствора, °С ..... 40…50	**Промывка** В проточной холодной воде	
	Пассивирование Хромовый ангидрид, г … 100…120 Серная кислота, г ..... 2…5 Температура раствора, °С ..... 15…20		
Алюминиевые сплавы (типа АМц и АМг)	**Травление** Едкий натр, г ..... 4…6 Температура раствора, °С ..... 35…50	**Промывка** В горячей воде (30…50 °С), затем в проточной холодной воде	100
	Осветление Азотная кислота, г ..... 200…300 Температура раствора, °С ..... 15…30	**Промывка** В проточной холодной воде	

Окончание табл. 5.5

Металл	Порядок основных операций обработки, состав и температура 1 л водного раствора	Обработка после основной операции	Допустимое значение $r_{ээ}$, мкОм
Алюминиевые сплавы (типа АМц и АМг)	**Травление с пассивированием** Ортофосфорная кислота, г ..... 50…120 Калиевый (натриевый) хромпик, г ..... 0,5…1,4 Температура раствора, °С ..... 25…35	**Промывка** В проточной холодной воде	100
Магниевые сплавы	**Обезжиривание** Тринатрийфосфат, г ..... 40…60 Едкий натр, г ..... 10…25 Жидкое стекло, г ..... 20…30 Температура раствора, °С .. 80…90	**Промывка** В горячей воде (35…50 °С), затем в проточной холодной воде	140
	Снятие старого хроматного покрытия Едкий натр, г ..... 300…400 Температура раствора, °С ..... 70…90	**Нейтрализация** В растворе хромового ангидрида	
	Травление Азотная кислота, г ..... 40…60 Температура раствора, °С .. 15…25	**Промывка** В проточной холодной воде	
	Пассивирование Хромовый ангидрид, г .... 200...250 Температура раствора, °С ..... 18…25	**Промывка** В горячей воде (35…50 °С), затем в проточной холодной воде	

Допускается о качестве подготовки деталей из сталей и титановых сплавов судить по результатам внешнего визуального осмотра и сравнения с эталонным образцом. Для деталей из алюминиевых сплавов обязательно измерение $r_{ээ}$.

На производстве используют механическую и химическую обработку поверхности деталей, в некоторых случаях (для жаропрочных сплавов) применяют их комбинированное сочетание.

Химические способы подготовки особенно эффективны в крупносерийном и массовом производстве ответственных деталей, поскольку они позволяют получить чистые и малоактивные поверхности с низким значением контактных сопротивлений практически для всех металлов и сплавов. Химическая обработка поверхности деталей проводится в соответствии с производственной инструкцией и технологической документацией, которые регламентируют последовательность операций, состав растворов, их температуру и продолжительность каждой операции (см. табл. 5.5).

Механическую подготовку поверхности проводят дробеструйной (пескоструйной) обработкой или зачисткой металлическими щетками и абразивными кругами. Дробеструйную обработку выполняют при наличии на деталях слоя окалины или прочной оксидной пленки. Детали из стали и титановых сплавов обрабатывают металлической дробью, алюминиевые и магниевые – стеклянными шариками. Остатки дроби и продуктов обработки удаляют с нахлестки деталей салфеткой, смоченной в растворителе, или обдувают сухим воздухом.

Зачистку металлическими вращающимися щетками и абразивными кругами на вулканитовой основе или войлочными кругами с абразивом чаще всего применяют для сталей (в том числе для жаропрочных, высокопрочных и жаростойких сплавов). Алюминиевые и магниевые сплавы подвергают местной очистке быстровращающейся стальной щеткой или мелким наждачным полотном (шкуркой) с ограничением силы прижатия зачистного инструмента, чтобы избежать глубоких повреждений поверхности металла. Однако сроки хранения деталей до сварки не должны быть >2...3 ч после обработки, из-за высокой химической активности свежезачищенной поверхности.

Поверхность деталей, подготовленных под сварку, в процессе хранения, сборки и сварки следует предохранять от загрязнения и пыли.

При сварке металлов, подверженных интенсивной коррозии при эксплуатации или в результате попадания в зазор реактивов, применяемых при антикоррозионной обработке сварного узла, внутренняя поверхность нахлестки деталей должна быть защищена электропроводящими лаками, грунтами и клеями. При этом необходимо пользоваться специальными отраслевыми инструкциями о порядке приготовления, нанесения, контроля и сроках засыхания герметиков. Грунт и герметики обычно наносятся во время окончательной сборки, перед прихваткой. Следует исключить попадание этих покрытий в контакты электрод – деталь. Рекомендуется сварку по грунтам проводить при увеличенной силе сжатия электродов (на ~20 %) на жестких режимах сварки.

Основная задача сборки заключается в обеспечении необходимой точности взаимного расположения деталей, входящих в свариваемый узел, в соответствии с требованиями и правилами, изложенными в конструкторско-технологической документации на сборку-сварку. В общем случае в зависимости от сложности узла и точности изготовления деталей подготовка к сварке состоит из следующих последовательно выполняемых операций: предварительной сборки и подгонки, подготовки поверхности, окончательной сборки и прихватки. При сварке изделий, детали которых не требуют подгонки и полностью взаимозаменяются, предварительная сборка не нужна. Собранный узел проверяется контролером, разбирается и комплектно поступает на подготовку поверхности деталей под сварку.

Требуемая точность сопряжения деталей обеспечивается при сборке по разметке, с применением шаблонов, съемных болтов, фиксаторов, упоров и струбцин. Сложные узлы собирают в специализированных сборочно-сварочных кондукторах. Конструктивные особенности и требования, предъявляемые к сборочной оснастке, зависят от принятой на производстве технологической схемы сборочно-сварочных операций и серийности продукции.

С позиции обеспечения качества сварки особое внимание должно быть обращено на уменьшение зазоров между деталями. При больших и нестабильных по величине зазорах увеличивается деформация сваренного узла и снижается стабильность качества сварки из-за колебания фактической силы сжатия в зоне сварки. Чем жестче детали и узел, тем точнее должны быть детали и их сборка. Допускаемые зазоры зависят также от режимов сварки и шага прихватки. Например, при точечной сварке деталей из стали толщиной 1 мм после их сборки и прихватки зазоры должны быть ≤0,4 мм на длине 100 мм и 1,2 мм на длине 300 мм. Для толщины 3 мм эти значения уменьшаются соответственно до 0,3 и 0,9 мм. В общем случае для листовых конструкций толщиной до 1 мм зазоры между деталями в местах сварки должны выбираться нажатием руки (сила 10 даН), а для более жестких узлов устраняться силой, не превышающей 10 % силы сжатия электродов при сварке.

Прихватка собранных деталей должна обеспечить полное закрепление деталей с сохранением основных размеров свариваемого узла после выемки его из приспособления и снятия фиксаторов.

Число прихваточных точек, расстояние между ними и порядок прихватки следует предусматривать в технологических картах с целью получения наименьшего коробления изделия. Шаг прихватки зависит от марки сплава, толщины и общей жесткости узла, точности подгонки деталей. Чем больше жесткость деталей и меньше зазоры при сборке, тем больше может быть шаг прихватки. Под точечную сварку шаг прихваточных точек 100...300 мм. Шаг прихватки под шовную сварку во избежание коробления материала уменьшают до 30...80 мм.

Места постановки прихваточных точек размечают мерительными инструментами или задают программно в схеме управления траекторией движения сварочного робота вдоль оси

шва. Под точечную сварку детали прихватывают по линии шва на тех же режимах, на которых выполняют сварку. Детали, соединяемые шовной сваркой, прихватывают по осевой линии шва на режимах со сниженной на 10...15 % силой тока.

Последовательность сварки точек в узле устанавливают так, чтобы сварить все точки при минимальном шунтировании тока и возможно меньших сварочных деформациях. Протяженные швы прихватывают от центра к краям попеременно, начиная сварку с участков повышенной жесткости (вблизи ребер жесткости, на закруглениях и т.д.). Обечайки прихватывают попеременно точками, расположенными диаметрально противоположно. После прихватки остальные точки желательно сваривать подряд.

Простые узлы, зафиксированные по сборочным отверстиям в приспособлениях, обычно сваривают без прихватки на стационарных машинах. После постановки точек прихватки сварные узлы должны контролироваться. Проверяются основные размеры узла, соответствие постановки точек прихватки технологическим картам, качество этих точек и величина зазора между деталями.

5.7.3. ПАРАМЕТРЫ РЕЖИМА И ТЕХНИКА ТОЧЕЧНОЙ СВАРКИ

Оптимальными считаются такие значения параметров режима, которые позволяют достаточно полно удовлетворить все требования, предъявляемые к качеству сварного соединения и процессу его осуществления.

Для каждого конкретного изделия качество сварного соединения характеризуют следующие показатели:

– соответствие размеров литого ядра, его расположения относительно плоскости сопряжения деталей и глубины вмятины требованиям ГОСТ 15878–79 или специальным требованиям отраслевых стандартов;

– прочность, пластичность, вязкость и антикоррозионная стойкость металла шва (литого ядра) и околошовной зоны, необходимые для тех видов и условий нагружения, которые испытывает соединение при эксплуатации;

– отсутствие рыхлот, раковин и пор, горячих и холодных трещин, внутренних выплесков и переноса части электродного металла на поверхность соединения.

Возможность достижения перечисленных показателей качества зависит от реакции свариваемого металла на термомеханический цикл сварки и взаимодействие нагретого материала с окружающей средой, что в целом определяет понятие «свариваемость материала». Поэтому свариваемость нельзя рассматривать в отрыве от процесса сварки и технологических свойств сварочного оборудования. Одно и то же соединение в разных изделиях в зависимости от предъявляемых к ним и процессам сварки требований может выполняться при резко отличающихся по величине значениях параметров режима.

Основными параметрами режима точечной (рельефной) сварки являются сила сварочного тока $I_{св}$, время его действия $t_{св}$, сила сжатия деталей $F_{св}$. Кроме параметров режима существенное влияние на показатели качества соединений оказывают форма и размеры рабочей поверхности электрода и его материал. Благодаря электродам при сварке происходят сжатие деталей, подвод сварочного тока и отвод теплоты, выделяющейся в зоне сварки.

Для точечной сварки применяют электроды с плоской и сферической рабочими поверхностями, для шовной – дисковые ролики с цилиндрической и сферической рабочими поверхностями. Размеры рабочей поверхности электродов выбирают в зависимости от толщины и марки свариваемых металлов по ГОСТ 14111–90 или исходя из следующих ориентировочных соотношений:

$$d_{эл} = (0{,}9...1{,}2)d; \quad R_{эл} = (15...20)d.$$

При точечной и шовной сварке рабочая поверхность электродов нагревается до высоких температур [$(0{,}3...0{,}5)T_{пл}$ металла] и подвергается воздействию значительных динамических сил при сварке и смыкании электродов при приложении сил сжатия к деталям. Поэтому исходная форма и размеры рабочей поверхности электродов искажаются, исходный размер площадок касания электрод – деталь и деталь – деталь увеличивается. Это приводит при неизменных значениях параметров режима ($I_{св}$, $t_{св}$, $F_{св}$) к снижению тепловыделения в зоне сварки и, следовательно, к уменьшению размеров литого ядра и прочности сварного соединения.

Электроды со сферической рабочей поверхностью лучше отводят теплоту, обладают большой стойкостью и менее чувствительны к перекосам осей электродов. Поэтому их используют для сварки следующих металлов: с пониженным сопротивлением деформации при

высоких температурах (алюминиевые, магниевые, медные и некоторые титановые сплавы); склонных к массопереносу (алюминиевые, магниевые сплавы); предрасположенных к горячим трещинам и раковинам и свариваемых с силой проковки (алюминиевые, магниевые сплавы, другие сплавы большой толщины). Целесообразно использовать сферические электроды с одновременным плавным нарастанием тока для борьбы с выплесками, уменьшением вмятин и зазоров между деталями. Использование сферических электродов повышает устойчивость процесса сварки к действию возмущений. Так, при уменьшении $I_{св}$ и $t_{св}$ от заданных значений диаметр точек и глубина проплавления уменьшаются в меньшей степени, чем при сварке электродом с плоской поверхностью.

Электроды с плоской рабочей поверхностью используют для сварки металлов с повышенным сопротивлением деформации, не склонных к массопереносу (стали, никелевые, титановые сплавы), когда допустимы увеличение вмятины и отдельные выплески. Конструкции электродов, электродные материалы и условия эксплуатации будут приведены в разд. 5.13.

При точечной (рельефной) сварке применяются различные циклограммы приложения силы сжатия электродов и включения сварочного тока (табл. 5.6), позволяющие реализовать необходимый термодеформационный процесс с учетом свойств и толщин свариваемых металлов. Основным технологическим вариантом точечной сварки является одноимпульсная сварка с постоянной силой сжатия (табл. 5.6, п. 1). В соответствии с циклограммой процесс точечной (рельефной) сварки состоит из трех стадий. На стадии *I* детали сжимаются предварительной силой сжатия без пропускания тока. Во время стадии *II* на металл междуэлектродной области одновременно воздействуют сварочный ток и сила сжатия. На стадии *III* процесса формирования соединения происходит охлаждение и кристаллизация металла под действием силы проковки.

Цикл сварки с приложением ковочного давления $F_к = (2...5)F_{св}$ (табл. 5.6, п. 2) используют при сварке алюминиевых и магниевых сплавов толщиной >1,5 мм, при сварке жаропрочных сплавов, а также конструкционных сталей большой толщины. В зависимости от марки материала, его толщины и динамических свойств привода сжатия время включения силы проковки выбирают равным $t_к = (1{,}1...1{,}5)t_{св}$; при меньшем времени $t_к$ возможен выплеск металла из ядра, при большем ядро успевает закристаллизоваться при $F_{св}$ и приложение $F_к$ неэффективно. В некоторых случаях для устранения зазоров и предупреждения начальных выплесков применяют циклограмму силы (см. табл. 5.6, п. 3) с предварительным обжатием $F_{обж}$ и проковкой $F_к$ при сварке высокопрочных легких сплавов большой толщины, деталей с предварительно нанесенным жидким покрытием (клеем, грунтом) или неочищенной стали.

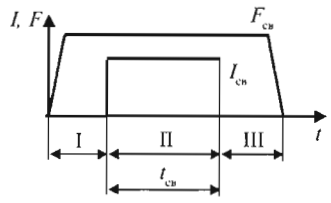
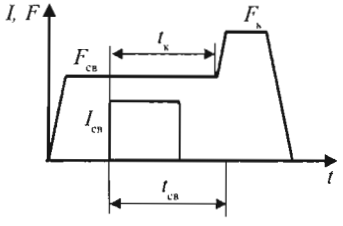
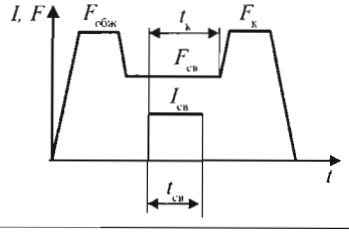
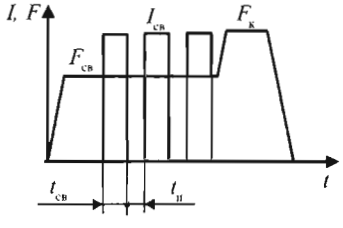
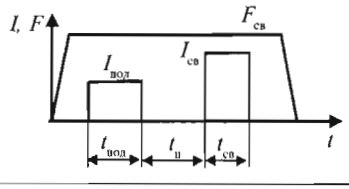
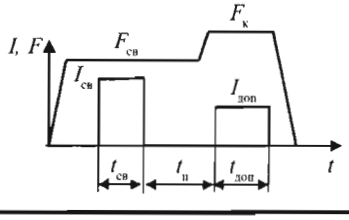
Чаще всего нагрев свариваемых деталей осуществляют одним импульсом сварочного тока, который на циклограммах (см. табл. 5.6, пп. 1–3) условно показан в виде прямоугольника. Регулирование силы сварочного тока, времени его действия, числа импульсов тока в сочетании с рассмотренными циклами сжатия позволяет эффективно управлять температурными и деформационными полями в зоне сварки. Так, при сварке горячекатаной стали толщиной >5 мм целесообразно использовать многоимпульсную сварку с приложением ковочной силы (см. табл. 5.6, п. 4), что позволяет снизить максимальную температуру нагрева металла в зоне сварки и увеличить объем разогреваемого металла. Такой цикл сварки снижает вероятность образования выплесков, способствует лучшему уплотнению металла, улучшает охлаждение электродов и уменьшает их изнашивание.

В некоторых случаях при сварке особо жаропрочных сплавов, для устранения сборочных зазоров при сварке жестких конструкций или для разрушения и удаления из стыка окалины и других загрязнений используют цикл сварки с предварительным подогревным импульсом тока (см. табл. 5.6, п. 5). Циклограмма силы при этом может быть различной (см. табл. 5.6, пп. 1–3).

Для обеспечения высокой прочности и пластичности соединения при сварке закаливающихся сталей и борьбы с выплесками и дефектами усадочного характера при сварке дисперсионно-твердеющих жаропрочных сплавов применяют последующий дополнительный импульс тока (см. табл. 5.6, п. 6) в сочетании с любой циклограммой силы.

В особо трудных случаях при сварке металла большой толщины используют трехимпульсную программу тока с предварительным подогревом и последующим после сварочного дополнительным импульсом термообработки.

5.6. Типовые циклограммы (технологические варианты) точечной (рельефной) сварки

Номер по порядку	Характеристика процесса	Схема цикла	Условия применения
1	Одноимпульсная сварка с постоянной силой сжатия		Сварка деталей из незакаливающихся сталей при толщине каждой детали до 4…6 мм
2	Одноимпульсная сварка с ковочной силой		Сварка ответственных деталей из легких сплавов, сварка стали толщиной >6 мм, сварка легированных сталей и сплавов
3	Одноимпульсная сварка с предварительным сжатием и проковкой		Сварка по грунту легких сплавов большой толщины, не очищенной от окалины стали большой толщины
4	Многоимпульсная сварка		Сварка горячекатаной стали и стали большой толщины
5	Сварка с предварительным подогревом		Сварка жаропрочных сталей, низколегированных в закаленном состоянии и неочищенных сталей
6	Сварка с последующей термической обработкой в электродах машины		Сварка деталей из закаливающихся углеродистых, низколегированных и хромистых сталей

Нагрев при контактной точечной, рельефной и шовной сварке **может осуществляться импульсами тока различной формы** в зависимости от типа сварочной машины (рис. 5.19). Выбор необходимой формы импульса тока определяется теплофизическими свойствами, толщиной металла и размерами свариваемых деталей. Каждый импульс сварочного тока характеризуется определенными параметрами: у машин переменного тока (см. рис. 5.19, *а*) – действующим значением тока $I_{св.д}$, временем включения $t_{св}$, а также длительностью нарастания $t_н$ и спада тока $t_{сп}$ для модулированного импульса тока (см. рис. 5.19, *б*); у низкочастотных машин (см. рис. 5.19, *в*) – максимальным значением тока $I_{св.max}$, временем до достижения максимального значения $t_{св}$ и при наличии дополнительного заднего фронта импульса тока – максимальным значением дополнительного тока $I_{доп.max}$ и временем дополнительного импульса $t_{доп}$; у машин с выпрямлением в сварочном контуре (см. рис. 5.19, *г*) – максимальным (средним) значением выпрямленного тока и длительностью импульса; у конденсаторных машин (см. рис. 5.19, *д*) кроме максимального значения тока и времени его достижения в зарубежной практике определяют длительность импульса $t_{0,5I_{max}}$ в момент достижения на ветви спада тока до величины, равной $0{,}5I_{max}$.

Энергетические возможности любого импульса сварочного тока определяются как $I^2t_{св}$, где I – действующий ток за время сварки; $t_{св}$ – длительность сварочного тока. Поэтому если известен режим сварки какого-нибудь материала на машине переменного тока, то, приравняв энергетические параметры импульсов и задавшись, например, временем сварки, можно определить ориентировочное значение силы тока для низкочастотной, конденсаторной или для машины с выпрямлением тока в сварочном контуре.

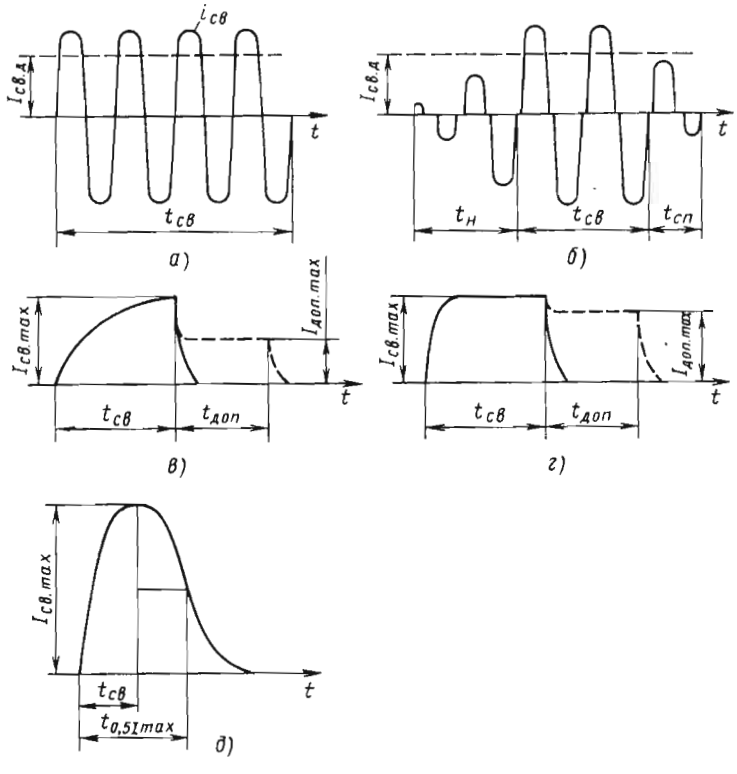


Рис. 5.19. Формы импульсов сварочных токов различных типов машин:
а – переменного тока; *б* – переменного тока с модуляцией; *в* – низкочастотных; *г* – с выпрямлением тока во вторичном контуре; *д* – конденсаторных

Регулируя соответственно силу сварочного тока и время его действия, получают жесткий или мягкий режим сварки. **Жесткий режим** характеризуется кратковременным мощным импульсом тока. Температурное поле в этом случае определяется в основном тепловыделением, т.е. в большей степени зависит от распределения плотности тока и мало от условий теплоотвода. Суммарные потери теплоты в электроды и металл, окружающий литое ядро, <20 % от выделяющейся в зоне сварки энергии $Q_{ээ}$. Для жесткого режима характерна высокая скорость нагрева и охлаждения. Поэтому для предотвращения возможного выплеска при сварке на жестких режимах требуется повышение $F_{сж}$ и использование машин с жестким механическим контуром и приводом сжатия с высокими динамическими свойствами.

При сварке на жестком режиме литое ядро расположено более симметрично относительно плоскости стыка соединяемых деталей. Особенно важно это использовать для улучшения соединения при сварке деталей с большим отношением толщин и для металлов с очень разными теплофизическими свойствами. Из-за незначительного теплоотвода в электроды при сварке на жестких режимах растет высота литого ядра, уменьшается вмятина на поверхности деталей и повышается стойкость электродов.

Мягкие режимы характеризуются значительной длительностью протекания тока относительно малой силы. При этом происходит значительный теплообмен в зоне сварки, и потери теплоты в электроды и массу деталей могут превышать 80 % от $Q_{ээ}$. При сварке на мягких режимах деталей неравной толщины с отношением толщин до 1 : 3 литое ядро смещено в толстую деталь и располагается симметрично относительно плоскости, равноудаленной от стоков теплоты (электродов). Чем мягче режим сварки, тем больше зона термического влияния и, следовательно, больше тепловые деформации и коробление.

Выбор жесткости режима сварки, формы тока, циклограммы процесса и значений основных параметров режима ($I_{св}$, $t_{св}$ и $F_{сж}$) зависит от толщины и теплофизических свойств металла, его прочности при высоких температурах и реакции на термомеханический цикл сварки. Связь некоторых свойств металлов с параметрами режима сварки показана на рис. 5.20. Очевидно, что с увеличением толщины металла растет диаметр ядра и, соответственно, значения всех параметров режима.

Сила сварочного тока в значительной степени определяется удельным электросопротивлением ρ (см. рис. 5.20). С уменьшением ρ увеличивается необходимый ток $I_{св}$, поэтому для алюминиевых, магниевых и медных сплавов требуются бóльшие сварочные токи, чем для сталей. Силу сварочного тока можно рассчитать по уравнению теплового баланса или в результате решения обратной электротермодеформационной задачи, предварительно задавшись необходимыми размерами литого ядра и временем сварки.

Время сварки определяется теплопроводностью и сопротивлением пластической деформации металла при повышенной температуре [$\sigma_{0,2}$ при $T = (0{,}5\ldots0{,}6)T_{пл}$]. Алюминиевые, магниевые и медные сплавы из-за высокой теплопроводности предпочтительно сваривать при малом времени действия тока, чтобы уменьшить потери теплоты. Низкоуглеродистые стали, имеющие умеренную теплопроводность и невысокую прочность при повышенных температурах, можно сваривать на мягких и жестких режимах. Жаропрочные сплавы, высокопрочные низколегированные стали сваривают при большой длительности тока. **Существует эмпирическая зависимость** $t_{св} = K_t s$, в которой K_t – коэффициент пропорциональности, зависящий от материала и его толщины, с/м. Обычно он равен для низкоуглеродистых сталей 80…320; низколегированных и углеродистых 370…550; коррозионно-стойких 80…170; жаропрочных сплавов 250…500; алюминиевых и магниевых сплавов 50…120; для титана и его сплавов 100…200; для латуней 100…200. Для толщин 0,5…1,5 мм величину K_t следует выбирать ближе к верхнему пределу, для толщин 2…4 мм – ближе к нижнему. При выборе K_t также надо учитывать требуемую производительность, мощность сварочной машины и общие затраты на сварку.

Сила сжатия при сварке $F_{св}$ зависит от сопротивления пластической деформации металла, его толщины и жесткости режима сварки. Если $F_{св}$ значительно меньше его оптимального значения, велика вероятность появления следующих дефектов соединения и процесса сварки:

– систематических выплесков металла из междуэлектродной области;

– приваривания или прилипания электродов к поверхности деталей;

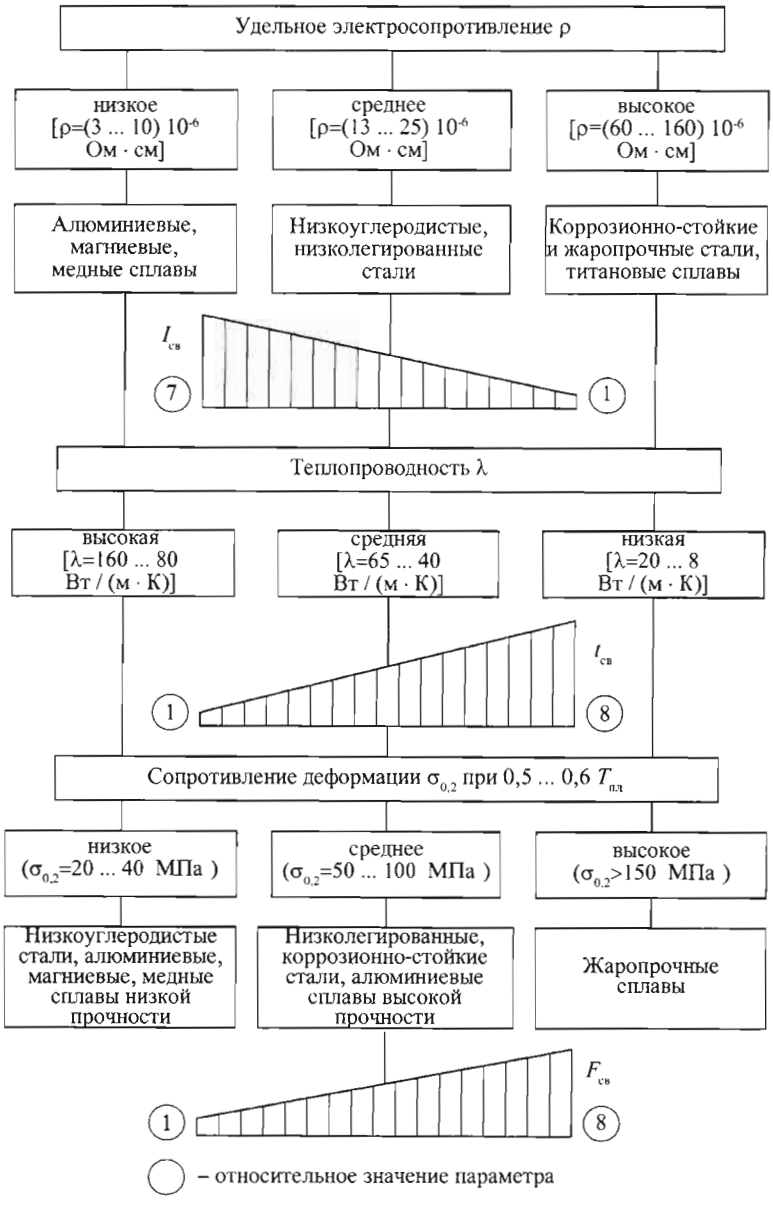


Рис. 5.20. Связь основных свойств металлов с параметрами процесса контактной сварки

– образования в ядре точки раковин, трещин и других усадочных дефектов;

– снижения стабильности размеров литого ядра и прочности соединения;

– резкого уменьшения срока службы электродов.

Если сила сжатия значительно превышает его оптимальную величину, то из-за снижения контактных сопротивлений и уменьшения плотности тока тепловыделение в зоне сварки существенно снижается. В то же время теплопроводность контактов и теплоотвод в электроды резко возрастают. В этих условиях литое ядро либо вовсе не образуется, либо имеет недостаточные размеры. Прочность соединения низка и нестабильна.

Статистическая обработка опытных данных позволяет представить **зависимость $F_{св}$** от толщины металла для диапазона толщин 0,5...3,0 мм в виде **линейной функции $F_{св} = K_F s$**, где K_F – коэффициент, зависящий от материала и жесткости режима сварки, даН/м. Обычно на стадии «сварка» для исходной циклограммы процесса (см. табл. 5.6, п. 1) K_F для низкоуглеродистых сталей (100...350)10^3; низколегированных и углеродистых (400...500)10^3; коррозионно-стойких (300...500)10^3; жаропрочных сплавов (650...1000)10^3; алюминиевых (типа АМгАМ) и магниевых сплавов (220...250)10^3; титана и его сплавов (200...300)10^3; латуней (100...350)10^3. Большие значения K_F следует выбирать для жестких режимов и для металла меньшей толщины.

Учет основных закономерностей формирования литого ядра и реакции металла на электротермомеханический цикл контактной сварки позволяет определить принципы построения режимов сварки основных групп конструкционных материалов (см. рис. 5.20).

Низкоуглеродистые стали (группа 1) с содержанием до 0,25 % С имеют средние значения коэффициентов удельного электросопротивления ($13 \cdot 10^{-6}$ Ом · см) и теплопроводности [60 Вт/(м · К)], низкую прочность при повышенной температуре ($\sigma_{0,2} \approx 35$ МПа), поэтому они хорошо свариваются как на жестких, так и на мягких режимах при относительно небольших токах и силах электродами с плоской рабочей поверхностью. Сталь отличается малой чувствительностью к термомеханическому воздействию, узким интервалом температуры кристаллизации (~20 °С) и поэтому может свариваться по циклограмме с постоянной силой, одним импульсом тока (см. табл. 5.6, п. 1). Ориентировочные режимы сварки низкоуглеродистых сталей приведены в табл. 5.7.

При точечной сварке горячекатаной низкоуглеродистой стали средней и большой толщины целесообразно применять режимы с пульсирующим включением тока (см. табл. 5.6, п. 4) и приложением силы проковки. С поверхности горячекатаной стали следует обязательно удалять окалину, используя механические или химические (см. табл. 5.5) способы подготовки поверхности. Компактные узлы из горячекатаной стали толщиной 4...10 мм сваривают на однофазных машинах переменного тока мощностью до 400 кВ · А шестью – десятью импульсами тока продолжительностью 0,24...0,34 с каждый с паузами 0,08...0,12 с и ковочной силой $F_к = 1{,}5F_{св}$. Пульсирующее включение тока позволяет снизить необходимые для сварки ток и силу сжатия, улучшить охлаждение электродов и уменьшить их изнашивание.

Крупногабаритные конструкции из горячекатаной стали толщиной >10 мм целесообразно сваривать импульсами тока низкой частоты или постоянного тока (см. рис. 5.19, *в*, *г*) соответственно на машинах типа МТВ и МТН. Эти машины мало реагируют на введение в контур ферромагнитных масс, потребляют из сети меньшую мощность по сравнению с машинами переменного тока. Плавное нарастание тока в каждом импульсе уменьшает перегрев и изнашивание электродов. На таком оборудовании можно получить необходимую при сварке стали большой толщины циклограмму с повышенной силой сварки, предварительным сжатием и проковкой.

5.7. Ориентировочные режимы точечной сварки низкоуглеродистых сталей (типов 08кп, 10, 20) на однофазных машинах переменного тока

s, мм	Циклограмма (см. табл. 5.6)	$I_{св}$, кА	$t_{св}$, с	$F_{св}$, кН	$F_к$, кН	$t_к$, с
0,5	П. 1	6...7	0,08...0,1	1,2 ...1,8	Не рекомендуются	
0,8		7...8,5	0,1...0,14	2...2,5		
1,0		8,5...9,5	0,12...0,16	2,5...3		
1,2		9,5...10,5	0,12...0,2	3...4		
1,5		11...12	0,16...0,24	4...5		
2,0		12...13	0,2...0,32	6...7		
3,0		14...15	0,3...0,48	9...10	18...20	0,36...0,54
4,0	П. 2	18...19	0,7...0,9	13...15	20...24	0,8...1

В промышленности широко используют низкоуглеродистые стали с защитными покрытиями различного типа (например, оцинкованную, освинцованную, алитированную и хромированную стали, а также сталь с фосфатными покрытиями). Основная трудность сварки таких материалов заключается в активном взаимодействии свариваемого и электродного металлов в контактах электрод – деталь, что приводит к снижению коррозионной стойкости соединения в местах постановки точек и повышению изнашивания электродов. Для сварки таких материалов необходимо корректировать параметры режима по отношению к режимам сварки непокрытых сталей (см. табл. 5.7).

Оцинкованную сталь сваривают импульсами тока большей мощности по сравнению с режимами сварки металлов группы 1. Ориентировочно для стали с гальваническим покрытием средней толщины (20 мкм) $I_{св} = (1{,}5\ldots1{,}8)I_{св1}$, $t_{св} = (1{,}8\ldots2{,}0)t_{св1}$, $F_{св} = F_{св1}$. Для уменьшения налипания цинка на контактную поверхность электрода рекомендуется увеличивать время проковки до 0,3…0,4 с, а зачистку и заправку электродов осуществлять после постановки 500…1000 точек.

Освинцованную сталь сваривают на жестких режимах, рекомендуемых для сталей группы 1. Поскольку свинцово-оловянистое покрытие имеет низкую температуру плавления и легче налипает на контактную поверхность электрода, чем цинк, увеличивают время проковки и чаще зачищают электроды по сравнению со сваркой оцинкованной стали. Стойкость электродов можно повысить при использовании точек уменьшенных размеров (группа Б в табл. 5.4).

Алитированную сталь также сваривают на жестких режимах, применяемых при сварке непокрытых сталей группы 1. Желательны увеличение силы сжатия на 20…25 % и использование электродов, изготовленных из материалов с высокой электропроводностью (например, кадмиевая бронза), со сферической формой рабочей поверхности электродов радиусом 50 мм. Стойкость последних можно повысить, применяя модуляцию переднего фронта импульса тока.

Стали с тонкими фосфатными покрытиями (толщиной < 7 мкм), полученными методами холодного и ускоренного горячего фосфатирования струйным обливом, свариваются контактной точечной сваркой по циклу с постоянной силой сжатия (см. табл. 5.6, п. 1) на режимах, соответствующих сварке непокрытых сталей группы 1, электродами из хромистой бронзы со сферической формой рабочей поверхности радиусом 50…100 мм. Дробеструйная обработка металла перед фосфатированием позволяет получить соединения, равнопрочные с соединениями из нефосфатированной стали, сваренными на тех же режимах. Стали с фосфатными покрытиями толщиной >10 мкм не свариваются без разрушения фосфатного слоя в местах постановки точек.

Среднеуглеродистые и низколегированные стали с содержанием 0,25…0,45 % С, а также стали с суммарным содержанием легирующих элементов до 2,5 % имеют невысокое $\rho \approx 25 \cdot 10^{-6}$ Ом · см, среднее значение теплопроводности $\lambda \approx 40$ Вт/(м · К) и относительно высокое сопротивление пластической деформации при низких температурах (см. рис. 5.20). Повышенное содержание углерода и легирующих элементов обусловливает высокие прочность и твердость этих сталей в начальной стадии нагрева, склонность к образованию кристаллизационных трещин в ядре и склонность к закалке. Структуры закалки (например, мартенсит) повышают хрупкость и снижают пластичность сварных соединений в зоне термического влияния. Рекомендуется использовать для сварки металл в отожженном или нормализованном состоянии и режимы, обеспечивающие относительно медленный нагрев и охлаждение зоны соединения.

Точечная сварка этих сталей возможна по двум основным технологическим вариантам, уменьшающим хрупкость и появление трещин: на очень мягком режиме с одним включением тока при ограниченном времени проковки по циклограмме (см. табл. 5.6, п. 1) с последующей полной термической обработкой изделия в печи и на двухимпульсном режиме по циклограмме (см. табл. 5.6, п. 6), когда после сварочного импульса тока $I_{св}$ следует дополнительный импульс тока $I_{доп}$ для электротермической обработки соединения непосредственно между электродами машины.

На режимах с электротермической обработкой между электродами машины обеспечиваются высокие пластичность и прочность точечных соединений, а также лучшие технико-экономические показатели процесса сварки. Так, при сварке на режимах, указанных в табл. 5.8, отношение силы отрыва к силе среза сварных точек ≥0,25.

5.8. Ориентировочные режимы точечной сварки среднеуглеродистых и низколегированных сталей (типов 30ХГСА, 12Г2, 23Х2НВФА и 45) на однофазных машинах переменного тока

s, мм	Сварка		Пауза	Термообработка		$F_{св}$, кН
	$I_{св}$, кА	$t_{св}$, с	$t_п$, с	$I_{доп}$, кА	$t_{доп}$, с	
0,5	5...6	0,32...0,4	0,3...0,5	4...5	0,5...0,6	2...3
0,8	5,5...6,2	0,36...0,44	0,4...0,6	4,5...5,2	0,6...0,74	2,5...3,5
1,0	6,2...6,7	0,42...0,5	0,6...0,7	4,8...5,5	0,68...0,78	4...5
1,5	8,7...9,2	0,56...0,64	0,8...1,1	6,2...7,4	0,86...0,96	6...8
2,0	10...11	0,74...0,84	1...1,4	7...8	1,1...1,3	8...10
2,5	11,5...12,5	1...1,1	1,1...1,5	8...9	1,3...1,9	10...12
3,0	13...14	1,2...1,4	1,3...1,6	9...10	1,8...2,2	11...14

При использовании циклограммы (см. табл. 5.6, п. 6) с двухимпульсным режимом нагрева на этапе сварки значения параметров режима ($I_{св}$, $t_{св}$ и $F_{св}$) должны оказать такое термомеханическое воздействие на металл зоны сварки, в результате которого будут обеспечены медленный нагрев металла, отсутствие выплесков и формирование ядра необходимых размеров. Это достигается, если сварку проводить на умеренных токах $I_{св} = (0{,}75...0{,}8)I_{св1}$ большой длительности $t_{св} = (4...5)t_{св1}$ и повышенной силе сжатия $F_{св} = 1{,}5F_{св1}$ по отношению к аналогичным параметрам режима сталей группы 1. Длительность паузы между сваркой и термообработкой, составляющая $t_п = (1{,}1...1{,}4)t_{св}$, должна быть достаточной для снижения температуры на периферии литого ядра до температуры ниже начала мартенситного превращения. Последующий импульс тока термической обработки осуществляет отпуск закаленной точки. При этом сила тока термической обработки $I_{доп} = (0{,}7...0{,}8)I_{св}$ и время его действия $t_{доп} = (1{,}5...1{,}8)t_{св}$ должны быть достаточными, чтобы нагреть зону сварки до температуры образования аустенита и не допустить повторной закалки.

Коррозионно-стойкие (нержавеющие) стали аустенитного класса типа 12Х18Н10Т обладают сравнительно высоким $\rho \approx \approx 75 \cdot 10^{-6}$ Ом · см и низкой теплопроводностью $\lambda \approx 16$ Вт/(м · К) (см. рис. 5.20). Поэтому их сваривают на токах, существенно меньших, чем для сталей группы 1, а именно: $I_{св} = 0{,}7I_{св1}$. Поскольку аустенитные стали часто используются в холоднокатаном состоянии, то для уменьшения степени разупрочнения металла в околошовной зоне ограничивают время сварки, ориентируясь на жесткие режимы сварки сталей группы 1 ($t_{св} \approx t_{св1}$). Высокая жаропрочность металла и обусловленная ей склонность к выплескам требуют применения повышенных сил сжатия: $F_{св} = 1{,}5F_{св1}$, где $F_{св1}$ – сила сжатия для металлов группы 1. Малая склонность аустенитных сталей к образованию горячих трещин позволяет применять простейший цикл сварки (см. табл. 5.6, п. 1) с постоянной силой сжатия. При толщине деталей >2 мм желательно применять силу проковки (см. табл. 5.6, п. 2).Ориентировочные режимы сварки коррозионно-стойких сталей приведены в табл. 5.9.

Сплавы обычной и повышенной жаропрочности на никелевой основе типов ХН75МБТЮ и ХН77ТЮР представляют собой дисперсионно-твердеющие сплавы с интерметаллидным упрочнением. Эти сплавы в зависимости от состава имеют очень большое удельное электросопротивление [$\rho \approx \approx (90...140)10^{-6}$ Ом · см], мало изменяющееся при нагреве, низкую теплопроводность [$\lambda \approx (10...13)$ Вт/(м · К)] и повышенные прочностные свойства при высоких температурах (см. рис. 5.20). Поэтому сплавы отличаются повышенной склонностью к начальным и конечным выплескам и образованию в литом ядре усадочных дефектов типа трещин и раковин, особенно при сварке металла толщиной >1,5 мм. С учетом этого для сварки используют малый ток [$I_{св} = (0{,}6...0{,}7)I_{св1}$] большой длительности [$t_{св} = (2...4)t_{св1}$] и максимальные силы сжатия: $F_{св} = (2{,}5...4)F_{св1}$. Обычно применяют циклограмму (см. табл. 5.6, п. 1), но

5.9. Ориентировочные режимы точечной сварки коррозионно-стойких сталей (типов 12Х18Н10Т, 10Х17Н13М2Т и др.) на однофазных машинах переменного тока

s, мм	Циклограмма (см. табл. 5.6)	$I_{св}$, кА	$t_{св}$, с	$F_{св}$, кН	$F_к$, кН	$t_к$, с
0,5	П. 1	4...5	0,08...0,12	2,5...3	Не рекомендуются	
0,8		4,5...5	0,12...0,16	3...4		
1,0		5...5,7	0,14...0,18	3,5...5		
1,2		6...7	0,16...0,2	4,5...6		
1,5		7...8	0,2...0,24	5...7		
2,0		8...9	0,24...0,3	8...9,5		
3,0	П. 2	10...11	0,34...0,38	10...14	20...22	0,38...0,42
4,0		11...12	0,4...0,5	15...17	24...26	0,5...0,6

для предупреждения выплесков, дефектов усадочного характера и снижения остаточных напряжений, особенно для металла толщиной >1,5 мм, используют циклограмму, представленную в табл. 5.6, п. 2 или даже циклограмму п. 3 этой таблицы с предварительными обжатием и проковкой. В особо сложных случаях при сварке металла небольшой толщины для борьбы с выплесками рекомендуется использовать предварительный подогрев или плавное нарастание сварочного тока. Ориентировочные режимы сварки жаропрочных сплавов приведены в табл. 5.10.

Титановые сплавы в зависимости от структуры в нормализованном состоянии подразделяются на следующие основные классы: α-сплавы (ВТ1-1, ВТ5), (α + β)-сплавы (ВТ6С, ВТ14) и β-сплавы (сплав 4201). Кроме того, выделяются два переходных класса: псевдо α-сплавы (ОТ4, ВТ20) и псевдо β-сплавы (ВТ15). По своим механическим свойствам титановые сплавы подразделяют на малопрочные высокопластичные с $\sigma_в < 700$ МПа, среднепрочные с $\sigma_в = 750...1000$ МПа и высокопрочные с $\sigma_в > 1000$ МПа.

Сплавы титана имеют высокое удельное электросопротивление [$\rho \approx (110...160)10^{-6}$ Ом · см] и низкую теплопроводность [$\lambda \approx 8...10$ Вт/(м · К)] (см. рис. 5.20). Основная проблема свариваемости титановых сплавов – получение сварных соединений с хорошей пластичностью, зависящей от качества защиты и чувствительности металла к термодеформационному циклу сварки. Снижение пластичности титановых сплавов обусловлено активным взаимодействием титана с кислородом, азотом и водородом при температурах ≥350 °С. Однако в связи с отсутствием прямого контакта металла ядра с воздухом и кратковременностью процесса при точечной (шовной) сварке не требуется специальной защиты. Из-за

5.10. Ориентировочные режимы сварки жаропрочных сплавов (типов ХН75МБТЮ, ХН70Ю и др.) на однофазных машинах переменного тока

s, мм	Циклограмма (см. табл. 5.6)	$I_{св}$, кА	$t_{св}$, с	$F_{св}$, кН	$F_к$, кН	$t_к$, с
0,5	П. 1	4,5...5,5	0,22...0,26	4...5	Не рекомендуются	
0,8		5...6	0,28...0,32	5,5...6,5		
1,0		6...6,5	0,34...0,38	7...8		
1,2		6,2...6,8	0,4...0,46	8...9		
1,5		6,5...7,0	0,48...0,56	9,5...11		
2,0	П. 2	7,0...7,5	0,6...0,78	10,5...12	18...20	0,72...0,9
3,0		8,0...8,5	0,84...1,2	16...18	28...30	0,96...1,32

низкой теплопроводности и малой объемной теплоемкости титана время пребывания металла при высоких температурах значительно больше, чем для стали, что может привести к перегреву, увеличению размеров зерна в околошовной зоне и снижению пластичности. Поэтому целесообразно сварку титановых сплавов выполнять на минимально возможном токе малой длительности.

Титановые сплавы малой прочности типов ВТ1 и ОТ4 сваривают на малых токах $I_{св} = (0{,}6...0{,}7)I_{св1}$, а время сварки $t_{св} \approx t_{св1}$ и сила сжатия $F_{св} \approx F_{св1}$ соответствуют жестким режимам сварки сталей группы 1. Ориентировочные режимы сварки указанных типов титановых сплавов приведены в табл. 5.11. При сварке сплавов титана средней и высокой прочности типов ВТ5, ВТ14, ВТ15 и ВТ20 рекомендуется повышать $F_{св}$ на 20...25 %, а также использовать циклограмму с проковкой (см. табл. 5.6, п. 2) и модуляцию тока при сварке металла толщиной >2 мм для борьбы с выплесками и возможной пористостью.

Алюминиевые и магниевые сплавы относятся к группе легких сплавов, поскольку в отличие от большинства конструкционных материалов имеют малую плотность и высокую удельную прочность. Наибольшее влияние на величину параметров режима и циклограмму процесса сварки оказывают такие свойства материалов, как теплоэлектропроводность, предел текучести при повышенных температурах и реакция металла на термомеханический цикл сварки. Исходя из этого, с позиций режимов сварки легкие сплавы можно разделить на три подгруппы:

а) деформируемые алюминиевые сплавы, упрочняемые термообработкой (Д16АТ, Д20АТ, ВД95АТ и др.), а также малопластичный АМг6;

б) деформируемые алюминиевые сплавы, упрочняемые нагартовкой (АМц, АМг, АМг3 и др.);

в) деформируемые магниевые сплавы, упрочняемые нагартовкой (МА1, МА8, МА2, МА5 и др.), и жаропрочные сплавы, упрочняемые термообработкой (МА11,МА13 и др.).

Легкие сплавы подгруппы «а» имеют малые значения $\rho \approx 6...13$ мкОм · см, высокую теплопроводность $\lambda \approx 100...120$ Вт/(м · К), большое сопротивление деформации при повышенных температурах ($\sigma_{0,2} \approx 80$ МПа при $T = 300$ °С) и широкий температурный интервал кристаллизации (до 130 °С). Указанные свойства обусловливают высокую склонность этих сплавов к выплескам и горячим трещинам, а в литом ядре велика вероятность образования дефектов типа раковин, пор и трещин. Механические свойства металла ядра приближаются к свойствам отожженного сплава, а в околошовной зоне наблюдается снижение прочности и пластичности металла. Для предотвращения указанных дефектов рекомендуется повышать силу сжатия до $(1{,}2...1{,}4)F_{св1}$ и применять, начиная с толщины 0,5 мм, циклограмму (см. табл. 5.6, п. 2) с ковочной силой сжатия $F_к = (2...3)F_{св}$.

5.11. Ориентировочные режимы точечной сварки титановых сплавов (типов ВТ1, ВТ5, ВТ14 и ОТ4) на однофазных машинах переменного тока (циклограмма табл. 5.6, п. 1)

s, мм	$I_{св}$, кА	$t_{св}$, с	$F_{св}$, кН
0,5	4...5	0,08...0,1	1...1,5
0,8	4,5...5	0,12...0,14	1,5...2,0
1	5...5,5	0,14...0,16	2...2,5
1,2	5,5...6	0,16...0,18	2,5...3,0
1,5	6,5...7,5	0,18...0,22	3...3,5
2	8...9	0,24...0,26	4...5,5
2,5	8,5...9,5	0,28...0,3	6...7,5
3	10...11	0,32...0,34	8...10

Сварку легких сплавов этой подгруппы целесообразно выполнять на жестких режимах ($t_{св} = 0{,}5t_{св1}$) униполярными импульсами тока (рис. 5.19, *в – д*) большой силы $I_{св} = (3{,}5...4)I_{св1}$ на машинах постоянного тока и низкочастотных (реже конденсаторных). В табл. 5.12 приведены режимы сварки сплава Д16АТ, имеющего средние значения предела текучести и удельного электросопротивления сплавов подгруппы «а».

При сварке других сплавов этой подгруппы указанные режимы сварки следует корректировать. Так, например, при сварке сплава В95АТ с наиболее высоким пределом текучести сила $F_{св}$ должна быть увеличена на 15... 20 %, а ток на 5...10 %. При сварке сплавов подгруппы «а» в неупрочненном состоянии (Д16АМ, Д20АМ и т.п.) рекомендуется понижать на 15...20 % $F_{св}$ и $F_к$ по сравнению с упрочненными сплавами.

5.12. Ориентировочные режимы точечной сварки легких сплавов подгруппы «а»

s, мм	Сила сжатия, кН		Время включения ковочной силы $t_к$, с	Сварочный ток			
				основной		дополнительный	
	$F_{св}$	$F_к$		$I_{св\,max}$, кА	$t_{св}$, с	$I_{д\,max}$, кА	$t_д$, с
Режимы сварки на низкочастотных машинах							
0,5	2	5	0,04	26	0,04	–	–
		4	0,06			17	0,04
0,8	3	6,5		32		–	–
		5				22	0,04
1,0	4	9	0,08	40	0,06	–	–
		7	0,1			27	0,06
1,5	5	14		47	0,08	–	–
		11	0,12			32	0,08
2	7	19	0,14	56	0,1	–	–
		17	0,16			38	0,1
2,5	9	26		65	0,12	–	–
		21	0,2			43	0,12
3	12	32	0,22	70	0,16	–	–
		27	0,24			48	0,16
4	28	60	0,28	85	0,2	–	–
		52	0,3			55	0,2
Режимы сварки на машинах постоянного тока							
0,5	2	4,5	0,04	22	0,04	15	0,04
0,8	3	7	0,08	26	0,06	18	
1,0	4	9	0,1	30	0,08	20	0,06
1,5	7	16	0,16	38	0,14	27	0,12
2,0	10	22	0,18	44	0,16	32	
3,0	13	32	0,24	65	0,2	46	0,14
4,0	30	60	0,26	72	0,22	50	

На однофазных машинах переменного тока из-за их ограниченной мощности сваривают детали из легких сплавов толщиной ≤2 мм. В этом случае при сварке легких сплавов подгруппы «а» применяют менее жесткие режимы сварки, в том числе с плавным нарастанием и спадом тока (рис. 5.19, *б*), а ковочную силу прикладывают, начиная с толщины деталей 1,5 мм. Ориентировочные режимы сварки легких сплавов на машинах переменного тока приведены в табл. 5.13.

Легкие сплавы подгруппы «б» имеют очень малое $\rho \approx 4...5$ мкОм · см, высокую $\lambda \approx 140...180$ Вт/(м · К), малое сопротивление деформации при повышенных температурах ($\sigma_{0,2} \approx 45$ МПа при $T = 300$ °С), узкий интервал кристаллизации и умеренную склонность к образованию горячих трещин. Поэтому для сплавов подгруппы «б» силу сжатия снижают на 30...40 % по сравнению со сплавами подгруппы «а», а силу проковки $F_к = (1,5..2)F_{св}$ рекомендуется применять при сварке деталей толщиной >1,5...2 мм. Сварку сплавов подгруппы «б» выполняют на жестких режимах ($t_{св} = 0,5t_{св1}$) униполярными импульсами тока (см. рис. 5.19, *в*, *г*) большой силы $I_{св} = (3...3,5)I_{св1}$ на машинах постоянного тока и низкочастотных. В табл. 5.14 приведены режимы сварки сплава АМцАМ – типичного представителя сплавов подгруппы «б». При необходимости легкие сплавы этой подгруппы толщиной до 2 мм можно сваривать и на мягких режимах, используя однофазные машины переменного тока (см. табл. 5.13).

5.13. Ориентировочные режимы точечной сварки легких сплавов на однофазных машинах переменного тока

s, мм	Сила сжатия, кН		Время включения ковочной силы $t_к$, с	Параметр тока			
	$F_{св}$	$F_к$		$I_{св}$, кА	$t_н$, с	$t_{св}$, с	$t_{сп}$, с
Сплавы подгруппы «а»							
0,5	2,2	–	–	17	–	0,08	–
	2			16	0,04		0,12
0,8	3,5			19	–	0,1	–
	3			18	0,04		0,14
1,0	4,5			24	–	0,12	–
	3,5			23	0,04		0,14
1,5	6,5			30	–	0,16	–
	5,5			29	0,06		0,16
	4,5	10	0,24	27			
2,0	8	–		35	–	0,2	–
	7			33	0,08		0,18
	6,5	12	0,32	31			
Сплавы подгруппы «б»							
0,5	1,3	–	–	16	–	0,08	–
0,8	1,9			18		0,1	
1,0	2,5			22		0,12	
1,5	3,5			27		0,14	
2,0	5			32		0,18	
Сплавы подгруппы «в»							
0,8	3	–	–	20	–	0,1	–
1,0	4			24		0,12	
1,5	5			27		0,14	
2,0	7			30		0,18	

5.14. Ориентировочные режимы точечной сварки легких сплавов подгрупп «б» и «в» на низкочастотных машинах

s, мм	Сила сжатия, кН		Время включения ковочной силы $t_к$, с	Сварочный ток	
	$F_{св}$	$F_к$		$I_{св\ max}$, кА	$t_{св}$, с
Сплавы подгруппы «б»					
0,5	1,2			25	0,04
0,8	2			28	
1,0	2,5		–	34	0,06
1,5	3,5			38	0,08
2,0	5	10	0,14	50	0,1
2,5	6,5	14	0,18	57	0,12
3,0	8	20	0,2	62	0,16
4,0	9	26	0,28	72	0,2
Сплавы подгруппы «в»					
0,8	2	4	0,08	26	0,06
1,0	2,5	6	0,1	28	0,08
1,5	3,5	8	0,12	35	0,1
2,0	4,5	10	0,16	41	0,14
2,5	5,5	14	0,2	43	0,16
3,0	6,5	20	0,28	48	0,2
4,0	8	26	0,32	53	0,24

Магниевые сплавы (легкие сплавы, подгруппа «в») незначительно отличаются от алюминиевых по тепло- и электропроводности: $\rho \approx 12$ мкОм · см, $\lambda = 100$ Вт/(м · К). У большинства сплавов этой подгруппы при нагреве наблюдаются рост зерна и разупрочнение металла околошовной зоны, поэтому рекомендуется их сварку проводить с малой длительностью ($t_{св} \approx 0{,}07s$) по циклограмме (см. табл. 5.6, п. 2) с приложением силы проковки. Для точечной сварки магниевых сплавов применяют машины постоянного тока и низкочастотные, режимы сварки легких сплавов подгруппы «в» для этих машин приведены в табл. 5.14. Реже, для деталей толщиной до 2 мм, используют однофазные машины переменного тока (см. табл. 5.13), при этом параметры нагрева ($I_{св}$ и $t_{св}$) смягчают, а силу сжатия увеличивают для борьбы с повышенными деформациями и короблением деталей.

Отличительной особенностью сварки алюминиевых и магниевых сплавов является активный массоперенос в контактах электрод – деталь, в результате которого происходит интенсивное загрязнение рабочей поверхности электродов частицами свариваемого металла и, наоборот, на поверхности точек оседают частицы металла электродов. Эти процессы снижают качество сварных соединений и нарушают стабильность процесса сварки. Поэтому необходимо зачищать поверхность электродов при сварке алюминиевых сплавов через 50…70 точек, а магниевых сплавов после каждых 10…20 точек.

Медные сплавы (латуни и бронзы) имеют низкое $\rho \approx (6...10)$ мкОм · см, как у алюминиевых сплавов, и высокую $\lambda \approx$ $\approx (80...110)$ Вт/(м · К), поэтому их сваривают на жестких режимах, используя большие токи $I_{св} = (2{,}5...3)I_{св1}$ и малое время сварки $t_{св} = (0{,}5...0{,}7)t_{св1}$. В то же время высокая пластичность и малое сопротивление деформации при повышенной температуре позволяют сваривать медные сплавы по циклограмме (см. табл. 5.6, п. 1) с постоянной силой сжатия $F_{св} \approx F_{св1}$. Медные сплавы целесообразно сваривать униполярными импульсами тока (см. рис. 5.19, *в* – *д*) малой длительности, что позволяет снизить деформацию сварных узлов и повысить стойкость электродов. При сварке на машинах переменного тока используют более мягкие режимы. Ориентировочные режимы точечной сварки латуни Л62 на машинах разного типа приведены в табл. 5.15.

5.15. Ориентировочные режимы точечной сварки латуни Л62 на низкочастотной и машине переменного тока

s, мм	Низкочастотная машина			Машина переменного тока		
	$I_{св\ max}$, кА	$t_{св}$, с	$F_{св}$, кН	$I_{св\ max}$, кА	$t_{св}$, с	$F_{св}$, кН
0,5	18	0,04	2	15	0,1	1,2
0,8	20	0,08	3	17	0,16	1,7
1,0	22	0,1	4	18,5	0,18	2
1,2	25	0,12	5	21,5	0,2	2,5
1,5	31	0,14	6	26	0,24	3
2	37	0,18	7	Не рекомендуется		
3	42	0,24	8			

Для получения сварных соединений уменьшенных размеров (группа Б в табл. 5.4) приведенные выше режимы сварки для всех металлов корректируют исходя из следующих соотношений: $t_{св}$(Б) ≈ $t_{св}$(А); $F_{св}$(Б) ≈ (0,6...0,7)$F_{св}$(А); $I_{св}$(Б) ≈ (0,7...0,8)$I_{св}$(А); $F_к$(Б) ≈ ≈ (0,8...1)$F_к$(А); Размеры рабочей поверхности электродов для соединений группы Б уменьшают, корректируя их по известным соотношениям: $d_{эл}$ = (0,9...1,2)d; $R_{эл}$ = (15...20)d, где d – диаметр литого ядра для соединения группы Б.

Сварка разнотолщинных деталей с соотношением толщин 1 : 3 и более, а также **разноименных материалов**, имеющих хорошую или удовлетворительную свариваемость. В этих случаях наблюдается смещение литого ядра относительно плоскости стыка свариваемых деталей, в результате чего не обеспечивается проплавление каждой детали в соответствии с требованиями ГОСТ 15878–79. При этом основная технологическая проблема заключается в том, что уменьшается проплавление тонкой детали (при сварке разнотолщинных деталей) или деталей из материала с более высокой тепло- и электропроводностью (при сварке разноименных материалов). Сместить изотерму плавления в деталь с недостаточным проплавлением можно за счет увеличения тепловыделения в ней и в контакте деталь – деталь и уменьшения отвода теплоты от этой детали в электрод. Этого удается достичь, в частности, рациональным выбором жесткости режима сварки, размеров и формы рабочей поверхности электродов и их материала, руководствуясь следующими рекомендациями.

При сварке двух деталей неодинаковой толщины из однородного металла целесообразно использовать жесткие режимы сварки, ориентируясь на силу тока и время его действия для более тонкой детали, несколько увеличивая $I_{св}$ и $F_{св}$. При этом наилучшие результаты достигаются, если для создания жесткого режима использовать конденсаторные машины, отличающиеся большой скоростью нарастания сварочного тока (при условии, что свариваемый металл не склонен к образованию выплесков). Рекомендуется применять электроды с разной рабочей поверхностью, располагая со стороны тонкой детали электрод с меньшей площадью (меньшим $d_{эл}$ или $R_{эл}$). Такой прием особенно эффективен при разнице в толщине деталей до 1 : 6 или когда приходится применять мягкие режимы (или модуляцию тока) из-за склонности металла к выплескам. При значительной разнице в толщине деталей следует со стороны тонкой детали устанавливать электрод из менее теплопроводной бронзы (например, из сплава БрНБТ), чем со стороны толстой.

При сварке деталей из разноименных материалов для улучшения проплавления применяют те же технологические приемы, что и при сварке разнотолщинных деталей. Так, со стороны детали с большей тепло-, электропроводностью используют электрод с меньшей площадью рабочей поверхности (например, сферической) или из бронзы, имеющей более низкую тепло-, электропроводность. При этом силу сварочного тока устанавливают, ориентируясь на металл с меньшей тепло-, электропроводностью. Время действия тока увеличивают,

чтобы обеспечить лучшее перемешивание металла в литом ядре, добиваясь максимально возможного проплавления без образования конечного выплеска. Силу сжатия устанавливают по металлу, более склонному к образованию дефектов усадочного характера.

Рекомендуется сварку разноименных металлов выполнять на относительно жестких режимах униполярными импульсами тока (см. рис. 5.19, *в* – *д*). При этом существенную роль в тепловыделении играют термоэлектрические эффекты (В. Томсона, Пельтье), действие которых проявляется как в контакте разноименных металлов, так и на границе твердый – жидкий металл. В зависимости от направления сварочного тока на указанных границах выделяется или поглощается теплота Пельтье ($Q_П = \pm П I_{св} t_{св}$, где П – коэффициент Пельтье), которая, суммируясь с Джоулевой теплотой, влияет на формирование температурного поля в зоне сварки. Следовательно, при разработке режимов сварки разноименных и разнотолщинных деталей на машинах постоянного тока, низкочастотных и конденсаторных необходимо учитывать полярность импульса тока, которая подчас играет решающую роль в смещении литого ядра встык свариваемых деталей. Полярность тока следует выбирать такой, чтобы дополнительно выделялась теплота Пельтье со стороны тонкой детали или детали из материала с большей тепло-, электропроводностью.

Одностороннюю двухточечную сварку применяют в тех случаях, когда не возможен или ограничен двусторонний подход электродов к месту сварки (например, для крупногабаритных узлов). Чаще всего одностороннюю сварку выполняют с использованием токопроводящей медной подкладки (см. табл. 5.3, п. 2) или короткозамкнутых электродов (п. 6 той же таблицы). При значительной разнице толщин свариваемых деталей (1 : 3 и более) и определенном шаге между точками (>40 мм) возможна сварка без подкладки, если жесткость деталей достаточна для восприятия $F_{св}$. Иногда используют одностороннюю одноточечную сварку с холостым электродом (табл. 5.3, п. 5).

При односторонней сварке с подкладкой (табл. 5.3, п. 2) ток I_2 распределяется между верхней и нижней деталями и медной подкладкой: $I_2 = I_{в.л} + I_{н.л} + I_п$, как показано стрелками. Сварка осуществляется током, большая часть которого протекает через медную подкладку, а меньшая – через нижнюю деталь. Ток $I_{в.л}$, протекающий по верхнему листу, – ток шунтирования непосредственно в процессе сварки не участвует, лишь увеличивая I_2. Ток шунтирования осложняет процесс односторонней сварки, вызывая перегрев металла в контакте электродов с верхней деталью, что увеличивает вероятность образования выплесков и снижает стойкость электродов. Он уменьшается при увеличении ρ свариваемого металла, расстояния (шага) между электродами и уменьшении ρ токоведущей подкладки. Ток шунтирования можно снизить, применяя циклограмму сварки с подогревом (см. табл. 5.6, п. 5) или импульсы тока с плавным нарастанием (см. рис. 5.19, *б*, *в*). При необходимости соединить детали различной толщины более тонкий лист желательно располагать со стороны сварочных электродов. Если более толстой является верхняя деталь, то вместо токоведущей подкладки устанавливают короткозамкнутые контрэлектроды (см. табл. 5.3, п. 6). Хорошие сварные соединения в случае, когда тонкая деталь расположена со стороны подкладки, можно обеспечить при соотношении свариваемых толщин ≤3 : 1. Из-за шунтирования тока через верхнюю деталь односторонняя сварка нашла наибольшее применение для сварки тонколистовых конструкций из сталей и титановых сплавов, имеющих значительное ρ. Односторонняя сварка деталей из легких сплавов, латуни и бронзы не применяется. При односторонней сварке стальных листов толщиной до 1 мм на токопроводящей подкладке расстояние между электродами t должно быть в 2–3 раза больше величины, указанной в табл. 5.4. При односторонней сварке листов толщиной >1 мм шаг между точками должен быть ≥50…100 мм.

В большинстве случаев схема одностороннего токоподвода применяется в многоэлектродных машинах, предназначенных для сварки крупногабаритных тонколистовых конструкций (табл. 5.3, п. 7), или в специальных двухэлектродных головках и пистолетах.

В табл. 5.16 и 5.17 приведены режимы односторонней двухточечной сварки на медной подкладке низкоуглеродистой стали, стали Х18Н10Т и сплава ОТ4-1.

5.16. Режимы односторонней двухточечной сварки холоднокатаной низкоуглеродистой стали

s, мм	I_2, кА	$F_{св}$, кН	$t_{св}$, с	t, мм
0,8	13,3	1,8	0,38	65
1,0		2,0		
1,2	15,4	2,5		

5.17. Режимы односторонней двухточечной сварки стали Х18Н10Т и сплава ОТ4-1

s, мм	$R_{эл}$, мм	I_2, кА, при шаге t, мм		$t_{св}$, с, при шаге t, мм	$F_{св}$, даН
		40	60	40; 60	
Сталь Х18Н10Т					
0,5 + 0,5	50	6,9	6,9	0,08	200
1 + 1	75	9	8,7	0,12	450
1,5 + 1,5	100	11,9	11,9	0,22	750
0,5 + 1	25	5,8	5,5	0,1	200
0,5 + 1,5		5,9	5,9	0,12	250
1 + 2	50	9,1	8,6	0,1	450
1 + 3		9,5		0,12	
Сплав ОТ4-1					
0,8 + 0,8	50	6,2	6,2	0,1	200
1 + 1	75	6,9	6,5	0,14	250
1,5 + 1,5	100	8,4	8,4	0,18	350
1 + 1,5	75	7	7	0,12	280
1 + 2					
1 + 3		7,3		0,14	
3 + 1	100	8,3	7,8	0,16	350

5.8. ТЕХНОЛОГИЯ РЕЛЬЕФНОЙ СВАРКИ

Рельефная сварка – вид контактной сварки, при котором сварное соединение получается на отдельных участках, обусловленных их геометрической формой, в том числе по выступам (ГОСТ 2601–84, рис. 5.1, *в*).

Электротермодеформационные процессы при рельефной сварке сходны с процессами при точечной и стыковой сварке. Металл в зоне соединения при рельефной сварке, как правило, доводится до плавления и либо выдавливается из соединения (как при стыковой сварке оплавлением), либо образует литое ядро (как при точечной сварке). Поэтому рельефная сварка обладает рядом достоинств, главными из которых являются:

– высокая производительность, поскольку число одновременно свариваемых точек одним импульсом тока достигает 15…20 и более;

– компактность сварных узлов, так как шаг между точками при рельефной сварке может быть меньше, чем при точечной, а сами рельефы могут располагаться ближе к кромке деталей;

– возможность сварки окисленного металла, поскольку при штамповке рельефа оксидная пленка частично разрушается, чему также способствует высокое удельное давление, развиваемое на стадии сжатия;

– возможность сварки деталей весьма различных толщин и сечения и из материалов с очень разными теплофизическими свойствами;

– возможность легирования металла литого ядра при рельефной сварке через вставки или прокладки;

– повышенная стойкость электродов при рельефной сварке по сравнению с точечной;

– машины для рельефной сварки по конструкции проще, чем многоэлектродные.

В то же время рельефной сварке присущи и некоторые недостатки, которые необходимо учитывать при разработке технологии сварки, элементов сварочного оборудования и при оценке технико-экономической целесообразности ее применения.

К таким недостаткам следует отнести:

– более высокую вероятность возникновения выплесков металла в момент включения сварочного тока, для предупреждения которых целесообразно применять импульсы тока с плавным нарастанием, увеличивать начальную силу сжатия, использовать машины с малой массой подвижных частей и направляющими, снабженными подшипниками качения;

– сложность конструкции сварочной головки и механизма сжатия при одновременной сварке нескольких рельефов;

– усложнение конструкции электродов и их эксплуатации особенно при многорельефной сварке;

– необходимость создания рельефов штамповкой, высадкой или точением, что связано с дополнительными затратами, окупающимися лишь в условиях массового производства.

Рельефную сварку применяют для соединения деталей из сталей, титановых сплавов и цветных металлов высокой твердости, а также в приборостроении для соединения деталей малых толщин и сечений из разноименных металлов и сплавов, в том числе с покрытиями.

В зависимости от конструкции и взаиморасположения свариваемых деталей различают три группы рельефных соединений (рис. 5.21): нахлесточные, тавровые и крестообразные.

Наиболее широко применяют сварку листов внахлестку со штампованными рельефами (см. рис. 5.21, *а – в*). Для сварки листов из сталей и титановых сплавов используют одиночный круглый рельеф сферической формы (*а*). При малой длине нахлестки применяют рельефы удлиненной формы (*б*), что позволяет получить необходимую площадь, а следовательно, и прочность соединения. Для сварки металла толщиной 0,4…0,6 мм рекомендуются кольцевые рельефы (*в*), которые обладают повышенной прочностью и мало сминаются под действием силы сжатия до включения тока.

При сварке алюминиевых и других сплавов (например, медно-цинковых и медно-никелевых) с малой жаропрочностью хорошо использовать сплошные рельефы, создаваемые горячей высадкой в процессе формообразования детали (см. рис. 5.21, *г*). Такие рельефы характеризуются повышенной стойкостью и позволяют получать сварные соединения с формированием литого ядра. При рельефной сварке деталей различной толщины (например, специальных гаек с листом) компактные рельефы разнообразных формы и высоты получают холодной высадкой, располагая их у края гайки для облегчения закрытия зазора между деталями (см. рис. 5.21, *д*). Для миниатюрных деталей из разноименных металлов малой толщины (<0,3…0,4 мм) целесообразно изготовлять рельефы в виде пирамид треугольного (*е*) или трапецеидального сечения, размещая их на детали с более высокой тепло-, электропроводностью. При этом общая площадь свариваемой поверхности с рельефами может составлять ≤ 1 мм^2.

Рельефную сварку пластин толщиной 10…25 мм и более, когда штамповка рельефов затруднительна, имеет смысл осуществлять с применением вставок (см. рис. 5.21, *ж*) из листа круглой или продолговатой формы диаметром (0,5…0,6)s и толщиной (0,12...0,15)s. При необходимости вставка может быть из другого по составу металла, что позволяет улучшить свариваемость и легировать металл литого ядра. Иногда рельефы-вставки изготовляют в виде проволочных колец (*з*), шариков и шайб (*и*).

Широкое применение нашла рельефная сварка тавровых соединений (см. рис. 5.21, *к – с*), когда одна из деталей своей торцовой поверхностью приваривается к развитой поверхности другой детали. Различают два вида тавровых соединений: торцовые и соединения с острой гранью. У торцовых соединений рельеф имеет сферическую (*к*) или конусную форму (*л*). С помощью кольцевых рельефов можно сваривать втулки и трубы с листом с образованием герметичного соединения (см. рис. 5.21, *м, н*). Герметичные тавровые соединения можно получить и при вваривании деталей в отверстие листа или трубы методом острой грани (*о – с*).

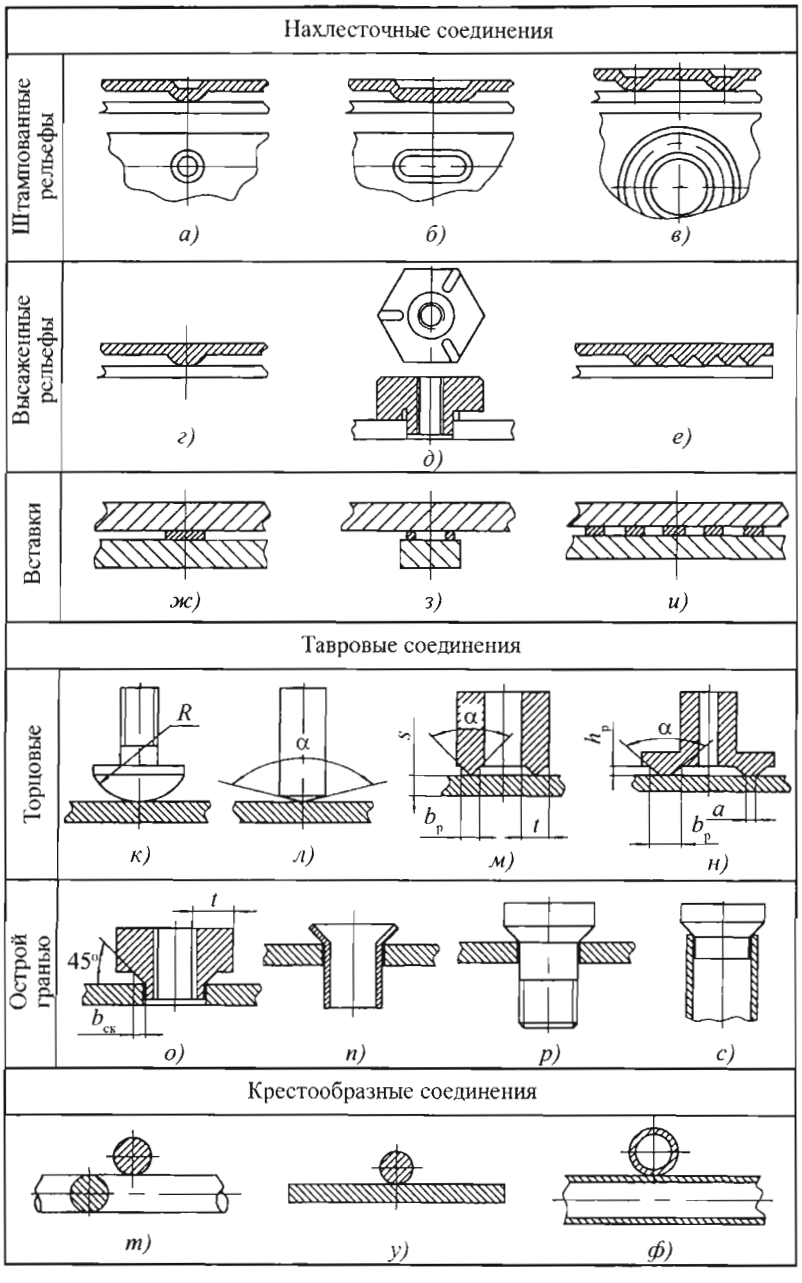
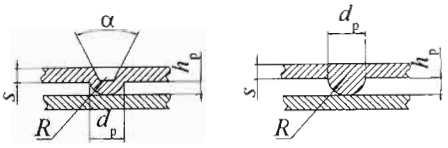


Рис. 5.21. Основные группы рельефных соединений

Еще одной довольно распространенной разновидностью рельефной сварки является сварка вкрест проволоки, стрежней и труб (см. рис. 5.21, *т*, *у*, *ф*). Рельеф в этом случае создается естественной формой свариваемых деталей.

Сварка нахлесточных соединений. Основными параметрами нахлесточных соединений со штампованными круглыми рельефами сферической формы (рис. 5.22, *а*), согласно ГОСТ 15878–79 являются диаметр литой зоны *d*,



а) *б)*

Рис. 5.22. Типичные формы рельефов

величина проплавления h и h_1, величина нахлестки B и расстояние от центра рельефа до края нахлестки (см. рис. 5.4). Этот стандарт регламентирует основные размеры для двух групп сварных рельефных соединений: А и Б. Соединения группы А имеют больший диаметр литого ядра, большую величину нахлестки и обладают более высокой прочностью по сравнению с соединениями группы Б (табл. 5.18).

Подготовка поверхности деталей под рельефную сварку включает в себя такие же операции, как при точечной сварке (см. разд. 5.7.2). Применительно к листовым нахлесточным соединениям травление или механическую обработку поверхности проводят до штамповки рельефов.

Изготовление рельефов целесообразно совмещать с формовкой детали при ее штамповке или вырубке. Это позволяет повысить точность штамповки рельефов и одновременно снизить трудоемкость изготовления детали.

При изготовлении штамповкой круглых рельефов сферической формы (см. рис. 5.22, *а*) для металла толщиной 0,4...6 мм применяют сменные матрицы и пуансоны (штампы). Инструмент для штамповки изготовляют из сталей У10А, Х12М с термообработкой, обеспечивающей твердость 58...60 HRC. Для металла толщиной до 1,2 мм допуск на диаметр рельефа ±0,1 мм и высоту ±0,05 мм, для больших толщин соответственно ±0,15 и ±0,12 мм. Размеры рельефов, разработанных в разных организациях, существенно разнятся.

5.18. Размеры конструктивных элементов рельефных нахлесточных соединений по ГОСТ 15878–79

s, мм	Параметры соединений, мм			
	Группа А		Группа Б	
	d, не менее	B, не менее	d, не менее	B, не менее
0,3	2,5	5	1,5	3
Свыше:				
0,3 до 0,4	2,7	5	1,7	3
0,4 до 0,5	3	6	2	4
0,5 до 0,6	3	6	2,2	4
0,6 до 0,7	3,3	6	2,5	5
0,7 до 0,8	3,5	7	2,5	5
0,8 до 1	4	8	3	6
1 до 1,3	5	10	3,5	6
1,3 до 1,6	6	12	4	8
1,6 до 1,8	6,5	13	4,5	9
1,8 до 2,2	7	14	5	10
2,2 до 2,7	8	16	6	12
2,7 до 3,2	9	18	6,5	13
3,2 до 3,7	10,5	21	7	14
3,7 до 4,2	12	22	8	16
4,2 до 4,7	13	24	9	18
4,7 до 5,2	14	26	10	20
5,2 до 5,7	15	28	11	22
5,7 до 6	16	30	12	24

Однако, как показали исследования, прочность сварных соединений при этом практически одинакова. Штамповку выполняют пуансонами в форме усеченного конуса (угол $\alpha = 45...90°$) или конуса (угол $\alpha = 30°$) со сферической вершиной ($r = 0{,}75s + 0{,}2$ мм). Диаметр рельефа $d_р$ и его высота $h_р$ зависят от толщины детали s или диаметра литого ядра d и для соединений группы А по ГОСТ 15878–79 могут быть ориентировочно определены из соотношений:

$d_р = (1{,}8...2)s + 1$ мм; $h_р = (0{,}37...0{,}4)s + 0{,}3$ мм;

$d_р = (0{,}6...0{,}8)d$; $h_р = (0{,}2...0{,}3)d_р$.

Для получения соединений группы Б размеры рельефа уточняют. Следует иметь в виду, что диаметр литого ядра зависит от параметров режима сварки и обычно на 20...50 % больше $d_р$ с учетом требуемой прочности соединения.

К недостаткам штампованных рельефов нужно отнести их относительно невысокую стойкость (жесткость) при использовании для сварки пластичных металлов и сплавов с малой жаропрочностью. В этих случаях применяют более жесткие сплошные рельефы без лунки (см. рис. 5.22, *б*). Поскольку металл рельефа при его смятии остается между деталями, резко увеличиваются диаметр контакта и зазор между деталями. Поэтому рекомендуется размеры сплошных рельефов уменьшать на 20…30 % по сравнению со штампованными.

Выбор режимов сварки. При рельефной сварке основные параметры режима ($I_{св}$, $t_{св}$ и $F_{св}$) те же, что и при точечной, за исключением размера и формы рабочей поверхности электрода. Как правило, при рельефной сварке нахлесточных соединений используют электроды или плиты с плоской рабочей поверхностью, существенно превышающей размеры сварного соединения. Благодаря этому можно уменьшить величину нахлестки и получить поверхность одной из деталей без заметных деформаций и вмятин. Для обеспечения равномерного распределения тока и силы сжатия между рельефами при многоточечной рельефной сварке рабочие поверхности электродных плит должны быть строго параллельны и не смещаться относительно друг друга под действием силы сжатия. Допускается непараллельность плит ≤0,25 мм на базе 200 мм.

При выборе значений параметров режима и закона их изменения в процессе сварки следует исходить из необходимости создания условий для интенсивной радиально направленной пластической деформации металла рельефа (без его перегрева и выплеска или преждевременного смятия) с одновременным нагревом зоны сварочного контакта до температуры, близкой к температуре плавления, с последующим после осадки рельефа образованием литого ядра. Для выполнения этих условий рекомендуется использовать циклограмму процесса с постоянной силой сжатия (см. табл. 5.6, п. 1) при сварке тонколистового металла. Для сварки больших толщин (3,5…6 мм) применяют циклограмму с повышенной силой проковки (п. 2 той же таблицы), что позволяет уменьшить зазоры между деталями и уплотнить литое ядро. Для борьбы с выплесками рельефную сварку осуществляют модулированными импульсами тока (см. рис. 5.19, *б*) с длительностью нарастания $t_н = (0{,}2...0{,}3)t_{св}$, при этом начальное значение тока $I_{св.н} = (0{,}3...0{,}5)I_{св}$. Для сварки больших толщин можно использовать двухимпульсный режим нагрева (см. табл. 5.6, п. 5). Первый (подогревный) импульс тока применяют для выравнивания высоты рельефов [$I_{под} = (0{,}6...0{,}7)I_{св}$], второй (сварочный) желательно с плавным нарастанием для предупреждения выплесков. Предпочтительны режимы средней жесткости с модуляцией тока, что особенно важно при большом числе одновременно свариваемых рельефов.

При сварке закаливающихся сталей (типа 30ХГСА), отпуск выполняют повторным включением тока $I_{доп}$ на время $t_{доп}$. Для предупреждения дефектов усадочного характера используют цикл силы с $F_к$ (см. табл. 5.6, п. 6) или замедленное охлаждение зоны сварки дополнительным током. Использование $F_к$ также увеличивает прочность рельефных соединений, особенно при сварке без расплавления.

Суммарный сварочный ток и общая сила сжатия обычно прямо пропорциональны числу рельефов, свариваемых одновременно. Время сварки не зависит от числа рельефов и определяется только толщиной свариваемых деталей и их материалом.

В табл. 5.19 приведены режимы рельефной сварки низкоуглеродистой стали, обеспечивающие образование соединений группы А. В табл. 5.20 приведены режимы рельефной сварки стали 12Х18Н10Т.

5.19. Режимы рельефной сварки низкоуглеродистой стали

s, мм	d, мм	$F_{св}$, кН	$I_{св}$, кА	$t_{св}$, с	$t_{н}$, с
0,5	3	0,6...0,9	4,5...5,5	0,06...0,1	0,02...0,04
0,8	4	0,9...1,3	6...7	0,08...0,12	0,04...0,06
1	4,5	1,2...1,6	7...8	0,12...0,2	0,04...0,08
1,5	6	2...3	9,5...11	0,2...0,3	0,06...0,1
2	7	2,8...4	11...12,5	0,3...0,5	0,1...0,16
2,5	8	4...5	13...15	0,4...0,7	0,14...0,24
3	9	5...7	15...17	0,6...0,9	0,2...0,3

5.20. Режимы рельефной сварки стали 12Х18Н10Т

s, мм	$d_{р}$, мм	$h_{р}$, мм	B, мм	$F_{св}$, кН	$I_{св}$, кА	$t_{св}$, с
0,5	1,75	0,5	5	2	4	0,16
0,8	2,5	0,6	6	3,2	5,6	0,24
1	3	0,7	8	4	6,6	0,26
1,5	4	0,9	11	6	9	0,36
2	4,75	1	13	8	11	0,42
2,5	5,5	1	15	10	12,5	0,46
3	7	1,5	18	12	14	0,48

Сварка нахлесточных соединений по замкнутым кольцевым и прямоугольным рельефам (см. рис. 5.21, *в*) наибольшее применение нашла для соединения тонколистовых конструкций и при герметизации корпусов полупроводниковых приборов. При сварке по замкнутым рельефам соединение обычно формируется в твердой фазе. Необходимый профиль сечения рельефа (чаще всего закругленной формы) выштамповывают на одной из свариваемых деталей. Равнопрочность сварного соединения основному металлу достигается при следующих размерах поперечного сечения рельефов: ширине основания $b_{р} = (1{,}2\ldots1{,}5)s$; высоте $h_{р} = (0{,}6\ldots0{,}8)s$.

Параметры режима сварки рекомендуется определять из соотношений $F_{св} = (12\ldots15)sL$; $I_{св} = (0{,}6\ldots0{,}8)L$; $t_{св} = (0{,}06\ldots0{,}1)s^2$, где s – толщина детали, мм; L – длина периметра рельефа, мм; $F_{св}$, даН; $I_{св}$, кА; $t_{св}$, с.

Тавровая сварка. При сварке деталей типа болтов, шпилек и стержней (см. рис. 5.21, *к*, *л*) с листом на их торце выполняют рельефы конической, реже сферической или иной формы для того, чтобы обеспечить локальный нагрев деталей и протекание интенсивной пластической деформации металла в плоскости сварки. При выполнении этих условий формируется твердофазное сварное соединение высокой прочности, которое при испытании разрушается с вырывом по основному металлу.

Сварочный ток к длинным стержням или шпилькам подводится через их боковую поверхность вблизи от места сварки с использованием цанговых или призматических токоподводов (электродов), исключающих проскальзывание деталей под действием сварочной силы осадки. При сварке коротких стержней типа шипов или бобышек возможен подвод тока с торца деталей, если нет опасности их перегрева и деформации. При сварке деталей, имеющих головки с заплечиками (см. рис. 5.21, *к*), ток подводят с использованием полых электродов, опирающихся на заплечики. Радиус сферы рельефа, выполняемого на конце стержня (см. рис. 5.21, *к*), рекомендуют выбирать равным двум диаметрам стержня. Если рельеф имеет конусную форму (см. рис. 5.21, *л*), то угол заточки торцов стержней выбирают в пределах 120...170° с учетом диаметра стержня.

Поскольку для тавровой сварки стержней характерно большое разнообразие конструктивных форм подготовки деталей, схем токоподвода и приложения силы сжатия, режимы сварки определяют опытным путем. При этом можно использовать следующие рекомендации. Для сварки стальных стержней диаметром 4...12 мм сила сварочного тока может быть определена по зависимости

$$I_{св} = (1{,}2...1{,}6)d_{ст},$$

где $I_{св}$ – в кА; $d_{ст}$ – диаметр стержня, мм.

Время сварки $t_{св}$ стержней указанного диаметра устанавливают равным 0,1...0,3 с.

Силу на электродах выбирают из условия обеспечения давления в поперечном сечении стержня, равного 70...100 МПа.

Тавровая сварка деталей типа втулок, заглушек, бонок (см. рис. 5.21, *м*) с использованием кольцевых рельефов на их торцовой поверхности позволяет получать прочноплотные сварные соединения. Возможность локального тепловыделения и сосредоточенной пластической деформации в зоне кольцевого рельефа позволяет избежать общего перегрева и деформации деталей вне зоны сварки. Такие детали свариваются, как правило, без расплавления с использованием кольцевых рельефов треугольной формы с углом $\alpha = 90°$.

Условие, при котором сварное соединение равнопрочно основному металлу, когда при нагружении детали разрушение происходит с вырывом из листа толщиной s, достигается, если минимальная ширина основания рельефа $b_р \approx 0{,}8s$.

Условие, при котором исключаются перегрев и деформация корпуса детали, удовлетворяется, если толщина стенки детали $t \geq 3s$. Эти условия необходимо соблюдать при конструировании деталей и рельефов на их торцовой поверхности.

При выборе режимов кольцевой тавровой сварки деталей типа втулок с рельефами на торцовой поверхности можно воспользоваться рекомендациями для нахлесточных соединений с кольцевыми рельефами (см. выше), исходя из того что независимо от размеров втулок и толщины плоской детали из низкоуглеродистой стали необходимо обеспечить плотность тока j = 0,4...0,5 кА/мм^2 и давление p = 80... 100 МПа при ширине зоны соединения, равной ~1,5s. Время сварки подбирают из условия недопущения перегрева стенки детали.

При тавровой сварке тонкостенных втулок ($t < 3s$), а также для получения сварных соединений с кольцевой расплавленной зоной втулки изготовляют с фланцами (см. рис. 5.21, *н*) шириной ≥2,5s, толщиной 1...2 мм, на торце которых имеется рельеф. Рекомендуемая форма рельефов трапецеидальная (α = 120°) или закругленная с $h_р$ = 0,5...0,8 мм, $b_р$ = 1,5...2 мм.

Сварку таких деталей из коррозионностойких и титановых сплавов выполняют с плавным нарастанием тока с плотностью j = 0,2... 0,25 кА/мм^2 и давлением p = 80...120 МПа площади основания рельефа, время сварки для листовой детали толщиной s = 1...2 мм устанавливают в пределах 0,2...0,3 с.

Рельефную кольцевую сварку деталей из жаропрочных сплавов осуществляют с предварительным подогревом и приложением силы проковки по циклограмме (см. табл. 5.6, п. 5).

При сварке тавровых соединений острой гранью (см. рис. 5.21, *о*, *р*, *с*) создаются благоприятные условия для интенсивной пластической деформации металла на свариваемых поверхностях обеих деталей. Это способствует повышению качества сварки, равномерному провару по периметру соединения, снижению деформации стенки привариваемой втулки. Рекомендуемый угол скоса при сварке острой гранью α = 45°, ширина скоса $b_{ск} \leq (0{,}4...0{,}5)t$. По сравнению со сваркой торцовых соединений в этом случае требуется несколько меньший $I_{св}$ или $t_{св}$.

Сварка крестообразных соединений (см. рис. 5.21, *т*, *у*, *ф*) широко используется в производстве сеток, решеток, каркасов железобетонных конструкций и других изделий. Сварка стержней между собой или стержня с листом (соответственно рис. 5.21, *т*, *у*) сопровождается значительной пластической деформацией деталей в процессе их осадки. При этом расплавленный металл выдавливается из стыка и соединение формируется в твердой фазе. Равнопрочность соединения обеспечивается при величине осадки стержня из стали Ст3 на 25 % его диаметра, при сварке стержней с повышенным содержанием углерода (сталь Ст5) осадку увеличивают до 40 % из-за разупрочнения металла в зоне нагрева. Для определения значений параметров режима сварки пользуются данными производственных инструкций или специальными графиками, устанавливающими зависимость между сварочным током, временем сварки и диаметром стержня. Ориентиро-

вочно режимы сварки стержней диаметром 2...12 мм из низкоуглеродистой стали с учетом величины осадки Δ выбирают следующим образом: для Δ = 15 % ток $I_{св} = (800...1000)d_c$, А; $F_{св} = (60...100)d_c$, даН; для Δ = 30 % ток $I_{св} = (1000...1300)d_c$, А; $F_{св} = (80...200)d_c$, даН; для Δ = 15 и 30 % $t_c = (0{,}06...0{,}1)d_c$, с.

5.9. ТЕХНОЛОГИЯ ШОВНОЙ СВАРКИ

Шовная сварка широко используется для соединения внахлестку деталей толщиной 0,3...4 мм. Как правило, она обеспечивает получение прочноплотных швов, когда каждая последующая точка перекрывает на 25...40 % предыдущую. Такие швы выполняют, например, при сварке продольных и поперечных швов обечаек. Допускается применение шовной сварки (взамен точечной) для получения ряда отдельных точек, например при сварке плоских панелей, а также для приварки к листу профилей жесткости.

Основным конструктивным элементом, определяющим прочность и герметичность сварного соединения, является ширина литой зоны шва d. Размеры литой зоны и других конструктивных элементов (см. рис. 5.3) в зависимости от толщины и материала регламентирует ГОСТ 15878–79 (табл. 5.21), в соответствии с которым допускается получение соединений групп А и Б. Соединения группы Б с меньшей шириной литой зоны и меньшей нахлесткой применяют в конструкциях для снижения их массы.

Шовная сварка может осуществляться при непрерывном и прерывистом включении тока (рис. 5.23, *а*, *б*). В первом случае свариваемые детали перемещаются с постоянной скоростью при непрерывно включенном сварочном токе. Непрерывная шовная сварка применяется для неответственных сварных соединений. При этом способе сварки из-за повышенного тепловложения расширяется зона термического влияния, перегреваются электроды, возрастает шунтирование тока через ранее сваренный участок шва, увеличивается вероятность непроваров. В то же время непрерывное включение тока позволяет резко повысить скорость сварки, поэтому этот способ нашел применение для сварки тонколистового металла (0,15...0,35 мм) с раздавливанием кромки.

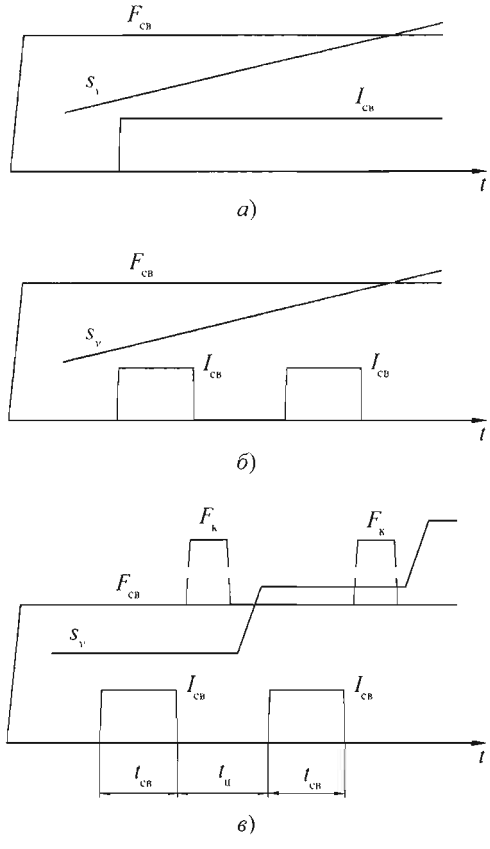


Рис. 5.23. Типовые циклограммы шовной сварки: *а* – непрерывной; *б* – прерывистой; *в* – шаговой

Основным способом шовной сварки является прерывистая сварка (см. рис. 5.23, *б*), когда кратковременные импульсы тока чередуются с паузами при непрерывном движении деталей. Во время паузы теплота от несваренного участка отводится в электроды, что снижает нагрев этого участка и его окисление. Электроды, прокатываясь по нагретому несваренному участку шва, вызывают пластическую деформацию его выступов, частичное разрушение оксидых пленок и уменьшение контактного сопротивления этого участка. Это способствует уменьшению тока через зону шунтирования и увеличению полезного тока, что облегчает достижение высокого качества соединений.

Каждый импульс тока состоит из одного или нескольких периодов тока. Длительность каждого импульса тока подбирается таким образом, чтобы за время его действия образовалась литая зона определенных размеров

5.21. Размеры конструктивных элементов шовных соединений по ГОСТ 15878–79

Толщина деталей, мм	Параметры соединений, мм					
	Группа А			Группа Б		
	d, не менее	B, не менее		d, не менее	B, не менее	
		Черные металлы и сплавы	Цветные металлы и сплавы		Черные металлы и сплавы	Цветные металлы и сплавы
0,3	2,5	6	10	1,5	4	6
Свыше:						
0,3 до 0,4	2,5	7	10	1,7	5	7
0,4 до 0,5	3	8	10	2	6	8
0,5 до 0,6	3	8	10	2,2	7	9
0,6 до 0,8	3,5	10	12	2,5	8	10
0,8 до 1	4	11	14	3	9	12
1 до 1,3	5	13	16	3,5	10	13
1,3 до 1.6	6	14	18	4	11	14
1,6 до 1.8	6,5	15	19	4,5	12	15
1,8 до 2,2	7	17	20	5	13	16
2,2 до 2,7	7,5	19	22	6	15	18
2,7 до 3,2	8	21	26	7	17	20
3,2 до 3,7	9	24	28	–	–	–
3,7 до 4	10	28	30	–	–	–

(по ГОСТ 15878–79). Длительность паузы определяется так, чтобы произошло достаточное остывание несваренного участка и чтобы вновь формирующаяся литая зона перекрывала на 25...40 % предыдущую (см. рис. 5.3). Шаг точек L_1 и скорость сварки $v_{св}$ связаны зависимостью $L_1 = v_{св}(t_{св} + t_п)$. Для получения герметичного шва необходимо, чтобы $L_1 < L$.

В тех случаях, когда требуется сваривать легкие и цветные сплавы или детали толщиной >2 мм, используют шовную шаговую сварку. Она выполняется при прерывистом включении тока и прерывистом (шаговом) вращении роликов (см. рис. 5.23, *в*). При этом способе ток включается во время остановки роликов, следовательно, кристаллизация и обжатие расплавленного металла происходят под давлением электродов и появляется возможность прикладывать повышенную силу проковки. Такой цикл сварки применяют для алюминиевых, магниевых и медных сплавов, имеющих широкий интервал температуры кристаллизации и склонных к возникновению в литом ядре трещин, пор и других дефектов усадочного характера.

Поверхности деталей под шовную сварку должны быть свободны от грязи и ржавчины и подготовлены по той же технологии, что и под точечную сварку, с учетом группы свариваемого металла и состояния поставки под сварку (см. табл. 5.5). Шовная сварка выполняется с использованием дисковых электродов-роликов с цилиндрической (шириной $b_{эл}$) или сферической (радиусом $R_{эл}$) рабочей поверхностью. Форму и размеры рабочей поверхности роликов следует выбирать в зависимости от толщины и группы свариваемого металла, что будет рассмотрено далее.

Основными параметрами шовной сварки являются сила сварочного тока $I_{св}$, длительность импульсов тока $t_{св}$, длительность пауз $t_п$, сварочная сила $F_{св}$ и скорость сварки $v_{св}$.

Для увеличения производительности процесса повышают $v_{св}$, при этом максимальные значения скорости сварки ограничены скоростью нагрева и кристаллизации. Поэтому

для обеспечения высокой скорости сварки стремятся уменьшить $t_{св}$ и $t_п$. С увеличением толщины металла $v_{св}$ уменьшают в связи с замедлением скорости нагрева и кристаллизации. При сварке металлов с большой теплопроводностью $v_{св}$ несколько увеличивают. Скорость сварки можно рассчитать с учетом требуемого перекрытия точек f (25...40 %) и шага точек L_1 по выражению

$$v_{св} = 0{,}06L_1 / (t_{св} + t_п),$$

где $L_1 = L(1 - f / L)$; $t_{св}$ и $t_п$ – соответственно длительность импульса тока и паузы, с.

В связи с увеличением скорости сварки и шунтированием тока через ранее сваренный участок шва сила сварочного тока при шовной сварке с прерывистым включением тока в 1,5–2 раза больше, чем при точечной сварке.

При сварке первой точки шва условия формирования соединения такие же, как и при точечной сварке. Поэтому для предупреждения перегрева и выплеска металла при сварке первой точки $I_{св}$ уменьшают на 10...15 % по сравнению с током для сварки всего шва. Сила сжатия при шовной сварке на 10...30 % выше, чем при точечной.

Влияние теплофизических свойств свариваемых металлов на выбор параметров режима при шовной сварке такое же, как и при точечной (см. рис. 5.20). Режимы шовной сварки основных групп металлов и сплавов, при которых образуются соединения группы А, приведены в табл. 5.22–5.27.

5.22. Ориентировочные режимы шовной сварки низкоуглеродистых сталей (типов 08кп, 10, 20) на однофазных машинах переменного тока

Толщина деталей, мм	$I_{св}$, кА	$t_{св}$, с	$t_п$, с	$F_{св}$, кН	$v_{св}$, м/мин
0,5	7...8	0,02...0,04	0,04...0,06	1,5...2	1,2...1,4
0,8	8,5...10	0,04...0,06	0,04...0,08	2...3	1...1,2
1	10,5...12	0,06...0,08	0,08...0,1	3...4	0,8...0,9
1,2	12...13	0,08...0,1	0,1...0,12	4...5	0,7...0,8
1,5	13...14,5	0,12...0,14	0,12...0,14	5...6	0,6...0,7
2	15,5...17	0,16...0,18	0,18...0,22	7...8	0,5...0,6
3	18...20	0,24...0,32	0,28...0,34	10...11	0,4...0,5

Примечание. Форма рабочей поверхности роликов цилиндрическая, циклограмму процесса см. на рис. 5.23, *б*.

5.23. Ориентировочные режимы шовной сварки коррозионно-стойких сталей (типов 12Х18Н10Т, 10Х17Н13М2Т и др.) на однофазных машинах переменного тока

Толщина деталей, мм	$I_{св}$, кА	$t_{св}$, с	$t_п$, с	$F_{св}$, кН	$v_{св}$, м/мин
0,5	5...7	0,02...0,04	0,06...0,08	3...3,5	0,6...1,3
0,8	7...9	0,04...0,08	0,08...0,12	4...5	0,5...1
1	9...11	0,06...0,1	0,12...0,16	5...6,5	0,5...0,8
1,2	10...12	0,06...0,12	0,14...0,18	6...7	0,5...0,8
1,5	11,5...13	0,08...0,14	0,16...0,2	7...9	0,4...0,7
2	12...16	0,12...0,16	0,24...0,32	10...13	0,3...0,6
3	14...18	0,2...0,3	0,6...0,7	13...16	0,2...0,4

Примечание. Форма рабочей поверхности роликов цилиндрическая, циклограмму процесса см. на рис. 5.23, *б*.

5.24. Ориентировочные режимы шовной сварки титановых сплавов на однофазных машинах переменного тока

Толщина деталей, мм	$I_{св}$, кА	$t_{св}$, с	$t_{п}$, с	$F_{св}$, кН	$v_{св}$, м/мин
0,5	5...6	0,1...0,12	0,14...0,18	2...2,5	0,9...1
0,8	5...6	0,12...0,14	0,14...0,18	3...3,5	0,8...0,9
1	6...6,5	0,12...0,14	0,18...0,24	3,5...4	0,7...0,8
1,2	7...8	0,14...0,16	0,2...0,24	4...4,5	0,7...0,8
1,5	8...9	0,18...0,2	0,3...0,36	4,5...5,5	0,6...0,7
2	9...10	0,2...0,22	0,32...0,4	5,5...6,5	0,5...0,6
3	11...12,5	0,28...0,3	0,34...0,48	9...11	0,3...0,4

Примечание. Форма рабочей поверхности роликов цилиндрическая или радиусная, циклограмму процесса см. на рис. 5.23, *б*.

5.25. Ориентировочные режимы шовной сварки жаропрочных сплавов (ХН75МБТЮ6, ХН38ВТ6, ХН70Ю) на однофазных машинах переменного тока

Толщина деталей, мм	$I_{св}$, кА	$t_{св}$, с	$t_{п}$, с	$F_{св}$, кН	$v_{св}$, м/мин
0,5	4,5...7	0,08...0,12	0,08...0,14	5...8,5	0,5...0,6
0,8	6...8,5	0,1...0,16	0,16...0,22	6...10	0,3...0,45
1	6,5...9,5	0,14...0,18	0,24...0,28	7...11	0,3...0,45
1,2	7...10	0,16...0,2	0,28...0,32	8...12	0,3...0,4
1,5	8...11,5	0,2...0,26	0,38...0,5	9...13	0,25...0,4
2	9,5...13,5	0,24...0,32	0,48...0,6	10...14	0,2...0,35
3	12...16	0,36...0,46	0,6...0,78	12...17	0,15...0,25

Примечание. Форма рабочей поверхности роликов цилиндрическая, циклограмму процесса см. на рис. 5.23, *б*.

5.26. Ориентировочные режимы шовной сварки цветных сплавов на однофазных машинах переменного тока

Толщина деталей, мм	$I_{св}$, кА	$t_{св}$, с	$t_{п}$, с	$F_{св}$, кН	$v_{св}$, м/мин
Алюминиевые сплавы типа АМгАМ					
0,5	21	0,02...0,04	0,06...0,12	2,5	1,3...0,5
0,8	25	0,02...0,04	0,06...0,12	3	1,2...0,5
1	29	0,04...0,06	0,12...0,18	3,5	1...0,5
1,2	33	0,04...0,06	0,12...0,18	4	1...0,5
1,5	38	0,06...0,08	0,18...0,24	4,5	0,8...0,5
Латунь типа Л62					
0,5	19	0,06	0,06	2	0,75
0,8	23	0,08	0,08	3	0,7
1	27	0,08	0,1	4	0,7
1,2	31	0,1	0,12	4,5	0,65
1,5	36	0,12	0,14	5,5	0,6

Примечание. Форма рабочей поверхности роликов радиусная, циклограмму процесса см. на рис. 5.23, *б*.

5.27. Ориентировочные режимы шовной сварки алюминиевых сплавов на низкочастотных машинах и машинах постоянного тока

Толщина деталей, мм	$I_{св}$, кА	$t_{св}$, с	$F_{св}$, кН	Величина шага, мм	$v_{св}$, число точек в минуту	Тип машины
Сплав АМг6						
1	45	0,1	5	1,5	150	МШН (МШШИ-400)
1,5	49	0,12	6,6	2,5	120	
2	55	0,14	8	3,8	100	
2,5	60	0,18	9	4,2	80	
3	64	0,2	9,5	4,2	60	
Сплав АМгАМ						
1	47	0,1	4,5	1,5	150	МШН (МШШИ-400)
1,5	49	0,12	5,5	2,5	120	
2	55	0,14	6,5	3,8	100	
2,5	62	0,16	8	4,2	80	
3	72	0,2	9,5	4,2	60	
Сплав АМг6						
0,5	27	0,06	3,5	1,5	160	МШВ-7501
0,8	30	0,1	5	1,7	150	
1	34	0,12	6	2	140	
1,2	37	0,14	7	2,5	140	
1,5	40	0,16	9	3	130	
2	48	0,2	12	3,5	120	
2,5	54	0,22	15	4	100	
3	61	0,26	18	4,5	80	

Примечание. Форма рабочей поверхности роликов радиусная, циклограмму процесса см. на рис. 5.23, *в*.

Шовную сварку низкоуглеродистой стали выполняют на жестких режимах (см. табл. 5.22). В связи с меньшим $t_{св}$ и наличием вмятин от предыдущих точек шва $I_{св}$ больше, чем при точечной.

Коррозионно-стойкие стали сваривают на жестких режимах с использованием повышенных $F_{св}$ (см. табл. 5.23). Титановые сплавы сваривают практически на тех же $I_{св}$, что и коррозионно-стойкие стали, но при $F_{св}$, соответствующих сварке низкоуглеродистых сталей (см. табл. 5.24.).

При шовной сварке жаропрочных сплавов на никелевой основе $F_{св}$ в 1,8–2 раза больше, чем при сварке коррозионно-стойких сталей, а $t_{св}$ больше в 2–3 раза. Для устранения дефектов (пор и трещин) шовную сварку выполняют на малой скорости (см. табл. 5.25).

Шовную сварку цветных сплавов на машинах переменного тока ведут на жестких режимах в связи с их высокой тепло-, электропроводностью и низкой прочностью при нагреве (см. табл. 5.26). Наиболее высокое качество сварных швов при сварке алюминиевых сплавов достигается при шовно-шаговой сварке на машинах постоянного тока или низкочастотных (см. табл. 5.27).

5.10. СОСТАВ, ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ, КЛАССИФИКАЦИЯ И ОБОЗНАЧЕНИЯ КОНТАКТНЫХ МАШИН

Выбранное или спроектированное оборудование для сварки заданного узла должно обеспечивать выполнение поставленной технологической задачи наиболее экономичным путем при безопасной его работе с учетом требований организации производства, экологии и эргономики.

Контактная сварка – термомеханический процесс. В соответствии с этим определением оборудование для контактной сварки состоит из двух взаимосвязанных частей:

– электрической, обеспечивающей нагрев зоны соединения проходящим по свариваемым деталям током;

– механической, выполняющей сжатие свариваемых деталей, подвод к ним сварочного тока, перемещение деталей во время сварки и необходимую пластическую деформацию металла в зоне соединения.

На рис. 5.24 приведена структурная схема контактной машины.

Электрическая часть контактной машины состоит из ряда функциональных блоков. Среди них:

1) внешний контур – совокупность токоведущих элементов машины (гибкие и жесткие шины, консоли или хоботы, колодки, угольники, электродержатели, электроды и др.) и контактов между ними, передающих сварочный ток от источника питания (выводных колодок сварочного трансформатора) к свариваемым деталям. Часть элементов внешнего контура участвует в сжатии и перемещении свариваемых деталей, т.е. передает механическую нагрузку. Различают также вторичный контур контактной машины, включающий в себя внешний контур и вторичную обмотку сварочного трансформатора (в машинах постоянного тока – выпрямительный диодный блок), и сварочную цепь, состоящую из вторичного контура и свариваемых деталей;

2) источник питания (источник сварочного тока), преобразующий энергию электрической сети в сварочный ток необходимых величины, формы и длительности;

3) контактор – управляемое устройство, коммутирующее ток в первичной цепи контактной машины, участвующее в формировании величины, формы и длительности сварочного тока, а также являющееся силовым исполнительным элементом при организации системы автоматического управления процессом контактной сварки;

4) аппаратура управления и контроля, обеспечивающая заданную последовательность и продолжительность всех операций цикла сварки, установку и стабилизацию электрических и механических параметров процесса, их контроль, управление и регистрацию.

Механическая часть контактной машины включает в себя комплекс конструктивных элементов (корпуса, станины, кронштейны, хоботы, упоры, электрододержатели и др.), обеспечивающих жесткость, маневренность, эксплуатационную надежность контактной машины, и механизмы, выполняющие закрепление, сжатие и перемещение свариваемых деталей. Некоторые конструктивные элементы и узлы механизмов проводят сварочный ток.

Основные требования к машинам контактной сварки общего назначения определяет ГОСТ 297–80 «Машины контактные. Общие технические условия». Прежде всего этот стандарт оговаривает **основные параметры контактных машин**. К ним относятся:

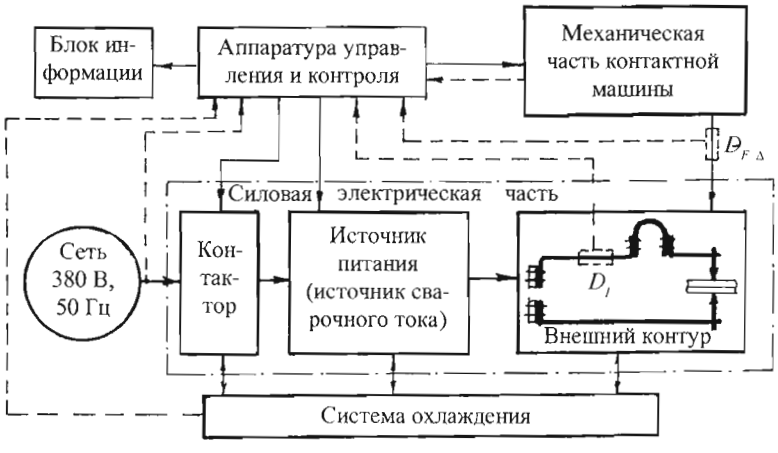


Рис. 5.24. Структурная схема контактной машины:
D_I – датчик тока; $D_{F,\Delta}$ – датчик силы, перемещения

наибольший вторичный ток $I_{2\ max}$ – ток, который проходит во вторичном контуре при его коротком замыкании на максимальной ступени регулирования трансформатора, при минимальном угле включения тиристоров контактора, при наименьших вылете и растворе внешнего контура;

номинальный длительный вторичный ток $I_{2\ дл.ном}$ – условный, расчетный для машины ток, который при непрерывном прохождении по вторичному контуру нагревает его элементы до той же температуры, что и реальный сварочный ток в повторно-кратковременном режиме;

номинальная и (или) наименьшая и наибольшая сила сжатия электродов точечных, шовных и рельефных машин $F_{сж.ном}$;

наибольшая ковочная сила $F_к$ – для машин с переменной силой (на машинах группы А время нарастания силы от сварочной до 0,8 ковочной не должно превышать 0,04 с);

номинальная и (или) наименьшая и наибольшая сила осадки – для стыковых машин;

наибольшая длительность прохождения сварочного тока $t_{св\ max}$ – для точечных, шовных и рельефных машин;

наименьшая и наибольшая линейные скорости роликовых электродов – для шовных машин;

номинальный и (или) наименьший и наибольший вылеты точечных и шовных машин l – расстояние от осевой линии электродов до передней стенки машины (для рельефных машин – от середины плиты);

номинальный и (или) наименьший и наибольший растворы точечных и шовных машин h – наименьшее расстояние между консолями или их выступающими частями по всей длине вылета машины;

наименьшее и наибольшее расстояния между токоведущими губками – для стыковых машин;

наибольшее вертикальное смещение электродов – для точечных и шовных машин;

наибольшее взаимное смещение электродов в горизонтальной плоскости ΔS, мм – для точечных и шовных машин;

допуск параллельности контактных поверхностей плит – для рельефных машин;

масса контактной машины и дополнительных устройств.

Все многообразие типов контактных машин целесообразно разделить на две большие группы: машины общего назначения и специальные.

Контактные машины общего назначения выпускаются в соответствии с ГОСТ 297–80, который устанавливает их следующую классификацию:

– по виду получаемого соединения: точечные, шовные, рельефные, стыковые;

– по конструктивному исполнению: стационарные прессового и радиального типов, подвесные со встроенным и отдельным трансформаторами;

– по типу источника питания: переменного тока промышленной частоты, низкочастотные, постоянного тока, конденсаторные, переменного тока повышенной частоты (800…2000 Гц);

– по типу силы сжатия: с постоянной и переменной силой;

– по нормируемым техническим требованиям: группа А – с повышенной стабильностью параметров (наибольший вторичный ток не должен отклоняться от значения, указанного в технических условиях, более чем на –5… +10 %; отклонение длительности протекания сварочного тока для машин переменного тока не должно превышать ±2 %; должны быть установлены манометры класса точности не ниже 1,5) и группа Б – с нормальной стабильностью параметров (отклонение наибольшего вторичного тока не более ±10 %, длительность протекания сварочного тока ±10 %, класс манометра 2,5).

Для контактных машин общего назначения ГОСТ 297–80 определяет структуру условных обозначений, приведенную на рис. 5.25. Допускается указывать одновременно и ранее принятое обозначение.

Пример условного обозначения подвесной точечной машины с выпрямлением тока во вторичном контуре на наибольший вторичный ток 12 кА, с номером модификации 05, климатического исполнения Т4, группы А, на напряжение питающей сети 380 В частотой 50 Гц:

машина МТВП-1205Т4, А, 380 В, 50 Гц, экспорт, ГОСТ 297–80.

Контактные машины специального назначения предназначены для сварки конкретных узлов: звеньев цепи, дверей автомобилей, корпусов полупроводниковых приборов и т.п. В специализированных контактных машинах могут осуществляться формообразование свариваемых деталей, их транспортировка и фиксация, снятие грата и другие сопутствующие технологические операции. Сложность специа-

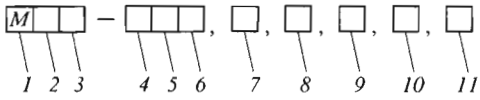


Рис. 5.25. Структура условных обозначений контактных машин общего назначения:
1 – обозначение вида изделия (машина контактная); *2* – обозначение машины по виду соединения (Т – точечная, Ш – шовная, Р – рельефная, С – стыковая); *3* – обозначение машины по конструктивному исполнению и (или) типу источника тока (В – с выпрямлением тока во вторичном контуре, К – конденсаторная, Н – низкочастотная, Р – радиальная, П – подвесная, С – для стыковой сварки сопротивлением, *О – для стыковой сварки оплавлением*); *4* – наибольший вторичный ток в килоамперах (для точечных, шовных, рельефных машин и машин для стыковой сварки сопротивлением) или сила осадки в десятках килоньютонов (стыковые машины для сварки оплавлением); *5* – номер модификации машины (две цифры); *6* – вид климатического исполнения по ГОСТ 15150–89; *7* – группа машин по нормируемым техническим требованиям; *8* – напряжение сети; *9* – частота питающей сети; *10* – слово «экспорт» (для машин, предназначенных на экспорт); *11* – обозначение технических условий на конкретную машину или стандарта для машин, предназначенных на экспорт

лизированных машин значительно выше машин общего назначения, но благодаря высокой производительности в условиях крупносерийного и массового производства они экономичнее универсальных машин при эксплуатации и их доля в производстве контактных машин постоянно повышается.

Специальные контактные машины классифицируются:

– по виду изделия, для сварки которого они предназначены, – многоэлектродные машины для сварки сеток; шовные машины для сварки лент, для сварки бензобаков; рельефные машины для герметизации корпусов, полупроводниковых приборов; стыковые машины для сварки рельсов и др.;

– по степени механизации и автоматизации операций загрузки, перемещения, выгрузки, дополнительных операций подготовки деталей (правки, резки, формовки) – полуавтоматы, автоматы, сборочно-сварочные линии, роботизированные комплексы.

Условные обозначения специальных контактных машин существенно отличаются от принятых для машин общего назначения. Первая буква в большинстве обозначений означает: М – машина, А – автомат, П – полуавтомат, У (К) – установка (комплекс), Л – линия … Вторая и третья буквы могут быть заимствованы из обозначения универсальных машин; цифры после букв, как правило, технического смысла не имеют, а являются номером модели машины. Например: МТМ-35 – машина точечная многоэлектродная; МШЛ – машина шовная для сварки лент; УТВМ-07 – установка для точечной сварки выпрямленным током многоэлектродная для листовых и корытообразных панелей; ССП – сварочный стол с пылезащитной средой.

Контактные машины, разработанные в ИЭС им. Е.О. Патона (Киев), обозначались буквой К с указанием номера модели, не содержащего технических характеристик: *К-355А – рельсосварочная машина*, *К-264* – сварочные клещи с встроенным трансформатором. В последнее время подобные машины получили двойное обозначение – разработчика и согласно ГОСТ 297–80, например рельсосварочная машина К-355А с усилием осадки 450 кН получила обозначение К355А (МСО-4501).

5.11. ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ (ИСТОЧНИКИ СВАРОЧНОГО ТОКА) И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНТАКТНЫХ МАШИН

Гибкость технологии контактной сварки в значительной степени определяется возможностями получения широкой гаммы величин, длительности и форм импульса сварочного тока, что, в свою очередь, зависит от используемых в машинах источников питания и аппаратуры управления.

В настоящее время по характеру источников питания используют пять видов контактных машин:

1) однофазные переменного тока промышленной частоты;

2) трехфазные низкочастотные;

3) трехфазные с выпрямителем сварочного тока во вторичной цепи (машины постоянного тока), в том числе с промежуточным звеном повышенной частоты;

4) конденсаторные;

5) переменного тока повышенной частоты (800…2000 Гц).

Источником питания однофазных машин переменного тока промышленной частоты является понижающий сварочный трансформатор (рис. 5.26, *а*). Первичная обмотка трансформатора с регулируемым числом витков через управляемый контактор подключается к электрической сети 380 В, 50 Гц (для машин с наибольшей мощностью до 60 кВ·А допускается 220 В).

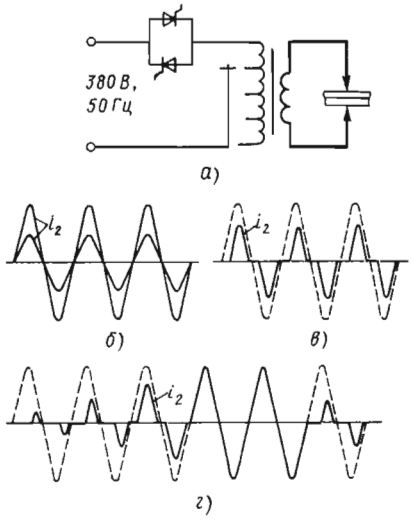


Рис. 5.26. Силовая электрическая схема контактной машины переменного тока (*а*) и характер импульсов сварочного тока (*б – г*)

Источники переменного тока широко применяются как в машинах общего назначения, так и в специальных машинах для сварки преимущественно малогабаритных узлов из металлов и сплавов с относительно высоким удельным сопротивлением (стали, титановые сплавы) с использованием сварочных токов 5…70 кА.

Сварочный ток регулируется ступенчатым изменением числа витков первичной обмотки сварочного трансформатора и плавным регулированием фазы включения тиристоров контактора (см. рис. 5.26, *б*, *в*). Такое комбинированное регулирование позволяет получить импульсы сварочного тока различных величины, длительности и формы, в том числе с плавным нарастанием и спадом тока в начале и конце импульса (см. рис. 5.26, *г*), многоимпульсную сварку и сварку одним полупериодом.

Существенным недостатком источников питания переменного тока является их большое индуктивное и, соответственно, общее электрическое сопротивление $Z_{к.з} \geq 200…300$ мкОм, что приводит к малому cos φ (0,2…0,6) контактной машины и низкой степени полезного использования мощности, потребляемой из сети ($\nu \leq 0{,}4$). Степень использования электроэнергии резко снижается при больших размерах внешнего контура ($l > 800$ мм и $h > 300$ мм) и наличии ферромагнитных масс свариваемых деталей и приспособлений внутри внешнего контура или в непосредственной близости от его токоведущих элементов. Недостатками использования однофазных машин также являются перекос фаз и падение напряжения в сети при кратковременном включении мощной однофазной нагрузки в трехфазную сеть.

В то же время высокое внутреннее сопротивление источников питания переменного тока по отношению к сопротивлению нагрузки – сопротивлению свариваемых деталей ($r_{ээ}$) – обеспечивает формирование пологой нагрузочной характеристики, что способствует стабилизации сварочного тока при колебаниях $r_{ээ}$.

Источник питания низкочастотных машин (рис. 5.27, *а*) сформирован из двух управляемых трехфазных двухполупериодных выпрямителей, включенных встречно-параллельно, и однофазного понижающего сварочного трансформатора с регулируемым числом витков первичной обмотки.

При поочередном включении первого и второго выпрямителей на первичную обмотку трансформатора подаются прямоугольные импульсы напряжения разной полярности, регулируемые по величине и длительности. При каждом импульсе постоянного напряжения U_d, приложенного к первичной обмотке сварочного трансформатора, в электрической цепи развивается переходный процесс, формируется первичный ток i_1 и, соответственно, вторичный ток i_2 по экспоненциальному закону

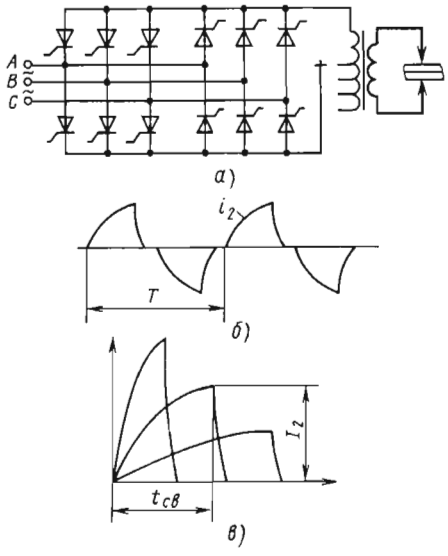


Рис. 5.27. Силовая электрическая схема низкочастотной контактной машины (*а*) и характер импульсов сварочного тока (*б*, *в*)

$$i_1 = U_d(1-\mathbf{e}^{t/\tau})/(r'_{ээ}+r'_м), \quad (5.10)$$

где t – длительность импульса постоянного напряжения; $\tau = L'_м/(r'_{ээ}+r'_м)$ – постоянная времени переходного процесса; $r'_{ээ}$, $r'_м$, $L'_м$ – активные сопротивления свариваемых деталей и машины, а также индуктивность машины, приведенные к первичной цепи.

При завершении переходного процесса в первичной цепи устанавливается постоянный ток большой величины $i_1 = U_d/(r'_{ээ}+r'_м)$, магнитопровод трансформатора насыщается ($\Phi_м$ = const), ЭДС = $d\Phi/dt$ и ток во вторичной цепи снижаются до нуля – такой режим для контактной машины аварийный. Поэтому длительность импульса сварочного тока $t_{св}$ ограничена временем переходного процесса и для большинства современных низкочастотных машин ≤0,4…0,6 с.

Импульсы сварочного тока низкочастотных источников питания имеют хорошую технологичную форму с плавным нарастанием и спадом, что особенно желательно при сварке легких сплавов. При шовной сварке используется серия импульсов чередующейся полярности с условной частотой 1…10 Гц; при точечной и рельефной сварке формирование сварного соединения осуществляется одним импульсом (см. рис. 5.27, *б*, *в*).

Относительно небольшая скорость нарастания тока, соответствующая частоте 1…10 Гц, приводит к резкому снижению индуктивного сопротивления сварочной цепи и повышению степени полезного использования мощности, потребляемой из сети, даже при сварке крупногабаритных узлов и наличии ферромагнитных масс во внешнем контуре машины.

Из всех видов низкочастотные источники питания имеют наименьшее внутреннее электрическое сопротивление вторичного контура (например, машина МРН-24001 имеет $r_{к.з}$ = 11 мкОм), что обеспечивает наиболее крутопадающую нагрузочную характеристику и наибольшее проявление эффекта саморегулирования сварочного тока при колебании электрического сопротивления зоны сварки ($r_{ээ}$).

Использование низкочастотных машин позволяет равномерно загрузить трехфазную сеть, не исключая ее перегрузок. Недостатками этого источника питания являются большие габаритные размеры и масса сварочного трансформатора и ограничение времени сварки ($t_{св}$ < 0,6 с).

Источник питания машин постоянного тока состоит из трехфазного понижающего сварочного трансформатора (с регулируемым числом витков первичной обмотки), подключенного к электрической сети через управляемый тиристорный контактор, и выпрямительного диодного блока. В машинах с большим вылетом используется простая и надежная схема трехфазного однополупериодного выпрямления (рис. 5.28, *а*). Индуктивность вторичного контура таких машин настолько велика, что даже при однополупериодном выпрямлении глубина пульсации сварочного тока весьма мала и удовлетворяет технологическим требованиям.

В мощных машинах и машинах с малым рабочим пространством внешнего контура для обеспечения высоких энергетических характеристик (в первую очередь повышения коэффициента использования мощности) и малой глубины пульсаций выпрямленного сварочного тока используется схема шестифазного (двухполупериодного) нулевого выпрямителя (рис. 5.28, *б*).

Существенно влияют на энергетические характеристики источника постоянного тока, кроме схемы выпрямителя, параметры применяемых диодов и конструктивное исполнение фазовых цепей, определяющее их активное и индуктивное сопротивления. Все шесть диодов выпрямителя установлены на горизонтально расположенном групповом охладителе, закрепленном непосредственно на сварочном трансформаторе. Групповой охладитель является отрицательным полюсом выпрямителя и присоединен к верхней ветви внешнего контура. Соответствующие выводы вторичных обмоток трансформатора подключены к диодам с помощью гибких шин и индивидуальных охладителей, прижатых к диодам через тарельчатые пружины. Вторым (положительным) полюсом выпрямителя является шина, подсоединяющая «нулевые» выводы вторичных обмоток сварочного трансформатора к нижней ветви внешнего контура машины.

В контактных машинах используются специальные низковольтные диоды Д143-2000, имеющие прямое падение напряжения <1,4 В при амплитуде тока 6000 А. При больших выпрямляемых токах в каждую фазу выпрямления на общем групповом охладителе устанавливаются несколько включенных параллельно диодов (с подбором их по прямому падению напряжения). Конструкция блока из двух параллельно включенных диодов приведена на рис. 5.28, *д*.

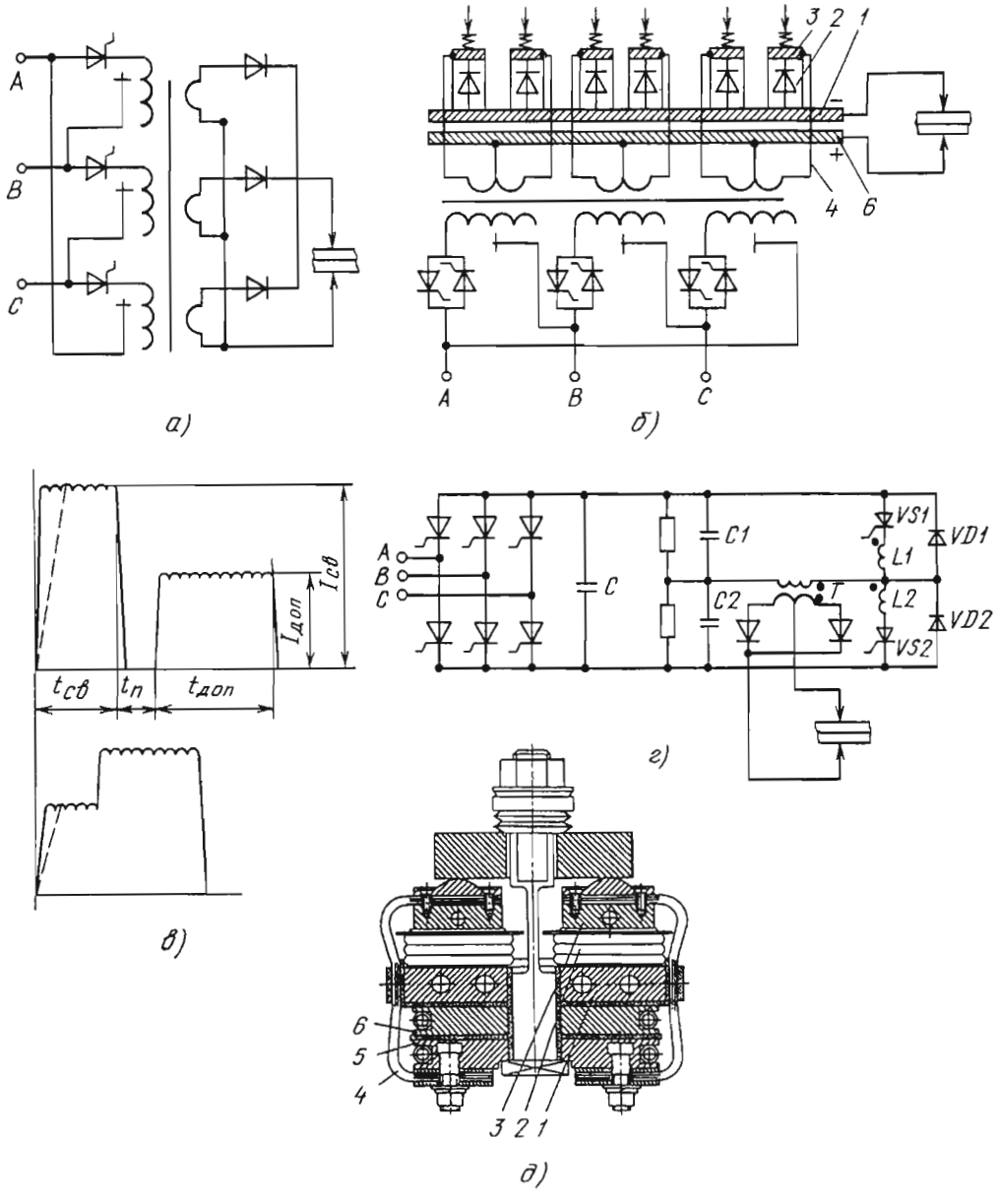


Рис. 5.28. Силовая электрическая схема контактной машины постоянного тока с трехфазным однополупериодным (*а*) и шестифазным двухполупериодным (*б*) выпрямителями; характер импульсов сварочного тока (*в*); схема машины постоянного тока с промежуточным звеном повышенной частоты (*г*); конструкция блока параллельно включенных диодов (*д*):

1 – групповой охладитель; *2* – таблеточные диоды; *3* – индивидуальный охладитель; *4* – гибкая шина; *5* – дополнительная шина; *6* – обратный токоподвод

Применение более мощных низковольтных диодов Д253-4000 на сварочные токи 30...40 кА позволяет ограничиться одним диодом в каждой фазе выпрямителя и сформировать компактный трансформаторно-выпрямительный блок, располагаемый в корпусе машины.

Схема управления дает возможность осуществлять сварку одним или двумя импульсами постоянного тока с модуляцией переднего фронта первого импульса. Ток каждого импульса имеет независимое регулирование в пределах 40 % максимального значения на данной ступени трансформатора. Регулируются также длительность каждого импульса и пауза между ними. Импульсы могут следовать друг за другом без паузы (см. рис. 5.28, *в*).

Источники питания постоянного тока целесообразно использовать при сварке изделий (в том числе крупногабаритных) из алюминиевых и титановых сплавов, жаропрочных и коррозионно-стойких сталей и других металлов.

Постоянный ток мало изменяется при внесении во внешний контур машины массивных ферромагнитных деталей и приспособлений, а также при сварке обечаек, охватывающих нижний токоподводящий элемент машины. Использование постоянного тока позволяет резко снизить индуктивные сопротивления сварочной цепи и в 2–3 раза по отношению к источникам переменного тока понизить потребляемую из сети мощность при сварке одних и тех же деталей. Допустимо значительное удаление источника от электродных устройств. Источник постоянного тока имеет крутопадающую нагрузочную характеристику и обеспечивает эффект саморегулирования сварочного тока при колебаниях сопротивления зоны сварки ($r_{ээ}$).

При рельефной сварке постоянный ток более равномерно распределяется между рельефами при значительных расстояниях между ними, что повышает качество соединений.

При шовной сварке с раздавливанием кромок и шовно-стыковой сварке труб постоянный ток обеспечивает равномерный нагрев кромок и высокое качество при скорости до 100 м/мин.

Недостатками источников питания постоянного тока являются необходимость использования дорогих мощных низковольтных диодов и значительное падение напряжения на выпрямительном блоке, составляющее до половины напряжения холостого хода сварочного трансформатора.

В роботизированных комплексах целесообразно использование **источника питания постоянного тока с промежуточным звеном повышенной частоты.** Такие источники обладают существенными преимуществами перед источниками переменного тока:

– меньшими массой и габаритными размерами сварочного трансформатора в 3–5 раз;

– малой глубиной пульсаций сварочного тока, а следовательно, более эффективным вкладом энергии в зону сварки;

– возможностью управления величиной сварочного тока на всем протяжении импульса;

– равномерным распределением нагрузки по трем фазам питающей сети.

На рис. 5.28, *г* представлена одна из схем источника постоянного тока с промежуточным звеном повышенной частоты. Он состоит из трехфазного управляемого выпрямителя с конденсаторным фильтром C, инвертора ($C1$, $C2$, $VS1$, $VS2$, $L1$, $L2$, $VD1$, $VD2$) на 400...1000 Гц, однофазного понижающего сварочного трансформатора T со вторичной обмоткой, имеющей среднюю (нулевую) точку, и двухполупериодного выпрямителя.

Источник питания конденсаторных машин включает в себя повышающий одно- или трехфазный трансформатор, управляемый выпрямитель, зарядное коммутирующее устройство, батарею конденсаторов с регулируемой емкостью, разрядное коммутирующее устройство и понижающий сварочный однофазный трансформатор. Возможна схема без сварочного трансформатора, например для ударно-искровой конденсаторной стыковой сварки деталей малых сечений.

Один из вариантов электрической схемы конденсаторного источника питания приведен на рис. 5.29, *а*. Сварка осуществляется при разрядке батареи конденсаторов C на первичную обмотку трансформатора. При этом используют только первый полупериод разрядного тока.

Форма импульсов сварочного тока при изменении регулируемых параметров машины (емкости батареи конденсаторов C, напряжения зарядки батареи U_c и коэффициента трансформации сварочного трансформатора $K_{тр}$) показана на рис. 5.29, *б*.

Одним из существенных недостатков конденсаторного источника питания является крутой фронт нарастания тока, что в сочетании с большим и нестабильным начальным сопротивлением свариваемых деталей приводит к

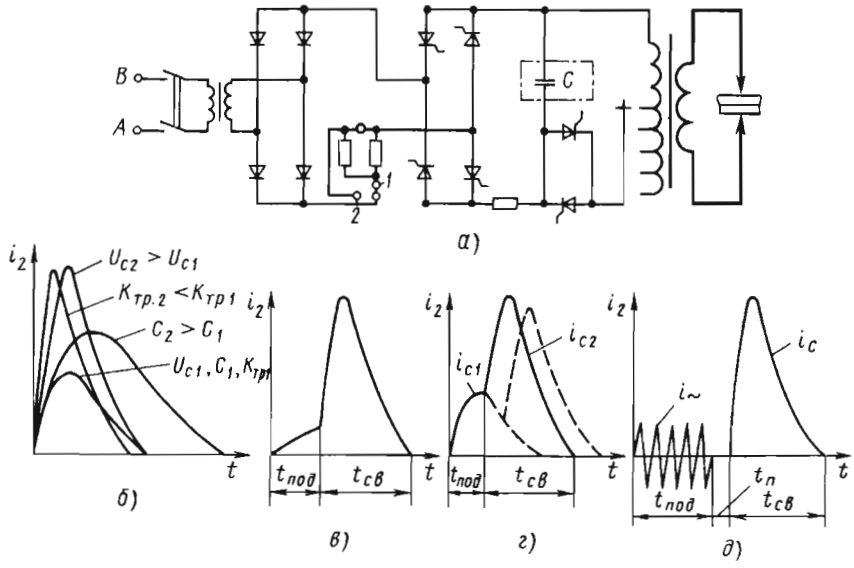


Рис. 5.29. Силовая электрическая схема конденсаторной машины (*а*) и форма импульсов сварочного тока при изменении регулируемых параметров C, U_c, $K_{тр}$ (*б*). Формирование начальной стадии импульса сварочного тока за счет кратковременного включения дросселя в разрядную цепь (*в*), использования дополнительной батареи конденсаторов (*г*) и отдельного источника переменного тока (*д*)

выплескам. Это вызывает необходимость предусматривать в конденсаторных машинах для сварки деталей малых толщин (<0,5 мм) начальную стадию сварочного тока, обеспечивающую подогрев зоны соединения с целью стабилизации контактного сопротивления между свариваемыми деталями. Такой подогрев можно осуществить за счет временного включения в разрядную цепь дросселя (см. рис. 5.29, *в*); предварительного импульса тока, организованного от дополнительной батареи конденсаторов (см. рис. 29, *г*), а также переменным током, пропускаемым через детали перед основным сварочным импульсом (см. рис. 5.29, *д*).

Конденсаторные источники питания решают две задачи. В приборостроительной промышленности – это технологическая задача получения импульсов сварочного тока 1…5 кА, длительностью 1…10 мс со стабильным вложением энергии при каждой сварке. Последнее обеспечивается стабилизацией энергии, накапливаемой в батарее конденсаторов определенной емкости при ее зарядке напряжением с точностью до ±1,5 %.

Более радикальным способом получения высокого и стабильного качества сварных соединений при значительных уровнях возмущающих факторов (колебания начальных контактных сопротивлений, изменения силы сжатия, изменения диаметра рабочих поверхностей электрода и др.) является использование автоматического регулятора параметров процесса сварки.

В машиностроении решается другая задача – энергетическая, связанная со снижением мощности, потребляемой из сети, в первую очередь при точечной сварке крупногабаритных узлов из алюминиевых сплавов и сварке по рельефам большой протяженности. Например, при вылете 1,5 м машина с конденсаторным источником питания сваривает детали из алюминиевых сплавов толщиной 2,5 + 2,5 мм при потребляемой мощности 75 кВ · А. Низкочастотная машина при этих условиях потребляет мощность 300 кВ · А, а машина переменного тока – 1500 кВ · А.

Источники питания переменного тока повышенной частоты (800…2000 Гц) нашли применение при сварке и пайке деталей толщиной от нескольких микрометров до 0,5 мм, а также при шовной сварке тонкого металла на повышенной скорости (50…100 м/мин).

Они включают в себя одно- или трехфазный выпрямитель с конденсаторным фильтром, управляемый инвертор на базе тиристоров или

силовых транзисторов и понижающий сварочный трансформатор. Такие источники обеспечивают амплитудную или фазовую модуляцию сварочного тока 0,7...5 кА в пределах импульса длительностью 0,002...0,020 с, что позволяет гибко управлять характером температурного поля в зоне соединения. Одни из первых схем и конструктивных решений оборудования для контактной сварки с использованием источников повышенной частоты были выполнены в советское время в МВТУ им. Н.Э. Баумана. Сейчас точечные и шовные машины с источниками повышенной частоты разрабатываются и выпускаются НПП «Технотрон» (г. Чебоксары).

Машины для контактной сварки работают в **повторно-кратковременном режиме** (рис. 5.30), который характеризуется относительной продолжительностью включения (ПВ), %

$$\text{ПВ} = 100t_{\text{св}}/(t_{\text{св}} + t_{\text{п}}) = 100t_{\text{св}}/t_{\text{ц}}, \quad (5.11)$$

где $t_{\text{св}}$ – время прохождения сварочного тока; $t_{\text{п}}$ – время паузы между импульсами сварочного тока; $t_{\text{ц}}$ – время повторяющихся циклов.

Величина ПВ зависит от назначения машины и организации производства при изготовлении конкретного изделия. Для точечных машин эта величина ≤20 %, для шовных машин ~50 %, для стыковых 20...30 %, а для трубосварочных станов 100 %.

С учетом величины ПВ, %, определяется номинальный длительный вторичный ток $I_{2\text{дл.ном}}$ – одна из технических характеристик контактных машин:

$$I_{2\text{дл.ном}} = I_{2\text{ном}}\sqrt{\text{ПВ}/100}, \quad (5.12)$$

где $I_{2\text{ном}}$ – реальный кратковременный сварочный ток, обеспечивающий высококачественную сварку деталей, принятых за номинальные для данной машины.

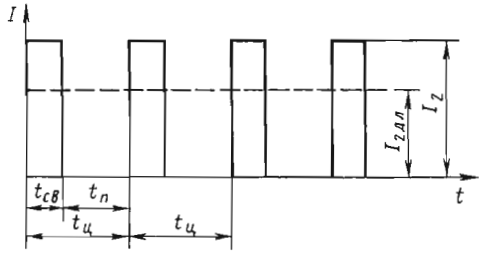


Рис. 5.30. Повторно-кратковременный (фактический) и длительный (расчетный) режимы работы контактной машины

Номинальный длительный вторичный ток является расчетной величиной для определения сечений токоведущих элементов вторичного контура по допускаемой плотности тока.

При работе контактной машины **потребляемая мощность** S, кВ · А, из-за существенного индуктивного сопротивления вторичного контура только частично преобразуется в тепловую ($P_{\text{а}}$, кВт):

$$P_{\text{а}} = S\cos\varphi, \quad (5.13)$$

где $\cos\varphi = r_2/z_2$ – коэффициент использования мощности; $r_2 = r_{\text{ээ}} + r_{\text{м}}$ – активное сопротивление сварочной цепи; $z_2 = \sqrt{(r_{\text{ээ}} + r_{\text{м}})^2 + X_{\text{м}}^2}$ – полное сопротивление сварочной цепи (рис. 5.31).

В свою очередь, только часть тепловой мощности $P_{\text{ээ}}$ расходуется на сварку (выделяется между электродами):

$$P_{\text{ээ}} = P_{\text{а}}\eta, \quad (5.14)$$

где $\eta = r_{\text{ээ}}/r_2$ – КПД машины.

Обобщающей энергетической характеристикой контактных машин является **степень полезного использования мощности**:

$$\nu = P_{\text{ээ}}/S = r_{\text{ээ}}/z_2 = \cos\varphi\eta. \quad (5.15)$$

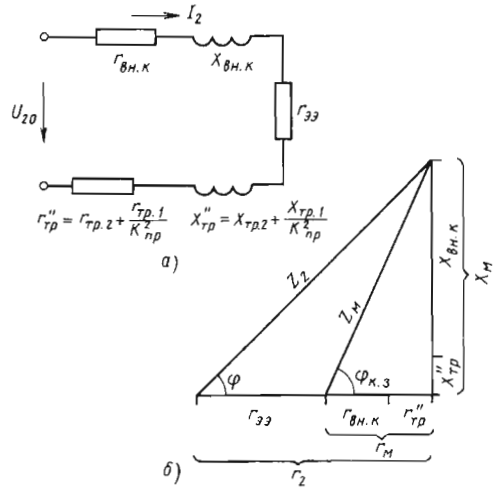


Рис. 5.31. Схема замещения контактной машины (без учета тока холостого хода), приведенная ко вторичному контуру (*а*), и треугольник ее сопротивлений (*б*)

Для машин с источником питания переменного тока при сварке сталей $\nu = 0{,}1\ldots0{,}4$, а при сварке алюминиевых сплавов $\nu = 0{,}02\ldots0{,}1$.

Низкая степень полезного использования мощности контактными машинами переменного тока определяется большим индуктивным сопротивлением их внешнего контура $X_м = 200\ldots300$ мкОм, особенно при значительных размерах вылета и раствора, и относительно малым сопротивлением свариваемых деталей: $r_{ээ} = 8\ldots20$ мкОм при сварке деталей из легких сплавов толщиной 3...0,3 мм и 70...200 мкОм при сварке сталей. Для сварки легких сплавов, а также крупногабаритных узлов из сталей больших толщин энергетически и экономически целесообразно использовать контактные машины постоянного тока и низкочастотные, имеющие малое внутреннее сопротивление $Z_м$.

Технологические возможности контактной машины и ее динамические свойства определяются нагрузочной $I_2 = f(r_{ээ})$ или внешней $U_{ээ} = f(I_2)$ характеристиками (рис. 5.32).

Пологая нагрузочная (или крутопадающая внешняя) характеристика (кривая *1*), соответствующая машинам переменного тока ($r_{ээ} < z_м$), указывает на явление **стабилизации сварочного тока** при колебаниях сопротивления зоны сварки, связанное с изменениями толщины свариваемых деталей, толщины покрытий, состояния поверхности.

Крутопадающая нагрузочная (или пологая внешняя) характеристика (кривая *2*), соответствующая машинам для стыковой сварки оплавлением, машинам постоянного тока и в наибольшей степени низкочастотным машинам ($r_{ээ} > z_м$), свидетельствует о возможности **саморегулирования сварочного тока**. Явление саморегулирования (автоматическое изменение $I_{св}$ при колебаниях $r_{ээ}$) обеспечивает постоянство тепловыделения в зоне сварки и стабилизацию качества сварных соединений при увеличении диаметра электродов, появлении шунтирующих цепей, колебаниях силы сжатия, изменении количества зон контактирования в процессе оплавления при стыковой сварке.

Таким образом, отношение электрического сопротивления свариваемых деталей $r_{ээ}$ к сопротивлению контактной машины при коротком замыкании $z_м$ с учетом структуры этого сопротивления ($x_м$, $r_м$) определяет как энергетические (экономические) характеристики машины – степень полезного использования мощности, потребляемой от сети, так и ее динамические свойства – возможность саморегулирования или стабилизации сварочного тока (рис. 5.33).

5.12. КОНТАКТОРЫ. АППАРАТУРА УПРАВЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ КОНТАКТНЫХ МАШИН. ПРЕРЫВАТЕЛИ

Коммутация тока в первичной цепи контактных машин обеспечивается различными контакторами: механическими, электромагнитными, игнитронными, тиристорными, транзисторными. Управление контакторами может осуществляться простейшими педальными и кулачковыми устройствами, концевыми выключателями и электронными блоками фазового регулирования, входящими в состав аппаратуры управления контактных машин. По характеру включения различают асинхронные и синхронные контакторы.

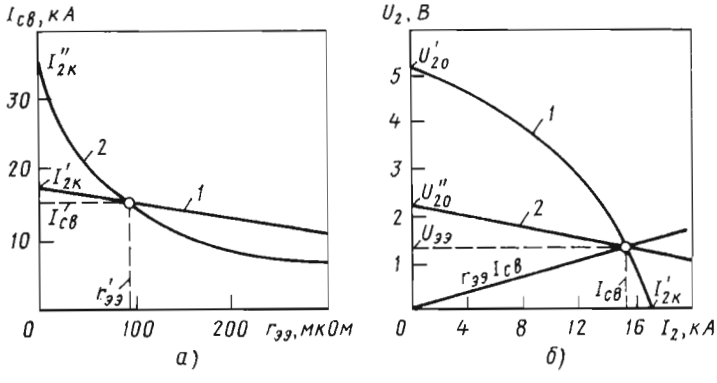


Рис. 5.32. Нагрузочная (*а*) и внешняя (*б*) характеристики контактных машин

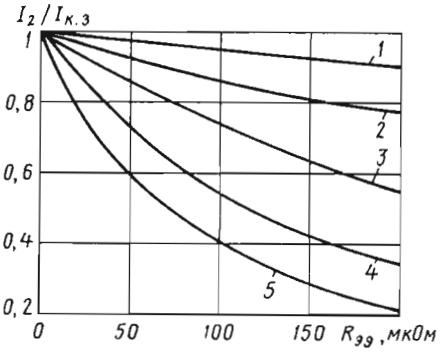


Рис. 5.33. Сравнительные нагрузочные характеристики контактных машин:
1 – МТП-1110; *2* – МТ-2102; *3* – МТ-4019; *4* – МТВ-4802; *5* – МТН-7501

Асинхронные электромагнитные контакторы (рис. 5.34, *а*) осуществляют включение и выключение (коммутацию) тока в моменты времени, не синхронизированные с фазой синусоиды напряжения сети (рис. 5.34, *б*, точки А и Б). При этом в электрической цепи возникают переходные процессы, искажающие синусоиду тока в первые один-два периода. При неблагоприятных условиях включения ($\alpha = \varphi + 90°$) амплитудное значение тока переходного процесса может превышать амплитудное значение установившегося тока до 1,7 раза. При выключении тока (точка Б) из-за образования дуги между силовыми контактами при их размыкании ток в электрической цепи продолжает протекать в течение нестабильного отрезка времени Δt (до 0,1 с).

Эти несовершенства асинхронных контакторов, приводящие к нестабильному дозированию энергии на каждую сварку, делают их неприемлемыми для сварки на жестких режимах ($t_{св} < 0{,}2$ с). Электромагнитные асинхронные контакторы используются в машинах с большой длительностью $t_{св}$: для стыковой сварки оплавлением, в трубных станах, шовных машинах малой мощности с непрерывным протеканием тока.

Синхронные контакторы обеспечивают включение тока в каждом полупериоде в определенные регулируемые моменты времени, синхронные по отношению к нулевым значениям синусоиды напряжения сети (т.е. с определенным регулируемым фазовым углом включения α). Выключение тока в каждом полупериоде происходит за счет выключения тиристоров при переходе синусоиды тока через нулевое значение. Таким образом, синхронные контакторы работают в режиме управляемого переходного процесса в каждом полупериоде (рис. 5.35, *а*). Это определяет стабильное дозирование энергии на каждую сварку, плавное регулирование сварочного тока и возможность его модуляции в начале и конце импульса (см. рис. 5.26, *г*).

Наибольшее распространение в контактных машинах получили **синхронные тиристорные контакторы** типов КТ-07, КТ-11, КТ-12 (продолжают также эксплуатироваться тиристорные контакторы прежних выпусков КТ-1 – КТ-04). На рис. 5.36 приведена принципиальная электрическая схема тиристорных контакторов, а в табл. 5.28 даны их технические характеристики.

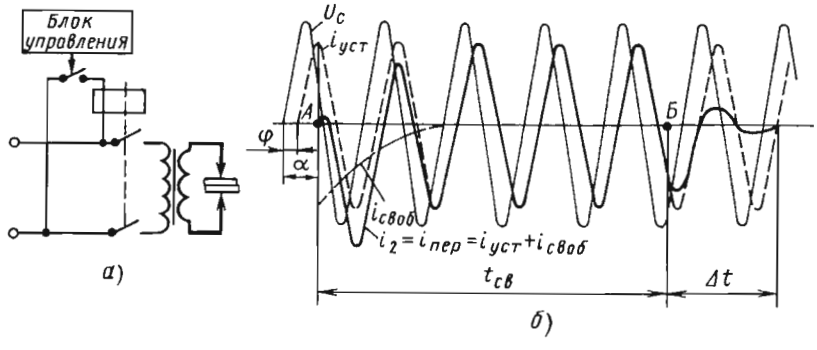


Рис. 5.34. Принципиальная схема асинхронного электромагнитного контактора (*а*) и характер сварочного тока при его включении и выключении (*б*):
$i_{пер}$ – сварочный ток в период переходного процесса; $i_{уст}$ – установившееся значение тока; $i_{своб}$ – свободный ток в период переходного процесса

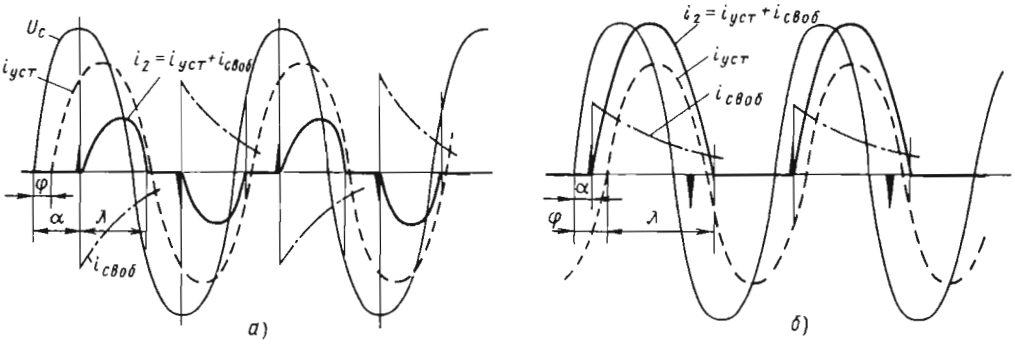


Рис. 5.35. Временные диаграммы напряжения и тока при работе синхронного тиристорного контактора:
а – $\alpha > \varphi$; *б* – $\alpha < \varphi$

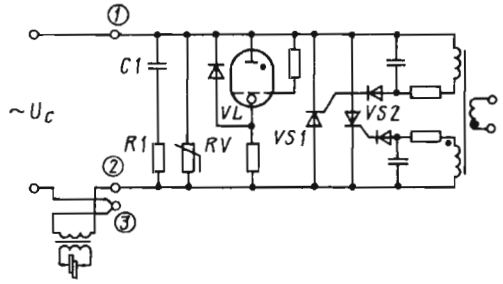


Рис. 5.36. Электрическая схема тиристорных контакторов типов КТ-07, КТ-11, КТ-12

5.28. Технические характеристики тиристорных контакторов

Показатель	Тип контактора		
	КТ-07	КТ-11	КТ-12
Номинальный ток, А:			
при длительности импульса сварочного тока 0,5 с и ПВ, равной:			
50 %	260	800	1500
20 %	480	1000	1750
5 %	800	1300	1850
при длительности импульса сварочного тока 2 с и ПВ, равной:			
50 %	250	800	1300
20 %	450	900	1400
Вид охлаждения	Воздушное	Водяное	
Расход охлаждающей воды, л/мин	–	1	3

Контакторы комплектуются тиристорами Т171-250 с воздушным охлаждением (КТ-07) или тиристорами Т2-320, Т-500 – с водяным охлаждением (КТ-11, КТ-12). Для контроля температуры радиаторов применяются термореле типа ДРТ-Б-60. Защита тиристоров *VS*1, *VS*2 от импульсных перенапряжений обеспечивается варистором *RV*, для ограничения скорости нарастания напряжения использована цепочка *R*1 – *C*1 (см. рис. 5.36). В схему контактора также включен унифицированный блок индикации полнофазного включения на базе лампы тлеющего разряда МТХ-90 (*VL*).

Стабильный и рациональный режим работы синхронного тиристорного контактора обеспечивается при $(\varphi + 5°) < \alpha < (\varphi + 60°)$. При $\alpha < \varphi$ возможно появление полуволнового эффекта (однополупериодного выпрямления тока – см. рис. 5.35, *б*), приводящего к насыщению магнитопровода сварочного трансформатора и аварийному режиму работы контактной машины. Для защиты от этого используют увеличение ширины импульсов, управляющих включением тиристоров. При $\alpha > (\varphi + 60°)$, т.е. при глубоком фазовом регулировании сварочного тока, значительно искажается синусоидальная форма напряжений и токов в обмотках трансформатора, что приводит к появлению их высокочастотных гармоник и, следовательно, к увеличению полного сопротивления машины Z_2 и уменьшению сварочного тока $I_{2(\alpha > \varphi)}$:

$$I_{2(\alpha > \varphi)} = I_{2(\alpha = \varphi)} i_\alpha k_z, \qquad (5.16)$$

где $I_{2(\alpha = \varphi)}$ – действующее значение полнофазного тока; $i_\alpha = I_{2(\alpha > \varphi)} / I_{2(\alpha = \varphi)}$ – коэффициент глубины регулирования сварочного тока; k_z – коэффициент, учитывающий уменьшение фактического сварочного тока при $\alpha > \varphi$ за счет появления высокочастотных гармоник напряжения и тока.

На рис. 5.37 показана зависимость фазового угла включения тиристоров контактора α и коэффициента k_z от глубины регулирования сварочного тока i_α и cos φ машины.

Аппаратура управления контактных машин. Основной задачей аппаратуры управления контактных машин является стабильное воспроизведение циклограммы процесса, обеспечивающей высококачественное сварное соединение. В задачи аппаратуры могут быть также включены: пассивный и активный контроль наиболее значимых параметров процесса, анализ и диагностирование качества сварки и надежности работы оборудования, управление вспомогательными операциями.

Структурной основой ранее разработанных регуляторов цикла сварки сер. РКС, РВИ и шкафов управления (ШУ) является серия унифицированных электронных блоков на базе интегральных логических микросхем К-155, К-511.

Регуляторы сер. РКС (РКС-502, РКС-801) предназначены для однофазных стационарных и подвесных контактных машин переменного тока. Они взаимозаменяемы между собой и с регуляторами прежней сер. РЦС, выпускавшейся на базе элементов «Логика Т». В схемах сер. РКС использованы блок регулирования сварочного тока с автоматической настройкой на коэффициент мощности сварочной машины (cos φ) и блок внешнего дистанционного управления сварочным током, позволяющий использовать датчики автоматических систем регулирования параметров процесса и управления качеством сварных соединений.

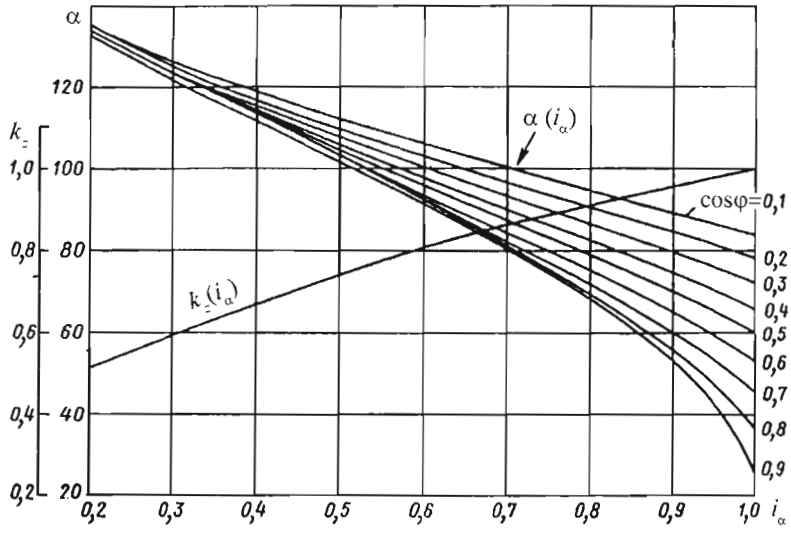


Рис. 5.37. Зависимость фазового угла α включения тиристоров контактора и коэффициента k_z от глубины регулирования сварочного тока i_α и cos φ машины

Для равномерной загрузки питающей сети при работе большого числа контактных машин введен блок задержки включения сварочного тока в конце поз. «Сжатие» до прихода внешнего разрешающего сигнала. Для формирования этого сигнала регулятор каждой контактной машины выдает импульс постоянного напряжения $U_{вых}$ во время протекания сварочного тока. На рис. 5.38 приведены циклограммы работы регуляторов РКС-502 и РКС-801.

Регулятор РКС-801 имеет восемь регулируемых и одну нерегулируемую по длительности позицию сварочного цикла: «Предварительное обжатие» (нерегулируемая, t_0 = 30 периодов), «Сжатие» t_1, «Сварка 1» t_3, «Охлаждение» (пауза между импульсами сварочного тока, t_2), «Проковка 1» t_5, «Задержка проковки» t_4, «Сварка 2» t_6, «Проковка 2» t_7, «Пауза» t_8. Длительность поз. t_1, t_3, t_5, t_6 – t_8 равна 1...99 периодам; поз. t_2 и t_4 одному – девяти периодам напряжения питающей сети. Регулятор снабжен множителем на 2 всех позиций цикла с дискретностью их установки два периода. Предусмотрен тумблер *K2*, позволяющий исключить из цикла поз. «Сварка 2» ($t_6 + t_7$). Для поз. «Сварка 1» предусмотрен режим пульсирующей сварки с повторением цикла ($t_2 + t_3$) от 1 до 9 раз. Пределы фазового регулирования сварочного тока 100...50 % от полнофазного значения. Предусмотрен принудительный переворот фазы первого полупериода каждого импульса. Фронт первого импульса может быть модулирован с временем нарастания тока до 0,28 с.

Помимо рабочей силы на электродах $F_{св}$ возможно приложение двух повышенных сил: предварительного обжатия $F_{обж}$ на время поз. «Сжатие» t_1 и ковочной $F_к$ с задержкой ее приложения t_4 относительно окончания последнего импульса тока «Сварка 1».

Регуляторы серии РВИ также предназначены для контактных машин переменного тока: РВИ-801 – точечных машин с переменной силой сжатия, РВИ-703 – точечных машин с постоянной силой, РВИ-501 – точечных и шовных (с непрерывным и прерывистым пропусканием тока) машин с постоянной силой. Примеры циклограмм работы регуляторов сер. РВИ приведены на рис. 5.39. В регуляторах сер. РВИ предусмотрено регулирование действующего значения сварочного тока (100...30 % от полнофазного значения) и длительности нарастания фронта первого импульса (до 15 периодов). Число импульсов тока до 10. Длительность позиций сварочного цикла

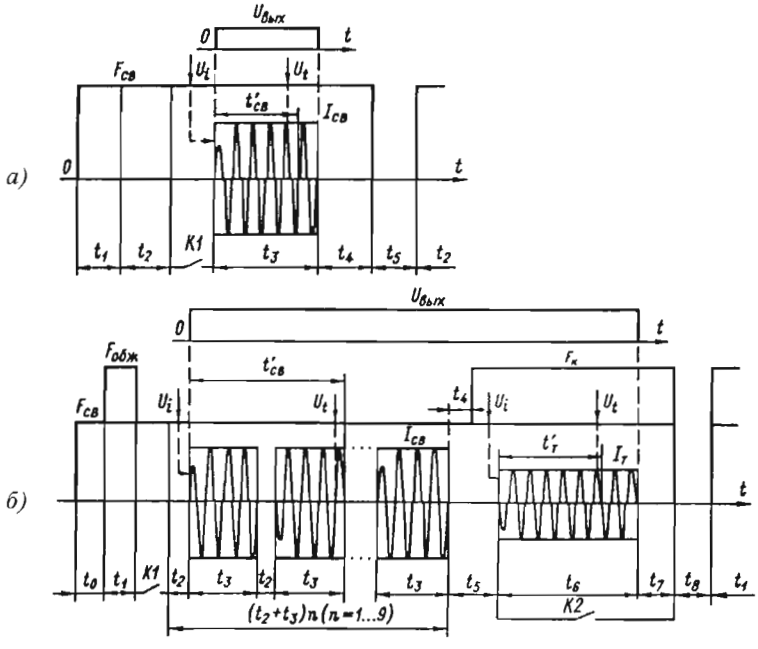
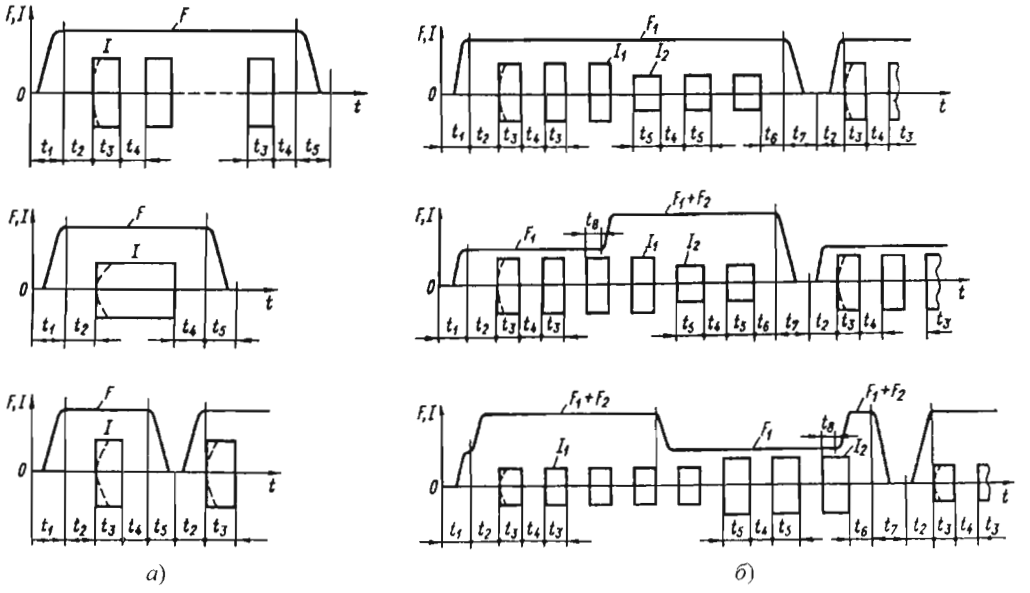


Рис. 5.38. Циклограммы работы регуляторов цикла сварки РКС-502 (*а*) и РКС-801 (*б*)



а) *б*)

Рис. 5.39. Примеры циклограмм работы регуляторов цикла сварки РВИ-501 (*а*) и РВИ-801 (*б*)

0...198 периодов. При работе в шовном режиме регулятора РВИ-501 цепь запуска должна быть включена дважды: первый раз – для запуска, второй – для остановки процесса.

На базе унифицированных электронных блоков выпускается **серия шкафов управления** для машин постоянного тока (ШУ-342 – ШУ-347), низкочастотных (ШУ-349) и конденсаторных (ШУ-350, -351).

ШУ обеспечивают:

– управление тиристорами контакторов и выпрямителей;

– включение до трех электропневматических клапанов;

– дискретный отсчет позиций сварочного цикла в пределах 1...99 или 4...396 периодов;

– регулирование в пределах 100...50 % относительно полнофазного и стабилизацию сварочного тока;

– работу машины в одиночном режиме, режиме повторения, режиме наладки;

– работу машины в точечном, шовном и шовно-шаговом режимах;

– контроль значения сварочного тока (в комплекте с датчиком, установленным на машине).

Примеры циклограмм работы ШУ приведены на рис. 5.40.

Более широкие возможности имеют регуляторы цикла сварки – **микропроцессорные контроллеры**, разработанные на базе однокристальных микроЭВМ.

Для управления контактными машинами переменного тока промышленной частоты последовательно разрабатывались **микропроцессорные регуляторы РКМ-1501, -601 и -801** (совместимые с РКС-502 и -801), **РКМ-803.** В микропроцессорных регуляторах сер. РКМ реализован набор из четырех видов цикла по усилению сжатия и одной (РКМ-601), двух (РКМ-801, -803) или трех (РКМ-1501) поз. «Сварка» (рис. 5.41). Каждая поз. «Сварка» может иметь до 10 импульсов тока с величиной, заданной в процентах от полнофазного сварочного тока: 100...30 % или непосредственно в килоамперах: 2,5...100 кА (РКМ-803). В последнем случае время выхода на данный сварочный ток не превышает одного периода. Временные интервалы задаются в полупериодах сетевого напряжения с максимальной величиной 999 для РКМ-1501 и 510 для РКМ-803. Все величины параметров в регуляторах вводятся по номеру, который соответствует индексу в обозначении параметра. Регуляторы обеспечивают стабилизацию сварочного тока с автоматической настройкой на cos φ машины, подсчитывают число проведенных сварок, увеличивают значение сварочного тока при заданном числе сварок для компенсации износа электрода, позволяют сохранить в энергонезависимой памяти до 16 программ.

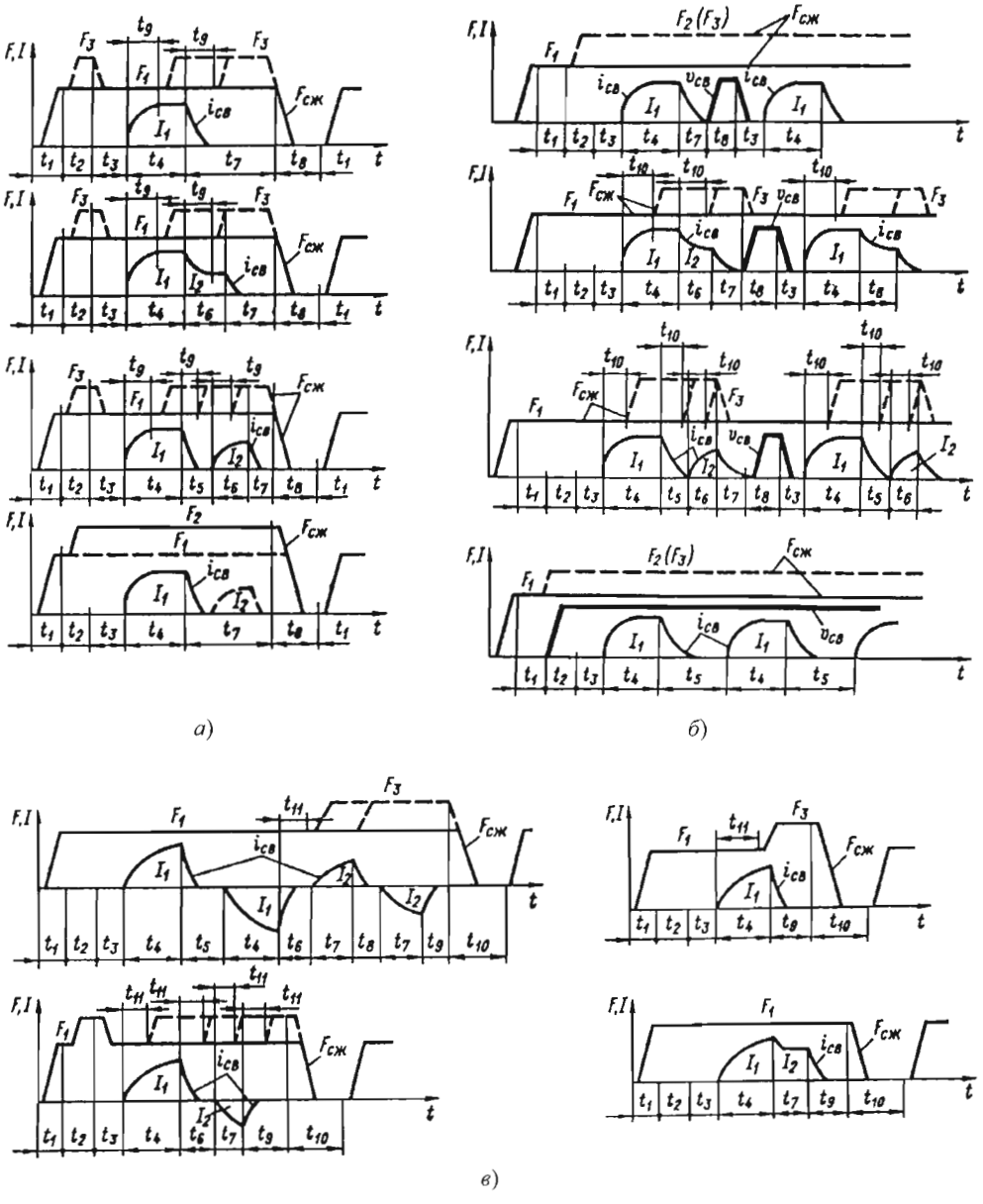


Рис. 5.40. Примеры циклограмм работы ШУ машин постоянного тока для точечной и рельефной сварки ШУ-347 (*а*), шовной сварки ШУ-344 (*б*) и низкочастотных машин для точечной и рельефной сварки ШУ-349 (*в*)

На индикатор регулятора выводятся установленные величины параметров сварки, а также измеренные среднедействующие значения сварочного тока, напряжение питающей сети, коэффициент мощности машины.

Для управления точечными (рельефными) и шовными контактными машинами постоянного тока и низкочастотными могут быть использованы микропроцессорные регуляторы РКМ-1510 и РКМ-86, а для машин, оснащенных

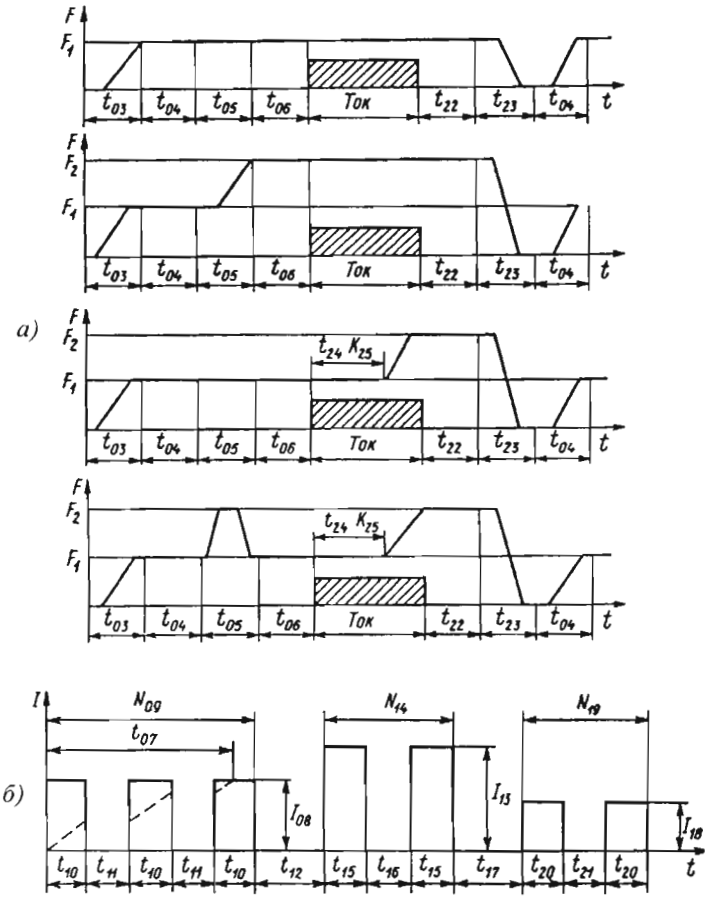


Рис. 5.41. Циклограммы работы микропроцессорных регуляторов серии РКМ по силе сжатия (*а*) **и структура импульса сварочного тока** (*б*)

источниками питания постоянного тока с промежуточным звеном повышенной частоты, – РКМ-1502.

По функциональным возможностям микропроцессорные регуляторы (контроллеры) не уступают современным зарубежным аналогам, таким как PS-2000 (фирма «Bosch», Германия), CT222A, CY241A (фирма «Miychi», Япония) и др.

Контроль процесса контактной сварки. Анализ и повышение качества контактной сварки требуют контроля параметров процесса, особенно при сварке ответственных конструкций. Такой контроль может быть осуществлен с помощью запоминающего электронного осциллографа и соответствующих датчиков, а также при использовании регистратора технологических процессов Р-3704 или измерителя параметров контактной точечной сварки МИКС-2.

Функционально **регистратор Р-3704** аналогичен многоканальному цифровому осциллографу и отличается от последнего тем, что функции регистрации и визуализации разделены между собственно регистратором и персональным компьютером. Регистратор, оснащенный набором необходимых датчиков (тока, напряжения, силы, перемещения, скорости и др.), осуществляет запись параметров на магнитном диске. На персональном компьютере можно просмотреть характер изменения этих параметров и провести необходимые вычисления.

Регистратор может служить средством 100%-ного контроля параметров сварки. В этом случае основные параметры процесса обрабатываются непосредственно регистратором и

сравниваются с граничными условиями. При выходе параметров за допустимые значения выполняются те или иные действия: фиксация номера сварочной операции, отметка сварного соединения или его отсортировка, блокирование дальнейшей работы машины.

Многофункциональный **измеритель параметров МИКС-2М** оснащен датчиками тока (поясом Роговского) и силы (измерительной скобой с тензометрическим мостом), имеет двухстрочный алфавитно-цифровой дисплей, на котором все измеряемые параметры фиксируются одновременно. Последняя модель прибора (МИКС-3) кроме действующего и максимального значений сварочного тока в пределах 2...250 кА и силы сжатия (100...2500 даН) с относительной погрешностью ≤2,5 % позволяет измерять время протекания сварочного тока (1...2000 мс), время нарастания тока (для машин постоянного тока, конденсаторных и низкочастотных), время нарастания силы сжатия, среднедействующее значение вторичного напряжения, активное и индуктивное сопротивления вторичного контура, величину cos φ машины. Масса прибора 1,5 кг, габаритные размеры 215 × 235 × 70 мм.

Прерыватели. Прерыватели машин контактной сварки предназначены для управления циклом сварки, регулирования и коммутации сварочного тока. Они объединяют регулятор цикла сварки и тиристорный контактор. Преимуществом прерывателей является функциональная законченность – наличие в одной конструкции устройства управления и силового коммутирующего устройства, что позволяет использовать их как при модернизации машин, так и при разработке новых многоэлектродных и специализированных машин, в том числе роботизированных комплексов.

Функциональные возможности прерывателей определяются типом используемого регулятора цикла сварки и контактора (табл. 5.29).

5.13. ЭЛЕКТРОДЫ КОНТАКТНЫХ МАШИН

Электроды (ролики, губка) являются элементами внешнего контура и сменным технологическим инструментом контактной машины. Они подводят ток к свариваемым деталям, обеспечивают их сжатие и перемещение (при шовной сварке). Электроды работают в сложных условиях теплового и механического воздействия – в условиях термоциклирования с температурой рабочей поверхности до 750 °С и давлении на нее до 400 МПа.

Материал и конструкция электродов в большой степени определяют качество сварного соединения, производительность, а в некоторых случаях и возможность ведения процесса контактной сварки.

5.29. Функциональные возможности прерывателей

Характеристика	Тип прерывателя		
	ПК-200	ПК-1200	ПКТ-1200
Область применения	Точечные и шовные машины с постоянной силой		Точечные и рельефные машины с переменной силой
Тип регулятора	РВИ-501		РВИ-801
Тип контактора	КТ-07	КТ-12	
Номинальный коммутируемый ток при ПВ = 50 % и длительности импульса 0,5 с, А	270	1500	
Охлаждение	Воздушное	Водяное	
Габаритные размеры, мм	500 × 360 × 590		
Масса, кг	32	37	

Требования к материалам электродов контактных машин целесообразно рассматривать в зависимости от их конкретного назначения. Например, электроды точечных и шовных машин работают при высокой плотности тока (до 250...300 А/мм^2). Материал электродов этой группы должен обладать высокой теплоэлектропроводностью; малой склонностью к взаимодействию с металлом свариваемых деталей, особенно при сварке легких сплавов, большой твердостью и высокой температурой рекристаллизации при сварке коррозионностойких и жаропрочных сплавов. Электропроводность электродов должна быть ≥70 % электропроводности чистой меди при твердости 1000...1600 МПа и температуре рекристаллизации 250...500 °С. Чем выше электропроводность и твердость свариваемых материалов, тем выше должны быть эти показатели у материалов электрода.

Электроды контактных машин для стыковой и рельефной сварки работают при сравнительно малых плотностях тока (до 12... 15 А/мм^2). К материалам этих электродов предъявляют пониженные требования по теплоэлектропроводности (до 35 % электропроводности меди) и повышенные по твердости в условиях эксплуатации (до 1800...2000 МПа). Последнее условие позволяет обеспечить меньший износ электродов, более точную центровку заготовок при стыковой сварке и более равномерное распределение сил и тока при групповой рельефной сварке. В табл. 5.30 приведены характеристики и назначение медных сплавов используемых для изготовления электродов.

Особую группу материалов образуют вольфрам, молибден, эльконайт ВМ (60...80 % W, остальное медь). Они отличаются высокой твердостью и жаропрочностью, что значимо для вставок составных электродов (рис. 5.42) при рельефной сварке, и низкой теплопроводностью, необходимой при сварке деталей с большой разницей толщин, деталей из разноименных металлов, а также металлов, имеющих малое электрическое сопротивление и большую теплопроводность (серебро, медь, латунь).

5.30. Технические характеристики электродных материалов

Группа сплава	Наименование сплава	Легирующие элементы, %	Твердость, МПа, не менее	Электропроводность по отношению к электропроводности отожженной меди, %, не менее	Основное назначение сплава
1	Кадмиевая бронза	0,9...1,2 Cd	1000	80	Для электродов и роликов при сварке легких и медных сплавов
	Серебряная бронза	0,07...0,12 Ag	950	90	
	Хромоциркониевая бронза	0,15...0,35 Cr; 0,07...0,15 Zr	1100	80	
2	Хромовая бронза	0,4...1,0 Cr	1200	75	Для электродов и роликов при сварке титановых сплавов, низкоуглеродистых и низколегированных сталей
	Хромоциркониевая бронза	0,4...1,0 Cr; 0,03...0,08 Zr	1250		
3	Никель-бериллиевая бронза	1,4...1,6 Ni; 0,2...0,4 Be; 0,05...0,15 Ti	1800	45	Для электродов, губок и роликов при сварке углеродистых и коррозионно-стойких сталей, жаропрочных сплавов
	Кобальт-кремниевая бронза	0,4...0,8 Cr; 1,3...1,8 Co; 0,3...0,6 Si			

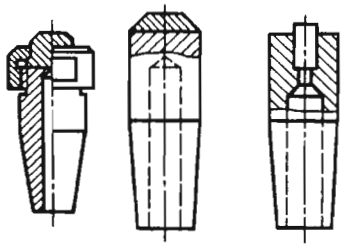


Рис. 5.42. Составные электроды для точечной сварки

Для сварки алюминиевых и магниевых сплавов предложены металлокерамические электроды системы Cu – Al_2O_3 с содержанием до 3 % оксидов. По электропроводности и твердости они аналогичны кадмиевой бронзе, но характеризуются более высокой жаропрочностью и замедленным процессом химического взаимодействия со свариваемым материалом.

Конструкция и основные размеры рабочей части прямых электродов для точечной сварки (ГОСТ 14111–90) и роликов для шовной сварки представлены на рис. 5.43 и в табл. 5.31. Находят применение электроды со сменными колпачками (рис. 5.44), позволяющие снизить расход электродного материала.

Для точечной сварки соединений сложной формы применяются фигурные электроды и электрододержатели (рис. 5.45, *а*), а при рельефной – электроды разнообразной конструкции, зависящей от свариваемых деталей (рис. 5.45, *б*).

Губки (электроды) стыковых машин не оказывают непосредственного влияния на формирование сварного соединения. Они подводят ток к свариваемым деталям и удерживают их от проскальзывания при осадке. Конструкция губок зависит от формы свариваемых деталей (рис. 5.46). Длину губок для обеспечения соосности свариваемых деталей выбирают не менее трех-четырех диаметров стержней или труб, а при сварке полос – не менее 10 их толщин.

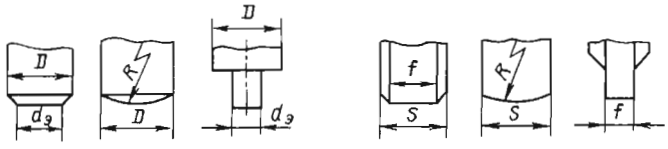


Рис. 5.43. Формы рабочей части электродов и роликов (размеры приведены в табл. 5.31)

5.31. Рекомендуемые размеры электродов и роликов (см. рис. 5.43)

Толщина деталей, мм	Размеры электродов и роликов для сварки углеродистых, коррозионно-стойких, жаропрочных сталей и сплавов, мм					Размеры электродов и роликов для сварки алюминиевых, магниевых и медных сплавов, мм		
	D	$d_э$	*R*	*S*	*f*	*D*	*S*	*R*
0,3	12	3	12...25	6	3	12	12	25
0,5		4	25...50		4	16	16	50
0,8		5	50...75	10	5			50...75
1,0			75...100		5			75
1,2	16	6		12	6			
1,5		7	100...150		7	20	20	75...100
2,0	20	8		15	8			100
2,5		9	150...200	18	9	25	25	
3,0	25	10		20	10			100...150
3,5		11	200...250	22	11			150
4,0		12		24		32	32	200
5,0		–		–	–			
6,0	32		250			40		250
7,0							–	300

Примечание. Размеры *D* и *S* – минимальные рекомендуемые.

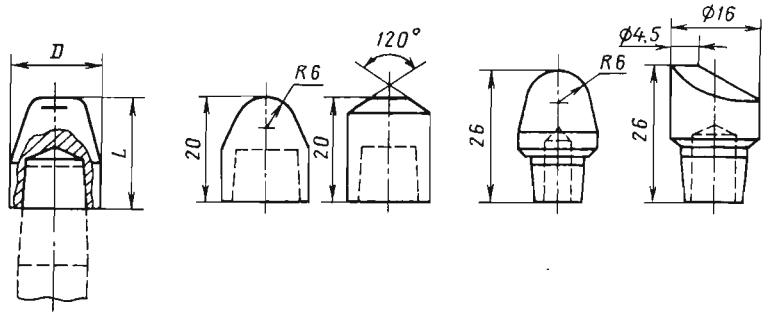


Рис. 5.44. Конструкция укороченных (колпачковых) электродов с посадкой на наружный или внутренний конус

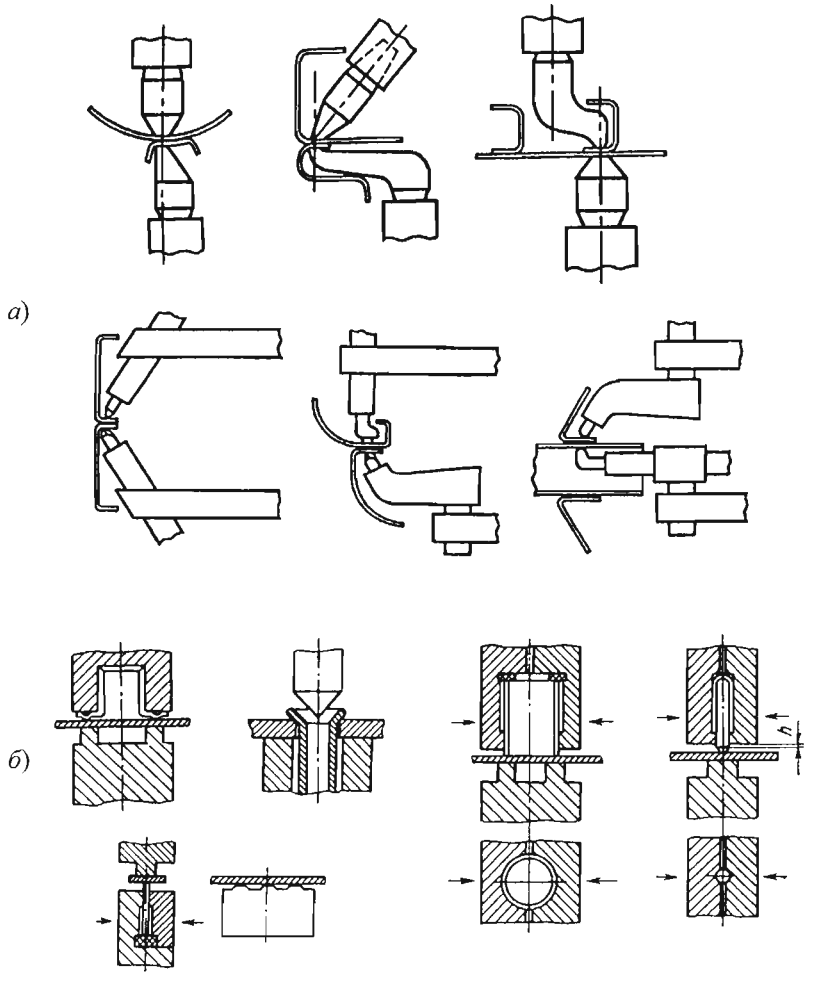


Рис. 5.45. Фигурные электроды и электрододержатели для точечной сварки (*а*) и специальные электроды для рельефной сварки (*б*)

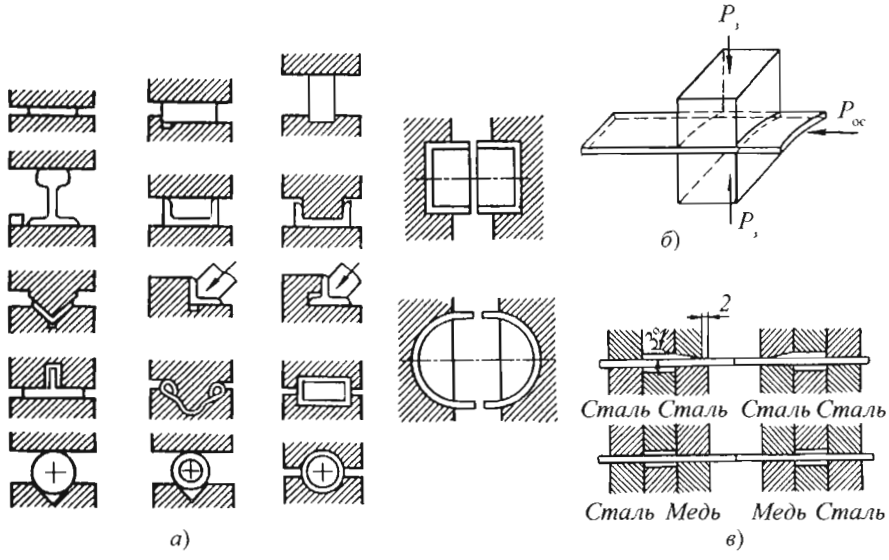


Рис. 5.46. Электроды (сварочные губки) для стыковой сварки заготовок разной формы сечения (*а*) и тонких полос (*б*, *в*):

$P_з$ – сила зажатия; $P_{ос}$ – сила осадки

Электроды изготовляются из круглого и плоского проката или литых заготовок (фигурные электроды). Прямые электроды предпочтительно производить по методу холодной высадки из прутков.

При эксплуатации электродов необходимо поддерживать форму и размеры рабочей поверхности электродов. Зачистка электродов обычно выполняется в сварочной машине личны́м напильником и абразивным полотном. При этом следует сохранять параллельность рабочих поверхностей обоих электродов. Электроды со сферической поверхностью зачищаются с помощью резиновой пластины толщиной 15...20 мм, обернутой абразивным полотном. Для восстановления размеров рабочей поверхности электродов используются переносные фрезерные головки.

При эксплуатации электродов особое внимание надо обращать на обеспечение хорошего электрического контакта посадочных поверхностей с электрододержателями и осями роликов.

Для съема электродов необходимо пользоваться специальными съемниками или предусматривать в конструкции электродов и электрододержателей схему выталкивания электродов.

5.14. МАШИНЫ ТОЧЕЧНОЙ СВАРКИ

Наибольшее распространение в машиностроении получили стационарные **точечные машины переменного тока прессового типа** (с прямолинейным перемещением верхнего электрода). Машины этого типа отличаются простотой конструкции, высокой производительностью, относительно низкой стоимостью и выпускаются на сварочные токи 5...40 кА. Они позволяют сваривать листовые конструкции из низкоуглеродистой стали толщиной 0,5...10 мм; низколегированной, коррозионностойкой стали и титановых сплавов до 5 мм; алюминиевых сплавов и латуни до 1,5 мм, а также крестовые соединения из прутков арматуры классов А240 – А400 диаметром 2...40 мм.

В табл. 5.32 приведены технические характеристики точечных машин отечественного производства (ОАО «Завод "Электрик"», Санкт-Петербург) общего назначения, а на рис. 5.47 – внешний вид машины МТ-3001, конструкция которой характерна для всей гаммы машин прессового типа. На верхнем кронштейне жесткого корпуса *9* установлены пневмопривод силы сжатия *6* с пневмоаппаратурой *7* и направляющее устройство *5*. Элементы верхнего токоподвода *4* через гибкую шину и промежуточный токоведущий угольник подсоединены к одной из выходных колодок

5.32. Технические характеристики точечных машин переменного тока общего назначения с прямолинейным ходом электродов

Характеристика	МТ-1229	МТ-1928	МТ-2103	МТ-3001	МТ-4224
Наибольший вторичный ток, кА	12,5	20	21	30	42
Номинальный длительный вторичный ток, кА	4	9		14	18
Наибольшая мощность при коротком замыкании, кВ · А	62	124	200	242	409
Сила сжатия, даН	100…440	150…680	130…2350	60…1500	200…3000
Вылет, мм	500		1200	500	
Раствор, мм	130…235	180…350	200…300	240…540	180…280
Ход верхнего электрода, мм:					
рабочий	5…30				
полный	60	80	100		
Свариваемые толщины, мм:					
низкоуглеродистой стали	0,5…4,0	0,5…5,0	0,8…6,0	0,8…7,0	1…10
коррозионно-стойкой стали	0,5	0,5…1,5	0,8…4,0	1…3	2…4
титановых сплавов	–		1…4		
алюминиевых сплавов		–	0,5…0,8	0,5…1,0	1…2
медных сплавов (латуни)		0,5	0,5…1,0	0,5…1,2	–
Свариваемые диаметры арматуры, мм:					
классов А1, В1	3…8	4…16	4…22	6…25	8…40
классов А2, В3	–	6…12	6…16	6…18	8…36
Масса, кг	280	600	1520	1000	1300
Габаритные размеры, мм	1150 × 420 × 1650	1350 × 460 × 1950	2330 × 620 × 2380	1580 × 520 × 2100	1700 × 650 × 2500

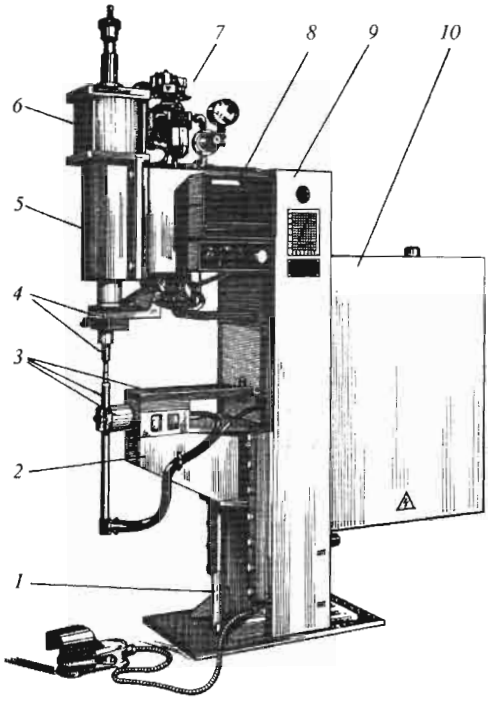


Рис. 5.47. Точечная машина прессового типа (с прямолинейным ходом электрода) МТ-3001

сварочного трансформатора *10*. Нижний кронштейн *2* с токоведущими элементами *3*, подсоединенными ко второй выходной колодке трансформатора, опирается на винтовой домкрат *1*, обеспечивающий плавное регулирование раствора машины. Регулятор цикла сварки *8* расположен на боковой стенке верхнего кронштейна или на крышке корпуса машины.

Аналогичные технические характеристики и конструкцию имеют машины, выпускаемые зарубежными фирмами: машины сер. PMP6-2/50...PMP6-2/150 производства «Nimak» и сер. GVP, UPL, TP, VP фирмы «Peco» (Германия); ZPDB 137 фирмы «Esab» (Швеция); KRW40...KRW120, изготовляемые фирмой «Kemppi» (Финляндия) и др.

Для сварки ответственных изделий из легированных сталей, алюминиевых, жаропрочных и титановых сплавов в авиационной и других отраслях промышленности применяются точечные машины постоянного тока типов МТВ-4801 и -8002, низкочастотные МТН-7501 и конденсаторные МТК-5502 и -8501. Они имеют технологичную, регулируемую в широком диапазоне форму униполярного импульса сварочного тока, крутопадающую нагрузочную характеристику, способствующую эффекту саморегулирования сварочного тока, и высокие динамические характеристики привода сварочной силы. Машины этой группы (табл. 5.33) потребляют из сети значительно меньшую мощность (например, конденсаторные машины в 6–8 раз) по сравнению с машинами переменного тока при сварке аналогичных деталей.

Маломощные точечные конденсаторные машины типа МТК-2002 (АО «ЭСВА». г. Калининград), МТК-2001, ТКМ-15 и -17 (разработчик ИЭС им. Е.О. Патона, Киев, Украина), а также монтажно-сварочные столы типа ССП и др. используются в приборостроении для сварки деталей из черных и цветных металлов толщиной 0,05...1,0 мм. Машины этого типа отличаются высокой стабильностью воспроизведения электрических и механических параметров процесса; в машинах МТК-2001 и -2002 предусмотрен подогрев деталей перед сваркой переменным током.

В точечных контактных машинах прессового типа однофазный (в машинах постоянного тока – трехфазный) понижающий **сварочный трансформатор** броневого типа (рис. 5.48) располагается внутри или сзади несущего корпуса. Первичная обмотка сварочного трансформатора состоит из отдельных дисковых катушек с отводами, выведенными на переключатель ступеней, позволяющий регулировать вторичное напряжение U_{20} и, следовательно, величину сварочного тока. Вторичный виток выполнен в виде отдельных охлаждаемых водой плоских секций, расположенных между дисками первичной обмотки. Такая компоновка гарантирует хорошее охлаждение сварочного трансформатора. Выводы вторичной обмотки трансформатора непосредственно или через блок выпрямителя (для машин постоянного тока) соединены с внешним контуром контактной машины.

В ряде серийных трансформаторов (ТК 0404 ЭП – ТК 4008 ЭП) первичная и вторичная обмотки заливаются эпоксидным компаундом в виде единого блока (см. рис. 5.48, *д*). В этом случае обмотки хорошо защищены от влаги и пыли, менее чувствительны к электродинамическим и тепловым воздействиям, более долговечны в эксплуатации, но не подлежат ремонту.

Внешний контур (рис. 5.49) представляет собой набор охлаждаемых водой токоведущих элементов (жестких и гибких шин, угольников, консолей или хоботов, электрододержателей, плит, электродов) и контактов между ними, обеспечивающих подвод тока к свариваемым деталям.

5.33. Технические характеристики точечных машин постоянного тока, низкочастотных и конденсаторных с прямолинейным ходом электродов

Характеристика	МТВ-4801	МТН-7501	МТК-5502	МТК-8501	МТК-2001
Наибольший вторичный ток, кА	48	75	55	85	20
Номинальный длительный вторичный ток, кА	14		12,5	16	–
Наибольшая мощность при коротком замыкании, кВ · А	350	315	70*	115*	2*
Наибольшая емкость батареи конденсаторов, мкФ	–		19 600	39 200	1600
Наибольшее напряжение зарядки конденсаторов, В			200…1000		
Сила сжатия, даН	100…1850	100…2200	100…1900	180…5500	8…90
Вылет, мм	500	800	600	1500	200
Раствор, мм	180…300	200…350	170…300	500	100
Ход верхнего электрода, мм, рабочий/полный	30/100			20/150	20
Свариваемые толщины, мм:					
низкоуглеродистой стали	0,5…5	0,6…6	–		
коррозионно-стойкой стали	0,5…2,5	0,4…4	0,3…1,2	0,3…2	0,1…1
титановых сплавов			0,3…1,5	0,5…2,5	
алюминиевых сплавов	0,5…1,5	0,5…3			–
медных сплавов (латуни)	0,5…2,5		–		
Масса, кг:					
машины	1570	4200	2700	6900	390
ШУ	105	110	95 + 500	95 + (500 × 2)	–
Габаритные размеры машины, мм	1850 × 800 × 2580	2830 × 970 × 2530	2140 × 725 × 2465	3700 × 1550 × 2850	1400 × 700 × 800

* Наибольшая мощность при зарядке конденсаторов.

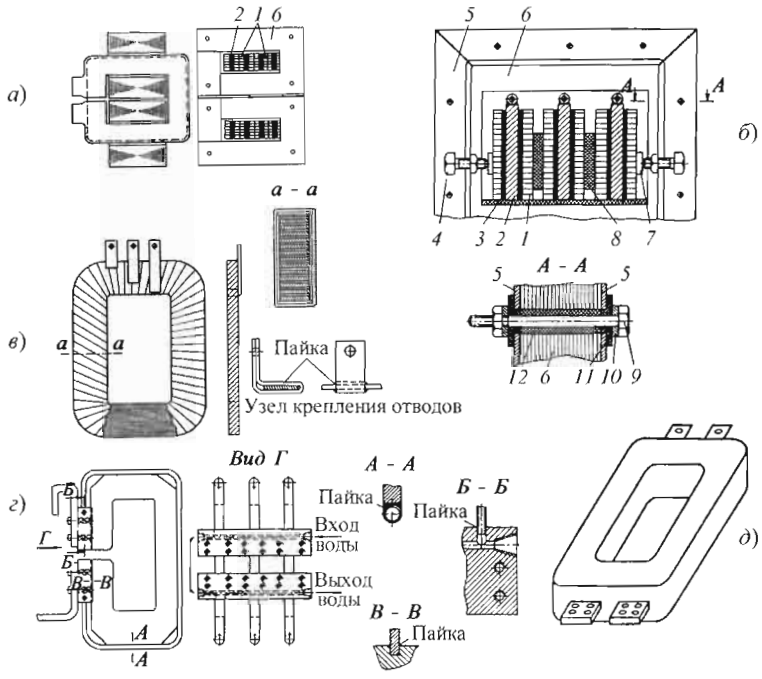


Рис. 5.48. Конструктивная схема (*а*) и компоновка (*б*) обмоток сварочного трансформатора броневого типа; конструкция дисковой катушки первичной обмотки (*в*) и плоских секций вторичного витка (*г*); блок обмоток, залитых эпоксидным компаундом (*д*):

1 – дисковые катушки первичной обмотки; *2* – плоские секции вторичного витка; *3* – изоляционные прокладки; *4* – прижимные болты; *5* – рама трансформатора; *6* – магнитопровод трансформатора; *7* – упорные шайбы; *8* – распорные клинья; *9* – стяжные болты; *10* – шайбы; *11*, *12* – изоляционные шайбы и втулки

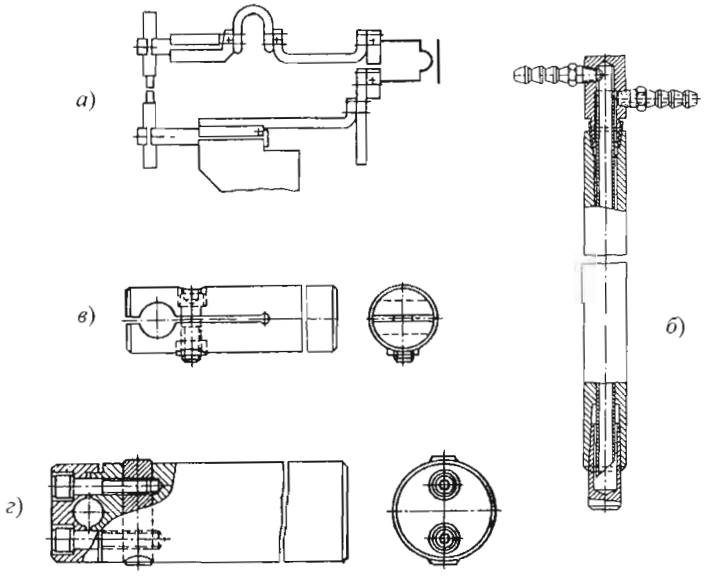


Рис. 5.49. Типовой внешний контур точечной машины (*а*); конструкция электрододержателя (*б*) и консолей (*в*, *г*)

Для охлаждения элементов внешнего контура, вторичной обмотки сварочного трансформатора и тиристоров контактора целесообразно предусматривать замкнутую систему водоснабжения (качество воды по ГОСТ Р 51232–98).

Конструкция и протяженность элементов внешнего контура выбираются в соответствии с размерами свариваемого узла. Сечение элементов контура S, мм^2, и площадь контактов рассчитываются по допустимой плотности тока j, А/мм^2 , зависящей от материала и системы охлаждения (табл. 5.34):

$$S = I_{2\,\text{дл.ном}} / j, \qquad (5.17)$$

где $I_{2\,\text{дл.ном}}$ – номинальный (расчетный) длительный ток (при ПВ = 100 %), А.

Сечения элементов, передающих силу, проверяются на жесткость по допустимому смещению электродов (ГОСТ 297–80).

Выбранные размеры внешнего контура, материал и сечение элементов, число контактов и их состояние, а также вид сварочного тока определяют активное и индуктивное сопротивления контактной машины и, следовательно, ее технологические и энергетические характеристики.

5.34. Допустимая плотность тока в элементах внешнего контура

Элемент внешнего контура	Материал	Условия охлаждения	Допустимая плотность тока, А/мм^2 (ПВ = 100 %)	Примечание
Свечи (электрододержатели)	Медь М1	Интенсивное водяное	12...18	–
Электроды	БрХ и другие материалы		20...30	В сплошном сечении
			30...45	В полом сечении
Гибкие шины	Лента МГМ	Воздушное	2...2,5	–
		Воздушное, по краям колодки охлаждаемое водой	2,5...4	
Круглые хоботы	Медь М1, БрХ и другие материалы	Воздушное	1...2	
		Воздушное, по концам в местах зажимов водяное	2...3	
		Водяное	3...5	
Сплошные шины	Медь М1	Воздушное	1...2	
		Водяное	2,5...4	
Медное литье с залитыми трубками охлаждения	Медь М3		2...3	
Неподвижные контактные поверхности	Медь	Воздушно-водяное	0,5...1	Одна из соприкасающихся частей охлаждается водой
Скользящие контакты шовных машин	Медь, БрХ и другие материалы	Водяное	0,5...2	Соприкасающиеся части охлаждаются водой, проходящей в каналах
			До 12	Работают в воде
Кабели подвесных машин	Медь М1		15...50	То же

Пневматический привод силы сжатия точечных контактных машин прессового типа располагается на верхнем кронштейне корпуса. На рис. 5.50 приведена схема, а на рис. 5.51, *а* показана конструкция унифицированного пневмопривода с силой сжатия электродов до 2500 даН. Пневмопривод имеет трехкамерный цилиндр и направляющие трения качения. Шток нижнего (рабочего) поршня связан с ползуном через блок тарельчатых пружин. Величина хода рабочего поршня регулируется установкой верхнего дополнительного поршня в необходимое положение с помощью гайки, навинчивающейся на его шток.

При раздельном регулировании давления воздуха в средней и нижней камерах цилиндра и значительной разнице площадей нижней и верхней поверхностей рабочего поршня может быть установлена любая сила сжатия электродов. Ковочная сила обеспечивается при быстром выпуске воздуха из нижней камеры цилиндра.

Мощные точечные машины с силой сжатия до 6000 даН (например, МТК-8501) оснащаются двухдиафрагменными пневмоприводами с электродвигательным приводом дополнительного хода (рис. 5.51, *б*).

Для подготовки воздуха и управления его распределением используются (рис. 5.52) фильтры-влагоотделители, редуцирующие клапаны, маслораспылители, дроссели, выхлопные клапаны, электропневматические распределители и электропневматические регуляторы (обеспечивающие давление сжатого воздуха, пропорциональное управляющему току).

Кроме машин прессового типа для точечной сварки выпускаются **машины радиального типа** переменного и постоянного тока отечественного производства (табл. 5.35) и ряда зарубежных фирм: «Telwin» (Италия) – машины типа PTE (PCP) 18-28; «Dalex» – SF, SL и «Peco» – PFU (Германия) и др. В радиальных машинах (рис. 5.53) верхний электрод закреплен на качающемся токоподводе с приводом, расположенным внутри корпуса. Такая компоновка позволяет освободить пространство над верхним электродом для размещения деталей свариваемых изделий сложной конфигурации. По конструкции радиальные машины проще, экономичнее в изготовлении, менее металлоемки, чем аналогичные машины прессового типа. В радиальных машинах небольшой мощности с педальным приводом силы сжатия корпусом может служить рама сварочного трансформатора.

Для точечной сварки крупногабаритных изделий в труднодоступных местах, а также объемных листовых и стержневых конструкций вместо стационарных применяются **подвесные контактные машины.** Они оснащены источниками переменного тока промышленной частоты МТП-1110, МТП-1111, МТП-1409 (табл. 5.36) или источниками постоянного тока (МТПВ-802, МТПВ-1207), в том числе с промежуточным звеном повышенной частоты (МТПВ-1201).

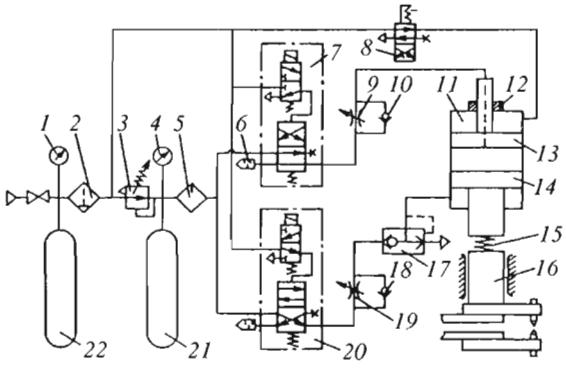


Рис. 5.50. Схема пневматического привода сжатия точечной машины с проковкой и дополнительным ходом верхнего электрода:

1, *4* – манометры; *2* – фильтр-влагоотделитель; *3* – редукционный клапан; *5* – маслораспылитель; *6* – глушитель; *7*, *20* – пневмораспределитель с электропневматическим управлением; *8* – ручной двухходовой кран; *9*, *19* – дроссель; *10*, *18* – обратный клапан; *11* – пневмоцилиндр; *12* – регулировочная гайка; *13* – поршень дополнительного хода; *14* – рабочий поршень; *15* – упругий элемент; *16* – направляющее устройство; *17* – выхлопной клапан; *21*, *22* – соответственно промежуточный и сетевой ресиверы

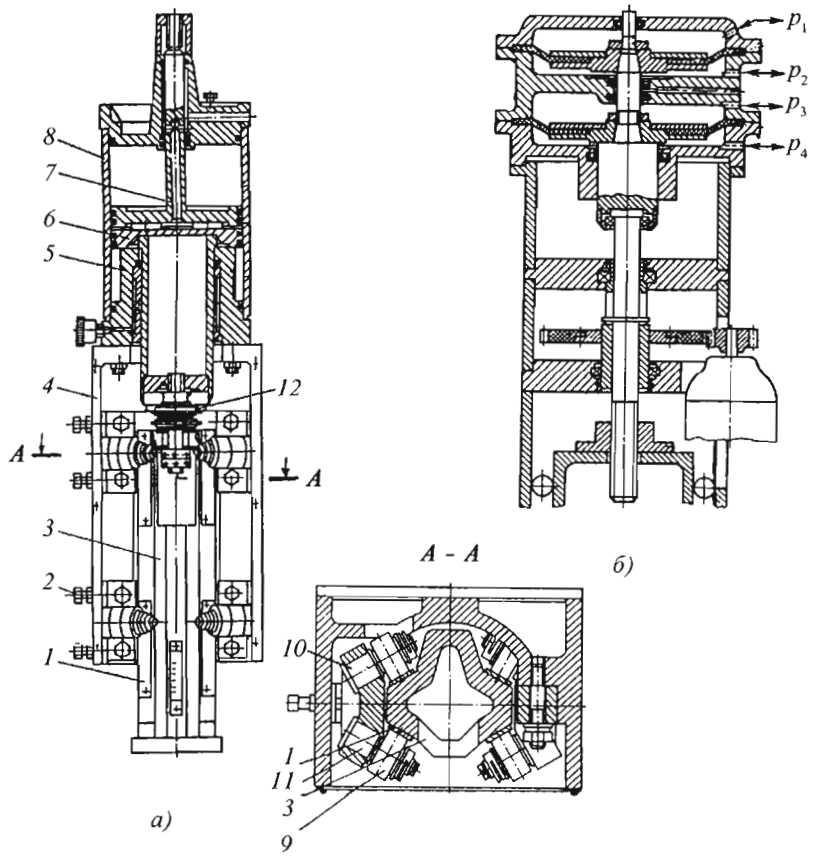


Рис. 5.51. Конструкция унифицированного пневмопривода с направляющими трения качения (*а*) и двухдиафрагменный привод с электродвигателем дополнительного хода (*б*):
1 – термообработанные планки; *2* – регулировочный винт; *3* – ползун; *4* – направляющее устройство; *5* – нижняя крышка цилиндра; *6* – рабочий поршень; *7* – поршень дополнительного хода; *8* – трехкамерный пневмоцилиндр; *9* – роликовые опоры; *10* – ось; *11* – эксцентрик; *12* – блок тарельчатых пружин

Сварочный трансформатор и отдельно расположенные клещи (рис. 5.54), связанные с трансформатором гибким водоохлаждаемым кабелем, подвешены на специальном балансировочном коромысле, обеспечивающем необходимую маневренность сварочного инструмента (клещей). На рис. 5.55 приведены некоторые типы клещей с пневматическим и гидравлическим приводами сжатия, с прямолинейным и радиальным ходом электродов, в том числе для односторонней одно- и двухточечной сварки. Отечественные и зарубежные фирмы выпускают также подвесные точечные машины в виде клещей со встроенным сварочным трансформатором (рис. 5.56). Например, фирма «Dalex» изготовляет клещи со встроенным трансформатором для сварки листов из низкоуглеродистой стали толщиной до 4 мм. Привод силы сжатия пневматический. Наибольший вторичный ток 25 кА; максимальный вылет 550 мм.

В роботизированных комплексах для точечной сварки клещи закрепляются на «кисти» робота. В этом случае целесообразно использовать источник питания с промежуточным звеном повышенной частоты и выпрямлением тока во вторичной цепи, позволяющий значительно уменьшить массу и габаритные размеры сварочного трансформатора. Крепление и механизм клещей должны позволять сварочным электродам при их перемещении самоустанавливаться относительно кромок свариваемого изделия.

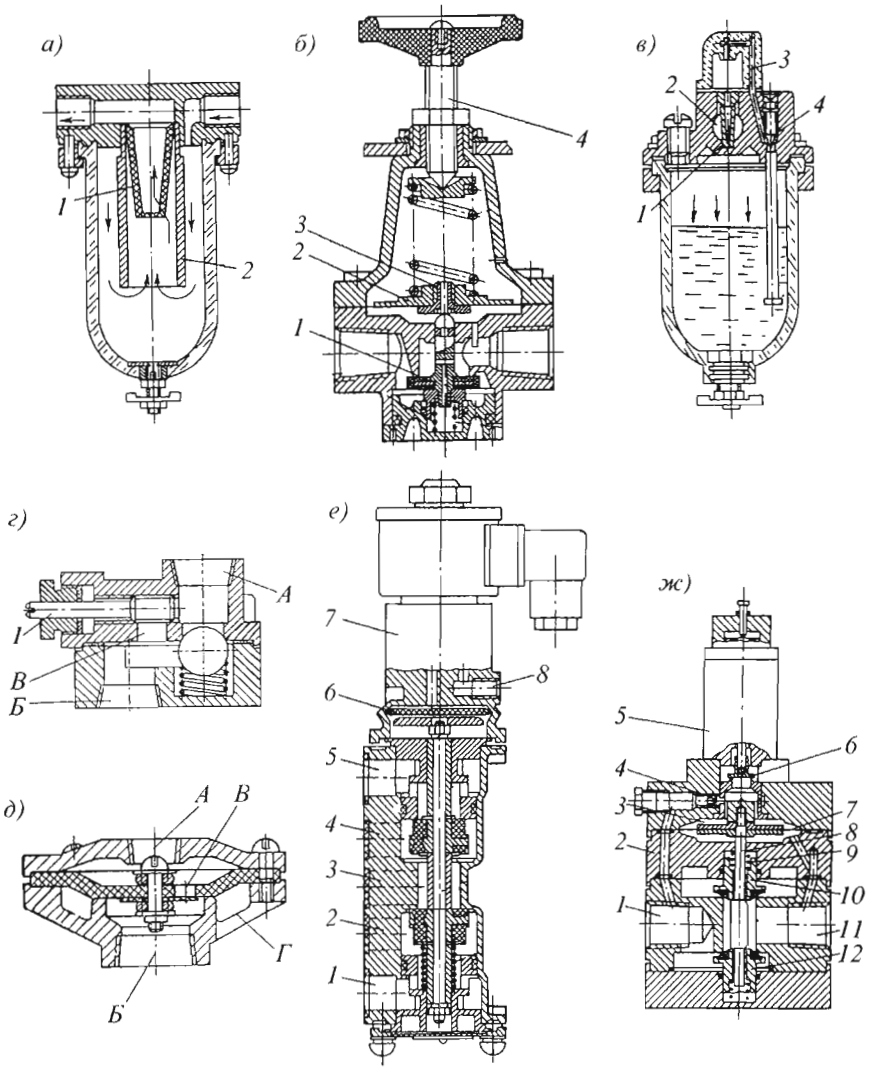


Рис. 5.52. Пневматическая аппаратура контактных машин:

а – фильтр-влагоотделитель (*1* – пористый конус-фильтр; *2* – направляющий стакан);
б – редукционный клапан (*1* – регулирующий клапан; *2* – мембрана;
3 – клапан сброса воздуха в атмосферу; *4* – регулировочный винт);
в – маслораспылитель (*1* – пористая насадка; *2* – отверстие для прохода воздуха; *3* – канал для подвода масла;
4 – дроссель); *г* – дросселирующий клапан (*А* – *Б* свободный вход воздуха в пневмоцилиндр;
Б – *В* – *А* – выход воздуха через регулируемые винтом *1* отверстия);
д – выхлопной клапан; *е* – пневмораспределитель с электропневматическим управлением
(*1*, *5* – каналы, связанные с атмосферой; *2*, *4* – каналы, связанные с камерами пневмоцилиндра;
3 – канал, соединенный с воздушной сетью; *6* – диафрагма;
7 – управляемый электропневматический клапан; *8* – подвод воздуха управления);
ж – электропневматический регулятор (*1*, *11* – каналы, связанные с воздушной сетью и пневмоцилиндром;
2 – корпус; *3* – междроссельная камера; *4* – дроссель постоянного сечения;
5 – управляемый электромагнит постоянного тока пропорционального типа;
6 – дроссель переменного сечения типа сопло – заслонка; *7* – мембрана; *8* – шток; *9* – пружина;
10, *12* – клапаны выпуска и впуска соответственно)

5.35. Технические характеристики точечных машин переменного и постоянного тока с радиальным ходом электрода

Характеристика	МТР-1101*	МТР-1701	МТР-2401	МТР-1601*	МТР-1801	МТВР-4801
Наибольший вторичный ток, кА	11	17	24	16	18	48
Номинальный длительный вторичный ток, кА	2,9	3,2	5,0	3,6	3,6	14
Наибольшая мощность при коротком замыкании, кВ · А	35	75	140	75	90	410
Сила сжатия, даН	70	100…500	130…630	30…250	100…650	120…1800
Вылет, мм	200	400	500	200…500	180…960	800…1200
Раствор, мм	130…325	150	180	135	150…330	140…390
Ход верхнего электрода, мм	20	30		5…20	5…30	18…200
Свариваемые толщины, мм:						
низкоуглеродистой стали	0,2…2,0	0,5…5,0	0,5…6,0	0,5…3,5	0,5…5,0	0,3…3,0
коррозионностойкой стали	–			0,5	0,5…1,0	0,3…2,5**
Масса, кг	175	325	410	200	340	2700 + 105
Габаритные размеры машины, мм	495 × 350 × 612	1210 × 450 × 1255	1315 × 450 × 1255	1070 × 300 × 1310	1065 × 460 × 1440	3100 × 950 × 1650 (+ШУ)
Изготовитель	ЗАО «Искра», Свердловская обл.			ОАО «Завод "Электрик"», г. Санкт-Петербург		

* С педально-пружинным приводом силы сжатия.
** Возможна сварка алюминиевых сплавов толщиной до 1,5 мм.

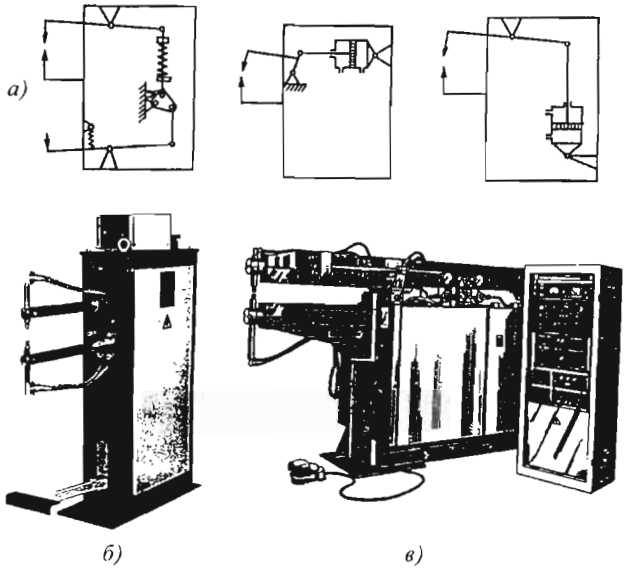


Рис. 5.53. Варианты кинематических схем (*а*) и внешний вид точечных машин с радиальным ходом электрода типов МТР-1601 (*б*), МТВР-4801 (*в*)

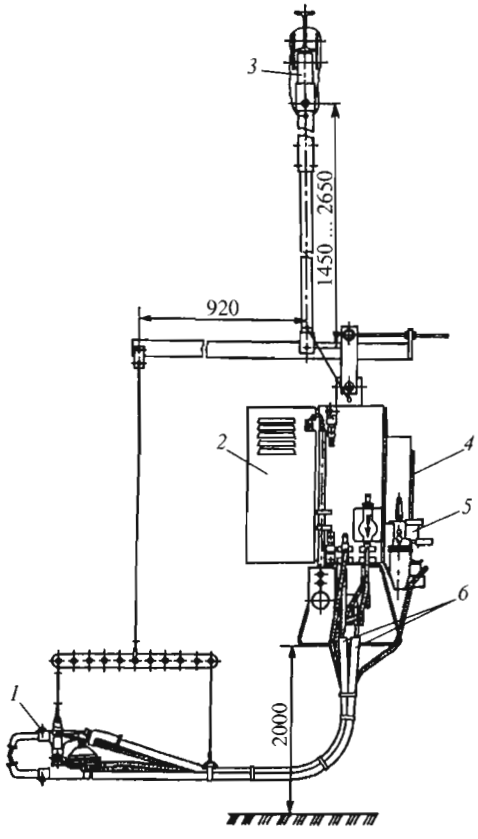


Рис. 5.54. Подвесная точечная машина типа МТП-1110:
1 – сварочные клещи;
2 – сварочный трансформатор;
3 – шарнирная подвеска;
4 – аппаратура управления;
5 – пневмоаппаратура;
6 – водоохлаждаемые токоведущие кабели

5.36. Технические характеристики точечных подвесных машин переменного тока

Характеристика	МТП-1110			МТП-1111		МТП-1409		
Наибольший вторичный ток, кА	11					14		
Номинальный длительный вторичный ток, кА	3,6					5,6		
Масса машины, кг	300			340		440		
Тип клещей	КТП-8-1	КТП-8-6	КТП-8-7	КТГ-8-1	КТГ-8-2	КТГ-12-3-2	КТГ-12-3-1	КТГ-15-4
Привод клещей	Пневматический			Пневмогидравлический				
Характер движения электродов	Радиальный	Прямолинейный		Радиальный	Прямолинейный	Радиальный	Прямолинейный	
Наибольшая сила сжатия, даН	260	430	345	270		625		
Номинальный вылет, мм	205	30	35	205	104	300	150	37
Номинальный ход электрода, мм	12	35	20	12	35	14	30	
Свариваемые толщины, мм	0,5…2,0					0,5…2,5	0,5…4,0	
Диаметр свариваемой арматуры класса А240, мм	0,5…10	0,5…16		0,5…6,0		4…10	4…12	4…16
Масса клещей, кг	16	11,5	6	16	15	21	17	13

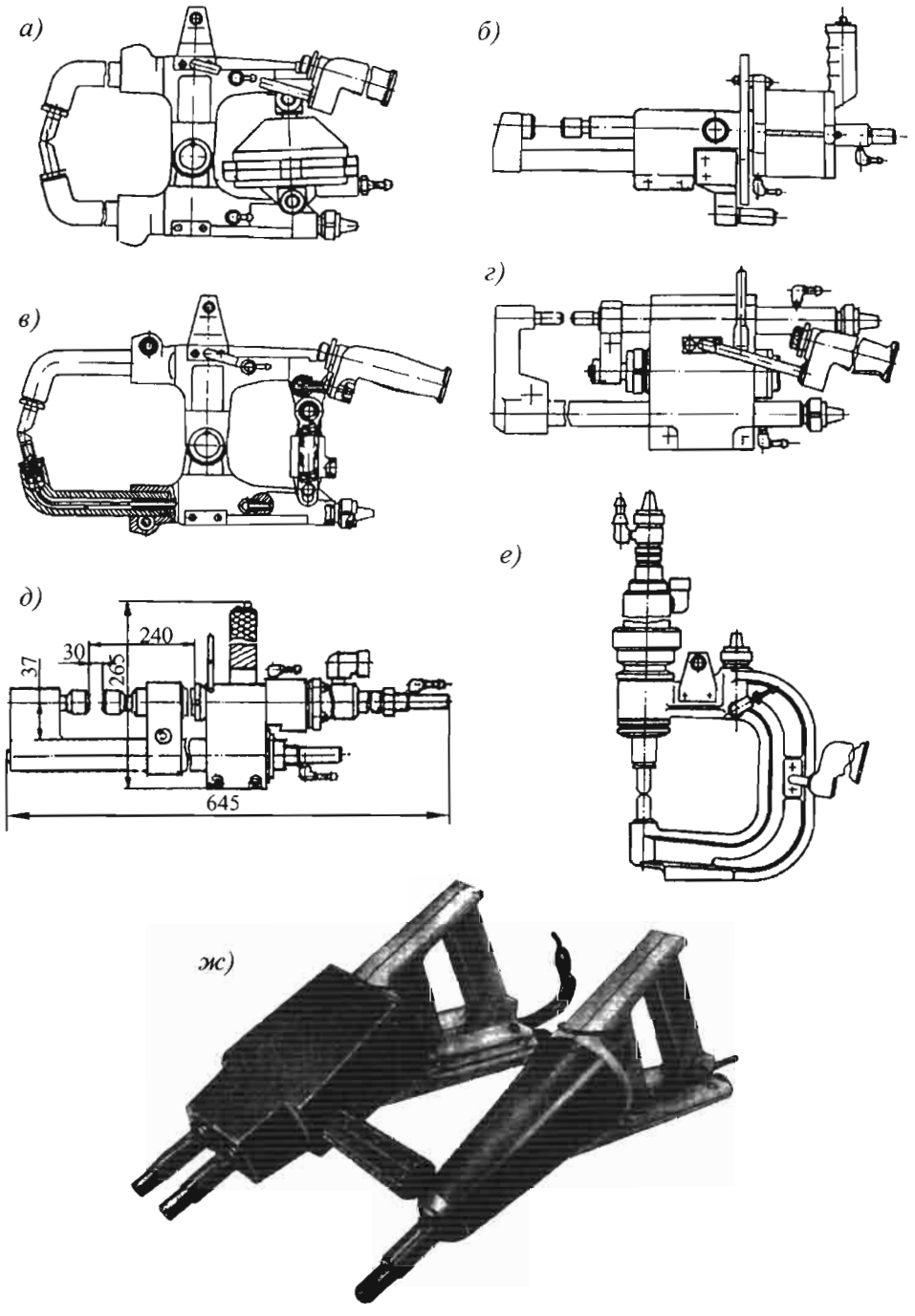


Рис. 5.55. Типы сварочных клещей подвесных точечных машин с пневматическим [КТП-8-1 (*а*), КТП-8-6 (*б*)] и гидравлическим приводами сжатия [КТГ-8-1 (*в*), КТГ-8-2 (*г*), КТГ-15-4 (*д*), КТГ-12-3-1 (*е*)]; ручные пистолеты для односторонней одно- и двухточечной сварки (*ж*)

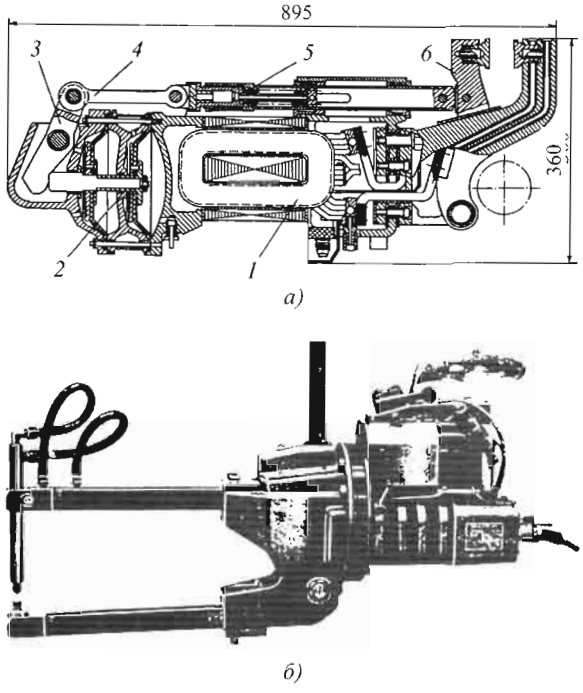


Рис. 5.56. Сварочные клещи со встроенным трансформатором МТП-2401 (*а*)**, 3228 «Dalex»** (*б*)**:**
1 – сварочный трансформатор; *2* – двухдиафрагменный пневмопривод сжатия; *3* – рычаг; *4* – серьга; *5* – пружина возврата; *6* – подвижный электрододержатель

Для индивидуальных потребителей и небольших мастерских отечественными (АО «Аэроэлектрик», Москва; ОАО «Псковский завод ТЭСО») и зарубежными фирмами («Kemppi», Финляндия, «ARO», Франция и др.) разработана серия клещей с ручным приводом сжатия на 40...120 даН и сварочный ток 5000...7000 А для сварки на мягких режимах низкоуглеродистой стали толщиной до 2,0 мм (рис. 5.57).

Специальные точечные машины (линии, комплексы) предназначены для сварки определенных или группы однотипных изделий применительно к массовому и крупносерийному производству (автомобильная промышленность, вагоностроение, строительная индустрия и др.). Конструктивное оформление специального оборудования определяется прежде всего конфигурацией и габаритными размерами свариваемых деталей, числом и расположением сварных точек, технологией сборки и сварки, необходимостью механизации и принятой компоновкой машины. Основой компоновки многоэлектродной машины является ее электросварочная часть, состоящая из типовых унифицированных сварочных трансформаторов, приводов силы сжатия с электрододержателями и электродами, токоведущих элементов, связывающих выводные колодки сварочных трансформаторов с электрододержателями.

На рис. 5.58, *а* показана простейшая схема компоновки многоэлектродной машины для сварки плоских деталей с двусторонним токоподводом: на неподвижных рамах *1* и *3* установлены сварочные трансформаторы *2* и *4* и приводы сварочного усилия *5* и *6* (механизмы перемещения и фиксации свариваемых деталей не показаны).

Возможна конструктивная схема с односторонним токоподводом (рис. 5.58, *б*) и использованием сварочных клещей различной конструкции (рис. 5.58, *в*). Доступ сварочных электродов *2* внутрь коробчатого изделия, расположенного на каретке машины, обеспечивается компоновкой, представленной на рис. 5.58, *г*. Верхняя балка *3* неподвижна, а нижняя *1* выполнена поворотной. При повороте нижние электроды *2* выводятся из полости свариваемого изделия *4* и не препятствуют его шаговому перемещению.

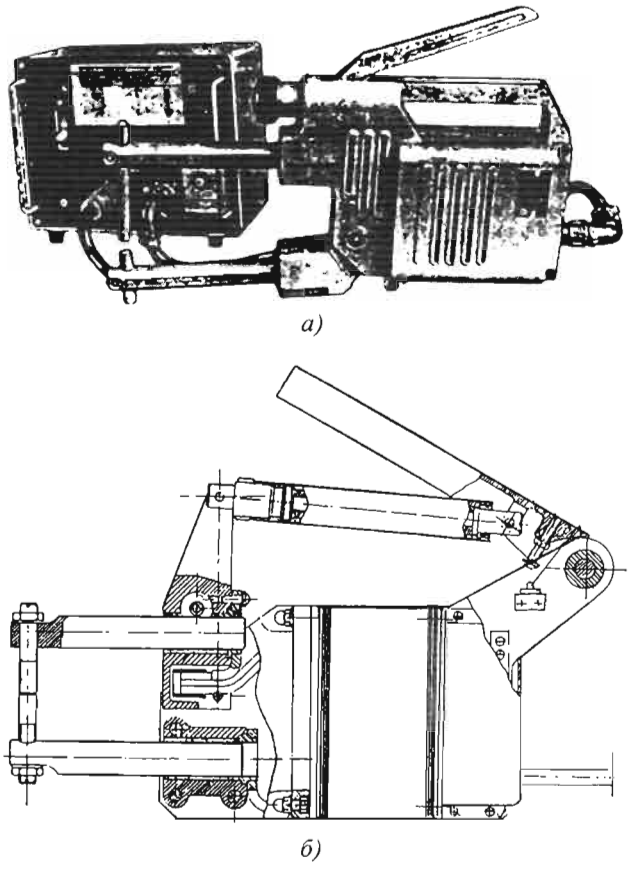


Рис. 5.57. Маломощные клещи с ручным приводом сжатия:
а – КСБ-03; *б* – МТ5-02

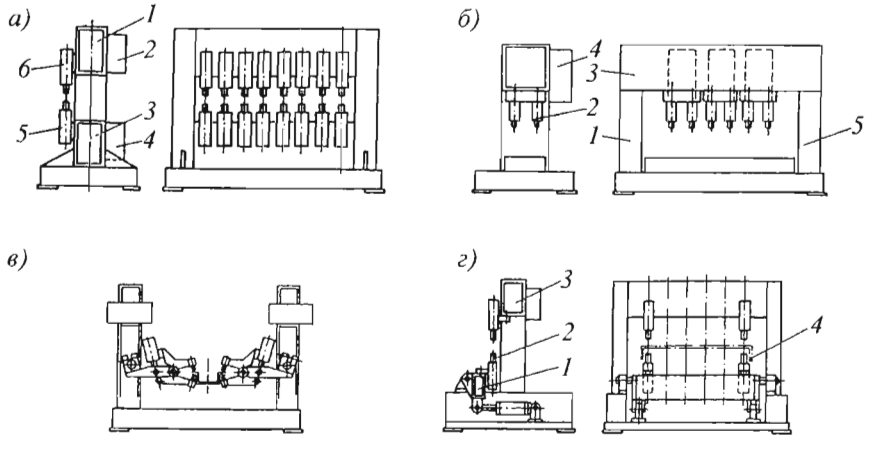


Рис. 5.58. Схемы компоновки многоэлектродных машин

В многоэлектродных машинах широко используются малогабаритные унифицированные сварочные трансформаторы типов ТК-301, -302, -401, -501 (табл. 5.37). Особенностями конструкции трансформаторов являются их вытянутая форма с малым поперечным сечением (184 × 235 мм) и наличие двух раздельных вторичных витков, позволяющих питать одновременно две пары электродов.

Конструктивные схемы электрододержателей показаны на рис. 5.59. Большинство из них представляет собой сложную деталь с двумя коническими отверстиями, расположенными соосно или с небольшим эксцентриситетом: одно для крепления электрода, другое для крепления электрододержателя на штоке привода силы сжатия. В электрододержателе имеются внутренние каналы и резьбовые отверстия, обеспечивающие подвод и отвод охлаждающей воды. Одна поверхность электрододержателя должна быть хорошо обработана для крепления гибкой шины.

Сжатие свариваемых деталей в многоэлектродных машинах осуществляют компактные пневматические и гидравлические приводы (пистолеты). На рис. 5.60, *а*, *б* показаны двух- и четырехступенчатый пневмоприводы, обеспечивающие силу на штоке 150... 400 даН для двухступенчатого и 300...750 даН для четырехступенчатого пневмопривода при длине цилиндров 150...300 и 300...600 мм соответственно. Диаметры пневмоцилиндров 50...75 мм, что позволяет выполнить точечную сварку с шагом 60...80 мм. Гидравлический привод силы сжатия (см. рис. 5.60, *в*, *г*) рассчитан на работу с избыточным давлением масла до 10 МПа. Гидроприводы подобного типа обеспечивают минимальный шаг между точками 50 мм. Применение гидравлических пистолетов предполагает наличие либо насосной станции, либо пневмогидравлического преобразователя давления (рис. 5.61).

Отечественные и зарубежные фирмы для компоновки электросварочной части многоэлектродных машин используют модули (рис. 5.62), состоящие из трансформаторов и закрепленных на них сварочных пистолетов или клещей.

На базе многоэлектродных точечных машин отечественными (ОАО «Завод "Электрик"») и зарубежными фирмами («Schlatter», Швейцария; «Ideal», Германия и др.) выпускаются машины и линии для сварки широкой гаммы типоразмеров плоских сеток и объемных стержневых каркасов. Например, машина МТМ-166 (рис. 5.63) обеспечивает сварку арматурных сеток шириной до 2650 мм из прутков диаметром 3...8 мм, осуществляет автоматическую подачу и правку поперечных и продольных прутков из бухт, резку поперечных прутков. Машина потребляет мощность 300 кВ · А, имеет 13 трансформаторов, каждый из которых обеспечивает сварку двух точек по схеме с односторонним подводом тока.

5.37. Технические характеристики трансформаторов

Тип трансформатора	Мощность при ПВ = 50 %, кВ · А	Пределы регулирования вторичного напряжения, В	Длительный ток вторичной обмотки (одного витка), А	Ток вторичной обмотки при ПВ = 50 %, А	Габаритные размеры, мм	Масса, кг
ТК-301	40	3...5	2800	8000	184 × 235 × 470	80
ТК-302	63	5...7	3200	9000	184 × 235 × 560	100
ТК-401	100	7...10	3550	10 000	184 × 235 × 695	135
ТК-501	180	9,6...14	4550	12 800	300 × 320 × 785	270
ТК-20	20	3,6	4000	5650	112 × 150 × 225	17
ТК-25	25	4,5			112 × 150 × 250	20
ТК-32	32	5,6			112 × 150 × 275	22

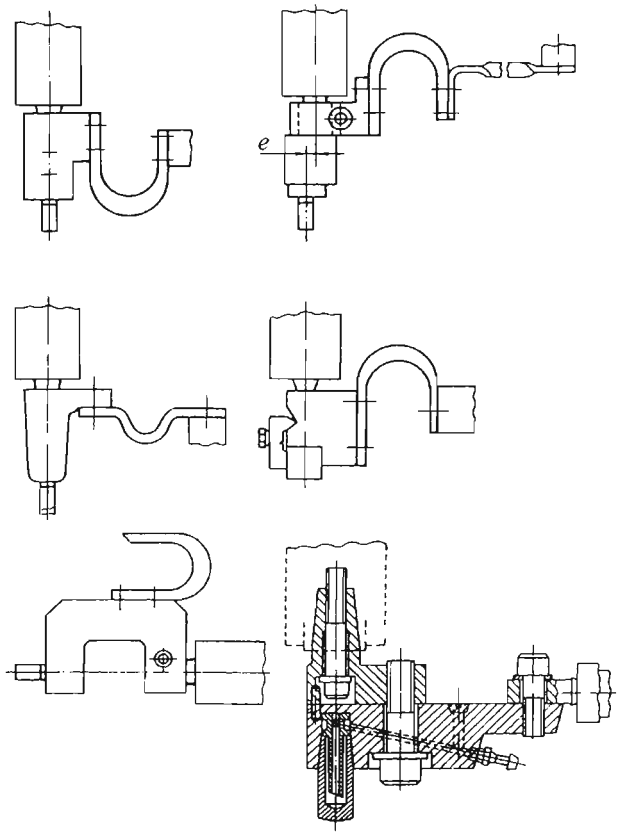


Рис. 5.59. Конструктивные схемы электрододержателей многоэлектродных машин

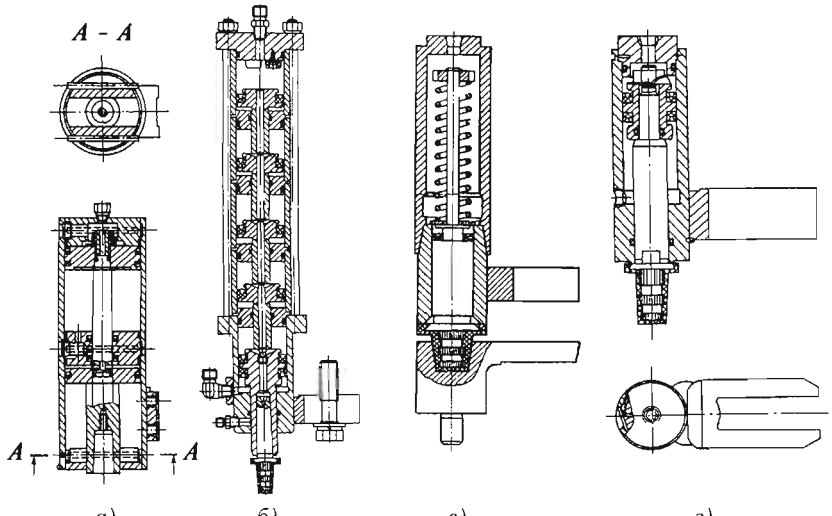


Рис. 5.60. Двух- и четырехступенчатый пневмоприводы (*а*, *б*) **многоэлектродных машин; варианты гидропривода** (*в*, *г*)

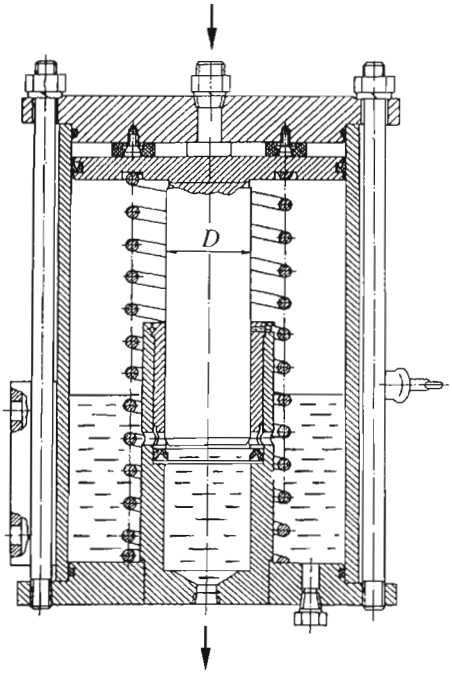


Рис. 5.61. Пневмогидравлический преобразователь давления

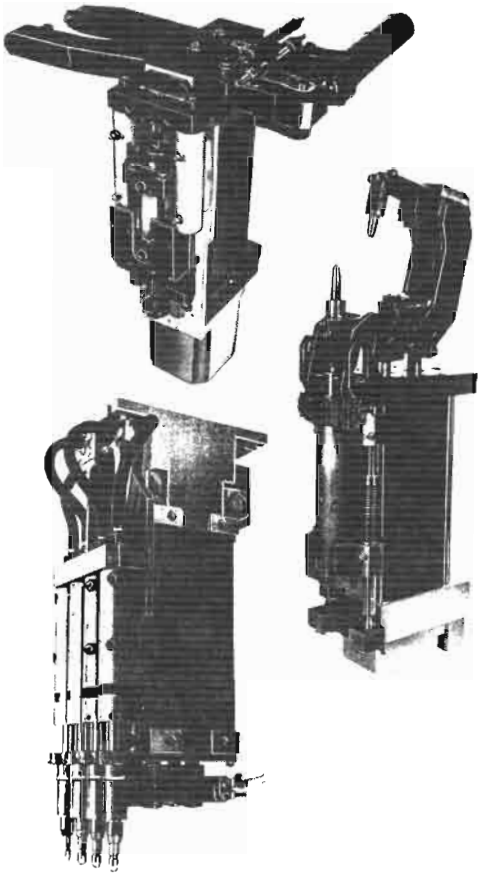


Рис. 5.62. Сварочные модули для компоновки многоэлектродных машин

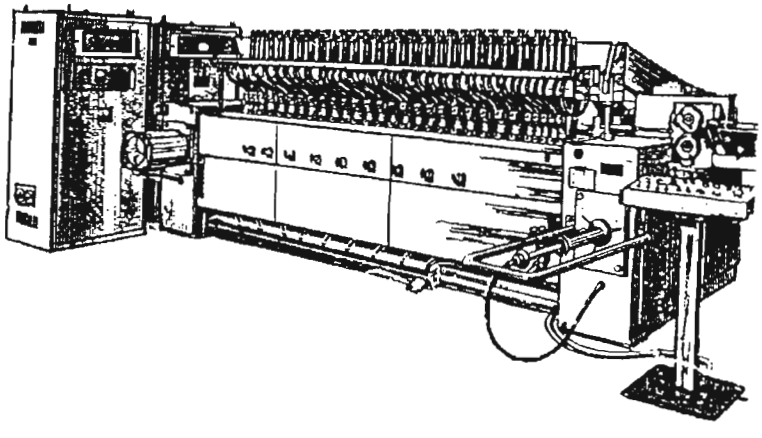


Рис. 5.63. Многоэлектродная точечная машина МТМ-166 для сварки плоских сеток

5.15. МАШИНЫ РЕЛЬЕФНОЙ СВАРКИ

Компоновка и конструкция основных узлов машин для рельефной сварки такие же, как у точечных машин прессового типа. Отличия заключаются в конструкции электродов, выполненных в виде двух плит с Т-образными пазами для установки приспособлений и закрепления свариваемых деталей; повышенном требовании к жесткости корпуса и ограничении вылета (расстояние от корпуса машины до центра плиты ≤300 мм); наличии устройств, регулирующих параллельность электродных плит и обеспечивающих установочный ход нижней плиты до 200 мм.

Образование соединения при рельефной сварке сопровождается значительным перемещением верхнего электрода, вызванного смятием рельефов. При этом из-за инерционности массивных подвижных частей привода силы сжатия, их трения в направляющих и возможного заклинивания, а также залипания манжет поршня возможно резкое снижение силы сжатия в начале процесса сварки, приводящее к выплескам и ухудшению качества соединений. В связи с этим в рельефных машинах необходимо предусматривать минимальную массу подвижных частей, опоры качения в направляющих, пружинную развязку между штоком и ползуном. Этим требованиям отвечает пневмопривод, приведенный на рис. 5.51, *а*. Целесообразно также уменьшение скорости смятия рельефов за счет плавного нарастания сварочного тока длительностью $(0{,}2\ldots0{,}3)t_{св}$.

Для сварки деталей из низкоуглеродистых сталей толщиной >0,5 мм, в том числе закладных деталей арматуры железобетона, могут быть использованы отечественные рельефные машины переменного тока типов МР-4020 (рис. 5.64), МР-6924, МР-8010, а также рельефные машины зарубежных фирм: «Dalex», «Kemppi», «ARO» и др.

Сварка изделий ответственного назначения из коррозионно-стойких и жаропрочных сталей и сплавов выполняется на мощных рельефных машинах постоянного тока типов МРВ-11001, МРВ-19001 и низкочастотных МРН-24009 (табл. 5.38). Использование машин постоянного тока позволяет снизить потребляемую мощность, улучшить распределение тока при групповой рельефной сварке, обеспечить сварку деталей малых толщин и узлов с ограниченной отбортовкой без выплесков.

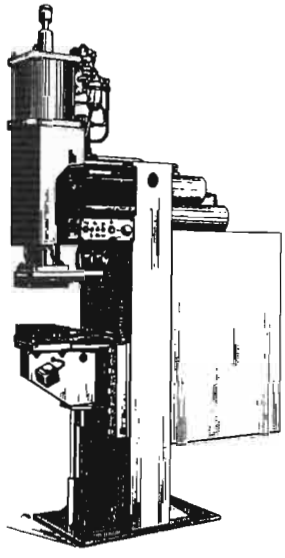


Рис. 5.64. Машина для рельефной сварки типа МР-4020

Машина МРВ-19001 имеет два трансформаторно-выпрямительных блока, расположенных по бокам жесткого корпуса, выполненного в виде скобы. Положительной особенностью конструкции внешнего контура машины является схема подвода тока к электродным плитам с разных сторон: к верхней плите сзади, а к нижней плите спереди. Такая схема токоподвода обеспечивает равномерное распределение сварочного тока между рельефами независимо от их расстояния до источника питания, что особенно важно при сварке изделий с большим числом рельефов, расположенных на значительном расстоянии друг от друга. Нагрузочные характеристики МРВ-19001 приведены на рис. 5.65; машина обслуживается шкафом управления ШУ-347.

Рельефные конденсаторные машины типа МРК-3501, а также специальные полуавтоматы типов ПРК-4001, ПРК-12002 используются для сварки изделий относительно малых толщин (до 0,5 мм) по развитым разомкнутым или кольцевым (прямоугольным) рельефам, например при герметизации корпусов полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. Значительная протяженность рельефов (≥100 мм) требует больших токов (до 150 кА). Эта задача успешно решается конденсаторными источниками тока при длительной потребляемой от сети мощности, не превышающей 50 кВ · А. Двухимпульсный разряд батареи

5.38. Технические характеристики машин для рельефной сварки

Характеристика	МР-4020	МР-6924	МРН-24009	МРВ-11001	МРК-3501	ПРК-12002
Наибольший вторичный ток, кА	40	69	240	110	35	120
Номинальный длительный вторичный ток, кА	11	18	32	28	Нет данных	
Наибольшая мощность при коротком замыкании, кВ · А	250	680	1240	Номинальная 400	5*	40*
Наибольшая запасаемая энергия, Дж	–				2650	32 000
Наибольшая емкость батареи конденсаторов, мкФ					67 500	404 000
Напряжение на конденсаторах, В					100…350	150…400
Сила сжатия, даН	130…1870	200…3030	200…5000	360…3500	40…500	200…1800
Вылет, мм	300				–	
Раствор, мм	130…330	115…330	90…450	50…450		
Ход верхнего электрода, мм, рабочий/полный	30/100	30/120	60/80	200	70	
Масса машины/ШУ, кг	980	1300	5400/250	4600	770	4800/122 + 310
Габаритные размеры машины, мм	1410×560×2380	1700×650×2500	2150×1100×3360 (+ШУ)	1550×1100×3300	1190×1100×1810	2165×2710×1970 (+2ШУ)

* Максимальная мощность при зарядке конденсаторов.

Примечание. На машине МРН-24009 возможна одновременная сварка до 10 рельефов при толщине низкоуглеродистой стали 1,0 мм и пяти рельефов при толщине 4,0 мм.

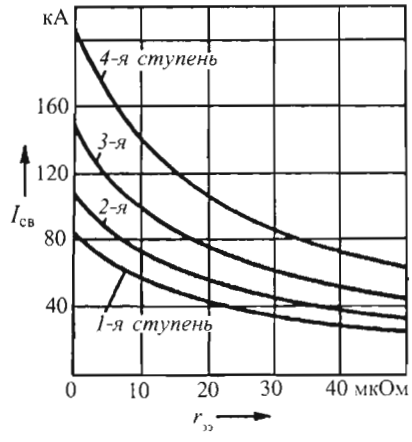


Рис. 5.65. Нагрузочная характеристика рельефной машины МРВ-19001

конденсаторов обеспечивает широкое регулирование формы сварочного импульса (см. рис. 5.26) и в совокупности с проковкой повышает стабильность и качество соединений. На рис. 5.66, *а* приведен общий вид машины МРК-3501. Электродный узел (см. рис. 5.66, *б*) обеспечивает высокую подвижность верхнего электрода во время сварки за счет направляющих трения качения и блока тарельчатых пружин, а также установку электродов различной конструкции на торцовые поверхности электрододержателей с помощью накидных гаек.

Машина оснащена скафандром для создания контролируемой атмосферы в зоне сварки, а полуавтоматы – поворотными столами для автоматизации перемещения герметизируемых корпусов от позиции их загрузки в специальные электродные устройства к позициям сварки и выгрузки. В табл. 5.38 приведены технические характеристики рассмотренных конденсаторных рельефных машин.

Для тавровой сварки шпилек и штифтов к плоской поверхности листов в заводских и монтажных условиях ряд зарубежных фирм, в частности немецкая «Soyer», выпускают компактное оборудование для ударно-конденсаторной (конденсаторно-искровой) сварки. Например, установка BMS-8N (фирма «Soyer») обеспечивает приварку шпилек и штифтов из стали и цветных металлов диаметром 3...8 мм к листам толщиной ≥0,5 мм без следов на лицевой поверхности листа. Установка имеет батарею конденсаторов емкостью 66 000 мкФ, напряжение зарядки 50...200 В, время сварки 1...3 мс.

5.16. МАШИНЫ ШОВНОЙ СВАРКИ

Машины шовной сварки применяются при соединении деталей внахлестку герметичным швом (в редких случаях используются при сварке отдельными точками с определенным шагом и высокой производительностью). В дополнение к классификации, приведенной в разд. 5.10, шовные машины различаются:

– по расположению роликов относительно корпуса машины – для поперечной и продольной сварки;

– по характеру пропускания тока – с непрерывным и прерывистым пропусканием тока;

– по способу передачи крутящего момента на сварочные ролики – с осевым приводом одного или обоих роликов, приводом обоих роликов с помощью шарошек, вращением роликов за счет трения о движущееся изделие или о неподвижное изделие при поступательном перемещении каретки с роликом;

– по характеру перемещения свариваемых деталей – с непрерывным и прерывистым (шаговым) перемещением;

– по способу подвода тока к свариваемым деталям – с дву- и односторонним токоподводом.

К шовным машинам общего назначения относятся машины переменного тока (выпускаемые ОАО «Завод "Электрик"») типов МШ-2005, МШ-2206, МШ-3207 для поперечной сварки; МШ-2204, МШ-2301 (с увеличенным вылетом), МШ-3208 для продольной сварки; МШ-2202 и МШ-2203 (ЗАО «Искра», Свердловская обл.) для поперечной и продольной сварки деталей из коррозионно-стойких и низкоуглеродистых сталей без покрытий толщиной 0,2...3,0 мм. Технические характеристики этих машин приведены в табл. 5.39.

На рис. 5.67 показаны серийные машины МШ-3207 и МТ-3208 для поперечной и продольной сварки. По компоновке и конструкции большинства узлов шовные машины общего назначения аналогичны точечным. Отличительной особенностью шовных машин является достаточно сложное **электродное устройство**, обеспечивающее подвод к дисковым электродам сварочного тока, вращающего момента и силы сжатия. На рис. 5.68 изображены верхнее неприводное и нижнее приводное электродные устройства машины МШ-3207 со скользящими контактами, разгруженными от передачи силы сжатия. Сила на сварочный

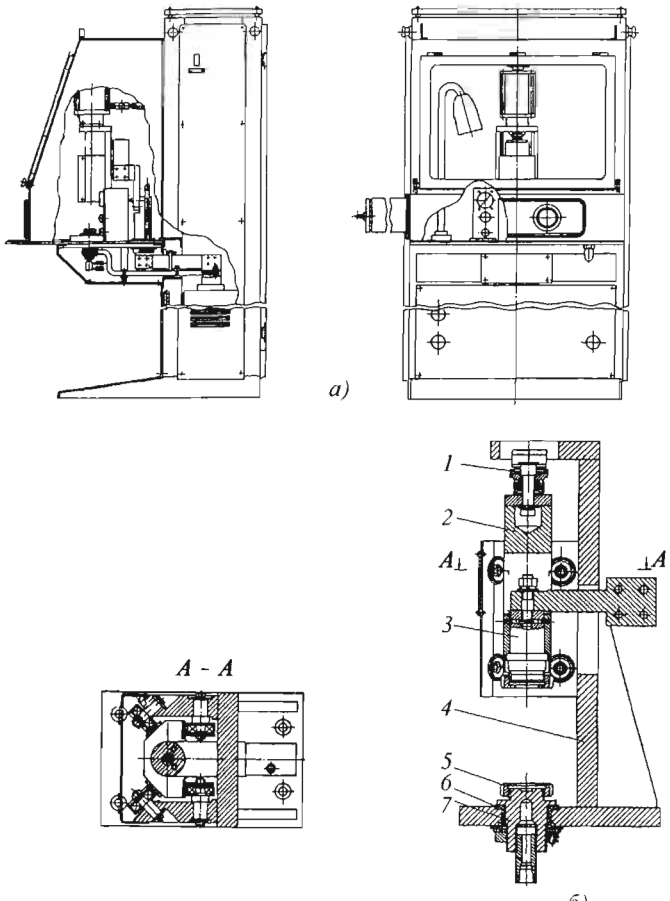


Рис. 5.66. Общий вид (*а*) **и электродный блок** (*б*) **рельефной конденсаторной машины МРК-3501:**
1 – блок тарельчатых пружин; *2* – ползун; *3* – верхний электрододержатель; *4* – сварная стойка; *5* – накидная гайка; *6* – изоляционная втулка; *7* – нижний электрододержатель

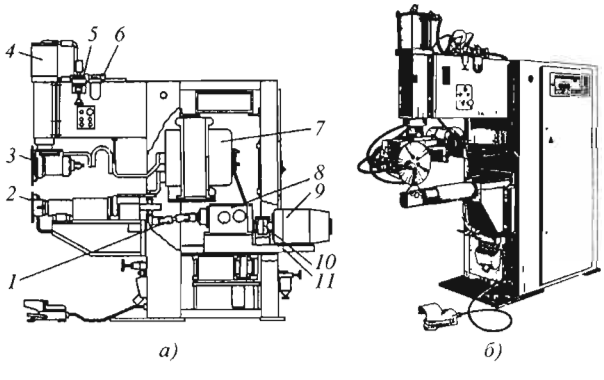


Рис. 5.67. Шовные машины МШ-3207 для поперечной (*а*) **и МШ-3208 для продольной** (*б*) **сварки:**
1 – шарнирный вал; *2*, *3* – электродные устройства; *4* – пневмопривод; *5*, *6* – пневмоаппаратура; *7* – сварочный трансформатор; *8* – редуктор; *9* – привод вращения; *10* – соединительная упругая муфта; *11* – основание привода

5.39. Технические характеристики шовных машин переменного тока (380 В, 50 Гц) общего назначения

Характеристика	МШ-2005	МШ-2206	МШ-3207	МШ-2204	МШ-2301	МШ-3208	МШ-2202
Расположение роликов	Поперечное			Продольное			Поперечное или продольное
Наибольшая мощность при коротком замыкании, кВ · А	80	140	290	140	210	290	139
Наибольший вторичный ток, кА	20	22	32	22	23	32	22
Номинальный длительный вторичный ток, кА	12,5	14	22	14	16	22	14
Вылет, мм	500	750	800		1200	800	
Раствор, мм	80	95	105	95	105		84
Сила сжатия, даН	80…750	100…750	190…1350	100..750	150…900	190…1350	200…1060
Ход верхнего электрода, мм	45	40	50	45	35	50	70
Линейная скорость, м/мин	0,4…3,6	0,3…4	0,4…6	0,3…4,0	0,4…6		0,4…4,8
Диаметр электродов (верхнего / нижнего), мм	220/180	280/220		220/103	280/160	180/130	280/220 (130)
Свариваемые толщины, мм: низкоуглеродистой стали	0,2…2		0,5…3	0,3…2	0,5…2	0,5…3	0,5…2
коррозионностойкой стали	0,2…1,5	0,3…1,5	0,3…2,5	0,3…1,5			
Масса машины, кг	850	1000	1550	1000	1800	1550	1350
Габаритные размеры машины, мм	1805×565×1700	2040×580×1730	2200×650×2030	1940×830×1730	2600×1100×2100	2160×950×2030	2250×610×2260

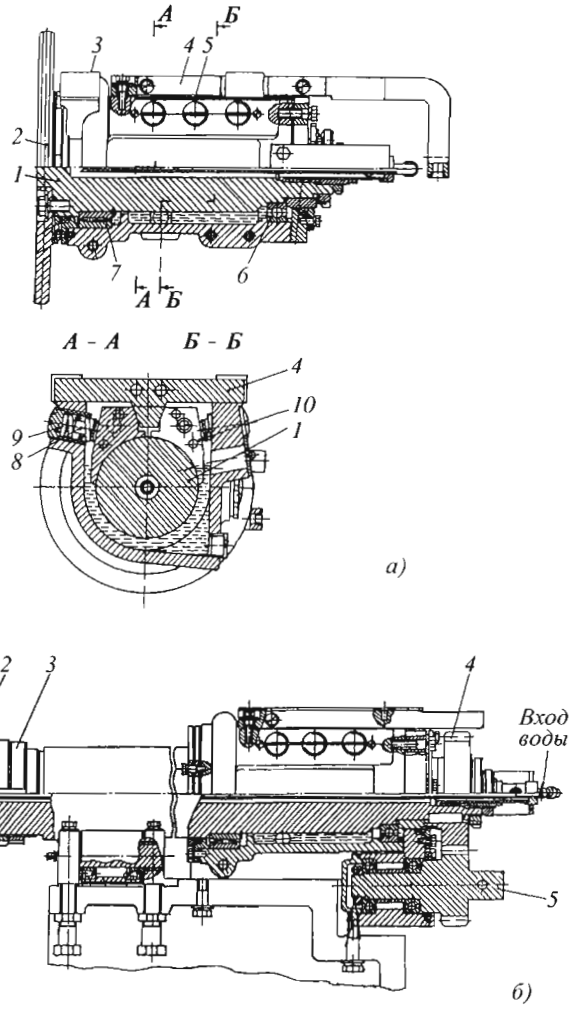


Рис. 5.68. Электродное устройство машины МШ-3207 со скользящими контактами, разгруженными от передачи сварочной силы:

а – верхнее неприводное устройство (*1* – электродный вал; *2* – сварочный ролик; *3* – латунный корпус, соединенный с ползуном направляющего устройства; *4* – токоподвод; *5* – изоляционная прокладка; *6*, *7* – подшипники электродного вала; *8* – толкатель; *9* – резьбовая втулка; *10* – токоподводящие контактные колодки); *б* – нижнее приводное электродное устройство (*1* – сварочный ролик; *2* – токоведущая резьбовая втулка; *3* – контргайка; *4* – зубчатое колесо; *5* – вал-шестерня)

ролик *2* (рис. 5.68, *а*), прикрепленный к электродному валу *1*, передается от ползуна привода сжатия через латунный корпус *3* и подшипники качения *6*, *7*. Передача сварочного тока на вращающийся вал от токоподвода *4*, закрепленного на корпусе и изолированного от него прокладкой *5*, выполняется шестью контактными колодками *10*. Колодки одновременно поджимаются и к выступающей части токоподвода, и к валу с помощью изолированных толкателей *8* и пружин. Электродный вал изготовлен из никель-кремниевой бронзы БрНК1,5-0,5, контактные колодки – из медно-графитового композиционного материала. Контактные поверхности колодок и выступающие части токоподвода имеют гальваническое серебряное покрытие толщиной 12 мкм. Во внутреннюю полость электродного узла залито касторовое масло. Токоподвод и электродный вал охлаждаются водой.

Нижнее приводное электродное устройство машины МШ-3207 (рис. 5.68, *б*) аналогично верхнему, но снабжено цилиндрической зубчатой парой *4*, *5*, соединенной шарнирным валом с приводом вращения. Сварочный ролик *1* закреплен на валу через промежуточную токоведущую резьбовую втулку *2*, фиксируемую контргайкой *3*, что позволяет легко совмещать сварочные ролики в одной плоскости. В машине МШ-3207 (МШ-2005) в отличие от МШ-2202 сварочный ролик выступает за переднюю плоскость машины, что дает возможность сваривать узлы по отбортовке.

В машине МШ-3208 для продольной сварки верхнее приводное электродное устройство отличается от приведенного на рис. 5.68, *а* наличием конической зубчатой пары для передачи вращения на электродный вал; нижнее аналогично электродному устройству машины МШ-2202 (рис. 5.69, *в*).

Привод вращения шовных машин общего назначения и большинства специальных машин состоит из тиристорного электропривода ЭПУ-2-1 (с двигателем постоянного тока сер. 4ПО), обеспечивающего плавное регулирование частоты вращения в диапазоне 1 : 50; понижающего редуктора планетарного или червячно-конического типа и шарнирного вала, соединяющего привод вращения с электродным устройством. В машинах для поперечной сварки с нижнеприводным электродным устройством, обеспечивающим надежную работу машины при установке электродов малого диаметра, привод вращения располагается в корпусе машины под трансформатором. При верхнеприводном электродном устройстве (МШ-3208) привод вращения размещается снаружи машины на левой стенке корпуса.

Схема **пневмопривода** шовных машин аналогична точечным машинам (см. рис. 5.50). Учитывая малое число перемещений ползуна, в шовных машинах используют надежные призматические направляющие с трением скольжения (рис. 5.70, *а*) или более простые цилиндрические направляющие, в которых ползун совмещен со штоком пневмоцилиндра (см. рис. 5.70, *б*).

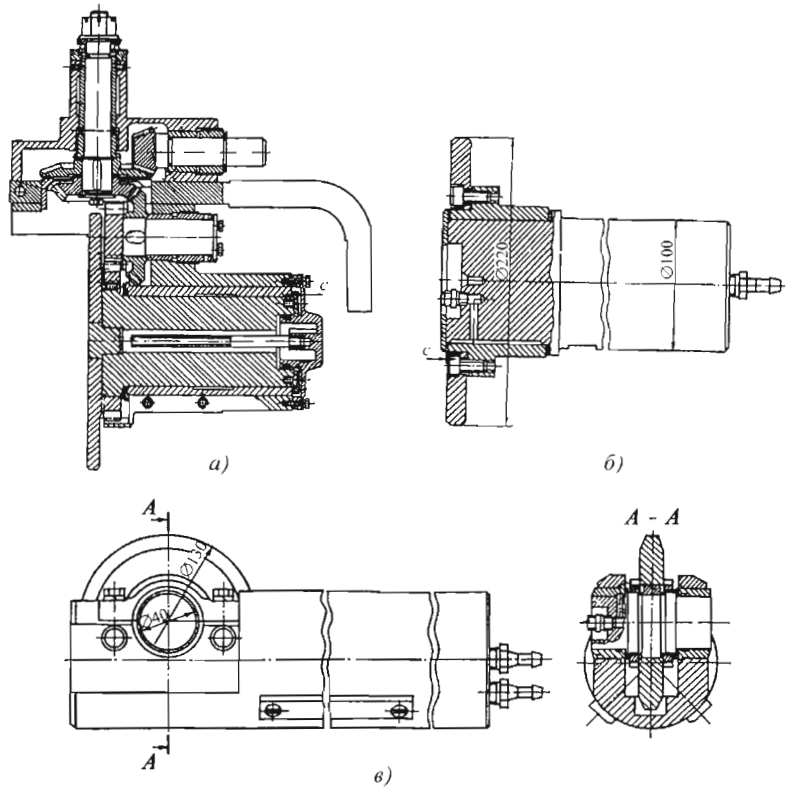


Рис. 5.69. Верхнее (*а*) и нижнее (*б*) электродные устройства машин МШ-2202, МШ-3401 для поперечной сварки со скользящими контактами типа вал – втулка; нижнее электродное устройство для продольной сварки (*в*)

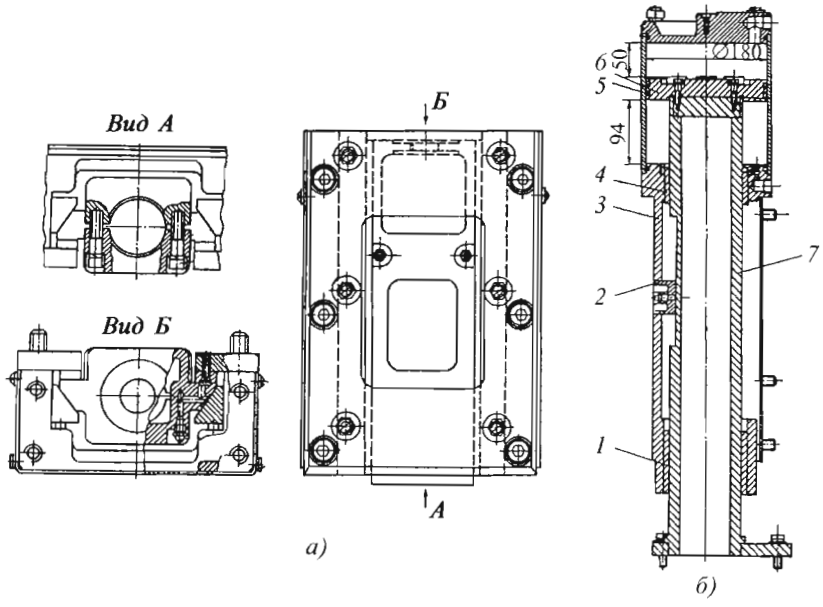


Рис. 5.70. Призматические (*а*) **и цилиндрические** (*б*) **направляющие пневмоприводов шовных машин:**
1, 4 – подшипниковые втулки; *2* – плоская шпонка; *3* – корпус направляющего устройства; *5* – пневмоцилиндр; *6* – поршень; *7* – пустотелый ползун, выполненный за одно целое со штоком

Для сварки ответственных крупногабаритных изделий из легких сплавов, латуни, коррозионно-стойких и жаропрочных сталей, титановых сплавов (толщиной 0,5...3,0 мм) предназначены шовные машины постоянного тока типов МШВ-3001, МШВ-7502.

Шестифазный выпрямитель обеспечивает малую глубину пульсаций тока, первая точка шва выполняется пониженным током, осуществляется автоматический контроль параметров процесса сварки. Нижнее и верхнее электродные устройства изготовлены со скользящими контактами по типу вал – втулка (см. рис. 5.69). Возможна их переналадка для сварки продольных и поперечных швов с непрерывным и шаговым вращением роликов. Шаговые перемещения роликов с регулируемой величиной шага и длительности остановки обеспечивается шаговой муфтой (рис. 5.71, *б*). Технические характеристики машин МШВ-3001, МШВ-7502 приведены в табл. 5.40.

Шовные машины специального назначения разработаны для ряда конкретных изделий серийного и массового производства.

Для сварки сильфонных и мембранных узлов, а также других ответственных соединений малых и неравных толщин из легированных сталей, теплостойких и цветных сплавов предназначены конденсаторные машины типа МРК-5М (ОАО «Электромеханика», г. Ржев), МШК-2002 и низкочастотная МШН-3702 (ОАО «завод "Электрик"»), установки для шовной сварки переменным током повышенной частоты (800...1300 Гц), выпускаемые НПП «Технотрон» (г. Чебоксары). Последние, например «Импульс ТМВ», служат для сварки продольных и круговых (кольцевых) швов диаметром до 120 мм в вертикальной и горизонтальной плоскостях при толщине тонкой детали до 0,5 мм. Амплитуда сварочного тока 700...5000 А, длительность импульса 0,002... 0,015 с, частота вращения 0,06...6 об/мин.

Машина МШК-2002 (со специальным сильфонным приводом давления) обеспечивает силу сжатия 10...120 даН. Она рассчитана на диапазон свариваемых толщин 0,05...0,4 мм. Емкость батареи конденсаторов 200... 1800 мкФ, пределы регулирования напряжения 200...600 В, скорость сварки 0,1...1,5 м/мин при частоте сварочных импульсов 2...25 Гц. Оба сварочных ролика приводные. Верхнее электродное устройство имеет возможность горизонтального и вертикального перемещения. Нижнее электродное устройство сменное, предусмотрена установка специальной сварочной оснастки на вертикальной перемещающейся плите с Т-образными пазами.

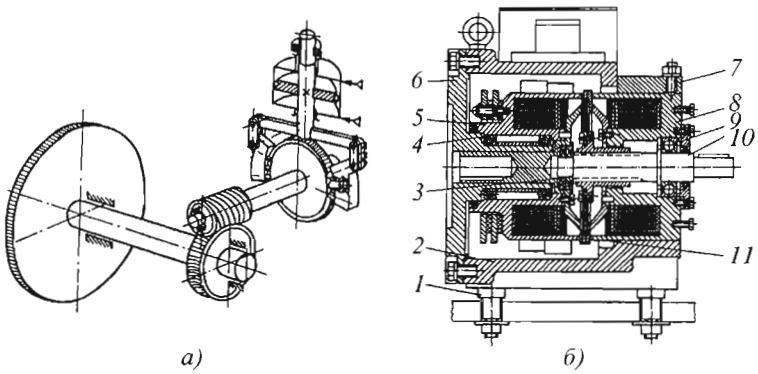


Рис. 5.71. Пневматический шаговый механизм с храповым колесом (*а*) и электромагнитная шаговая муфта (*б*):
1 – установочные болты; *2* – станина; *3*, *9* – подшипники выходного вала *10*; *4* – подшипники левой ведущей полумуфты *5*; *6*, *7* – крышки; *8* – правая тормозная полумуфта; *11* – сборный диск, обеспечивающий связь выходного вала либо с ведущей, либо с тормозной полумуфтами

Технические характеристики низкочастотной машины МШН-3702 (рис. 5.72) приведены в табл. 5.40. В машине организован осевой привод на любой ролик. Верхнее электродное устройство имеет установочные перемещения. На нижнем токоведущем валу предусмотрена возможность установки токоведущих цанг, оправок и другой оснастки. Низкочастотные машины обладают крутопадающей нагрузочной характеристикой, при которой в наибольшей степени проявляется эффект саморегулирования сварочного тока, исключающий прожоги, выплески и непровары при изменении электросопротивления свариваемых деталей.

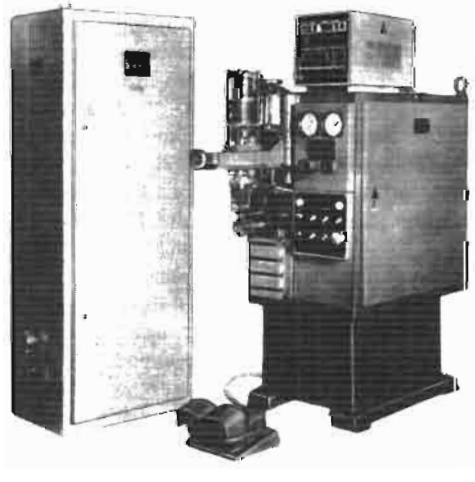


Рис. 5.72. Низкочастотная шовная машина типа МШН-3702 для сварки малых толщин

Для сварки топливных баков и других ответственных изделий из освинцованных и оцинкованных сталей, а также алюминиевых сплавов толщиной до 2 мм выпускают шовные машины для поперечной сварки переменным током МШ-3210 (3213) и низкочастотные МШН-7502 (7504), МШН-8501. Особенностями этой группы машин являются наклонное (под углом до 6°) расположение электродов для удобства сварки по отбортовке и привод вращения обоих электродов с помощью шарошек, обеспечивающий постоянство скорости сварки вне зависимости от диаметра электродов. Машина МШН-7502 оснащена пантографом, который обеспечивает установку и закрепление бака, точное перемещение отбортовки вдоль сварочных электродов, поворот бака и переключение режимов сварки на радиусных участках, перекрытие шва.

Для сварки продольных швов (например, воздуховодов) на базе МШ-3208 разработана машина МШ-2302 с приводом верхнего электрода с помощью шарошки и увеличенным до 1200 мм вылетом. Шарошки имеют гладкую поверхность сопряжения со сварочными электродами и неглубокие (0,6 мм) зубцы на обеих боковых наклонных поверхностях (рис. 5.73). Они поджимаются к электродам с помощью пневмогидравлических цилиндров с силой 60...1000 даН, обеспечивая профилирование и нагартовку рабочей поверхности электродов, увеличивающую срок их службы.

5.40. Технические характеристики шовных машин специального назначения

Характеристика	МШ-2302	МШ-3210	МШ-3213	МШН-3702	МШН-8501	МШВ-3001	МШВ-7502
Расположение роликов	Продольное	Поперечное				Продольное или поперечное	
Род сварочного тока	Переменный 50 Гц			Низкой частоты		Постоянный	
Наибольший вторичный ток, кА	23	32		37	85	30	75
Номинальный длительный вторичный ток, кА	15	22		3,6	36	11,2	36
Номинальная мощность при коротком замыкании, кВ · А	290	210	290	184	320	272	516
Сила сжатия, даН	185…630	190…1350		10…230	510..1600	200…2700	100…3000
Вылет, мм	1200	800	840	200	600	1500	1200
Раствор, мм	65	50		20	95	160	150
Ход верхнего электрода рабочий (полный), мм	30	75	50	10 (150)	120	20 (150)	15 (180)
Линейная скорость, м/мин	0,4…6	0,2…2,5	0,3…3,5	0,1…1,5	0,5…5	0,2…8	
Свариваемые толщины, мм:							
низкоуглеродистой стали	0,5…1,5	0,5…3		–	1…3	0,3…3	0,5…5
коррозионно-стойкой стали	0,3…1,2	0,3…2,5		0,05…0,8	1…2	0,3…3	0,5…3
алюминиевых сплавов	–			0,1…0,5	0,5…2,5	0,3…1	0,5…3
освинцованных и оцинкованных сталей	0,3…1,2	0,3…1,5	0,5…2	–	1…2	–	
медных сплавов	–			0,05…0,6	0,8…2	–	
Масса машины, кг	1800	1720	1700	1200	4350	3700	4300
Габаритные размеры машины, мм	2700×910×2100	2275×650×2030		1360×590×1595	1960×1395×2630	3305×975×2720	2900×1650×3000

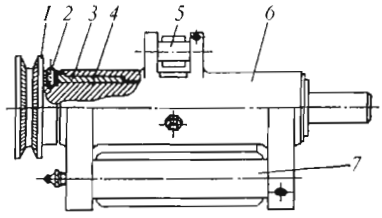


Рис. 5.73. Устройство для привода ролика шарошкой:
1 – шарошка; *2* – стопорный винт; *3* – втулка; *4* – вал; *5* – ось поджима; *6* – корпус; *7* – ось подвески

В машинах предусмотрены дополнительные устройства, которые совместно с шарошками осуществляют зачистку рабочей поверхности сварочных электродов от налипающего покрытия. Шабер зачистного устройства закреплен на рычаге и поджимается к электроду пружиной с регулируемой силой. При сварке легких сплавов зачистка производится наждачной бумагой с подложкой из мягкой резины, закрепленной в держателе. Держатель пружиной поджимается к электроду, а шток пневмоцилиндра обеспечивает его поступательное перемещение вперед-назад в плоскости электрода по касательной к его рабочей поверхности.

5.17. МАШИНЫ СТЫКОВОЙ СВАРКИ

Машины стыковой контактной сварки предназначены для соединения заготовок из низкоуглеродистой и легированной сталей; титана, цветных металлов и их сплавов сечением от сотых долей до десятков тысяч квадратных миллиметров. Свариваемые заготовки могут иметь разную конфигурацию: это стержни, проволока, трубы, полосы, ленты, прокатный профиль (в том числе рельсы), заготовки сложной формы, например литые стойки картера блока тепловозного дизеля, свариваемые одновременно в пяти местах суммарной площадью 50 000 мм^2.

Оборудование для стыковой сварки подразделяется:

– по методу сварки – на машины для стыковой сварки сопротивлением (МСС) и машины для стыковой сварки оплавлением (МСО), в том числе непрерывным, импульсным, а также оплавлением с предварительным подогревом;

– по конструкции зажимных устройств – на машины с рычажно-пружинным, эксцентриковым, винтовым, электромеханическим, пневматическим, гидравлическим и комбинированным механизмами;

– по конструкции механизма подачи подвижного зажима – на машины с рычажным, пружинным, электромеханическим (кулачковым или винтовым), пневматическим, гидравлическим и комбинированным механизмами;

– по виду источника питания – на машины переменного тока, постоянного тока, низкочастотные, конденсаторные;

– по назначению – на машины общего назначения и специальные;

– по степени автоматизации – на машины с ручным управлением, полуавтоматические, автоматические;

– по способу установки – на стационарные и передвижные (подвесные) машины.

На рис. 5.74 представлена конструктивная схема машины стыковой сварки. **Станины** этих машин должны обладать достаточной прочностью и высокой жесткостью, позволяющими выдерживать большие силы осадки $F_{ос}$ при сохранении необходимой соосности (ГОСТ 290–80) свариваемых заготовок. Станины изготовляют литыми или сварными из листовой стали и прокатных профилей с горизонтальным наклонным или вертикальным столом. На столе располагаются неподвижная и подвижная плиты с зажимными и упорными устройствами. Для машин небольшой мощности плиты выполняют из меди или бронзы, для остальных машин – из стали с медными вставками в местах присоединения шин от сварочного трансформатора и крепления токоведущих сварочных губок (электродов).

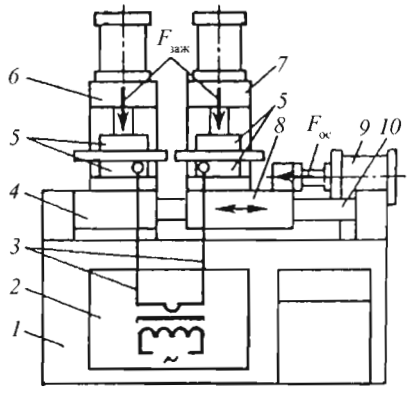


Рис. 5.74. Конструктивная схема машины стыковой сварки:
1 – станина; *2* – сварочный трансформатор; *3* – токоподвод; *4* – неподвижная плита; *5* – губки зажимных устройств; *6* и *7* – зажимные устройства; *8* – подвижная плита; *9* – механизм подачи; *10* – цилиндрические направляющие подвижной плиты

Подвижные плиты перемещаются в направляющих различных конструкций: прямоугольных, типа ласточкина хвоста, призматических, цилиндрических, шариковых (рис. 5.75).

Зажимные устройства обеспечивают контакт свариваемых деталей с токоведущими губками, точную установку деталей относительно друг друга и удержание их от проскальзывания.

Наиболее широкое применение нашли пневматические и гидравлические рычажные зажимные устройства (рис. 5.76, *а*), гидравлические устройства клещевого (см. рис. 5.76, *б*) или прямого действия. В машинах малой мощности применяются рычажно-пружинные, винтовые или эксцентриковые зажимные устройства (см. рис. 5.76, *в* – *д*). Установку деталей в зажимах осуществляют с упорами (рис. 5.77) или без них при сварке длинномерных и кольцевых заготовок. В последнем случае создают высокие силы зажатия заготовок, в 2–4 раза превышающие силы осадки.

Большое значение для получения высококачественного соединения имеет **конструкция сварочных губок**. Наибольшее распространение получили губки (см. рис. 5.46) с призматическими пазами для сварки круглых деталей сплошного сечения и цилиндрическими пазами для сварки тонкостенных труб. Для стыковой сварки листов обычно используют плоские электроды с нижним токоподводом. Надежное закрепление тонких листов достигается применением электродов с криволинейной поверхностью или со скосом передней кромки токоведущих губок. При этом помимо медных токоведущих губок для зажатия с большой силой используют дополнительные стальные губки.

При сварке заготовок из алюминиевых сплавов применяемые давления осадки близки к пределу текучести металла. Поэтому при сварке пустотелых профилей для исключения потери устойчивости стенок во внутреннюю полость профиля устанавливают вкладыши, остающиеся после сварки. При зажатии профилей сложной конфигурации применяют составные зажимные губки.

На рис. 5.78 показаны схемы крепления токоведущих губок, обеспечивающие их быструю замену и регулировку положения в горизонтальной плоскости. Для регулировки в вертикальном направлении можно воспользоваться клиновинтовой парой или другими, более сложными механизмами (рис. 5.79).

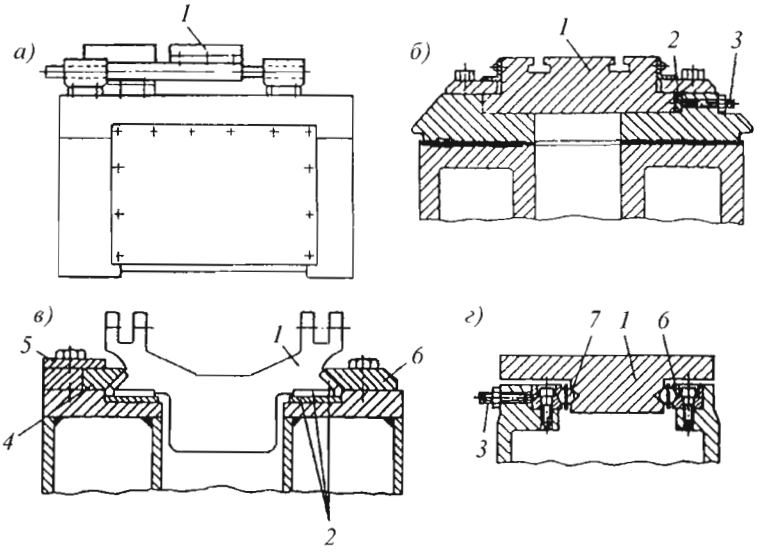


Рис. 5.75. Направляющие стыковых машин:
а – цилиндрические; *б* – прямоугольные с односторонней регулировкой; *в* – типа ласточкина хвоста; *г* – шариковые (*1* – подвижная плита; *2* – каленые планки; *3* – регулировочный винт; *4* – направляющий клин; *5* и *6* – прижимная и направляющая планки соответственно; *7* – шарик)

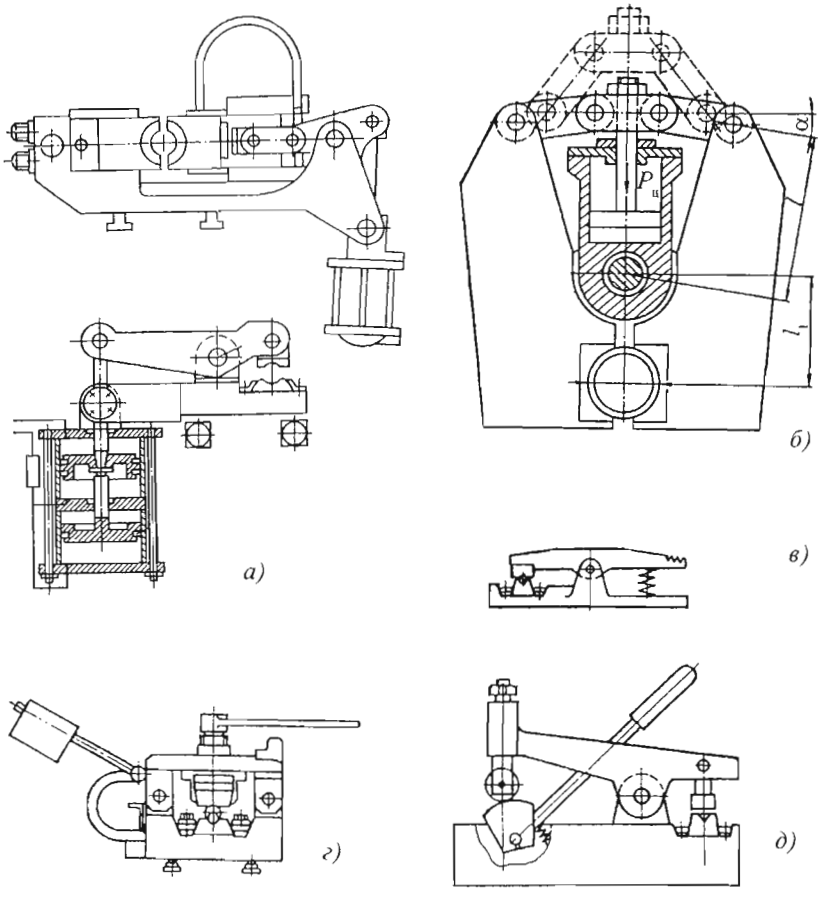


Рис. 5.76. Зажимные устройства стыковых машин:
а – пневморычажные с горизонтальным и радиальным ходом; *б* – клещевого типа; *в* – рычажно-пружинные; *г* – винтовые; *д* – эксцентриковые

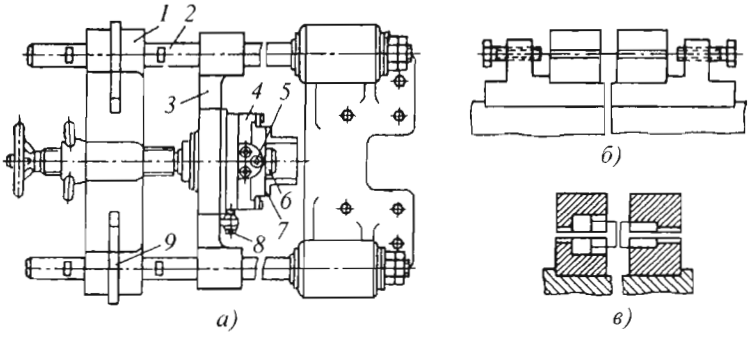


Рис. 5.77. Упорные приспособления:
а – универсальные; *б* – совмещенные с плитами машины; *в* – в электродных губках; *1* – упорная планка; *2* – направляющая штанга; *3* – ползун; *4* – центрирующее устройство; *5*, *8* – винты, перемещающие центрирующее устройство; *6* – центрирующий упор; *7* – опорный желобок; *9* – фиксирующая собачка

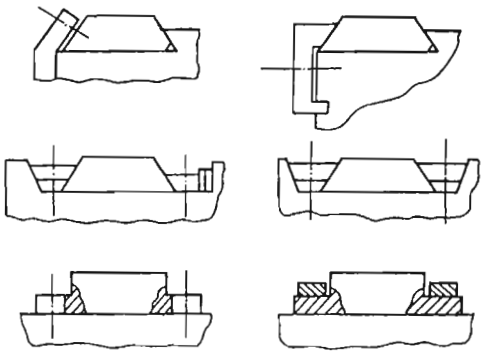


Рис. 5.78. Схемы крепления токоведущих губок

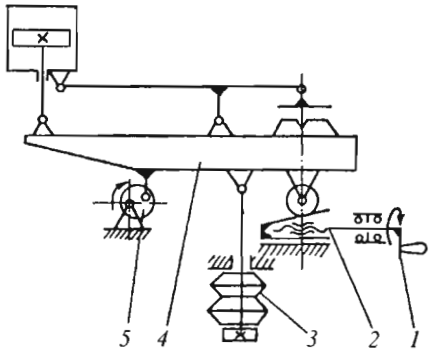


Рис. 5.79. Центрирующий механизм с клиновинтовой парой и эксцентриковой осью:
1 – штурвал; *2* – клиновинтовая пара; *3* – пружинный блок; *4* – основание неподвижного зажима; *5* – эксцентриковая ось основания зажима

Приводы подачи подвижного зажима стыковой машины должны развивать силу от 10^{-1}...100 кН при оплавлении и подогреве, до 10^{-1}...10^{4} кН при осадке. Скорость перемещения при оплавлении и подогреве 0,1...30 мм/с, при осадке 15...500 мм/с, причем при переходе от оплавления к осадке ускорение за несколько миллисекунд должно изменяться от почти нулевых значений до 50...100 м/с^2. Простейшим универсальным приводом является рычажный (рис. 5.80, *а*), в котором скорость передвижения подвижного зажима определяется оператором. Максимальная сила осадки F_{oc} на машинах с таким приводом не превышает 50 кН. На стыковых машинах небольшой мощности для сварки сопротивлением устанавливают полуавтоматический пружинный привод (см. рис. 5.80, *б*).

Наиболее распространенным приводом подачи в универсальных и специальных стыковых машинах с силой осадки до 300 кН является электромеханический привод с кулачковым (или винтовым) механизмом перемещения подвижной плиты (рис. 5.81). Необходимые график и величина перемещения подвижной плиты при оплавлении задаются профилем кулачка при постоянной (регулируемой) скорости его вращения. Для выполнения осадки (с начальной скоростью до 30 мм/с) на кулачке устанавливается сменная вставка с выступающей частью, определяющей величину осадки. Более широкие возможности для выбора режима сварки дает комбинация электромеханического привода оплавления с пневматическим или гидравлическим приводом осадки. Такой привод сложнее, он обеспечивает осадку со скоростью до 300 мм/с, не связанную со скоростью оплавления и осуществляемую в любой момент по отношению к развертке кулачка.

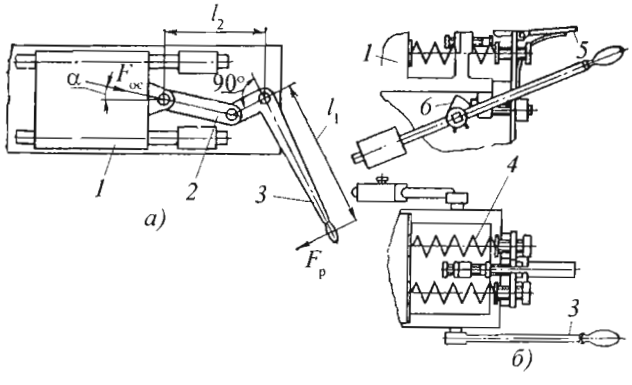


Рис. 5.80. Рычажный (*а*) и полуавтоматический пружинный (*б*) приводы маломощных стыковых машин:
1 – подвижная плита; *2* – серьга; *3* – рычаг; *4* – пружина механизма осадки; *5* – защелка; *6* – эксцентрик; F_p – сила рычага

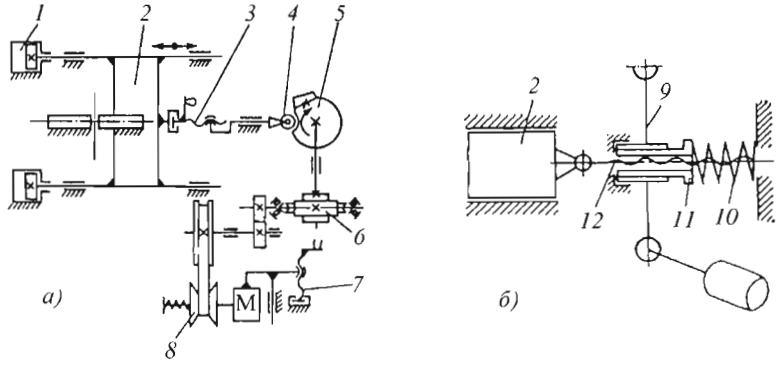


Рис. 5.81. Кинематические схемы электроприводов стыковых машин с кулачковым (*а*) и винтовым (*б*) механизмами:

1 – пневмоцилиндр, обеспечивающий возвратно-поступательное перемещение при подогреве и силовое замыкание толкателя с кулачком; *2* – подвижная плита; *3* – винт-гайка, обеспечивающие регулирование величины $2l_{уст}$; *4* – ролик толкателя; *5* – кулачок оплавления со сменной вставкой осадки; *6* – червячный редуктор; *7* – винт и гайка, обеспечивающие перемещение оси ведущего шкива клиноременного вариатора *8*; *9* – червячное колесо; *10* – пружинный динамометр; *11* – гайка, имеющая шлицевое соединение с червячным колесом; *12* – винт

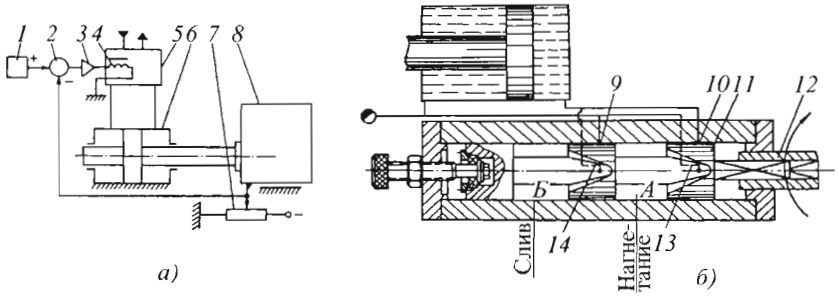


Рис. 5.82. Схема следящего гидропривода (*а*) и гидропривода импульсного оплавления с виброзолотником (*б*):

1 – электрический блок управления; *2* – блок сравнения; *3* – усилитель; *4* – электромагнит, управляющий гидравлическим золотником *5*; *6* – гидроцилиндр привода; *7* – датчик перемещения; *8* – подвижная плита машины; *9*, *10* – каналы, соединяющие камеры А и Б виброзолотника с полостями гидроцилиндра при перемещении влево; *11* – вращающийся шток виброзолотника; *12* – скользящая муфта; *13*, *14* – каналы, соединяющие камеры А и Б с полостями гидроцилиндра при перемещении вправо

В стыковых машинах с силой осадки >150…250 кН преимущественно применяются гидравлические следящие приводы, показанные на рис. 5.82. Они являются наиболее гибкими в управлении и обладают высокими динамическими характеристиками.

При импульсном оплавлении на основное поступательное движение подвижного зажима налагаются колебательные движения в широком интервале частот (до 50 Гц) от вибраторов с электромеханическим приводом или через гидроцилиндр с дополнительно включенным виброзолотником (рис. 5.82, *б*).

В зависимости от формы и размера сечения свариваемых заготовок в стыковых машинах применяют различную схему токоподвода к сварочным губкам (рис. 5.83). При сварке заготовок компактного сечения в универсальных машинах используется вторичный контур с одним трансформатором и односторонним (нижним или верхним) токоподводом. При сварке заготовок с развитым сечением равномерный нагрев обеспечивается при диагональном или двустороннем токоподводе. Использование параллельных сварочных контуров (в том числе кольцевых трансформаторов) позволяет существенно снизить сопротивление сварочной цепи и повысить устойчивость оплавления.

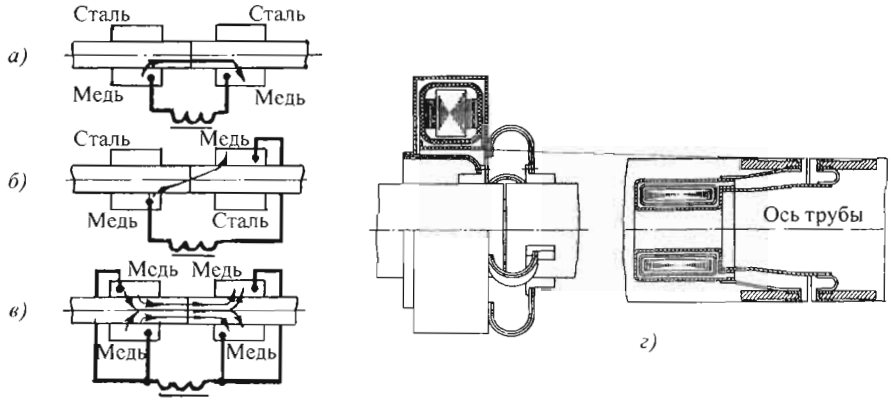


Рис. 5.83. Схемы токоподвода к сварочным губкам стыковых машин:
а – одностороннего; *б* – диагонального; *в* – двустороннего;
г – по периметру, с использованием кольцевых сварочных трансформаторов

Универсальные машины для стыковой сварки сопротивлением типов МСС-901, МСС-1902 (ЗАО «Искра») обеспечивают сварку заготовок диаметром 0,5...10 мм из черных и цветных металлов. Машины оснащены пружинными приводами зажатия и осадки деталей с силой до 100 даН. Команда на отключение тока вырабатывается путевым выключателем по величине перемещения подвижного зажима. Предусмотрена возможность термообработки зоны сварки при ручном управлении и визуальном контроле температуры нагрева. Имеется устройство для обрезки концов проволоки перед сваркой.

Для сварки высокопрочной проволоки из закаливающихся сталей диаметром 3...10 мм предназначена **специальная машина стыковой сварки сопротивлением** К-802 (МСС-1401). Машина имеет два привода осадки: один с силой 0,05...0,4 кН, обеспечивает сжатие деталей на этапе нагрева; другой, с силой 2...10 кН, выполняет принудительную деформацию металла на этапе осадки с подрезкой грата (сварочные губки оснащены вставками из жаропрочной стали). Осуществляется термообработка (отжиг или изотермический отпуск) в автоматическом режиме с управлением по температуре нагрева с помощью фотопирометра.

Машины МСС-2503, МСС-4001 применяются для сварки прутков диаметром до 24 мм и шин сечением до 5 × 25 мм из меди, алюминия, нихрома, сплавов для термопар и др. Пневматический привод перемещения подвижного зажима обеспечивает сжатие заготовок на этапе нагрева 0,1...3 кН и деформирование металла повышенной силой 1...20 кН на этапе осадки. В сварочных губках предусмотрены гнезда для установки вкладышей, осуществляющих подрезку грата и деформирование металла в затрудненных условиях. Направляющие подвижного зажима выполнены на опорах качения. Команду на осадку вырабатывает путевой выключатель после перемещения подвижного зажима на определенную величину.

Для стыковой сварки сопротивлением звеньев цепей (до 16-го калибра) обычной и повышенной прочности (сталь 35Г2) из предварительно связанной цепной заготовки разработаны цепесварочные автоматы типов А-8822, -8820 и др.

Универсальные машины для стыковой сварки оплавлением сваривают заготовки из низкоуглеродистой стали сечением до 2000 мм^2, заготовки инструмента из быстрорежущей стали с конструкционной, а также цветных металлов и сплавов сечением до 300 мм^2. Технические характеристики машин представлены в табл. 5.41.

Машина **МСО-0804** предназначена только для сварки непрерывным оплавлением. Электромеханический кулачковый привод оплавления оснащен двигателем постоянного тока с плавным регулированием частоты вращения. Привод осадки пневматический.

Подвижная плита машины **МСО-201** во время подогрева и оплавления перемещается сварщиком с помощью рычажного самотормозящего эксцентрикового механизма. На заданном этапе оплавления вырабатывается команда на включение пневматического привода осадки.

5.41. Технические характеристики стыковых машин для сварки оплавлением

Характеристика	Универсальные машины			Для сварки труб		Для сварки лент	Для сварки колец
	МСО-0804	МСО-201	МСО-606 (МС-2008)	МСО-604	МСО-1205	МСО-302	МСО-1203
Наибольший вторичный ток, кА	25	45	55	45	40	–	150
Номинальный длительный вторичный ток, кА	3,6	8	9		11	0,9	50
Потребляемая из сети мощность при осадке, кВ · А	110	140	–	350	250	–	350
Вторичные напряжения, В	2,2…4,4	3,4…6,8	4…8		5,6…8,5	2,2…4,4	4,8…14,6
Расстояние между сварочными губками, мм	0…40	0…60	10…100	40…70	–		
Скорость оплавления минимальная / максимальная, мм/с	0,2/20	0,5/5	0,15/6,8	0,3/10		1/10	0,8/10
Скорость осадки (максимальная), мм/с	200	40	60	80		250	60
Сила осадки (номинальная), даН	800	2000	6300		12 500	3200	12 500
Сила зажатия (номинальная), даН	1800	4000	10 000	–	20 000	5000	25 000
Масса, кг	1000 + 170	720	2400	3800	5530	2200	15 400
Габаритные размеры, мм	930×1040×1460 (+ШУ)	1380×860×1600	2070×1240×1370	2450×1580×1180	2920×1740×1250	1430×1530×1290	3700×2360×2950
Диапазон свариваемых сечений, мм^2, из:							
низкоуглеродистых сталей	15…250	120…1400	100…2000	–	До 1500	До 180	До 1000
легированных сталей	35…100	120…250	100…1250	До 850	До 1500	–	
алюминиевых сплавов	30…50	–		До 300	–		

Машина **МСО-606** (ОАО «КЗЭСО», г. Каховка, Украина) имеет электромеханический привод оплавления и осадки через кулачок со вставкой. Отличительной особенностью этой машины от ранее выпускавшейся МС-2008 является наличие дополнительных механизмов и блоков электрической схемы управления, обеспечивающих полную автоматизацию процесса сварки с предварительным подогревом. В машине МСО-606-1 дополнительно осуществляются стабилизация сварочного тока во время предварительного подогрева и контроль длительности осадки под током.

Для обеспечения непрерывной работы технологических линий в металлургическом производстве, трубоэлектросварочных, профилегибочных и других агрегатов применяются **специальные стыковые машины для сварки лент** по методу непрерывного оплавления. Например, машина **МСО-302** предназначена для сварки лент из стали и цветных металлов толщиной 0,4...1,5 мм и шириной 30...120 мм. Максимальное свариваемое сечение 180 мм^2. Машина имеет электромеханический привод оплавления и гидравлический привод осадки. Концы лент устанавливает оператор по съемным упорам, размещаемым между электродами.

Комплекс **КСО-3201** (рис. 5.84) обеспечивает сварку лент из углеродистых и легированных сталей толщиной 1...6 мм и шириной 50...500 мм.

Максимальное свариваемое сечение 3000 мм^2. Привод оплавления и осадки гидравлический. Скорость оплавления 0,2...12 мм/с, максимальная скорость осадки 150 мм/с, пределы регулирования вторичного напряжения 3,7...11,2 В. В комплексе автоматизированы все вспомогательные и сварочные операции: обрезка и перемещение концов лент, центровка, зажатие, сварка, зачистка грата, термообработка зоны сварки, разжатие сварочных губок.

Для контактной стыковки сварки оплавлением **ленточных пил** толщиной 1...3 и шириной 100...300 мм предназначена машина К-274М. Она снабжена гидравлической следящей системой и обеспечивает термообработку после сварки в автоматическом режиме. Серию машин (BAS-040 – BAS-210, рис. 5.85) для сварки оплавления ленточных пил по металлу и дереву, а также ленточных ножей шириной до 210 и толщиной от 0,4 мм, в том числе из коррозионно-стойких, биметаллических и легированных вольфрамом сталей, выпускает фирма «Ideal». *Машины имеют устройства* обрезки кромок, удаления грата, контроля параметров режима сварки и заключительной термообработки.

Для сварки **ободьев колес** из низкоуглеродистой стали шириной до 380 мм и сечением до 2500 мм^2 разработаны машины типов МСО-1203, КСО-2501 и др., снабженные электромеханическим кулачковым приводом оплавления и пневматическим приводом осадки.

Сварку колец со сложной конфигурацией поперечного сечения (включая замкнутые профили) из углеродистых, легированных сталей и цветных металлов обеспечивают машины типа К-607 (К-617). Наибольшее свариваемое сечение колец из углеродистой стали 16 000 мм^2 при минимальном внутреннем диаметре 400 мм. Машины имеют гидравлический привод оплавления и осадки. Скорость оплавления 0,2...9,2 мм/с, максимальная скорость осадки 350 мм/с. Пределы регулирования вторичного напряжения 6,8...13,6 В. Предусмотрены следующие этапы процесса сварки: предварительное оплавление для выравнивания торцов, предварительный подогрев, оплавление (включая импульсное), осадка.

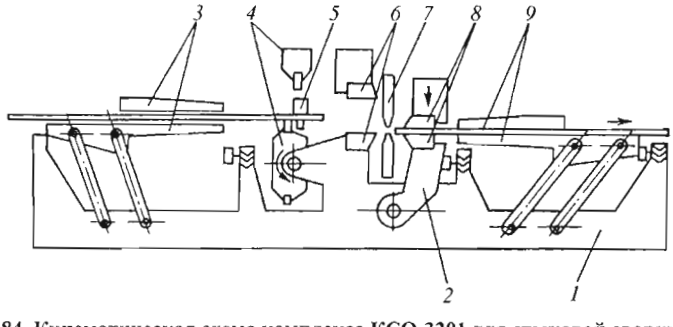


Рис. 5.84. Кинематическая схема комплекса КСО-3201 для стыковой сварки лент:
1 – станина; *2* – подвижной зажим качающегося типа; *3*, *9* – передаточные механизмы; *4* – ножницы; *5* – зажимные лапки центрователя; *6*, *8* – сварочные губки; *7* – гратосниматель резцового типа

Рис. 5.85. Стыковая машина BAS-052 (фирма «Ideal») для сварки ленточных пил

Наиболее прогрессивным методом **изготовления цепей** 14...28-го калибра в массовом производстве является их сварка из предварительно связанных С-образных звеньев. Цепные заготовки изготовляются на специальных цепевязальных машинах и передаются в цепесварочный автоматический комплекс (например, КСЦО-1201-1), в котором подача отдельных звеньев в зону сварки, зажатие их, сварка оплавлением с подогревом, срезание грата, перемещение сваренного участка цепи с поворотом следующего звена происходят автоматически.

Для стыковой **сварки оплавлением прямых труб и змеевиков** из перлитных и аустенитных сталей используются машины МСО-604 (трубы диаметром 25...42 мм) и МСО-1205 (диаметр труб 42...83 мм). Привод зажатия труб и осадки пневматический, оплавления – электромеханический. Возможна сварка как непрерывным оплавлением, так и с предварительным подогревом по жесткой временно́й программе (в том числе с предварительным оплавлением для выравнивания кромок). Внутренний грат удаляется механическим путем: дорном, фрезой, снарядом (рис. 5.86). Предусмотрена возможность срезания наружного грата. При этом после сварки неподвижный зажим остается в зажатом состоянии, а подвижный разжимается. Между подвижным зажимом и стыком устанавливается гратосниматель в виде клещей, ножи которого охватывают трубу. При включении двигателя привода оплавления и перемещении подвижного зажима срезается грат.

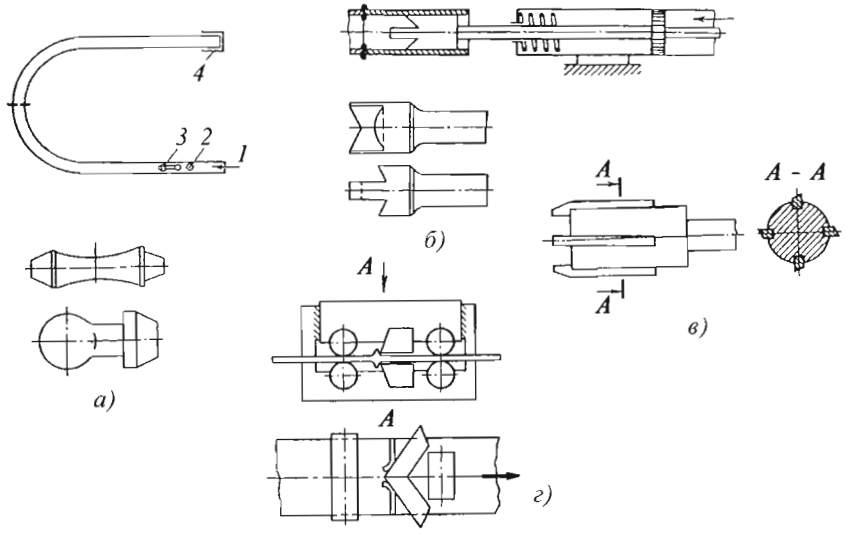


Рис. 5.86. Устройство для удаления внутреннего грата при сварке труб:
а – снарядом (*1* – место подачи сжатого воздуха; *2* – резиновый уплотнительный шар; *3* – снаряд; *4* – снарядоуловитель); *б* – дорном; *в* – фрезой; *г* – удаление грата косыми резцами (ножами) при сварке полос

Сварка промысловых и технологических трубопроводов диаметром 57…530 мм с толщиной стенки до 16 мм из низкоуглеродистых и низколегированных сталей в полевых и стационарных условиях выполняется машинами клещевого типа: К-805, К-813, К-584М (МСО-5001, рис. 5.87). Для сварки магистральных трубопроводов диаметром 720…1420 мм разработаны уникальные внутритрубные машины К-830, К-800, К-700-1 и К-810. Они оснащены гидравлическими приводами всех механизмов. Непрерывное оплавление выполняется с коррекцией программируемой скорости по току оплавления. Применение кольцевых трансформаторов с большим числом параллельных токоведущих ветвей во вторичном контуре позволяет снизить его сопротивление до 5…12 мкОм и осуществить электропитание машины от дизельной электростанции мощностью до 1000 кВт.

Стыковая **сварка рельсов,** а также проката различного профиля сечением до 18 000 мм^2 в стационарных условиях по методу непрерывного или импульсного оплавления может быть осуществлена на машинах МСР-6301 (ОАО «ПЗЭСО», г. Псков), К190ПК-1, К1000 (ОАО «КЗЭСО», г. Каховка, Украина). Машины – проходного типа (рис. 5.88) с гидравлическими приводами зажатия, оплавления и осадки. Вторичный контур имеет две параллельные ветви с токоподводом на верхние и нижние сварочные губки от двух трансформаторов, расположенных внутри неподвижной колонны. Машины оснащены устройствами для снятия грата непосредственно после сварки и компьютерными системами управления, контроля и регистрации параметров режима. Для сварки рельсов сечением до 12 000 мм^2 в полевых условиях могут быть использованы подвесные машины с механизмом зажатия клещевого типа К355А (МСО-4501), К900А-1, К920-1 (ОАО «КЗЭСО»).

Для сварки заготовок металлорежущего инструмента длиной 50…250 мм в условиях серийного производства в ИЭС им. Е.Э. Патона разработана серия машин для стыковой сварки оплавлением: СИ-086А; СИ-111 и СА-2; К-802 (диаметр заготовок соответственно 12…32; 20…60 и 4,8 мм). Машины снабжены регулируемыми упорами и зажимами, осуществляющими центровку заготовок в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Машины можно использовать для сварки заготовок прямоугольного сечения, а также высокопрочных и цветных сплавов. Для снятия грата и правки заготовок инструмента диаметром 10…65 мм рекомендуется полуавтомат СИ-102.

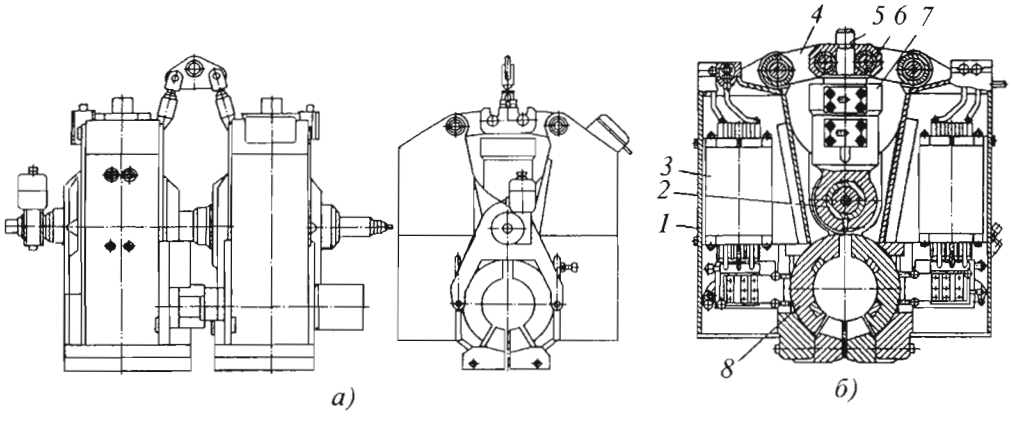


Рис. 5.87. Машина МСО-5001 (К584М) для стыковой сварки труб диаметром 114…325 мм в полевых и заводских условиях (*а*) и разрез ее левого клещевого зажима (*б*):
1 – коробчатая щека; *2* – центральная ось; *3* – сварочный трансформатор; *4* – серьга; *5* – шток; *6* – траверса; *7* – гидроцилиндр механизма зажатия; *8* – зажимные (сварочные) губки

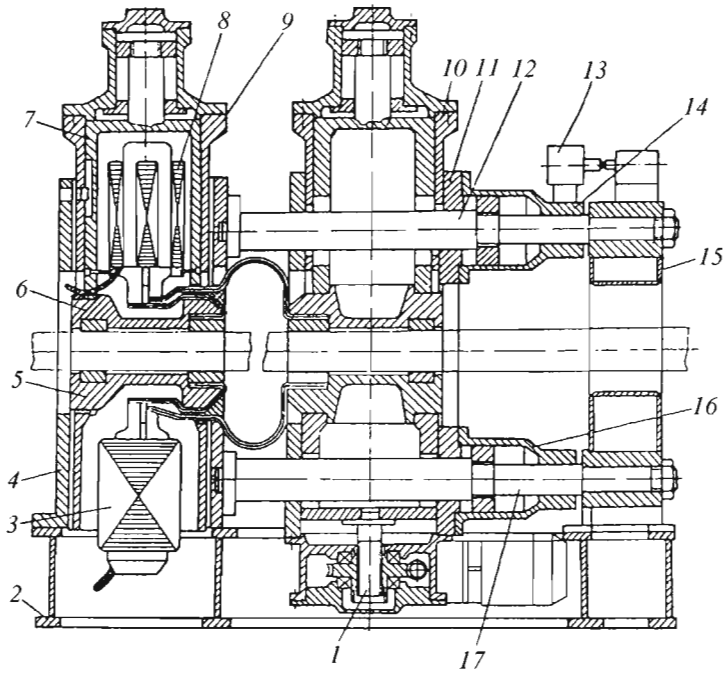


Рис. 5.88. Конструктивная схема стационарной стыковой машины К190П для сварки рельсов:
1 – механизм вертикальной центровки подвижной колонны; *2* – станина; *3*, *8* – сварочные трансформаторы; *4* – неподвижная колонна; *5*, *6* – зажимные башмаки со сварочными губками; *7* – полый поршень; *9*, *10* – гидропрессы зажатия; *11* – подвижная колонна; *12*, *17* – штоки гидроцилиндров осадки; *13* – гидроследящее устройство; *14*, *16* – гидроцилиндры осадки; *15* – жесткая неподвижная стойка

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бердичевский А.Е. и др.** Многоэлектродные машины для контактной сварки. Л.: Энергоатомиздат, 1984. 246 с.

2. **Гельман А.С.** Технология и оборудование контактной электросварки: Учебник для вузов. М.: Машгиз, 1960. 367 с.

3. **Гиллевич В.А.** Технология и оборудование рельефной сварки. Л.: Машиностроение, 1976. 152 с.

4. **Глебов Л.В., Пескарев Н.А., Файгенбаум Л.С.** Расчет и конструирование машин контактной сварки. Л.: Энергоиздат, 1981. 424 с.

5. **Глебов Л.В., Филиппов Ю.И., Чулошников П.Л.** Устройство и эксплуатация контактных машин. Л.: Энергоатомиздат, 1987. 312 с.

6. **ГОСТ 297–80.** Машины контактные. Общие технические условия.

7. **ГОСТ 15878–79.** Контактная сварка. Соединения сварные. Конструктивные элементы и размеры.

8. **ГОСТ 14111–90.** Электроды прямые для контактной точечной сварки. Типы и размеры.

9. **ГОСТ 22990–78.** Машины контактные. Термины и определения.

10. **Гуляев А.И.** Технология точечной и рельефной сварки сталей. М.: Машиностроение, 1978. 246 с.

11. **Кабанов Н.С., Слепак Э.Ш.** Технология стыковой контактной сварки. М.: Машиностроение, 1970. 264 с.

12. **Контроль** точечной роликовой электросварки / Б.Д. Орлов, П.Л. Чулошников, В.В. Верденский, А.Л. Марченко. М.: Машиностроение, 1973. 304 с.

13. **Контактная** стыковая сварка оплавлением / С.И. Кучук-Яценко; Отв. ред. В.К. Лебедев. АН Украины. Ин-т электросвар-

ки им. Е.О. Патона. Киев: Наукова думка, 1992. 236 с.

14. **Кочергин К.А.** Контактная сварка. Л.: Машиностроение, 1987. 240 с.

15. **Оборудование** для контактной сварки: Справ. пособие / Под ред. В.В.Смирнова. СПб.: Энергоатомиздат, 2000. 848 с.

16. **Рыськова З.А., Федоров П.Д., Жимерева В.И.** Трансформаторы для электрической контактной сварки. Л.. Энергоатомиздат, 1990. 424 с.

17. **Слиозберг С.К., Чулошников П.Л.** Электроды для контактной сварки. Л.: Машиностроение, 1972. 96 с.

18. **Сварка** в машиностроении: Справочник. В 4-х т. М.: Машиностроение, 1978 – 1979.

19. **Технология** и оборудование контактной сварки: Учебник для вузов / Под ред. Б.Д. Орлова. М.: Машиностроение, 1986. 352 с.

20. **Чулошников П.Л.** Точечная и роликовая электросварка легированных сталей и сплавов. М.: Машиностроение, 1974. 232 с.

Глава 6

СВАРКА КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ПИТАНИЯ

6.1. ПЛАЗМЕННАЯ СВАРКА

6.1.1. СУЩНОСТЬ ПЛАЗМЕННОЙ СВАРКИ

Плазма – ионизированный газ, в котором концентрации положительно и отрицательно заряженных частиц почти одинаковы, а хаотическое движение частиц преобладает над упорядоченным движением их в электрическом поле. Плазму, получаемую нагревом газа электрическим дуговым разрядом, принято считать дуговой.

Плазменная сварка – это сварка плавлением, при которой нагрев проводится направленным потоком дуговой плазмы (плазменной струей). Плазменную струю получают в специальных устройствах, которые в сварочных процессах называют плазменными горелками (плазмотронами). Наиболее распространены способы получения плазменных струй путем сжатия и интенсивного охлаждения газовым потоком столба дугового разряда, горящего в сравнительно узком водоохлаждаемом канале плазменной горелки.

Первые плазменные горелки для сварки были созданы на базе аргонодуговых (рис. 6.1) и отличались от них тем, что неплавящийся вольфрамовый электрод и часть столба дуги помещали в водоохлаждаемую металлическую камеру. Камера оканчивалась цилиндрическим отверстием (соплом), расположенным соосно с электродом. Подаваемый в камеру под давлением газ, проходя через сопло, пространственно стабилизирует, охлаждает и сжимает столб дугового разряда, а также обеспечивает его тепловую и электрическую изоляцию от стенки сопла. В результате струя проходящего газа, нагреваясь до высоких температур, ионизируется и приобретает свойства плазмы. Увеличение при нагреве объема газа в 50–100 раз приводит к истечению плазмы с высокими (околозвуковыми) скоростями.

Дуговую плазменную струю для сварки получают по двум основным схемам. При плазменной струе прямого действия изделие

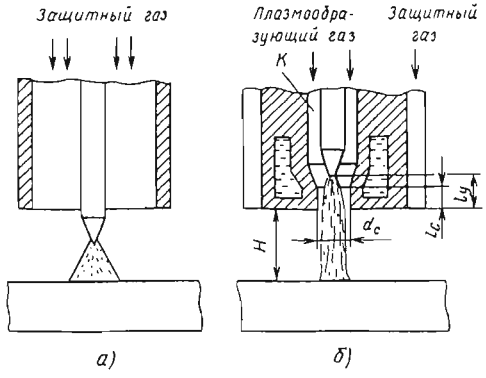


Рис. 6.1. Схемы сопловых частей аргонодуговой (*а*) и плазменной (*б*) горелок:
$d_с$ – диаметр выходного отверстия; K – камера; $l_с$ – длина выходного отверстия; $l_у$ – расстояние между торцом сопла и неплавящимся электродом; H – рабочее расстояние между торцом сопла и свариваемым изделием

включено в сварочную цепь дуги, активные пятна которой (катодное и анодное) располагаются на вольфрамовом электроде и изделии. Процесс сварки по этой схеме принято называть плазменно-дуговым, поскольку плазменная струя совмещена со столбом дугового разряда. При плазменной струе косвенного действия активные пятна дуги находятся на вольфрамовом электроде и внутренней или боковой поверхности сопла плазмотрона. По данной схеме источник теплоты становится независимым от изделия со струей плазмы, выделенной из столба дугового разряда в виде факела. В этом случае теплота передается к изделию теплопроводностью, конвекцией и излучением плазмы. При нагреве плазменной струей прямого действия (сжатой дугой) к перечисленным механизмам теплопередачи добавляется передача энергии заряженными частицами, движущимися в электрическом поле.

Наибольшее распространение получил способ плазменной сварки сжатой дугой прямого действия благодаря следующим преиму-

ществам перед сваркой сжатой дугой косвенного действия. Эффективный КПД сжатой дуги прямого действия в среднем на 10...30 % выше и достигает 65...75 %. Максимальная плотность теплового потока на изделии, как правило, выше на порядок и более. Допустимая электрическая и тепловая мощность при прочих равных условиях выше, что обусловлено отсутствием активного пятна в канале сопла плазмотрона. Стойкость сопла и стабильность горения дуги также выше.

Состав плазмообразующего газа и материала неплавящегося электрода выбирают в зависимости от требований, предъявляемых к процессу. В качестве плазмообразующего газа обычно применяют аргон, гелий, углекислый газ, водород и их смеси. Плазмообразующий газ может служить также и защитой расплавленного металла от воздуха. В некоторых случаях для этого используют подачу отдельной струи специального, более дешевого защитного газа. Электроды изготовляют обычно из вольфрама и меди.

Для защиты катода и сопла от разрушения и перегрева наилучшим газом считается аргон, так как он химически инертен и имеет малую теплопроводность. Однако аргон малоэффективен для преобразования электрической энергии в тепловую. Гелий и водород обладают относительно высокой теплопроводностью и лучше других преобразуют энергию дуги в теплоту. В случае применения их в чистом виде наблюдаются быстрый нагрев и разрушение сопла, поэтому указанные газы применяют в смеси с аргоном.

Плазменная сварка является дальнейшим этапом развития и усовершенствования дуговой сварки в защитных газах неплавящимся электродом. Необходимость разработки процессов сварки плазменной (сжатой) дугой обусловлена возросшими требованиями к сварным соединениям по остаточным деформациям, формированию шва и качеству его поверхности, механическим, антикоррозионным и другим свойствам. Обеспечение этих требований возможно при использовании высококонцентрированных источников энергии, в частности сжатой дуги.

При свободном горении дуги атмосферного давления температура в ее столбе зависит от состава газовой среды и достигает $(5...10)\,10^3$ К. В случае ограничения возможности свободного расширения дуги температуру столба можно повысить до $(15...30)\,10^3$ К. Кроме того, при сжатии столба дуги ограничивается свободное перемещение активного пятна на поверхности изделия. Благодаря этому тепловой поток в изделие становится более концентрированным, глубина проплавления увеличивается с одновременным уменьшением зоны нагрева основного металла, прилегающего к сварному шву. В отличие от свободной дуги, имеющей форму конуса с расширяющимся в сторону изделия сечением, плазменная дуга имеет форму, близкую к цилиндрической. При этом изменение длины плазменной дуги в достаточно широких пределах практически не влияет на глубину проплавления.

6.1.2. ОСНОВНЫЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

Плазменно-дуговая сварка успешно конкурирует со сваркой в среде защитных газов неплавящимся и плавящимся электродами по производительности, экономичности и качеству получаемых соединений. Поэтому она стала применяться в первую очередь в таких отраслях промышленности, как авиастроение, ракетная техника, приборостроение, электронное, электротехническое, химическое машиностроение, медицинская техника и др., где широко используется аргонодуговая сварка.

По сравнению с аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом плазменная сварка обладает следующими преимуществами:

– меньшим влиянием возможного изменения расстояния от торца сопла до изделия на геометрические размеры зоны проплавления;

– меньшей критичностью изменения тока к форме дуги, а следовательно, и к стабильности проплавления металла;

– высокой надежностью зажигания дуги благодаря дежурной дуге;

– отсутствием включений вольфрама в сварном соединении;

– повышенной скоростью сварки;

– меньшим тепловложением и, следовательно, короблением изделий.

Если принять одинаковую скорость сварки, то при плазменной сварке необходим ток почти в 2 раза меньший по сравнению с аргонодуговой, сварные швы более узкие и с меньшей зоной термического влияния.

Наибольшее применение плазменная сварка нашла в производстве изделий из тонколистовых металлов толщиной 0,05...1,5 мм в

тех случаях, когда требуется жесткий контроль тепловложения, например при сварке тонкостенных корпусов полупроводниковых элементов, конденсаторов, вакуумных датчиков, сильфонных узлов, фильтров, узлов электронных ламп, дросселей люминесцентных ламп, тонкостенных труб диаметром 5...10 мм из высоколегированных коррозионно-стойких сталей различного назначения и др.

О широких возможностях плазменной сварки свидетельствуют примеры использования этого процесса для изготовления ответственных сварных конструкций толщиной 3...20 мм из низкоуглеродистых, низколегированных, высокопрочных и коррозионно-стойких сталей, никелевых и титановых сплавов, меди и ее сплавов, алюминиевых сплавов. Наряду с обычными условиями плазменная сварка используется для соединения металлов под водой и в вакууме.

6.1.3. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ РЕЖИМА

Тепловая эффективность проплавления основного металла при плазменной сварке характеризуется полным термическим КПД, плотностью теплового потока в изделии и степенью ее сосредоченности, а также давлением сжатой дуги на сварочную ванну.

Сжатую дугу прямого действия, применяемую для сварки, можно рассматривать как электрическую дугу, но отличающуюся от последней более высокой концентрацией энергии и широкими возможностями ее регулирования. Основные параметры режима плазменной сварки аналогичны параметрам аргонодуговой сварки. К дополнительным параметрам, влияющим на основные параметры режима плазменной сварки, относятся диаметр и длина плазмообразующего сопла, расход и состав плазмообразующего газа.

Основными параметрами плазменно-дуговой сварки являются ток, напряжение, расстояние от торца сопла до изделия, скорость сварки, расход плазмообразующего и защитного газов, диаметр и длина сопла.

Характерные для плазменной сварки диапазоны параметров режима

Сварочный ток, А	80...350
Напряжение, В	25...35
Скорость сварки, м/ч	10...50
Расход газа, л/мин:	
плазмообразующего	1,5...5
защитного	3...10
Расстояние от среза сопла до изделия, мм	4...8
Диаметр сопла, мм	2,5...5
Длина канала сопла, мм	1...3

Ток плазменной сварки является главнейшим параметром. От его величины зависят тепловые и геометрические характеристики дуги, проплавляющая способность, давление и стабильность горения дуги при заданных диаметре и длине канала сопла плазмотрона. При повышении сварочного тока эффективная мощность процесса, плотность теплового потока в центре пятна нагрева и диаметр пятна нагрева заметно увеличиваются (рис. 6.2). Уменьшение диаметра канала сопла приводит к уменьшению диаметра дуги (увеличению коэффициента сосредоточенности теплового потока, поступающего в изделие), росту эффективной тепловой мощности и давления дуги, поэтому при заданной глубине проплавления скорость сварки повышается. Кроме того, уменьшается объем жидкой сварочной ванны и улучшается качество формирования шва, особенно при сварке со сквозным проплавлением. Наиболее эффективно сжимается дуга при использовании сопл с дополнительными каналами, выходящими внутрь сопла (рис. 6.3).

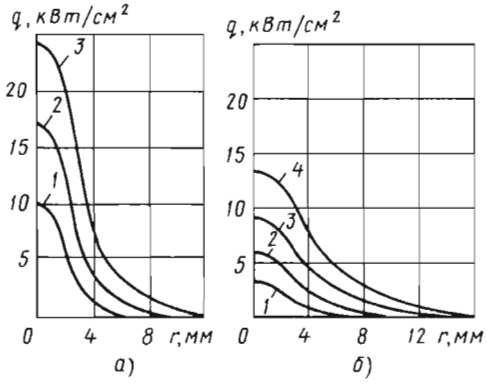


Рис. 6.2. Распределение плотности теплового потока по радиусу пятна нагрева (Q_0 = 12 л/мин; H = 10 мм; l_c = 4,5 мм; d_c = 6 мм):
1 – 4 – соответственно I = 100; 200; 300 и 400 А; *а, б* – плазмообразующие газы (соответственно азот и аргон)

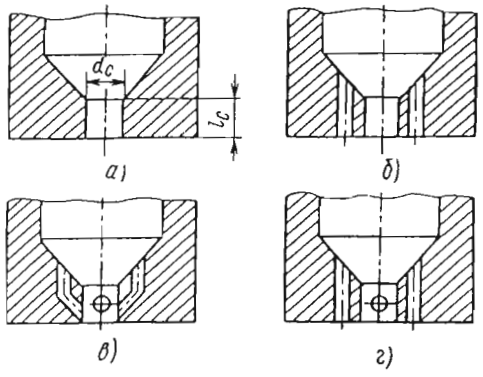


Рис. 6.3. Различное конструктивное исполнение сопл с дополнительными фокусирующими каналами, выходящими из предсопловой камеры:
а – одноканальное (без фокусирующих каналов); *б* – с системой каналов, параллельных оси отверстия сопла; *в* – с системой каналов, выходящих внутрь канала сопла; *г* – с системой каналов, выходящих внутрь и на торец сопла

Однако следует учитывать, что с уменьшением диаметра сопла снижается верхний предел тока (критический ток). Одним из недостатков плазменной сварки является невозможность увеличения тока больше определенного значения при фиксированных размерах канала сопла плазмотрона (длине и диаметре), т.е. дугу можно сжимать до определенного предела. При некоторых значениях тока и диаметра сопла образуется «двойная», или каскадная, дуга. Внешнее двойное дугообразование проявляется в том, что вместо одной дуги, горящей между неплавящимся электродом и изделием, горят две дуги: между неплавящимся электродом и соплом, а также между соплом и изделием. В этом случае на верхней кромке рабочего сопла образуется анодное пятно первой дуги (анодная область дуги), на нижней – катодное пятно второй дуги, которое может удаляться от отверстия сопла на значительное расстояние вместе со столбом дуги. В этих активных пятнах тепловые потоки превышают предельно допустимые значения и сопло разрушается.

Одной из причин образования двойной дуги является увеличение тока и, соответственно, диаметра столба сжатой дуги. При определенной величине тока диаметр столба становится соизмеримым с диаметром канала сопла. Толщина прослойки «холодного газа» между стенкой канала сопла и столбом дуги уменьшается, благодаря чему повышается ее электропроводность и создаются условия для электрического пробоя. Вероятность двойного дугообразования снижается, если увеличивается расстояние от сопла до изделия, отключается дежурная дуга, уменьшается длина канала, возрастает расход газа, уменьшается углубление электрода в канал сопла, увеличивается диаметр сопла и улучшается его охлаждение. Соотношение между критическими токами и расходами плазмообразующего газа показаны на рис. 6.4.

Тангенциальная подача плазмообразующего газа снижает вероятность образования двойной дуги, так как формирует на стенке сопла слой газа, способный выдерживать большее напряжение пробоя. Для обеспечения устойчивости процесса сварки рекомендуется выбирать такой режим, при котором исключалась бы возможность образования двойной дуги. Значение сварочного тока не должно быть близким к критической области, так как незначительное изменение параметров режима сварки может привести к образованию двойной дуги. Это явление, свойственное плазменной сварке, снижает эффективность процесса. Требуются радикальные средства для устранения такого режима работы плазмотрона.

Ценным свойством сжатой дуги является малая чувствительность глубины проплавления и ширины шва к изменению длины между соплом и изделием от 4 до 8 мм при износе вольфрамового электрода.

Силовое воздействие (общее давление) плазменной дуги пропорционально квадрату тока (рис. 6.5). Оно возрастает с увеличением расхода плазмообразующего газа, уменьшением диаметра и длины канала сопла, а также расстояния от торца сопла до изделия.

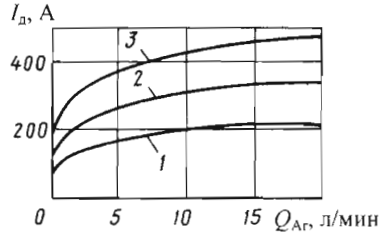


Рис. 6.4. Влияние расхода плазмообразующего газа на предельную токовую нагрузку $I_д$ сопл с каналами различных диаметров:
1 – 3 – соответственно d_c = 3; 4; 5 мм

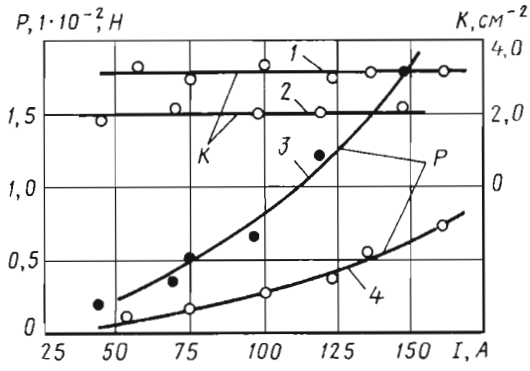


Рис. 6.5. Зависимость силового воздействия *P* дуги и коэффициента сосредоточенности *K* от сварочного тока:

1, *4* – аргонодуговая сварка (длина дуги 3 мм; расход аргона 9 л/мин); *2*, *3* – плазменная сварка (d_c = 3 мм; H = 9 мм; G_o = 1 л/мин)

Плазменная сварка может осуществляться как проникающей, так и непроникающей дугой. При сварке металла толщиной до 3 мм ток ≤100 А. В этом случае сварка выполняется без проникновения дуги через всю толщину металла. Она может осуществляться как без присадочного металла, так и с его добавлением. В первом случае шов формируется практически без усиления, во втором – наоборот.

Для исключения коробления рекомендуется использовать клавишные приспособления. Формирование корня шва может осуществляться на весу. В общем случае при сварке на весу металла малых толщин часто имеют место дефекты в виде прожогов. Основной причиной последних является то, что образующаяся ванна по ширине в несколько раз превышает толщину свариваемого металла, поэтому сварка на весу применяется ограниченно.

Для предупреждения прожогов и обеспечения необходимого проплавления требуемой формы применяют подкладки, чаще всего съемные, с обеспечением защиты обратной стороны шва и формирующей канавкой, а также используют импульсные режимы подачи сварочного тока. Импульсное введение тепловой энергии позволяет уменьшить зону термического влияния, коробление кромок, снижает вероятность прожогов, повышает стабильность горения дуги.

Параметры режимов плазменно-дуговой сварки различных металлов и сплавов небольшой толщины приведены в табл. 6.1.

6.1. Режимы автоматической плазменной сварки без присадочной проволоки

Материал	δ, мм	$I_{св}$, А	U, В	$v_{св}$, м/ч	d_c, мм	Q^*, л/мин (аргон)	
						плазмообразующего	защитного
12Х18Н10Т	1,0	30...50	17...19	20...40	1,4	0,8...1,2	5,5...7,5
	2,0	60...80	19...21	15...30		1,0...1,5	6,5...8,5
	3,0	80...100	21...22	10...20	1,5	2,0...3,0	8,5...10,5
30ХГСА	1,0	30...50	17...19	20...40	1,4	0,8...1,2	4,5...5,0
	2,0	60...80	19...21	15...30		1,0...1,5	
	3,0	80...100	21...22	10...20	1,5	2,0...3,0	5,0...5,5
ВТ5, ОТ4	1,2	45...50	18...19	10...11	1,4	0,5...0,7	14...15
	1,5	55...60	19...22		1,6		
	2,0	70...72	22...23	9,5...10	1,8		

* Расход газа.

Сварка проникающей дугой (рис. 6.6) характеризуется полным проплавлением свариваемых элементов по толщине с образованием небольшого отверстия, через которое раскаленные газы и пары удаляются за нижние кромки свариваемых элементов. Металл, расплавленный дугой, стекая по стенкам свариваемых элементов, удерживается силами поверхностного натяжения. При подобной технологии подкладки не применяют.

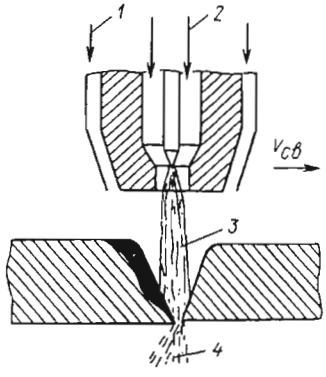


Рис. 6.6. Схема плазменной сварки проникающей дугой:
1 – защитный газ; *2* – плазмообразующий газ; *3* – столб сжатой дуги; *4* – факел плазмы, выходящий через отверстие за нижнюю плоскость свариваемого изделия

Способ сварки проникающей дугой позволяет получать высококачественное соединение при сварке металлов, обладающих повышенным поверхностным натяжением, например коррозионно-стойких сталей и сплавов титана толщиной 3...15 мм на токах 100...300 А.

Наиболее часто сварку ведут на постоянном токе прямой полярности, за исключением алюминиевых и магниевых сплавов, которые сваривают на обратной полярности или переменном токе. По сравнению со сваркой без сквозного проплавления этот метод обеспечивает: полный и равномерный провар без применения подкладок, установка которых всегда затруднительна; постоянный контроль провара благодаря образованию сквозного отверстия; увеличение допусков на величину зазора.

При плазменной сварке вследствие высокой концентрации энергии и силового воздействия сжатой дуги на сварочную ванну возрастает роль потоков жидкого металла сварочной ванны в формировании шва, высокие скорости сварки и охлаждения металла шва вызывают образование дефектов в виде подрезов. Чтобы избежать этих дефектов сварного соединения, приходится снижать скорость сварки, а также расход плазмообразующего газа, что способствует образованию двойной дуги и нестабильности формирования шва и проплавления металла. Однако при оптимальном сочетании параметров режима можно получать швы с хорошим формированием, без каких-либо подрезов (табл. 6.2).

6.2. Примерные режимы сварки стыковых соединений постоянным током

δ, мм	$I_{св}$, А	U, В	$v_{св}$, м/ч	$d_э$, мм	Q^*, л/мин (аргон)	
					плазмообразующего	защитного
Коррозионно-стойкая сталь						
6,0	180...190	24...25	15...16	2,5	0,8...1,3	5,0...7,0
8,0	250...260	28...29	12...13	3,0	3,0...3,5	8,5...9,5
10,0	290...300	30...31	10...11			9,5...10,5
Титановые сплавы						
4,7	185...190	21...22	20...21	3,4	7,8...8,2	26...27
10,0	220...225	36...37	15...16		14...15	27...28
12,0	270...275	37...38			12,8...13	
Никель						
3,2	200...205	29...30	40...41	2,8	6,5...6,9	24...25
6,0	245...250	30...32	20...21	3,4	4,5...4,7	
8,0	310...312	31...32	14...15		5,5...5,7	

Сварка металла толщиной >10...12 мм без разделки кромок приводит либо к прожогам, либо к непроварам металла на всю толщину. Диапазон изменения параметров режима очень узкий. Проблема сварки всех без исключения материалов толщиной >7 мм состоит в поддержании многочисленных параметров режима плазменной сварки в строго заданных пределах. С увеличением толщины свариваемого металла диапазон отклонения параметров сужается. Это неизбежно приводит к необходимости автоматизации процесса с применением систем автоматического регулирования.

6.1.4. РАЗНОВИДНОСТИ ПЛАЗМЕННОЙ СВАРКИ И СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ЕЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Сварка закрытой сжатой дугой. Сущность этого способа состоит в следующем (рис. 6.7). Сварка осуществляется дугой, которая возбуждается между вольфрамовым электродом и изделием через канал медного сопла, охлаждаемого водой. Дуга, сварочная ванна и прилегающие зоны нагретого металла защищены от атмосферного воздуха медной, латунной или стальной микрокамерой, охлаждаемой водой. Горелка отделена от нее изоляционной втулкой. Присадочная проволока подается в зону сварки через отверстие в микрокамере. Плазмообразующий газ при выходе из горелки заполняет микрокамеру и под некоторым избыточным давлением выходит по каналу над остывающим сварным швом. Микрокамеру в процессе сварки прижимают к изделию с силой, достаточной для устранения коробления кромок в месте сварки. При сварке тонких листов (до 2...3 мм) для защиты шва достаточно потока плазмообразующего газа. Для листов большей толщины в микрокамеру подают дополнительно защитный газ. Форма микрокамеры соответствует профилю изделия и типу соединения. Закрытой сжатой дугой удается сваривать листы толщиной 0,1...16 мм за один проход без разделки кромок.

Сварка двойной плазменной дугой с токоведущей присадочной проволокой. В данном случае источниками тепла служат плазменные дуги, возбуждаемые между электродами горелки и изделием и между электродом и непрерывно подаваемой в зону сварки присадочной проволокой (рис. 6.8). Плазменная дуга между электродом и изделием в основном подогревает свариваемые кромки и жидкий присадочный металл, заполняющий разделку; плавление же проволоки обеспечивает преимущественно плазменная дуга между проволокой и электродом.

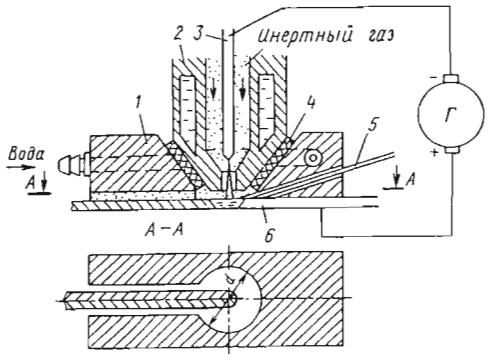


Рис. 6.7. Схема головки для сварки закрытой сжатой дугой:
1 – камера; *2* – сопло; *3* – электрод; *4* – изоляционная втулка; *5* – присадочная проволока; *6* – изделие; *Г* – источник питания плазменной дуги

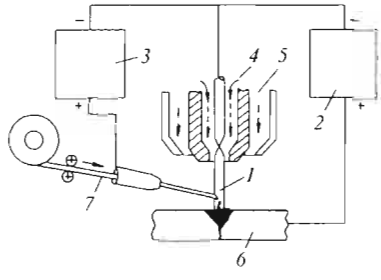


Рис. 6.8. Схема процесса сварки двойной плазменной дугой с токоведущей присадочной проволокой:
1 – плазменная дуга; *2* – источник питания дуги электрод – изделие; *3* – источник питания дуги электрод – проволока; *4* – плазмообразующий газ; *5* – защитный газ; *6* – изделие; *7* – проволока

Наилучшие результаты получаются, если применять источник питания для дуги электрод – изделие с крутопадающей вольтамперной характеристикой, а для дуги электрод – проволока – с жесткой. В этом случае наблюдается саморегулирование, обеспечивающее при заданных условиях сварки плавление проволоки около оси плазменной дуги.

Плазменная сварка плавящимся электродом. Этот способ представляет собой комбинацию плазменно-дуговой сварки и дуговой сварки плавящимся электродом. Он отличается от сварки плавящимся электродом тем, что окружающая атмосфера нагревается до такой высокой температуры, что оказывается состоящей из ионизированного газа, т.е. плазмы. Плазма может получаться от отдельного дуго-

вого разряда. Когда такой термически ионизированный газ с высокой электропроводностью окружает проволоку, которая имеет определенный потенциал, то электрический ток от проволоки перестает зависеть от собственного дугового разряда. Это обеспечивает самопроизвольное начало разряда, повышенную стабильность и лучший контроль над переносом металла и тепловложением.

При плазменной сварке плавящимся электродом (рис. 6.9) проволока подается по оси горелки через медное сопло в плазменную дугу, которая поддерживается между расположенным сбоку вольфрамовым электродом и изделием.

Плазменная сварка в вакууме полым неплавящимся катодом (рис. 6.10). В качестве источника теплоты используется дуговой разряд с полым катодом (ДРПК). Сварка осуществляется стабильно в диапазоне давления в камере $1...1 \cdot 10^{-2}$ Па при расходе через полость катода аргона 1...2 мг/с (2...4 л/ч). При этом эффективный КПД составляет 0,8...0,85. Возможность регулирования процесса эффективной мощностью и распределением плотности теплового потока в пятне нагрева за счет изменения тока разряда, длины дугового промежутка, подачи аргона через полый катод и воздействия аксиального магнитного поля позволяет получать высококачественные сварные соединения тугоплавких и химически активных

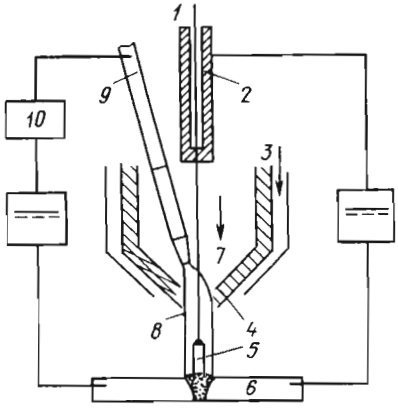


Рис. 6.9. Схема процесса плазменной сварки с плавящимся электродом:
1 – присадочная проволока; *2* – контактная трубка; *3* – защитный газ; *4* – медное сопло; *5* – светящаяся струя пара; *6* – изделие; *7* – плазмообразующий газ; *8* – плазменная струя; *9* – вольфрамовый электрод; *10* – осциллятор

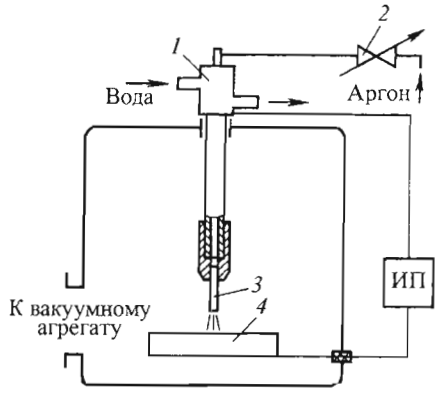


Рис. 6.10. Схема сварки полым неплавящимся катодом в вакууме:
1 – ствол горелки;
2 – натекатель плазмообразующего газа;
3 – полый термоэлектронный катод;
4 – изделие-анод; *ИП* – источник питания ДРПК

сплавов толщиной 1...20 мм. Применение этого способа имеет определенные металлургические преимущества, так как способствует удалению газов из расплавленного металла. Содержание газов в металле шва примерно такое же, а иногда и меньше, чем при электронно-лучевой сварке.

Микроплазменная сварка. При микроплазменной сварке применяют токи в пределах 0,2...15 А. Устойчивое и стабильное горение микроплазменной дуги на малых токах достигается благодаря высокой степени сжатия столба дуги каналом сопла малого диаметра (<1 мм). В качестве плазмообразующего газа используют аргон, а как защитный – аргон, гелий, азот, смеси аргона с водородом, аргона с гелием. При микроплазменной сварке сжатая дуга может принимать конусообразную форму с вершиной, обращенной к изделию. Высокая концентрация энергии и иглоподобная форма малоамперной сжатой дуги обеспечивают получение узкого шва и малой зоны термического влияния, что снижает деформацию изделий на 25...30 % по сравнению с аргонодуговой сваркой.

Микроплазменная дуга нашла широкое применение в радиоэлектронике и приборостроении для сварки тонких листов толщиной 0,025...0,8 мм. По сравнению с аргонодуговой сваркой изменение длины микроплазменной дуги оказывает значительно меньшее влияние на качество сварного соединения.

6.2. ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ СВАРКА

6.2.1. СУЩНОСТЬ МЕТОДА И ОСНОВНЫЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

Сущность электронно-лучевого воздействия состоит в преобразовании кинетической энергии направленного пучка электронов в зоне обработки в тепловую. Электронно-лучевая сварка (ЭЛС) осуществляется расплавлением кромок основного металла остросфокусированным потоком электронов, ускоренных электрическим полем с разностью потенциалов ≥10...100 кВ. В результате электронный луч в зоне обработки обеспечивает высокую плотность мощности. По этому показателю электронный луч существенно превосходит традиционные сварочные источники нагрева (электродуговые) и уступает только лазерному (табл. 6.3). Металл шва так же, как и при других методах сварки плавлением, имеет литую структуру.

Электроны, обладающие достаточно высокой энергией, могут проникать в обрабатываемый материал на некоторую глубину. Максимальная глубина, пройдя которую электрон теряет свою энергию, зависит от ускоряющего напряжения и плотности обрабатываемого материала и может быть выражена зависимостью $\delta = 2{,}35 \cdot 10^{-12} U^2 / \rho$, где δ – глубина проникновения, см; U – ускоряющее напряжение, В; ρ – плотность обрабатываемого материала, г/см^3. Так, для стали с плотностью 7,8 г/см^3 при $U = 60$ кВ $\delta \approx 12$ мкм. Следовательно, энергия электронного луча преобразуется в тепловую внутри тонкого поверхностного слоя. Взаимодействие электронного луча с обрабатываемым материалом вызывает ряд явлений, влияющих на технологию сварки и конструкцию сварочных установок. Тепловое и рентгеновское излучения, отраженные, вторичные и тепловые электроны незначительно снижают эффективно используемую долю энергии электронного луча для нагрева и плавления свариваемого металла. Значения эффективного КПД при ЭЛС порядка 0,85...0,95. Таким образом, электронный луч по сравнению с другими сварочными источниками энергии, используемыми для сварки плавлением, самый высокоэффективный.

6.3. Плотность мощности в пятне нагрева сварочных источников теплоты

Источник нагрева	Минимальная площадь пятна нагрева, см^2	Максимальная плотность мощности в пятне нагрева, Вт/см^2
Ацетилено-кислородное пламя	0,2	$1 \cdot 10^4$
Электрическая дуга	0,1	$1 \cdot 10^5$
Электронный луч	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^8$
Лазерный луч	$<1 \cdot 10^{-7}$	$>1 \cdot 10^8$

При воздействии пучка электронов сравнительно невысокой плотности мощности (до $1 \cdot 10^5$ Вт/см^2) процесс ЭЛС подобен процессу обычной электродуговой сварки. Проплавление существенно ограничено по глубине и в поперечном сечении близко по форме к полусфере. Такой процесс применяется для сварки малых толщин (до 3 мм).

Переход от сварки малых толщин к однопроходной сварке металлов больших толщин осуществляется при условии достижения критической плотности мощности q_2^*, величина которой для большинства металлов $q_2^* = 10^5...10^6$ Вт/см^2. В этом случае эффективная мощность электронного луча уже не может быть отведена в глубь металла путем теплопроводности и тепловое равновесие поверхности нагрева наступает при испарении части металла.

При плотности мощности пучка электронов до $10^5...10^7$ Вт/см^2 в зоне его воздействия развивается заметное испарение металла, поверхность ванны интенсивно прогибается и в жидком металле формируется пародинамический канал на всю глубину ванны. Образование этого канала обусловлено главным образом давлением отдачи частично испаряемого металла. Чем выше плотность мощности пучка, тем сильнее нагрев поверхности сварочной ванны и эффективнее передается энергия пучка электронов по всей толщине свариваемого металла. Электронно-лучевое воздействие в этом диапазоне плотности мощности характеризуется явлением «кинжального», или глубокого, проплавления с соотношением глубины проплавления к его ширине до 10 : 1 и более (рис. 6.11). Высокая концентрация энергии в луче позволяет сваривать за один проход металл толщиной до 200...300 мм и получать при больших скоростях ЭЛС узкие и глубокие

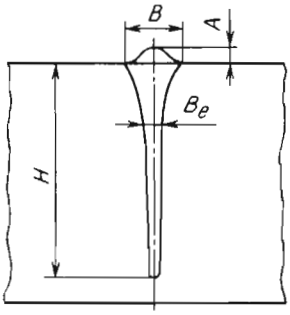


Рис. 6.11. Типичная форма поперечного сечения сварного шва в металле, выполненного электронным лучом:
H, *B*, *A* – глубина, ширина и усиление шва соответственно; B_e – ширина шва на уровне 0,368*H*, т.е. на уровне *H* / **e**, где **e** – основание натурального логарифма

сварные швы с малой зоной термического влияния. Поперечное сечение шва имеет слабосходящиеся или параллельные боковые стенки, что обеспечивает минимальные угловые деформации.

Главной особенностью формирования канала проплавления при ЭЛС по достижении $q_2 > q_2^*$ является то, что процесс носит автоколебательный характер. При формировании сварного шва наблюдаются в основном два типа периодических процессов: периодическое испарение по мере углубления электронного луча в металл (с частотами порядка единиц и десятков килогерц) и колебания жидкого металла в сварочной ванне за счет периодического «строгания» передней стенки (с частотой порядка 1…100 Гц).

Процесс ЭЛС в основном осуществляют в высоком вакууме (10^{-2}…10^{-3} Па), реже в диапазоне давления 1…10^{-1} Па. Высокий вакуум применяется как для эффективной генерации электронного пучка и беспрепятственного прохождения его (из-за отсутствия столкновения электронов с остаточными молекулами воздуха) до свариваемого изделия, так и для создания химически инертной среды, содержащей вредные примеси (кислород, азот и водород), в 10–100 раз меньшие, чем в аргоне высшего сорта при атмосферном давлении. Это позволяет получать сварные соединения высокого качества при сварке таких химически активных сплавов, как титановые, циркониевые, молибденовые, ниобиевые и др.

При повышении давления в сварочной камере до 1…10 Па становится уже заметным рассеяние пучка электронов в пространстве дрейфа до изделия, что ограничивает возможную длину пучка при ЭЛС. При вневакуумной ЭЛС рассеяние пучка столь велико, что не удается достигнуть рабочего расстояния пушка – изделие >10…30 мм.

Для сварки обычно применяются аксиально-симметричные конические, реже цилиндрические электронные пучки. Формирование мощного электронного пучка с малыми поперечными размерами осуществляется сварочной электронной пушкой с высоковольтным источником питания и системами управления. Схема получения электронного луча показана на рис. 6.12.

Промышленное применение. ЭЛС является наиболее перспективным способом соединения изделий из химически активных и тугоплавких металлов и сплавов; изделий из термически упрочненных материалов, когда нежелательна, затруднена или невозможна термообработка; изделий после завершающей механической обработки при необходимости обеспечения минимальных сварочных деформаций; ряда толстостенных и толстолистовых конструкций ответственного назначения.

Наиболее широко освоено промышленное применение ЭЛС в мире в авиакосмической промышленности; ядерной энергетике; энергетическом машиностроении; турбиностроении; электровакуумном, приборном и релейном производстве; автомобильной промышленности и др.

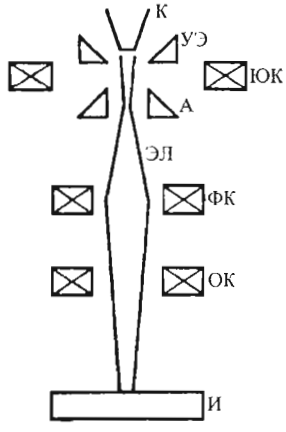


Рис. 6.12. Типичная схема электронно-лучевой пушки:
К – катод; *УЭ* – управляющий электрод; *ЮК* – юстирующие катушки; *А* – анод; *ЭЛ* – электронный луч; *ФК* – фокусирующие катушки; *ОК* – отклоняющие катушки; *И* – свариваемое изделие

6.2.2. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ РЕЖИМА

Технологические параметры ЭЛС – это ускоряющее напряжение U, кВ; ток луча I, мА; рабочее расстояние (расстояние от центра фокусирующей системы до поверхности свариваемого изделия) l, см; угол сходимости луча α, градус; скорость перемещения луча v, м/ч; ток фокусирующей системы $I_ф$, мА. Последний определяет диаметр пятна воздействия электронов на изделие. Изменением скорости сварки можно регулировать скорость кристаллизации металла сварного шва и термическое воздействие на основной металл в околошовной зоне. Кроме того, ЭЛС может характеризоваться дополнительными параметрами: формой и частотой колебаний пучка, скоростью и направлением подачи присадочного материала и т.п.

Типичные интервалы значений параметров электронного пучка для сварки следующие: мощность q = 1...120 кВт при U = = 25...120 кВ; α = 1...5°; l = 2...20 см; v = 3...100 м/ч, диаметр пятна луча в зоне сварки d = 0,1...3 мм и т.д.

Технологические параметры ЭЛС включают в себя физико-химические свойства основного металла, давление и состав остаточной среды в вакуумной камере, величину и распределение остаточной намагниченности изделия, пространственное положение сварного шва и электронного луча, тип и геометрию стыкового соединения.

Из энергетических параметров процесса сварки наиболее существенно влияют на качество шва мощность пучка, положение его минимального сечения и скорость сварки. Стабилизация уровня фокусировки и мощности пучка электронов при сварке обеспечивает стабильность как коэффициента равномерности шва, так и средней глубины проплавления. По мере увеличения толщины свариваемого металла резко снижается диапазон допустимых изменений уровня фокусировки пучка.

Оптимальное значение скорости сварки определяется, с одной стороны, условием минимальной интенсивности гидродинамических возмущений в ванне, а с другой, - условием минимальной ширины шва для снижения деформаций, повышения трещиноустойчивости, сохранения концентрации легкоиспаряющихся легирующих элементов в металле шва. Первое условие требует уменьшения скорости сварки, а второе – ее повышения. С увеличением толщины свариваемого металла оптимальная скорость сварки снижается. Так, если металл толщиной 1,0...1,5 мм удается сваривать с хорошим формированием шва при скорости сварки v ≈ 210...240 м/ч, то, например, сталь толщиной 150...200 мм нужно сваривать при v ≈ 3...5 м/ч. Хотя современное оборудование позволяет проплавлять сталь этой толщины, по крайней мере, в 3 раза больших скоростях, однако с совершенно неудовлетворительным формированием шва. Уточнение скорости для получения необходимых свойств металла сварного соединения играет большую роль при разработке технологии сварки.

6.2.3. ТЕХНИКА СВАРКИ

Наиболее важными технологическими параметрами процесса сварки являются тип и геометрия стыкового соединения и пространственное положение сварного шва и электронного пучка. Для однопроходной ЭЛС применяются типы соединений, главным образом характерные для сварки плавлением (рис. 6.13). Отличительными типами соединений являются соединения под сварку: проникающим электронным пучком (см. рис. 6.13, *ж*); в углублении и труднодоступных местах (см. рис. 6.13, *г*); тавров через полку (см. рис. 6.13, *и*). Отбортовка кромок (см. рис. 6.13, *в*) применяется обычно в изделиях радиоэлектроники и приборостроения. Соединения под сварку проникающим пучком допускаются для тонколистовых металлов в нижнем положении и для металлов малых и средних толщин в горизонтальном положении. Тавровые соединения могут выполняться на металлах с $\delta \le 10$ мм. Остальные соединения допускаются для металлов малых, средних и больших толщин.

Как показал многолетний опыт, сварка электронным пучком может успешно осуществляться (и широко применяться на практике) в нижнем положении, на боку, на подъем. Сварка в нижнем положении (вертикальным электронным пучком) выполняется как без подкладки, так и на подкладке и служит для соединения сталей толщиной до 40 мм, титановых и алюминиевых сплавов толщиной до 80 мм. Сварка на боку и на подъем проводится горизонтальным электронным пучком для металлов любой толщины без подкладки. Для предотвращения вытекания жидкого металла из сварочной ванны иногда устанавливается ограничительная планка.

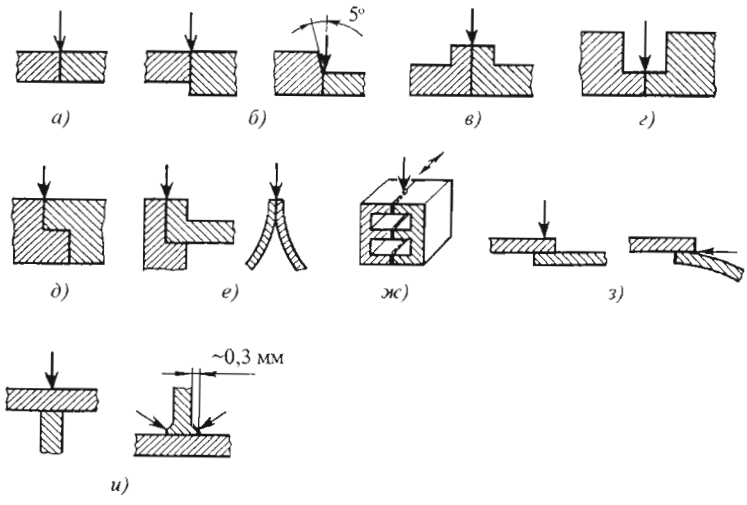


Рис. 6.13. Типы соединений для ЭЛС:
а и *б* – соответственно равнотолщинный и разнотолщинный стыки; *в* – стык с отбортовкой кромок; *г* – стык в углублении; *д* – замковый стык; *е* – стыковое соединение тонкостенных деталей; *ж* – «многоэтажный» стык; *з* – нахлесточное соединение; *и* – тавровое соединение; стрелкой показано направление воздействия электронного пучка

Подготовка как стыкуемых поверхностей деталей, так и самих деталей под сварку электронным пучком имеет ряд особенностей. Последние обусловлены в основном наличием вакуума при сварке и спецификой источника теплоты – узкого потока заряженных частиц. Для обеспечения высокого качества сварного шва очистке от средств консервации, загрязнений, ржавчины и оксидных пленок подвергаются в обязательном порядке стыкуемые поверхности, внешние и внутренние (при сквозном проплавлении) поверхности деталей на расстоянии ≥100 и ≥20 мм от кромки при сварке соответственно толсто- и тонколистовых металлов. Предварительная очистка выполняется механически, а окончательная – в зависимости от свариваемого металла и степени шероховатости очищаемой поверхности различными физико-химическими способами. Непосредственно перед сваркой внешняя поверхность свариваемых деталей в области стыка и стыкуемые поверхности (насколько возможно через зазор в стыке) можно очищать с помощью маломощного сканирующего электронного пучка. При этом пучок должен незначительно оплавлять очищаемую поверхность, не заплавляя зазор в стыке. Для очистки выполняются один-два прохода.

Для однопроходной ЭЛС *не требуется* разделки кромок. В то же время имеются определенные требования к ширине зазора в стыке. Допустимая ширина зазора на металлах с $\delta \leq 20...30$ мм при сварке без присадки 0,1...0,2 мм, а с $\delta > 30$ мм равна 0,3 мм. Чем хуже свариваемость металла и выше требования к допустимой деформации изделия, тем более высокие требования предъявляются к минимальной ширине зазора.

Разделка кромок соединяемых ЭЛС деталей применяется лишь в необходимых случаях для улучшения качества формирования шва и обеспечения надежной работоспособности систем автоматического слежения за стыком.

6.2.4. СПЕЦИФИЧЕСКИЕ ДЕФЕКТЫ В СВАРНЫХ ШВАХ ЭЛС

Особенности гидродинамических, тепловых и деформационных процессов при формировании сварного шва в ходе ЭЛС приводят к образованию специфических дефектов, снижающих эксплуатационные характеристики соединений.

Вследствие периодического заливания дна пародинамического канала наблюдаются неравномерность проплавления с образованием пилообразной формы нижней части границы литой зоны, образование пор и усадочных раковин, особенно в корневой части шва, из-за недостатка жидкого металла при высокой ско-

рости кристаллизации литой зоны малых размеров. Корень шва имеет типичную пичковую структуру. Каждому пичку в корне шва соответствует чешуйка на поверхности шва, т.е. для сварного шва при ЭЛС характерна, как правило, слоистая структура.

Для предотвращения корневых дефектов необходимо формировать пародинамический канал с достаточно широкой нижней частью и закруглением канала. Изменение формы канала осуществляется изменением формы распределения плотности мощности электронного пучка в зоне сварки, например круговым сканированием пучка. Расширение корня шва позволяет также уменьшить опасность несплавлений свариваемых деталей из-за проявления остаточных или наведенных магнитных полей.

В центре шва по всей его высоте вследствие нормального теплоотвода в месте стыковки встречно-растущих кристаллитов и сосредоточения легкоплавких включений может возникать зона пониженной прочности с образованием продольных горячих трещин. Иногда их называют срединными трещинами. Их высота обычно составляет 2...15 мм, а ширина 0,1...0,3 мм. Следует при этом учитывать и высокую жесткость соединения при сварке больших толщин.

При уменьшении скорости сварки (при q_2 = const) глубина канала увеличивается. На выходе канала возможны захлопывание канала жидким металлом и образование полости (рис. 6.14).

К специфическим дефектам ЭЛС следует также отнести отклонение канала проплавления от линии стыка вследствие отклонения луча при сварке сталей с остаточной намагниченностью. Для ликвидации этого дефекта прибегают к предварительному размагничиванию свариваемого изделия.

Из сказанного здесь следует, что геометрия и качество швов при ЭЛС взаимосвязаны более сильно, чем при дуговых способах сварки.

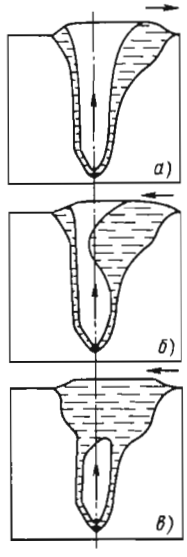


Рис. 6.14. Схема поведения канала при ЭЛС:
а – канал свободен от жидкости;
б – отражение волны жидкого металла от хвостовой части ванны; *в* – захлопывание канала

6.2.5. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИЕМЫ СВАРКИ

Для улучшения качества шва и повышения производительности процесса ЭЛС разработано и применяется большое количество технологических приемов. Наиболее изученные и апробированные из них: формирование шва с обязательным полным проплавлением; развертка и наклон пучка; модуляция тока пучка; подача присадочного материала; применение подкладок; сварка смещенным и «расщепленным» пучком; выполнение прихваток и предгасительных проходов. Достаточно изученные и обоснованные приемы, но не получившие широкого применения, – тандемная сварка и сварка в узкую разделку. Рассмотрим наиболее освоенные приемы.

Полное проплавление свариваемого стыка. Это наиболее надежный и простой способ, позволяющий исключить корневые дефекты, свести к минимуму угловые деформации, уменьшить вероятность образования пор и раковин благодаря улучшению условий дегазации металла сварочной ванны. При сварке в нижнем положении данный прием применяется для соединения металлов с $\delta < 40$ мм, а при сварке горизонтальным электронным пучком – с $\delta \le 400$ мм. В последнем случае для предотвращения вытекания жидкого металла из сварочной ванны иногда устанавливается ограничительная планка вдоль нижней кромки стыка.

Развертка электронного пучка. Чрезвычайно широко используются следующие развертки пучка: продольная, поперечная, Х-образная, по окружности, эллипсу, дуге и т.п. с амплитудой порядка диаметра пучка и частотами до 1...2 кГц.

Эффект от развертки проявляется в изменении мгновенного и усредненного по периоду распределения плотности мощности электронного пучка. Соответственно меняются характер гидродинамических процессов и конфигурация сварочной ванны. Благодаря этому при сварке металлов больших толщин удается сильно расширить диаметр и повысить устойчивость канала в сварочной ванне, что благоприятно сказывается на стабильности формирования швов: уменьшается разбрызгивание расплавленного металла, предотвращается вытекание расплава из ванны при сварке горизонтальным пучком. Вследствие изменения формы шва уменьшается склонность к образованию трещин, корневых дефектов и протяженных полостей.

Сварка наклонным электронным пучком. Для сварки металлов большой толщины рекомендуется применять постоянное отклонение электронного пучка в направлении его перемещения по изделию. При этом удается избежать S-образной формы фронта кристаллизации, улучшить условия дегазации расплавленного металла при сварке в нижнем положении и обеспечить отток жидкости металла из глубины ванны при сварке на подъем. В последнем случае создаются практически одинаковые условия кристаллизации расплава по всей глубине сварочной ванны. Экспериментально установлено, что угол отклонения пучка должен составлять 5...7°. Такой прием позволяет уменьшить количество пор и несплошностей.

Модуляция тока электронного пучка. Для уменьшения тепловложения при сварке тонколистовых (до 1 мм) материалов, а также осуществления точечной сварки обычно используется импульсная модуляция тока электронного пучка с частотой 1...100 Гц. При шовной сварке частота импульсов и скорость сварки выбираются так, чтобы отдельные проплавленные участки перекрывали друг друга. Модуляция пучка применяется для предотвращения образования трещин и обеспечения возможности сварки тонкостенных малогабаритных деталей.

Многочисленные попытки применения модуляции тока пучка при сварке металлов средних и больших толщин не нашли широкого применения из-за интенсивного разбрызгивания металла, значительных подрезов с обеих сторон шва.

Сварка с присадкой. Этот прием используется иногда для легирования металла шва или восстановления необходимой концентрации легкоиспаряющихся элементов в шве и достаточно широко – при больших зазорах в стыке и исправлении дефектов шва.

В качестве присадочного материала для непрерывной подачи в процессе сварки используются прутки, ленты, сплошная или рубленая проволока, гранулы и порошок. Наибольшее промышленное применение нашла сварка с подачей присадочной проволоки диаметром 0,8...1,6 мм, особенно для ремонта швов. Обычно проволоку вводят в сварочную ванну позади электронного пучка под углом 15...45° к его продольной оси. При этом режим подачи выбирается так, чтобы часть проволоки расплавлялась в жидком металле ванны, а часть – непосредственно электронным пучком.

При переменном зазоре в стыке предложено применять системы автоматического регулирования скорости подачи присадочного материала. Параметром, за которым «следит» такая система, служит либо ширина зазора, либо ширина или высота усиления шва.

Зачастую между стыкуемыми поверхностями деталей помещается тонкий слой другого, переходного материала в виде ленты, гранул или порошка, предназначенного для легирования металла шва. Слой переходного материала может быть также нанесен напылением, осаждением или наплавкой на стыкуемые поверхности. Толщина слоя переходного материала в виде вставки должна быть равна диаметру электронного пучка, а в случае наплавки может достигать 10 мм. Такая разновидность приема позволяет осуществить наиболее однородное легирование металла шва.

При сварке на легирующей подкладке одновременно обеспечивается выведение корневых дефектов в подкладку. Равномерное легирование шва достигается благодаря интенсивному переносу жидкого металла из глубины ванны к ее поверхности. Толщина подкладки должна составлять ≥20...25 % общей глубины шва.

Возможна также сварка с использованием легирующей накладки. Толщина ее не должна превышать высоты усиления шва. Область применения этой модификации приема ограничивается отсутствием или затруднительностью контроля положения электронного пучка по отношению к стыку.

Сварка на дисперсной подкладке. Для улучшения выхода газов и паров из сварочной ванны и уменьшения интенсивности гидроди-

намических явлений в ней, а также для снижения трудоемкости удаления подкладки сварку металлов толщиной ≥40 мм в нижнем положении рекомендуется осуществлять на подкладке из гранул или рубленой сварочной проволоки. Конструктивно такая подкладка выполняется в виде металлической коробки с отверстиями, закрытыми металлической сеткой. Коробка наполняется дисперсным материалом. Режим сварки выбирается так, что сварочная ванна достигает наполнителя подкладки. При этом газы и пары из зоны сварки удаляются через промежутки между частицами наполнителя и отверстия в стенках коробки.

Сварка с постоянным поперечным смещением электронного пучка. При сварке, а также при сварке-пайке разнородных металлов электронный пучок смещают относительно плоскости симметрии стыка в сторону более тугоплавкого металла. Величина смещения либо рассчитывается, либо определяется экспериментально.

Смещение пучка применяется также в ряде случаев для компенсации его поперечного отклонения продольным (вдоль стыка) магнитным полем, возникающим иногда при сварке разнородных металлов и сплавов.

Сварка «расщепленным» пучком. Используя отклонение электронного пучка импульсным током (при изменении полярности) прямоугольной формы в электромагнитной отклоняющей системе пушки, можно одновременно сваривать отдельными точками или непрерывными швами два или более близко расположенных стыков. При шовной сварке период колебаний пучка выбирается из условия устойчивости пародинамического канала в сварочной ванне, а время переброса пучка между стыками – из условия несплавления поверхности изделия. Поскольку здесь имеет место несовпадение при этом оси отклоненного пучка й плоскости симметрии стыка, такой прием годится только для сварки металлов малых толщин.

Прихватки. При ЭЛС ферромагнитных материалов прихватки желательно выполнять электронным пучком, так как использование для этих целей дуговых методов сварки приводит к появлению намагниченности. Предпочтительно пучком выполнять прихватки и на термически упрочненных материалах.

Длина прихваток должна обеспечивать функционирование системы позиционирования пучка и слежения за стыком. Поэтому прихватки выполняют обычно длиной ≤20…30 мм. Порядок наложения прихваток вдоль стыка – от середины к его краям. Число прихваток определяется конструкцией свариваемых деталей.

При выполнении прихваток на всю глубину шва осуществляется так называемая секционированная сварка, например для предотвращения возникновения микротрещин вследствие термических деформаций при сварке протяженных замкнутых стыков. Шов выполняют отдельными участками, причем в такой последовательности, чтобы каждый последующий участок отстоял от предыдущего как можно дальше. Желательно выдерживать паузы между сваркой отдельных участков.

6.3. ЛАЗЕРНАЯ СВАРКА

6.3.1. ФОРМИРОВАНИЕ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ

Лазер представляет собой генератор электромагнитных волн в широком диапазоне, характеризующихся высокой степенью монохроматичности и высокой когерентностью. Благодаря этим качествам лазерное излучение можно сфокусировать на чрезвычайно малую площадь, теоретически соизмеримую с квадратом длины волны излучения. При этом в современных лазерных системах достигаются рекордные уровни концентрации энергии (рис. 6.15), открывающие новые возможности для обработки материалов.

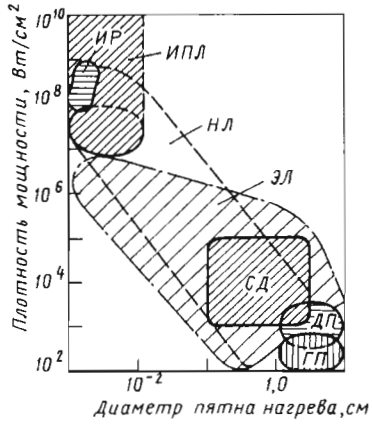


Рис. 6.15. Концентрация энергии различных тепловых источников:
ГП – газовое пламя; *ДП* – дуговая плазма; *СД* – сварочная дуга; *ЭЛ* – электронный луч; *НЛ* – непрерывные лазеры с плотностью мощности излучения $E_{max} = 10^8 \ldots 10^9$ Вт/см^2; *ИПЛ* – импульсно-периодические лазеры, $E_{max} = 10^{10} \ldots 10^{14}$ Вт/см^2; *ИР* – искровой разряд

Лазерное излучение обеспечивает высокую концентрацию энергии, значительно превосходящую другие источники энергии, применяемые при сварке. Электронный луч, используемый в настоящее время для сварки ответственных конструкций, также обеспечивает достаточно высокую концентрацию энергии. Однако ЭЛС осуществляется в вакуумных камерах, что необходимо для устойчивого проведения процесса. Лазерная сварка принципиально отличается от ЭЛС тем, что не требует вакуумных камер. Процесс лазерной сварки осуществляется на воздухе либо в среде защитных газов: аргона, гелия, углекислого газа и др. Благодаря этому лазерную сварку можно применять для соединения элементов крупногабаритных конструкций.

Лазерный луч с помощью оптических систем легко транспортируется и направляется в труднодоступные места. При этом обеспечивается надежное и оперативное управление процессом лазерной сварки с регулируемыми энергетическими характеристиками. В отличие от электронного луча, дуги и плазмы на лазерный луч не влияют магнитные поля свариваемых деталей и технологической оснастки. Это позволяет получать устойчивое высококачественное формирование сварного соединения по всей длине.

Для сварки металлов используются твердотельные и газовые лазеры как периодического, так и непрерывного действия.

Благодаря высокой концентрации энергии лазерного излучения в процессе сварки обеспечиваются малый объем расплавленного металла, незначительные размеры околошовной зоны (ОШЗ) термического влияния, высокие скорости нагрева и охлаждения металла шва и ОШЗ. Эти особенности теплового воздействия предопределяют минимальные деформации сварных конструкций, специфику физико-химических и металлургических процессов в деталях при лазерной сварке, высокую технологическую прочность и характерные свойства полученных сварных соединений.

Лазерная сварка осуществляется в широком диапазоне режимов, обеспечивающих высокопроизводительный процесс соединения различных металлов толщиной от нескольких микрометров до десятков миллиметров.

Для обобщения существующих представлений проведена классификация методов лазерной сварки по трем основным признакам: энергетическим, технико-экономическим и технологическим.

Энергетические признаки. Основными энергетическими признаками, характеризующими лазерную сварку, являются плотность мощности лазерного излучения E, которая определяется отношением мощности лазерного источника к площади пятна сфокусированного луча, и длительность воздействия τ. При непрерывном лазерном излучении длительность воздействия определяется продолжительностью времени экспозиции, а при импульсном излучении – длительностью импульса.

Плотность мощности излучения при сварке ограничена по верхнему пределу пороговым значением E^*, при превышении которого возникают интенсивные объемные кипение и испарение, приводящие к выбросу металла и дефектам сварного шва. На практике процессы лазерной сварки осуществляют с плотностями мощности излучения в диапазоне $E = 10^5 \ldots 10^7$ Вт/см^2. При $E < 10^5$ Вт/см^2 лазерное излучение теряет свое основное достоинство – высокую концентрацию энергии. В этом случае целесообразнее использовать традиционные методы сварки плавлением.

Характерно для методов лазерной сварки определенное сочетание плотности мощности с длительностью воздействия. Предлагается ввести в классификацию режимов лазерной сварки три основные группы сочетаний плотности мощности излучения E и длительности воздействия τ.

1. $E = 10^5 \ldots 10^6$ Вт/см^2; $\tau > 10^{-2}$ с. В эту группу входят методы сварки непрерывным лазерным излучением. Длительность воздействия представляется отношением диаметра d сфокусированного излучения к скорости сварки $v_{св}$:

$$\tau = d / v_{св}. \qquad (6.1)$$

Изменение E и τ в указанных пределах позволяет сваривать плавлением разнообразные конструкционные материалы малых и больших толщин.

2. $E = 10^6 \ldots 10^7$ Вт/см^2; $\tau < 10^{-3}$ с. В эту группу входят методы сварки импульсно-периодическим лазерным излучением. Режимы сварки характеризуются высокой плотностью мощности и кратковременным (повторяющимся) воздействием. Частота следования импульса составляет десятки и сотни герц, а длительность импульсов значительно ниже значений, определяемых по формуле (6.1). Суммарное воздействие импульсов достаточно для полу-

чения глубокого проплавления. Режимы этой группы можно использовать для сварки материалов различных толщин при значительно меньших энергозатратах, чем при сварке непрерывным излучением.

3. $E = 10^5 \ldots 10^6$ Вт/см^2; $10^{-3} < \tau < 10^{-2}$. Длительность импульсов указанного диапазона превышает соответствующие значения во второй группе. Проплавление на всю глубину осуществляется в процессе воздействия импульса, т.е. при действии импульса формируется точечное сварное соединение. Сочетание плотности мощности и времени воздействия из указанного диапазона обеспечивает проплавление малых толщин.

Технико-экономические показатели. Они характеризуют эффективность лазерных методов сварки. К технико-экономическим показателям относятся скорость сварки, экономия материала, локальность сварки.

Лазерная сварка непрерывным излучением осуществляется на скоростях, в несколько раз превышающих традиционные методы сварки плавлением. Это условие экономически целесообразно не только благодаря высокой производительности процесса, но и вследствие малых затрат энергии на единицу погонной длины шва, определяемых низким значением погонной энергии, т.е. отношением мощности излучения к скорости сварки. Однако при лазерной сварке импульсным излучением скорость процесса значительно ниже, чем при сварке непрерывным излучением, и практически сопоставима со скоростями при традиционных методах сварки.

Экономия материала достигается при лазерной сварке непрерывным излучением больших толщин. Например, дуговая сварка встык листа толщиной 15…20 мм осуществляется за несколько проходов с разделкой кромок, с использованием присадочной проволоки, тогда как мощное лазерное излучение обеспечивает сварку за один проход без разделки кромок и использования присадочного материала. При лазерной сварке малых толщин экономия материала несущественна по сравнению с традиционными методами сварки плавлением.

Локальность процесса лазерной сварки обеспечивается концентрацией излучения в пятно малых размеров диаметром ≤0,1 мм. Благодаря этому имеют место малая ширина шва, незначительные пластические деформации и, как следствие, минимальные остаточные деформации сварных соединений. Таким образом, лазерную сварку можно рекомендовать для получения прецизионной конструкции, причем высокая точность сварных конструкций достигается без последующей правки или механической обработки. Малые размеры швов, выполненных лазерной сваркой, позволяют весьма экономно проектировать сварные детали и конструкции. В частности, в электронике, исходя из сказанного, проектируют крайне уплотненные монтажные схемы, снижая тем самым габаритные размеры и массу приборов, их деформации. Наиболее ярко выражена локальность процесса при лазерной сварке импульсным излучением.

Технологические признаки. Их удобно рассмотреть применительно к двум основным видам проплавления при лазерной сварке: глубокому проплавлению при сварке материала толщиной $\delta > 1$ мм; незначительному проплавлению при сварке материала толщиной $\delta < 1$ мм.

Сварка с глубоким проплавлением может быть выполнена как в непрерывном, так и в импульсно-периодическом режиме излучения. При сварке малых толщин, осуществляемой непрерывным и импульсным излучением, используют более «мягкие» режимы, обеспечивающие лишь расплавление металла в шве без перегрева до температур интенсивного испарения.

При лазерной сварке с присадочным материалом, используемым для легирования металла шва или снижения требований по точности сборки, применяют порошок или тонкую проволоку диаметром ≤1,0…1,5 мм. При этом необходимо обеспечить точную подачу проволоки в зону проплавления.

Лазерная сварка с глубоким проплавлением осуществляется в большинстве случаев с защитой шва, подбираемой соответствующим образом в зависимости от свариваемого материала. Сварка деталей малых толщин из низкоуглеродистой стали и некоторых других материалов может выполняться без дополнительной защиты зоны сварки, что значительно упрощает технологический процесс.

В зависимости от конструктивного оформления соединяемых деталей используется сварка со сквозным проплавлением в основном в ответственных силовых конструкциях и без сквозного проплавления для герметизации или соединения тонких деталей с массивными.

Следует отметить, что лазерная сварка может беспрепятственно выполняться в различных пространственных положениях.

Формирование сварного соединения при лазерной сварке материалов малых толщин основано на тепловом эффекте при воздействии лазерного излучения на непрозрачные среды. Для обеспечения эффективного проплавления металла длительность лазерного импульса должна соответствовать тепловой постоянной времени для данного металла:

$$\tau = \delta^2 / (4a), \qquad (6.2)$$

где $a = \lambda_т / (c\gamma)$ – коэффициент температуропроводности; $\lambda_т$ – коэффициент теплопроводности; γ – плотность материала.

Значение τ для тонких образцов ($\delta \approx$ $\approx$ 0,1...0,2 мм) сопоставимы с длительностью импульсов лазера в режиме свободной генерации, составляющей порядка нескольких миллисекунд. При увеличении толщины свариваемых образцов ($\delta \geq$ 1,0 мм) τ (6.2) значительно возрастает и существенно превосходит достижимые длительности лазерных импульсов. Вследствие этого лазерная сварка металлов толщиной $\delta \geq$ 1,0 мм импульсным излучением затрудняется.

Значительно сложнее механизм формирования сварного соединения при сварке с глубоким проплавлением. При сварке мощными концентрированными источниками энергии, такими как лазерный или электронный луч, формируется так называемое «кинжальное» проплавление, обеспечивающее большую глубину при малой ширине шва.

При лазерном излучении плотностью мощности выше критической осуществляется нагрев материала со скоростью, значительно превышающей скорость отвода теплоты за счет теплопроводности. При этом происходят процессы локального плавления и испарения материала. Вследствие этого формируется углубление на поверхности, которое при достаточной мощности источника развивается по глубине, что приводит к образованию канала, заполненного парами материалов и окруженного жидким металлом. Давление паров материала оказывается достаточным для поддержания канала, и полость канала не заполняется жидким металлом под действием гидростатического давления и сил поверхностного натяжения.

При соответствующей скорости сварки форма канала приобретает динамическую устойчивость. На передней стенке канала происходит плавление материала, а на задней – затвердевание. Наличие канала способствует поглощению лазерного излучения в глубине материала, а не только на его поверхности. При этом образуется узкий шов с большим отношением глубины проплавления к ширине шва.

При образовании канала над поверхностью материала появляется светящийся факел, состоящий из продуктов испарения и выброса, а также частиц конденсированного пара. В общем случае поглощается лазерное излучение факелом, а также плазмой, возникающей в результате оптического пробоя в газовой среде. Наличие плазменного факела влияет на эффективность проплавления. В условиях атмосферного давления на проплавлении сказывается состав газа, что учитывается при выборе защитного газа для лазерной сварки.

Обобщенная схема формирования сварного соединения показана на рис. 6.16. Из него видно, что сварочная ванна имеет характерную форму, вытянутую в продольном направлении сварки.

В головной части ванны расположен канал, или кратер, *3*, заполненный парами металла. Это область наиболее яркого свечения. На передней стенке канала существует слой расплавленного металла, который испытывает постоянные возмущения. Здесь наблюдается характерное искривление передней стенки в виде ступеньки, которая периодически перемещается по высоте канала. Расплавленный материал с передней стенки удаляется при перемещении ступеньки сверху вниз. Перенос расплавленного металла из головной части в хвостовую происходит преимущественно по боковым стенкам канала в горизонтальном

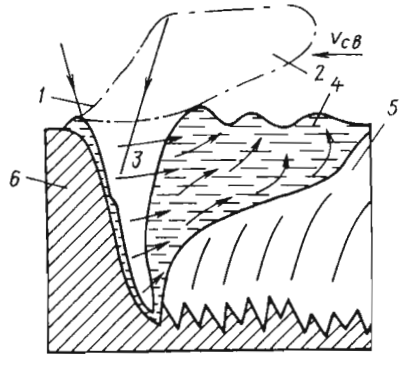


Рис. 6.16. Продольное сечение сварочной ванны:
1 – лазерное излучение; *2* – плазменный факел; *3* – парогазовый канал; *4* – хвостовая часть ванны; *5* и *6* – закристаллизовавшийся и свариваемый материал соответственно

направлении. Кроме того, наблюдаются восходящие потоки по мере углубления канала. В хвостовой части ванны расплавленный металл завихряющимися потоками поднимается вверх и частично выносится на поверхность сварочной ванны.

В процессе лазерной сварки над поверхностью сварочной ванны наблюдается ярко светящееся облако – плазменный факел *2*, размеры и яркость свечения которого периодически изменяются с частотами порядка сотен герц. При значительных скоростях лазерной сварки факел отклоняется в сторону, противоположную направлению сварки, на 20...60°.

Процессы массопереноса расплавленного металла в сварочной ванне существенно влияют на формирование шва, образование характерных дефектов и механические свойства сварного соединения. Основной силой, воздействующей на расплавленный металл и обеспечивающей его перенос, считается сила реакции паров. Под действием этой силы жидкий металл перемешается как сверху вниз по передней стенке канала, так и в горизонтальном направлении вокруг канала (см. рис. 6.16). Перенесенный расплавленный металл обнажает участки металла с более низкой температурой на передней стенке канала, после чего процессы плавления и переноса повторяются. Экспериментально установлено, что скорость переноса жидкого металла существенно превышает скорость сварки и при скорости сварки 2...5 мм/с достигает 1000...2000 мм/с. Перенос жидкого металла в канале проплавления носит дискретный характер. Частота переноса изменяется прямо пропорционально скорости сварки и составляет 10...50 Гц.

Большое значение для лазерной сварки имеет так называемый эффект автоколебаний. При нагреве материала постоянным во времени потоком лучистой энергии, превышающим некоторое критическое значение, температура поверхности колеблется. Наличие затухающих во времени колебаний температур указывает на существование резонансных режимов нагрева вещества. Это дает возможность разрабатывать новые эффективные методы сварки с динамической фокусировкой лазерного излучения и дополнительной импульсной подачей газа.

Следует отметить характерные особенности импульсно-периодической лазерной сварки, осуществляемой импульсами с длительностью $10^{-3}...10^{-6}$ с и частотой следования 100 Гц... 1 кГц при плотности мощности $10^6...10^7$ Вт/см^2. Глубокое проплавление выполняется, как и при непрерывном излучении, при наличии парогазового канала, который не схлопывается после действия очередного импульса.

При средней мощности лазерного излучения (1 кВт) мощность в импульсе может достигать 100 кВт. За короткое время действия импульса металл быстро нагревается до температуры кипения. Возникающая сила реакции паров перемещает объем расплавленного металла с передней стенки канала на заднюю. Происходит циклическое перемещение расплавленного металла в парогазовом канале с частотой импульсов, что принципиально отличает импульсно-периодическую лазерную сварку от сварки непрерывным излучением. При высокой частоте следования импульсов поверхность канала не успевает остыть, вследствие чего минимальная глубина проплавления оказывается выше, чем при действии непрерывного излучения.

Одной из особенностей импульсно-периодической лазерной сварки является периодичность образования и релаксации плазмы над поверхностью ванны плавления. При этом между началом импульса и образованием плазмы имеет место некоторая задержка по времени τ_1, а после окончания импульса плазма релаксирует в течение времени τ_2. Временна́я структура излучения определяется соотношением длительностей импульса $\tau_и$ и паузы $\tau_п$:

$$\left.\begin{aligned} \tau_и &= (qF_и)^{-1}; \\ \tau_п &= F_и^{-1} - \tau_и, \end{aligned}\right\} \qquad (6.3)$$

где q – скважность импульсов; $F_и$ – частота следования импульсов.

Соответствующим подбором параметров временной структуры можно добиться практически полного устранения влияния плазменного факела на снижение проплавляющей способности лазерного излучения. Для этого необходимо выполнение следующих условий: $\tau_и < \tau_1$; $\tau_п > \tau_2$.

6.3.2. СВАРКА ДЕТАЛЕЙ МАЛЫХ ТОЛЩИН

Сварка деталей малых толщин выполняется как импульсным, так и непрерывным излучением. Основными параметрами импульсной сварки, определяющими качество сварного соединения, являются энергия и длительность

импульсов, диаметр сфокусированного излучения, частота следования импульсов, положение фокального пятна относительно поверхности свариваемых деталей.

Энергию импульса лазерного излучения, обеспечивающую расплавление металла без выплеска, можно приближенно определить по следующей зависимости:

$$W_{и} = 0{,}885 T_{пл} \lambda_{т} \tau_{и} \pi r^2 / \sqrt{a\tau_{и}}\,, \quad (6.4)$$

где r – радиус сфокусированного излучения.

Длительность импульса определяет время нагрева и расплавления металла. Оптимальный диапазон длительности импульса зависит от свойств и толщины свариваемого металла. В первом приближении можно рекомендовать следующие ориентировочные значения $\tau_{и}$: для меди $10^{-4} < \tau_{и} < 5 \cdot 10^{-4}$ с, для алюминия $5 \cdot 10^{-4} < \tau < 2 \cdot 10^{-3}$ с, для сталей $5 \cdot 10^{-3} < \tau_{и} < 8 \cdot 10^{-3}$ с. Более точные значения $\tau_{и}$ необходимо устанавливать экспериментально.

Большое значение имеет форма импульса излучения. Лучшее качество сварки обеспечивается трапецеидальной либо треугольной формой импульса с крутым передним и пологим задним фронтами.

Диаметр сфокусированного излучения d определяет площадь нагрева и плотность мощности излучения:

$$E = 4W_{и} / (\pi d^2 \tau_{и}). \quad (6.5)$$

Диаметр d выбирают из условия обеспечения требуемой плотности мощности излучения ($E \approx 10^5 \ldots 10^6$ Вт/см^2). Для сварки диапазон изменения d составляет 0,05…1,0 мм. Регулирование d и, соответственно, E наиболее просто вести расфокусировкой излучения. При этом поверхность свариваемых деталей располагают выше или ниже фокальной плоскости, где сфокусированный световой пучок имеет наименьший диаметр.

Сварной шов при импульсном излучении образуется наложением сварных точек с некоторым перекрытием (на 0,3…0,9) в зависимости от типа сварного соединения, его прочности и герметичности. Скорость шовной импульсной сварки определяется диаметром сварной точки, приблизительно равным диаметру лазерного излучения d, коэффициентом перекрытия K и частотой следования импульсов $F_{и}$:

$$v_{св} = dF_{и}(1 - K). \quad (6.6)$$

Промышленные сварочные установки с твердотельными лазерами позволяют вести шовную сварку со скоростью до 5 мм/с при частоте следования импульсов до 20 Гц. Увеличить производительность можно повышением частоты следования импульсов.

Характерной особенностью сварного соединения, выполненного импульсной лазерной сваркой, является малое сечение шва, т.е. малый размер литой зоны. В сочетании с кратковременностью воздействия импульса это приводит к высоким скоростям охлаждения шва и ОШЗ. Скорость охлаждения в литой зоне достигает $10^5 \ldots 10^6$ К/с, что вызывает образование мелкодисперсных и дендритных структур с развитой междендритной микронеоднородностью. Размеры ОШЗ, т.е. зоны термического влияния, незначительны и обычно не превышают 100…150 мкм. Структура металла в этой зоне неоднородна.

Введение в сварочную ванну присадочного материала позволяет в широких пределах изменить химический состав металла шва и тем самым регулировать его структуру и свойства. Кроме того, использование присадки дает возможность регулировать геометрические размеры шва, увеличивать его сечение с целью устранения одного из наиболее распространенных дефектов – ослабления шва. Присадочный материал используется в компактном виде (проволока, лента и др.) и в виде порошков. Легирование сварного шва можно также осуществлять элементами, предварительно нанесенными на поверхность свариваемых кромок напылением, обмазкой, электроискровым способом и др.

Наиболее распространена лазерная сварка импульсным излучением в электронной и электрохимической промышленности (стыковые, нахлесточные и угловые соединения, приварка тонких деталей к массивным). Приварка тонких деталей к массивным является специфической для лазера: соединения успешно получают в различных модификациях.

Перед лазерной сваркой тонких тел вращения обычно обрабатывают кромки. Если свариваемые детали значительно отличаются по толщине, то в процессе сварки лазерный луч смещается на более толстый материал для выравнивания теплового поля в соединяемых деталях и достижения равномерного проплавления обеих деталей (рис. 6.17, *а*).

Тавровое присоединение тонкой детали к массивной выполняется сложнее и требует использования дополнительной технологической отбортовки (см. рис. 6.17, *б*).

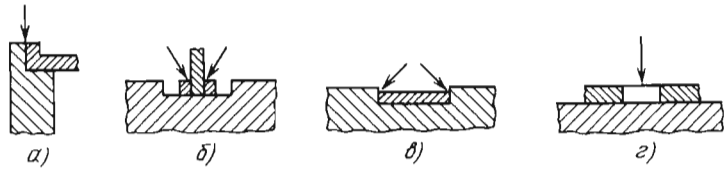


Рис. 6.17. Технологические приемы конструирования соединения при сварке тонких деталей с массивными (стрелкой показано направление действия излучения)

Хорошие сварные соединения тонких деталей в виде фольги, ленты с массивными деталями получают лазерной сваркой по специальным технологическим проточкам в массивной детали (см. рис. 6.17, *в*). Лазерное излучение в этом случае направляется по кромке технологической проточки, расплавляя кромку массивной детали и края тонкой детали с образованием общей сварочной ванны. Можно непосредственно приваривать тонкую деталь в отдельных точках так, чтобы глубина проплавления превышала ее толщину. Образуется так называемое проплавное соединение.Хорошие результаты достигаются, если в тонкой детали предусмотреть отверстие. В процессе сварки кромки отверстия тонкой детали оплавляются совместно с примыкающими поверхностными участками массивной детали с образованием сварного соединения (см. рис. 6.17, *г*).

Оптимальным следует считать стыковое соединение, обеспечивающее наиболее благоприятные условия для процессов нагрева, плавления и кристаллизации металла. Одним из важных условий при сварке стыкового соединения является соблюдение минимально допустимых зазора и перекоса кромок.

Сварку металлов малых толщин можно выполнять с использованием газовых и твердотельных лазеров непрерывного излучения мощностью до 1,0 кВт. Типы сварных соединений, получаемых непрерывными лазерами, не отличаются от импульсных.

6.3.3. СВАРКА МЕТАЛЛОВ С ГЛУБОКИМ ПРОПЛАВЛЕНИЕМ

Механизм формирования сварного соединения при сварке металлов с глубоким проплавлением характеризуется наличием парогазового канала, что является принципиальным отличием от сварки металлов малых толщин. Основные параметры режимов лазерной сварки с глубоким проплавлением – мощность лазерного излучения, скорость сварки, параметры фокусирующей системы.

Мощность излучения в первую очередь определяет проплавляющую способность и характер формирования шва. Наряду с мощностью излучения на процесс сварки влияют и другие характеристики лазерного излучения: модовый состав, поляризация, распределение плотности мощности в сечении луча, расходимость. В связи с этим при переходе от одной модели лазера к другой оптимальное значение мощности для сварки может существенно меняться.

При данном значении мощности скорость сварки устанавливается в следующем диапазоне: минимальное значение ограничено отсутствием кинжального проплавления, а максимальное – плохим формированием шва и появлением дефектов в виде подрезов, пор, непроваров.

На качество сварных соединений влияют условия фокусировки лазерного излучения. Для сварки лазерное излучение фокусируется в пятно диаметром 0,5...1,0 мм. При меньшем диаметре пятна повышенная плотность мощности приводит к значительному перегреву расплавленного металла шва, интенсификации процессов испарения металла и вследствие этого в шве появляются дефекты. При диаметре сфокусированного лазерного излучения >1,0 мм снижается эффективность процесса сварки.

Геометрические параметры шва зависят от режима лазерной сварки. Оптимальной для сварки с глубоким проплавлением является кинжальная форма поперечного сечения с коэффициентом формы шва, значительно большим единицы. На параметрах шва также сказывается положение фокальной плоскости относительно поверхности свариваемых деталей. Максимальная глубина проплавления достигается при расположении фокуса под поверхностью материала. Оптимальная величина этого смещения фокуса зависит от свойств материала, толщины деталей и режимов сварки.

Продольное сечение сварочной ванны имеет специфическую форму (рис. 6.18). Поверхность фронта кристаллизации отличается наличием выступа твердой фазы, который делит ванну на две характерные части. Нижняя часть ванны значительно заглублена и имеет малую протяженность в продольном и поперечном сечениях, тогда как верхняя часть более широкая и вытянута вдоль шва.

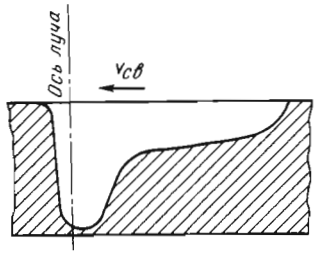


Рис. 6.18. Продольное сечение ванны при лазерной сварке

Анализ подобной формы продольного сечения свидетельствует о наличии двух процессов проплавления металла при лазерной сварке. Первый процесс определяет эффект глубокого проплавления и заключается в образовании парогазового канала при воздействии лазерного излучения высокой плотности мощности. Это условие обеспечивает локальное заглубление сварочной ванны в месте воздействия лазерного излучения. Второй процесс представляет собой поверхностное плавление за счет теплопроводностных свойств металла. Преимущественное развитие того или иного из указанных процессов определяет очертание сварочной ванны и зависит в первую очередь от режимов сварки.

Большое влияние на проплавляющую способность лазерного излучения оказывают условия фокусировки. Наряду с оптимизацией фокусирующих систем для достижения минимального размера сфокусированного излучения необходимо обращать внимание на угол сходимости сфокусированного излучения.

Расчет основных параметров лазерной сварки, обеспечивающих большую производительность вместе с высоким качеством сварного соединения, затруднен сложным характером их взаимосвязи. Поэтому в основном используют экспериментально полученные зависимости и справочные данные.

Принципиальной особенностью лазерного источника нагрева является высокая степень концентрации энергии, обеспечивающая сварку на повышенных скоростях по сравнению с дуговыми источниками. Этим достигается незначительное тепловое воздействие на ОШЗ, высокие скорости нагрева и охлаждения металла сварного соединения. Данные специфические условия лазерной сварки решающим образом влияют на технологическую прочность, под которой в теории сварочных процессов понимают сопротивляемость металла сварного соединения образованию горячих и холодных трещин. Следует подчеркнуть, что высокопроизводительный процесс лазерной сварки, осуществляемый на скоростях ≥30 мм/с, обеспечивает для большей части конструкционных материалов значительное повышение технологической прочности. Таким образом, лазерный процесс улучшает свариваемость металлов, т.е. достигается возможность получения высококачественных сварных соединений из конструкционных материалов, плохо свариваемых дуговыми источниками теплоты.

Выполнение лазерной сварки на скоростях 25…30 мм/с обеспечивает существенное снижение (в 3–10 раз) остаточных деформаций по сравнению с традиционными способами дуговой сварки. Вследствие малой ширины зоны пластических деформаций при лазерной сварке значения сжимающих напряжений в ОШЗ оказываются на 40…70 % ниже, чем при дуговой сварке, и не вызывают трудноустранимых деформаций потери устойчивости листовых элементов. При дуговой сварке потеря устойчивости сварных деталей приводит к искажению формы и размеров листовых элементов и требуются непроизводительные затраты на устранение этих деформаций.

Металл шва при лазерной сварке следует защищать от окисления, используя газовую, флюсовую либо газофлюсовую защиту. Газовая защита осуществляется подачей защитного газа через сопло непосредственно в зону воздействия лазерного излучения на материал подобно дуговой сварке. Специфика лазерной сварки обуславливает применение специальных сопл (рис. 6.19) и составов защитных газов, обеспечивающих как надежную защиту, так и эффективное проплавление. На рис. 6.19, *а – г* представлены некоторые варианты конструкций сопл, обеспечивающие наряду с защитой расплавленного металла шва также защиту ОШЗ. При сварке со сквозным проплавлением для ряда высокоактивных металлов требуется также защита корня шва.

В качестве защитных при лазерной сварке могут быть использованы те же газы, что и при дуговой. Однако следует учитывать их различное влияние на экранирующее действие факела, а значит, и на эффективность проплавления. Газы, имеющие более высокие потенциал ионизации и теплопроводность, обеспечивают максимальную эффективность проплавления.

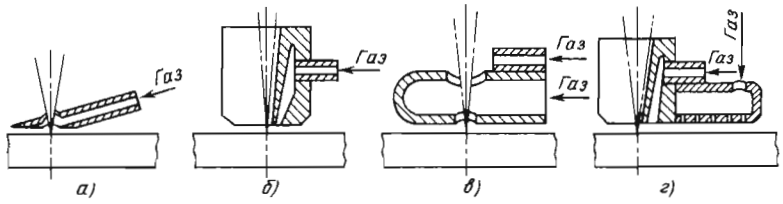


Рис. 6.19. Конструкции защитных сопл

Качество защиты обеспечивается соответствующим расходом газа. При недостаточном расходе защита шва неэффективна, а излишний расход приводит к неоправданным экономическим потерям. Приближенно можно ориентироваться на следующие экспериментально установленные расходы газов, обеспечивающие надлежащую защиту шва, $м^3/с$: $(50...60)10^{-5}$ He, $(15...20)\ 10^{-5}$ Ar, $(45...50)\ 10^{-5}$ смеси 50 % He и 50 % Ar .

Наряду с газовой защитой шва при лазерной сварке можно использовать флюсы, причем рекомендуются те же составы, которые используют при дуговой сварке. При лазерной сварке целесообразны флюсы в виде обмазок.

Важным технологическим приемом при лазерной сварке с глубоким проплавлением является использование присадочного материала. Это дает возможность регулировать в широких пределах химический состав шва, обеспечивая требуемые свойства сварных соединений, исключить такие дефекты, как неравномерность проплавления, поры в корне шва, горячие и холодные трещины, а также снизить требования к точности сборки деталей под сварку.

Лазерная сварка с присадкой выполняется теми же приемами, что и дуговая. Особенность заключается в использовании присадочной проволоки малого диаметра (<1,0 мм) и точной подаче ее под лазерное излучение с помощью специальных механизмов.

При сварке с глубоким проплавлением наиболее распространенными дефектами являются неравномерность проплавления корня шва и наличие полостей по высоте проплава. Увеличение скорости сварки при несквозном проплавлении приводит к снижению пикообразования в корне шва. Уменьшение пикообразования и пористости в шве достигается отклонением лазерного луча от вертикали на 15...17° по направлению движения луча. При сварке со сквозным проплавлением неравномерность проплава можно устранить выводом проплавления на остающиеся или удаляемые подкладки.

Одним из важных направлений в разработке технологии лазерной сварки является повышение эффективности процесса. Перспективным представляется использование импульсно-периодических режимов сварки. При частоте следования импульсов 0,4...1 кГц и при длительности 20...50 мс глубина проплавления может быть увеличена в 3–4 раза по сравнению с непрерывным режимом. Оценка термического КПД процесса проплавления при сварке показывает, что при импульсном воздействии эта величина в 2–3 раза выше, чем при непрерывном излучении. Однако следует учитывать, что импульсно-периодическая сварка требует точного наведения луча на стык, высокого качества подготовки стыкуемых кромок и обеспечивает малую скорость сварки, уступающую в несколько раз сварке непрерывным излучением.

Повышение эффективности сварки непрерывным излучением достигается за счет осциллирования сфокусированного лазерного излучения. В этом способе сфокусированный луч периодически заглубляется в сварочную ванну вследствие колебания фокальной плоскости относительно поверхности образца. Суть этого способа лазерной сварки состоит в том, что при увеличении скорости перемещения фронта плавления и испарения на передней стенке канала проплавления глубина проникания излучения в материал увеличивается. Повысить скорость перемещения фронта плавления и испарения можно увеличением плотности мощности на передней стенке канала. Однако при фиксированном положении фокуса относительно поверхности свариваемых деталей с углублением канала плотность мощности снижается по его высоте, за счет чего и уменьшается скорость перемещения фронта плавления и испарения в глубине канала. Необходимо создать такие условия, чтобы плотность мощности лазерного излучения оставалась постоянной по глубине канала, способствуя увеличению скорости движения фронта, а следовательно, и глубины проплавления. С этой целью

предлагается осциллирование сфокусированного излучения по высоте канала. Для этого используют специальные механические или пьезоэлектрические сканаторы фокусирующей системы (линзы или объектива), обеспечивающие варьирование частоты в диапазоне 0...150 Гц с амплитудой колебания, равной толщине свариваемых деталей.

Осциллирование сфокусированного излучения обеспечивает при сварке большей части конструкционных материалов (сталей, алюминиевых и титановых сплавов) увеличение глубины проплавления на 40 %. Ширина шва при этом возрастает на ~30 %, а коэффициент формы шва увеличивается на 10...15 %. Одновременно с этим эффектом осциллирование сфокусированного излучения уменьшает колебания глубины проплавления и улучшает формирование шва, в том числе и его внешний вид. Осциллирование существенно повышает термический КПД: на 60...80 % по сравнению с общепринятой схемой лазерной сварки с неизменным расположением фокуса излучения по отношению к поверхности свариваемых деталей.

Эффективность проплавления может быть увеличена подачей непосредственно в зону сварки дополнительного потока газа под определенным давлением. Дополнительный поток влияет на параметры плазмы в области взаимодействия излучения с материалом и на гидродинамические процессы в канале проплавления. При этом в качестве дополнительного одинаково эффективно можно использовать любой газ: в частности, аргон обеспечивает тот же эффект, что и гелий. Эффект увеличения глубины проплавления достигается при оптимальном давлении и расходе дополнительного газа. Последующее увеличение расхода приводит к ухудшению формирования шва, появлению в нем крупных пор, раковин. Еще больший расход газа вызовет выдувание жидкого металла, процесс сварки может перейти в процесс резки.

Разработан способ лазерной сварки с применением импульсной подачи дополнительного газа, обеспечивающий повышение эффективности проплавления при сварке. Характер изменения расхода газа определяет перемещение плазмы с поверхности изделия в глубь канала, а развитие приповерхностной плазмы ограничивается наличием постоянной составляющей газового потока. Оптимальная частота подачи газа зависит от мощности лазерного излучения, скорости сварки и свойств свариваемого материала. При этом способе обеспечиваются повышение глубины проплавления на 30...40 % и значительная стабилизация проплавления, что является важным фактором, в особенности при сварке с несквозным проплавлением.

Эффективность лазерной сварки может быть повышена совмещением лазерного источника нагрева с другими, менее дорогостоящими источниками теплоты. Ряд исследований выполнен по лазерно-дуговой сварке. Суммарный эффект проплавления при этом оказывается выше, чем сумма эффектов воздействия каждого источника в отдельности. При мощности дуги, сопоставимой с мощностью лазерного излучения, достигается максимальный эффект. В частности, скорость сварки при этом может быть повышена в несколько раз. Следует отметить экономичность лазерно-дуговой сварки по сравнению с лазерной, так как повышение эффективности процесса сварки достигается дополнительным введением относительно дешевого источника энергии в виде электрической дуги. Необходимо усилить внимание к разработкам и исследованию процессов сварки, основанным на сочетании лазерного источника теплоты с другими – дешевыми и менее дефицитными. Такое сочетание может обеспечить сохранение и усиление положительных сторон лазерного процесса сварки (высокая степень концентрации энергии, отсутствие вакуумных камер и др.) наряду с увеличением энергетической эффективности и улучшением технико-экономических показателей.

Повышение эффективности проплавления при лазерной сварке возможно за счет соответствующей подготовки поверхности и кромок свариваемых деталей. Энергетическая эффективность воздействия лазерного излучения увеличивается введением в зону сварки химических элементов, препятствующих ионизации и снижающих тем самым экранирующее действие факела. Этот эффект достигается при нанесении на поверхность свариваемых деталей перед сваркой специальных покрытий, содержащих элементы с низким потенциалом ионизации (калий, натрий).

Специфические особенности процесса лазерной сварки, заключающиеся в большой концентрации энергии, высокой скорости сварки, малом объеме сварочной ванны, высокой скорости кристаллизации металла шва, обеспечивают возможность сварки в различных пространственных положениях. Это существенно расширяет технологические возможности процесса лазерной сварки.

6.3.4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ РАЗЛИЧНЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

В настоящее время отработана технология лазерной сварки металлов малых и средних толщин до 10 мм. Однако широкое применение лазерной сварки в ряде случаев сдерживается из-за соображений экономического характера. Стоимость технологических лазеров пока еще достаточно высока, что требует тщательного выбора области применения лазерной сварки. Перспективны для лазерной сварки такие случаи, когда применение традиционных способов сварки не дает желаемых результатов либо технически невозможно. Лазерную сварку можно рекомендовать к применению в целях:

– получения прецизионной конструкции, форма и размеры которой практически не должны изменяться в результате сварки;

– значительного упрощения технологии изготовления сварных конструкций за счет выполнения сварки как заключительного процесса без последующих операций правки либо механической обработки для достижения требуемой точности;

– существенного увеличения производительности, так как процесс осуществляется на скоростях ≥35 мм/с, что в несколько раз превышает скорость наиболее распространенного традиционного способа дуговой сварки;

– сварки крупногабаритных конструкций малой жесткости с труднодоступными швами, при этом в отличие от электронно-лучевой сварки не требуются вакуумные камеры;

– соединения трудносвариваемых материалов, в том числе разнородных.

Конструкционные низкоуглеродистые и низколегированные стали. При изготовлении сварных конструкций получили широкое распространение низкоуглеродистые стали с содержанием до 0,25 % С и низкоуглеродистые низколегированные стали, в которых суммарное содержание легирующих элементов ≤4,0 %, а содержание углерода 0,25 %.

Низкоуглеродистые и низколегированные стали обладают хорошей свариваемостью, и сварные соединения должны обеспечивать равнопрочность с основным металлом. Лазерная сварка обеспечивает высокие скорости охлаждения кристаллизующегося металла шва и ОШЗ при высоких температурах. Эти условия гарантируют минимальные размеры зерна. При лазерной сварке термически упрочненных сталей вследствие жесткого термического цикла и малой протяженности зоны термического влияния не происходит разупрочнения на участке отпуска.

Рекомендуются высокопроизводительные режимы лазерной сварки на больших скоростях ($v_{св}$ = 30…40 мм/с), обеспечивающие повышенное сопротивление образованию горячих и холодных трещин по сравнению с дуговой сваркой.

Механические свойства сварных соединений из низкоуглеродистых и низколегированных сталей, выполненных лазером, достаточно высоки. Обеспечивается равнопрочность шва с основным металлом при высоких значениях пластичности и ударной вязкости. Такие высокие показатели достигаются не только при сварке встык металла сравнительно небольшой толщины (δ = 3…6 мм). При лазерной сварке стали 17ГС толщиной 15…20 мм за один проход получена равнопрочность шва основному металлу при высоком значении ударной вязкости.

Конструкционные средне- и высокоуглеродистые, а также легированные стали. Среднеуглеродистые стали содержат 0,26…0,45 % С и широко используются для изготовления сварных конструкций. Высокоуглеродистые стали включают в себя 0,46…0,75 % С, отличаются плохой свариваемостью и редко применяются в сварных конструкциях. Конструкционные легированные стали имеют суммарное содержание легирующих элементов в пределах 2,5…10 %.

Для сталей этого класса характерными особенностями при сварке являются образование закалочных структур в шве и зоне термического влияния, склонных к хрупким разрушениям, возможность возникновения горячих и холодных трещин в сварном соединении и пор в металле шва. Многолетний опыт изготовления сварных конструкций из рассматриваемых материалов показывает, что для предупреждения этих явлений часто необходим подогрев при сварке и термообработка после сварки, усложняющие технологию.

Применение высококонцентрированного источника энергии – лазерного луча – позволяет успешно решать эти задачи. Лазерная сварка по сравнению с дуговой обеспечивает более высокую сопротивляемость металла шва образованию горячих трещин, в особенности при больших скоростях сварки ($v_{св}$ > 30 мм/с). В большинстве случаев, когда при лазерной сварке происходит благоприятное изменение

структуры, сопротивляемость сварного соединения образованию холодных трещин имеет высокие значения.

В сварных соединениях углеродистых и легированных закаливающихся сталей образуется шов с литой структурой и химическим составом, как правило, отличным от основного металла. Механические свойства отдельных зон сварного соединения в целом могут изменяться для одного и того же металла в зависимости от исходной структуры, химического состава присадочной проволоки, режима сварки и последующей термической обработки. В случае сварки стали в состоянии отжига минимальный предел прочности сварного соединения определяется прочностью основного металла, при сварке предварительно упрочненной закалкой стали – прочностью зоны отпуска, а при сварке стали с последующей упрочняющей термической обработкой сварного соединения – прочностью металла шва.

Лазерная сварка обеспечивает повышенные механические свойства сварных соединений. Отличительной особенностью является минимальное разупрочнение в ОШЗ термоупрочненных сталей. В частности, предел прочности сварных соединений из термоупрочненных сталей 12Х2Н4А, 18ХГТ, выполненных лазером, на 12...15 % выше, чем при дуговой сварке.

Высокая прочность соединений, полученных лазерной сваркой из термоупрочненных сталей, также связана с эффектом упрочнения «мягкой прослойки». Контактное упрочнение последней наиболее вероятно при деформировании сварных соединений, выполненных лазером. В этом случае мягкая отожженая зона, имеющая минимальный размер по сравнению с дуговой сваркой, упрочняется в процессе деформирования и разрушение происходит по основному неразупрочненному металлу.

Ударная вязкость сварных соединений из стали 12Х2Н4А в зоне шва, на линии оплавления и в зоне закалки при лазерной сварке существенно выше, чем при дуговой, и даже превышает ударную вязкость основного металла. В зоне отпуска ударная вязкость лазерных и дуговых сварных соединений приблизительно одинакова. Высокий уровень пластических свойств и ударной вязкости сварных соединений, выполненных лазером, в основном определяется значительным измельчением вторичной структуры металла шва и ОШЗ, но может быть также связан с металлургической очисткой и дегазацией переплавленного металла.

Высоколегированные стали. Эти стали содержат более 10 % легирующих элементов. Широко распространены в сварных конструкциях аустенитные высоколегированные стали и сплавы, в которых содержание основных легирующих элементов – хрома и никеля обычно <18 и 10 % соответственно, а общее содержание легирующих элементов может достигать 55 %. Главной особенностью сварки этих сталей является склонность к образованию в шве и ОШЗ горячих трещин, связанных в основном с формированием крупнозернистой структуры.

Важнейшие мероприятия, повышающие сопротивляемость стали этого типа образованию горячих трещин, следующие:

– применение методов сварки, способствующих измельчению кристаллов и устранению столбчатой структуры;

– получение в структуре швов некоторого количества δ-феррита;

– снижение содержания примесей в швах, образующих легкоплавкие эвтектики.

Применение лазерной сварки во многих случаях позволяет реализовать указанные условия и исключить горячие трещины. При лазерной сварке стали 12Х18Н10Т структура шва характеризуется мелкодисперсностью, фазовый состав сварного шва содержит 10...20 % δ-феррита в отличие от основного металла и в составе шва содержится пониженное количество вредных примесей. Прочность сварных соединений из этой стали находится на уровне основного металла, а пластичность несколько выше вследствие пониженного содержания неметаллических включений.

Для изготовления ответственных сварных конструкций широкое применение находят мартенситно-стареющие коррозионно-стойкие стали. Высокая прочность в сочетании с хорошими пластичностью и вязкостью в этих сталях достигается при формировании высоколегированной низкоуглеродистой мартенситной матрицы, обладающей большой пластичностью, и последующем упрочнении этой матрицы в процессе дисперсионного твердения – старения.

Сварные соединения из этих сталей, выполненные дуговой сваркой, склонны к коррозионному растрескиванию и межкристаллитной коррозии в атмосферных условиях вследствие совпадения области действия растяги-

вающих остаточных напряжений с участками выпадения карбидов хрома по границам зерен в виде сетки и вторичного твердения металла в зоне термического влияния.

Особенностью сварки мартенситно-стареющих сталей является также склонность к образованию холодных трещин. Важным обстоятельством является то, что лазерная сварка повышает сопротивляемость сварных соединений из этих сталей образованию холодных трещин в сопоставлении с дуговой сваркой. Сварные соединения из мартенситно-стареющих сталей, полученные лазерной сваркой, обладают более высокими механическими свойствами по сравнению с соединениями, выполненными дуговой сваркой.

Характерные режимы непрерывной лазерной сварки некоторых сталей обеспечивают сочетание высококачественного формирования шва, хорошей технологической прочности и высоких механических свойств сварного соединения (табл. 6.4).

Как следует из табл. 6.4, оптимальные режимы сварки сталей обеспечиваются сравнительно высокими (80...120 м/ч) скоростями сварки. При этом мощность лазерного излучения может быть ориентировочно подобрана из условия 1 кВт на 1 мм толщины свариваемой детали.

Представленные в табл. 6.4 режимы даны для стыковых сварных соединений, но в первом приближении их можно использовать и для угловых, тавровых, прорезных и других видов соединений.

Алюминиевые сплавы. Эти сплавы обладают малой плотностью, высокой удельной прочностью и высокой коррозионной стойкостью. Они применяются в качестве конструкционных материалов в различных отраслях промышленности.

Сварка алюминиевых сплавов имеет специфику. Алюминий интенсивно окисляется при температуре плавления и выше. Оксидная пленка обладает высокой температурой плавления (>2273 К) и в процессе сварки не расплавляется. Эта пленка характеризуется высокой адсорбционной способностью к газам и парам воды, что приводит к появлению в сварочной ванне газов и различных несплошностей. Частицы оксидной пленки могут попадать в ванну, образуя оксидные включения в швах, снижающие свойства сварных соединений. Поэтому необходимо разрабатывать специальные мероприятия по разрушению и удалению пленки и защите металла от повторного окисления.

При сварке алюминиевых сплавов возможно образование пор, источником которых является водород, хорошо растворяющийся в алюминии при температуре плавления. Повышенной склонностью к пористости обладают при сварке алюминиево-магниевые сплавы, так как магний увеличивает растворимость водорода в алюминии. Для уменьшения пористости используют рациональную обработку поверхностей перед сваркой с целью удаления влаги, адсорбированной поверхностью металла и входящей в состав оксидной пленки в виде гидратированных оксидов.

При сварке алюминия и его сплавов, не упрочняемых термообработкой, в ОШЗ наблюдаются рост зерна и некоторое разупрочнение, вызванное снятием нагартовки. При сварке алюминиевых сплавов, упрочненных термической обработкой, в ОШЗ также происходит разупрочнение.

6.4. Характерные режимы непрерывной лазерной сварки сталей

Стали	h, мм	P, кВт	$v_{св}$, м/ч	F, см	ΔF, мм
Малоуглеродистые, низколегированные (Ст3, 17ГС)	3,0	3,1	110	12	1,5
Среднеуглеродистые, легированные (Ст35, 30ХГСА)	2,0	2,8	100	12	1,5
	3,0	3,2	100	12	1,5
	3,0	3,3	110	16	1,0
Высоколегированные, аустенитные (12Х18Н10Т)	5,0	5,0	75	15	1,0
	2,0	2,5	100	16	1,0
Высоколегированные, мартенситно-стареющие (08Х15Н5Д2Т)	3,0	3,5	80	50	1,5

Условные обозначения: P – мощность луча; F – фокусное расстояние; ΔF – заглубление фокуса.

Алюминиевые сплавы характеризуются высокой теплопроводностью, вследствие чего для их сварки требуется большее количество энергии, чем для сталей. Благодаря высокому значению коэффициента линейного расширения и низкому значению модуля упругости алюминиевые сплавы при сварке характеризуются значительными остаточными деформациями, превосходящими деформации сварных конструкций из сталей.

Применение для сварки высококонцентрированных источников энергии, таких как лазерный или электронный луч, во многом устраняет рассмотренные трудности.

Для получения высококачественного сварного соединения прежде всего необходима тщательная подготовка поверхности под лазерную сварку. Предусматривается удаление жировой смазки, которой покрывают полуфабрикаты при консервации, с последующей механической обработкой торцов свариваемых кромок. Пленку оксидов удаляют на ширину 25...30 мм по всей длине соединения травлением в растворе 50 г NaOH в 1 л воды с последующим осветлением в 30%-ном растворе HNO_3. После травления детали тщательно промывают в горячей воде. Очищенная поверхность сохраняет свои свойства в течение трех-четырех дней. Непосредственно перед сваркой соединяемые поверхности необходимо зачистить шабером до блеска. Такая подготовка поверхности позволяет избежать образования дефектов при сварке, в первую очередь пористости и оксидных включений.

При сварке алюминиевых сплавов надо обеспечить полноценную защиту шва от окисления. Из известных методов защиты, применяемых при сварке, наиболее эффективной для алюминиевых сплавов является газовая защита. Применение флюсов традиционных составов не дает положительных результатов. Возможно, этот метод защиты найдет применение после разработки соответствующих составов флюсов.

Максимальная глубина проплавления и высокое качество шва обеспечиваются при использовании гелия в качестве защитного газа, причем обязательна защита шва с обеих сторон. В целях экономии допускается применение гелия для защиты только верхней части сварочной ванны, а для нижней, корневой, части годится аргон.

Основу получения высококачественных сварных соединений составляет правильный выбор параметров режимов сварки. Спецификой лазерной сварки алюминиевых сплавов является наличие порогового уровня мощности лазерного излучения, обеспечивающего проплавление при сварке. Например, для сплава АМг6 мощность CO_2-лазера на уровне 2... 2,2 кВт сразу дает глубину проплавления 1,5...2,0 мм. При меньшей мощности излучения проплавление вообще отсутствует. Это связано с сочетанием высокого коэффициента отражения (0,97) алюминия на длине волны 10,6 мкм с высокими теплопроводностью и теплоемкостью алюминия. С нагревом поверхности алюминия до температур, близких к температуре плавления, коэффициент отражения резко снижается и происходит интенсивное проплавление материала с образованием парогазового канала. Последующее увеличение мощности излучения приводит к практически линейному возрастанию глубины проплавления. Следует отметить, что указанный порог мощности зависит от свойств излучения, степени фокусировки, толщины пластины, состояния ее поверхности и скорости сварки.

Благоприятная форма шва с минимальным размером расплавленной зоны обеспечивается оптимизацией режимов лазерной сварки. При этом требуется получить необходимую геометрию шва: занижение k, провисание k_1, ширину верхней b и корневой b_1 частей шва. Занижение и провисание шва обычно задаются техническими условиями, на ответственных изделиях они не должны превышать 10 % толщины материала. Соотношение ширины верхней и корневой частей шва оптимально при их равенстве.

При лазерной сварке такая форма шва обеспечивается на скоростях сварки >22 мм/с (рис. 6.20). На пластине из сплава АМг6 толщиной δ = 2,0 мм достигается проплавление с практически параллельными кромками при ширине шва ~2 мм, занижение и провисание шва находятся в допустимых пределах. С увеличением мощности излучения и глубины проплавления ширина шва увеличивается незначительно. Дуговыми методами сварки получить такую форму проплавления невозможно.

Оптимальные режимы сварки излучением CO_2-лазера алюминиевого сплава представлены в табл. 6.5.

Пористость сварных швов сплава АМг6 при оптимальной подготовке поверхности на указанных в табл. 6.5 режимах лазерной сварки находится в пределах, допустимых по техническим условиям на наиболее ответственные изделия.

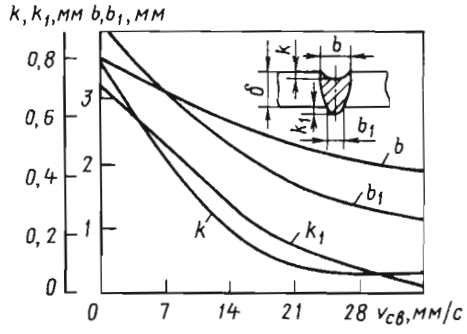


Рис. 6.20. Зависимость геометрических параметров формы шва от скорости сварки

6.5. Режимы лазерной сварки алюминиевого сплава АМг6 излучением CO_2-лазера

δ, мм	P, кВт	Скорость сварки $v_{св}$, м/ч	F, см
2,0	2,1	90	12
	2,3	120	
3,0	2,3	90	14
	2,8	120	
4,0	2,8	90	
	3,1	120	

Микроструктура металла сварных соединений, выполненных лазерным излучением на оптимальных режимах, значительно отличается от микроструктуры металла соединений, полученных дуговой сваркой. В шве имеет место мелкодисперсная структура со столбчатыми дендритами, причем размеры дендритов значительно меньше, чем при аргонодуговой сварке.

Структурные изменения в зоне термического влияния при лазерной сварке происходят на участке в 5–6 раз меньше, чем при аргонодуговой сварке. Размер зерна в этой зоне увеличивается незначительно. Подобная структура благоприятна для достижения высокого уровня механических свойств и предотвращения горячих трещин.

Для повышения эффективности процесса в последние годы разработан метод лазерной сварки алюминиевых сплавов по слою флюса. В состав разработанных флюсов для сварки излучением CO_2-лазера алюминиевых сплавов систем Al – Mg и Al – Mg – Li включены графит, порошки металлов, фториды щелочных и щелочно-земельных металлов, которые способствуют увеличению коэффициента поглощения излучения, улучшают поверхностную активность, обеспечивают высокий коэффициент поверхностного натяжения расплава флюса. Применение флюса для лазерной сварки алюминиевых сплавов приводит к перераспределению баланса энергии, что связано с увеличением поглощательной способности и удалением оксидной пленки. При этом достигается увеличение эффективного КПД процесса, снижается граница критической плотности мощности, характерная для лазерной сварки алюминиевых сплавов, и, таким образом, обеспечивается не скачкообразное, а плавное увеличение глубины проплавления при возрастании вводимой энергии.

Магниевые сплавы. Славы магния, имеющие высокую удельную прочность при низкой плотности, используются в качестве конструкционных материалов. Сварка магниевых сплавов связана с рядом трудностей. В первую очередь это определяется их высокой склонностью к окислению с образованием пленки оксидов с весьма большой температурой плавления. Кроме того, оксид магния имеет высокую плотность, в ~2 раза превышающую плотность металлов. В результате возникает несплавление кромок при сварке, оксиды попадают в сварочную ванну, что приводит к низкому качеству шва. Поэтому при сварке магниевых сплавов необходима тщательная защита шва.

Отличительными особенностями сварки магния являются повышенная жидкотекучесть его расплава и почти полная потеря прочности металла при температуре твердожидкого состояния. Это вызывает необходимость применения при дуговой сварке прокладок из меди или коррозионно-стойкой стали с целью получения удовлетворительного формирования шва.

Лазерная сварка устраняет указанные трудности и обеспечивает высокое качество сварных соединений. Технология сварки магниевых сплавов принципиально не отличается от сварки алюминиевых сплавов. Перед сваркой соединяемые кромки следует протравить или зачистить шабером до блеска. Применение лазерного излучения обеспечивает хорошее формирование швов при сварке на весу, т.е. в отличие от дуговой сварки не требуется применение подкладок. Это значительно упрощает технологию изготовления сварных конструкций, особенно крупногабаритных.

Высококачественное формирование шва обеспечивается сваркой на оптимальных скоростях в диапазоне 16...35 мм/с. Требуемая мощность для получения полного проплавления на указанных скоростях несколько ниже, чем для алюминиевых сплавов. В табл. 6.6 представлены режимы лазерной сварки магниевого сплава.

От окисления швов защищают гелием, подаваемым в верхнюю часть ванны, и аргоном, используемым только для защиты нижней, корневой, части шва.

Микроструктуры сварных соединений характеризуются отсутствием крупных зерен в зоне термического влияния. Переход от основного металла к сварному шву в зоне сплавления происходит с плавным изменением структуры от двухфазной, характерной для основного металла, до игольчатой в сварном шве.

Благоприятная структура и высококачественное формирование шва обеспечивают хорошую стойкость к образованию горячих трещин, возникающих при дуговой сварке магниевых сплавов. Механические свойства сварных соединений, выполненных лазерным излучением, находятся на уровне основного металла.

Титановые сплавы. Эти сплавы находят широкое применение для изготовления сварных конструкций самого разнообразного назначения, характеризуются сочетанием малой плотности с высокой прочностью и коррозионной стойкостью.

Основная трудность при сварке титана и его сплавов заключается в чрезмерной химической активности металла при высокой температуре и особенно в расплавленном состоянии по отношению к газам (кислороду и водороду). Повышенное содержание в шве и основном металле примесей внедрения (газов), в первую очередь водорода, увеличивает склонность сварных соединений из титановых сплавов к образованию холодных трещин. Кроме того, титановые сплавы проявляют склонность к росту зерна при нагреве до высоких температур.

6.6. Режимы лазерной сварки магниевых сплавов непрерывным излучением CO_2-лазера

Материал	δ, мм	P, кВт	$v_{св}$, м/ч	F, см
ИМВ-2	1,8	2,0	100	11,2
	1,2	2,3	130	
МА-18	4,0	2,0	36	
	1,2		130	

Концентрированные источники нагрева, такие как электронный и лазерный лучи, позволяют осуществлять сварку с минимальной погонной энергией и способствуют преодолению перечисленных выше трудностей. Большое значение при сварке титана имеет тщательная подготовка свариваемых кромок фрезерованием либо точением. Применяют комплексную обработку для удаления газонасыщенной пленки: дробе- или пескоструйную обработку с последующими химическим травлением, осветлением и промывкой. Хорошее формирование шва обеспечивается подгонкой свариваемых деталей и строгим соблюдением допустимых зазоров между кромками.

Высокие эксплуатационные свойства сварных соединений могут быть получены лишь при тщательной защите зоны шва. При лазерной сварке деталей из титановых сплавов необходимо защищать их как с верхней, так и с нижней стороны. При этом обязательно следует защищать не только сварочную ванну, но и остывающие участки металла шва и ОШЗ до температуры 773...673 К, что обеспечивается использованием сопла с дополнительным хвостовиком для подачи защитного газа. Для защиты зоны сварки применяют инертные газы высокой степени чистоты или бескислородные фторидно-хлоридные флюсы. Для защиты поверхности шва и плазмоподавления служит гелий, а для защиты остывающей поверхности шва и его корня можно использовать аргон.

Рекомендуется выполнять лазерную сварку титановых сплавов на повышенных скоростях (>25 мм/с). При уменьшении скорости увеличивается ширина шва, образуются неблагоприятные структуры, повышается вероятность насыщения металла вредными газами и возрастает склонность к образованию холодных трещин

Режимы лазерной сварки некоторых титановых сплавов представлены в табл. 6.7.

6.7. Режимы лазерной сварки титановых сплавов излучением CO_2-лазера

Материал	δ, мм	P, кВт	$v_{св}$, м/ч	F, см
ВТ-6	3,0	3,0	80	30
	5,0	4,0		
ВТ-28	2,0	4,0	160	23
	3,0	3,3	95	15
ПТ-3В	4,0	4,0	160	50
	5,0		95	15

Высокие скорости лазерной сварки различных конструкционных материалов обеспечивают повышенные скорости охлаждения и приводят к большей дисперсности металла шва и значительному измельчению зерна в ОШЗ. Благоприятные условия кристаллизации, мелкодисперсная структура, высокая технологическая прочность при лазерной сварке способствуют получению более высоких механических свойств сварных соединений по сравнению с другими способами сварки.

Установленные закономерности лазерной сварки показывают, что данный процесс перспективен для изготовления сварных конструкций. Тенденция развития лазерной техники и технологии, постоянное их совершенствование стимулируют развитие лазерной сварки, которая становится конкурентоспособной в различных отраслях промышленности.

6.4. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ, ЛАЗЕРНОЙ И ПЛАЗМЕННОЙ СВАРКИ

6.4.1. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ

Лазерная сварка в промышленности осуществляется с помощью лазерных технологических установок. В их состав входят, как правило, следующие основные узлы: технологический лазер, а также системы транспортирования и фокусировки излучения; защиты зоны шва; закрепления и относительного перемещения лазерного луча и свариваемого объекта.

Сейчас наиболее широкое применение находят два типа технологических лазеров: газовые и твердотельные.

Газовые лазеры. В них активной средой являются чистый газ, смесь нескольких газов или газа с парами металла, возбуждаемая электрическим разрядом, при протекании химических реакций или в процессе адиабатического истечения нагретого газа через сверхзвуковое сопло. В соответствии с этим различают газовые электроразрядные, химические и газодинамические лазеры.

Химические и газодинамические лазеры пока не находят широкого технологического применения. Наибольшее распространение в промышленности получили электроразрядные CO_2-лазеры, в которых используются нижние колебательные уровни возбужденных молекул CO_2 для инфракрасного излучения с длиной волны 10,6 мкм.

Для повышения эффективности генерации излучения молекул углекислого газа в большинстве CO_2-лазеров используется газовая смесь с различным процентным содержанием диоксида углерода, азота и гелия. Доставка азота в рабочую газовую смесь способствует усилению генерации излучения, а гелий в основном интенсифицирует отвод теплоты во время генерации вследствие высоких теплоемкости и теплопроводности, понижая тем самым общую температуру рабочей смеси.

Газовую смесь возбуждают электрическим разрядом. Электрический КПД электроразрядного CO_2-лазера составляет 5…15 % .

В современных конструкциях CO_2-лазеров для увеличения эффективности использования рабочей смеси необходимо поддерживать ее температуру на оптимальном уровне и не допускать перегрева. С этой целью рабочую смесь охлаждают либо по принципу отвода теплоты от разрядной трубки (CO_2-лазеры с диффузионным охлаждением рабочей смеси – медленная прокачка), либо непосредственной циркуляцией рабочей смеси с целью замены нагретых объемов (CO_2-лазеры с конвективным охлаждением – быстрая прокачка).

Медленная прокачка применяется в трубчатых однолучевых лазерах со сравнительно малой мощностью и в многолучевых лазерах. Однако излучение лазеров с диффузионным охлаждением отличается повышенной расходимостью из-за наличия большого числа поворотных зеркал и многомодового характера излучения. Поэтому при фокусировке излучения максимальные значения плотности мощности ограничены (10^4…$5 \cdot 10^5$ Вт/см^2).

К лазерам этого типа относятся отечественные лазеры «Иглан» (ЛН-2,5НМ), а также зарубежные модели М-400 (Великобритания), «Photon Soures Inc.» (США).

В лазерах с быстрой прокачкой достигаются более высокие мощности излучения (>1 кВт). По направлению газового потока относительно электродов газоразрядной камеры и зеркал резонатора различают лазеры с продольной прокачкой: «Латус-31», ИЛГН-707, VFA-500-5000, RS-1200-5000 и лазеры с поперечной прокачкой: мод. 971, 973, 820, ЛГТ-2.01, ЛГТ-2.02, «Плутон-1» (ЛН-12НО), ТЛ-1,5, ТЛ-5М, ТЛ-7,5 и др. Возбуждение, т.е. накачка рабочей газовой смеси, осуществляется разрядом постоянного тока (лазеры ЛН-1,2НО, ТЛ-5М, мод. 973, RS-1000 и др.); высокочастотным разрядом (лазеры VFA-1200; VFA-2500);

разрядом постоянного тока с импульсной предионизацией (лазеры ЛГТ-2.01; ЛГТ-2.02).

На рис. 6.21, *а*, *б* представлена схема с быстрой продольной прокачкой, которая используется в лазерной технологической установке для сварки «Латус-31». Быстрая продольная прокачка смеси осуществляется с высокой скоростью (v = 120 м/с) через четыре пары параллельных газоразрядных трубок; при последовательном сложении лучей общая оптическая длина активной среды L = 1,6 м. В блоке питания лазера используется трехфазный высоковольтный регулятор переменного напряжения. Модулятор питания позволяет перейти на импульсный режим. Газовакуумная система имеет ручное и автоматическое управление, осуществляющее откачку и напуск смеси за 2 мин. При этом обеспечивается поддержание давления в газовакуумном контуре.

Система охлаждения отвечает за оптимальную температуру активной среды и достаточно низкую температуру узлов конструкции технологического лазера, что гарантирует большой ресурс его работы.

Оптический резонатор должен обеспечивать высокие значения энергетической эффективности генерации излучения. Практически в технологических лазерах применяются три типа оптических резонаторов: многопроходные устойчивые (ЛГТ-2.01, мод. 973, RS-1500), неустойчивые (ТЛ-5М) и волноводные, близкие по свойствам к устойчивым. Используемые в технологических лазерах резонаторы обеспечивают качество излучения с расходимостью 1...5 мрад. Зеркала для резонаторов изготовляют из меди, кремния и других материалов с покрытиями, гарантирующими высокий коэффициент отражения 98...99,7 % для длины волны генерируемого излучения 10,6 мкм.

Система автоматического управления технологического лазера обеспечивает автоматический вывод излучения, безаварийность и безопасность функционирования технологического лазера, активную стабилизацию параметров лазерного излучения и управление технологическими параметрами процесса сварки. Система автоматического управления на лазерах ЛГТ-2.01, RS-1000, мод. 971 и 973 выполнена в виде релейной схемы и отдельных электронных блоков, а в системе на лазерах ЛГТ-2.02, ТЛ-1,5, VFA и мод. 825 управление осуществляется микроЭВМ.

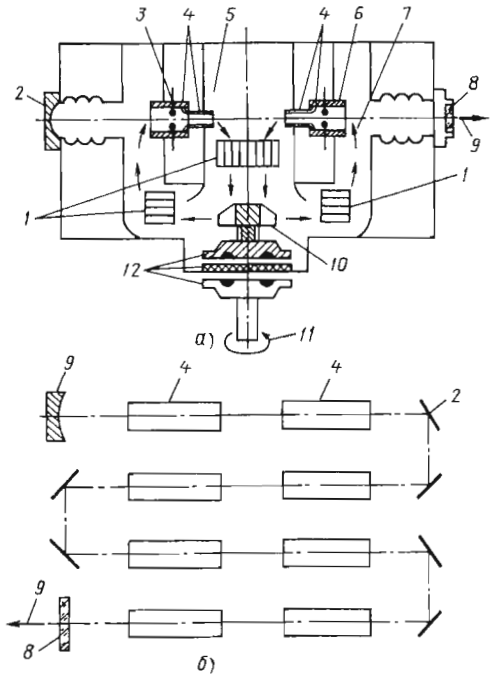


Рис. 6.21. Схема лазера с быстрой продольной прокачкой, используемая в лазерной технологической установке для сварки «Латус-31»:

а – газоразрядная и технологические схемы; *б* – оптическая схема; *1* – теплообменники; *2* – зеркала оптического резонатора; *3* – аноды; *4* – кварцевая часть газоразрядной трубки; *5* – катоды (заземленный корпус); *6* – керамическая часть газоразрядной трубки; *7* – направление газового потока; *8* – выводное окно; *9* – выходящий пучок лазерного излучения; *10* – вентилятор; *11* – привод вентилятора; *12* – магнитная муфта

Основные технические характеристики отечественных CO_2-лазеров представлены в табл. 6.8, а зарубежных – в табл. 6.9. Лазеры с малой расходимостью излучения (1...2 мрад) обеспечивают высокую концентрацию энергии лазерного излучения в сфокусированном пятне нагрева и рекомендуются для использования при резке, сварке и термообработке; с расходимостью 2...3 мрад – в процессе сварки и термообработки; с расходимостью ≥4...5 мрад во время термообработки.

Твердотельные лазеры. В твердотельных лазерах генерация излучения осуществляется в твердом активном элементе, в качестве которого используют стержни из кристалла искусственного рубина, стекла с присадкой

6.8. Характеристики отечественных технологических CO_2-лазеров

Параметр	ИЛГН-707	ЛН-1,2НМ	ЛН-2,5НМ	ЛГТ-2.01 («Лантан»)	ЛГТ-2.02 («Лантан»)	ТЛ-1,5	ТЛ-5М	МТЛ-2	ИПТЛ-2.01	ЛН-1,2 («Плутон»)	ТЛ-7,5
Номинальная мощность в непрерывном режиме, кВт	1	1,2	2,5	2 (1)	3 (2)	1,5	6	2	1,5	1,2	7,5
Частота импульсов, кГц	–			0…0,2	0…0,5	–			1,0	–	
Апертура излучения, мм	45	94		45	40/30	20	50	45	20	50 × 30	Кольцо 50/22
Расходимость, мрад, не более	5	3		2	2/1,5	1,4	1,5	6	3	1,5	2,0
Потребляемая мощность, кВ · А	25	30	50	30	35	40	100	20	40	30	120

6.9. Характеристики зарубежных технологических CO_2-лазеров

Параметр	США		Германия				Япония, LAC553-555	Великобритания, ILS1500	Болгария, ЛИ500-2500
	971 – 975	820 – 825	TLF	RS-500-5000	EFA-425-4000	VFA-1250-5000			
Номинальная мощность в непрерывном режиме, кВт	1,2...5	1,5...2,5	1...1,5	0,5...5	0,4...4	1,25...5	1,0...5	1,5	0,5...2,5
Частота импульсов, Гц	–			0...25	0,1...2,5	1,0	–		
Апертура излучения, мм	24...44	19...41	13	13...35	12...28	15...25	20...45	12	–
Расходимость, мрад, не более	1,4...3	1,4...1,5	2	1,5	–	2,0...3	2,0...3	2	4
Потребляемая мощность, кВ · А	29...76	40	27...43	10...100	8...60	16...64	35...100	25	12...80

редкоземельного элемента неодима, алюмоиттриевого граната с добавкой неодима (АИГ : Nd).

Принципиальная схема твердотельного лазера представлена на рис. 6.22. Твердый активный элемент *2* размещают в резонаторе между двумя зеркалами *1* и *3*. Зеркало *1* полностью отражает все падающее на него излучение, а зеркало *3* является полупрозрачным. Оптическая накачка активной среды осуществляется энергией газоразрядной лампы-вспышки *4* с источником питания *6*. Для получения более эффективного облучения лампу *4* вместе с активным элементом *2* помещают в кожух *5*, на внутреннюю поверхность которого нанесено отражающее покрытие типа серебра, золота и др. Кожух *5* имеет эллиптическую форму, а лампа и кристалл размещаются в фокусах эллипса. Этим достигаются условия равномерного и интенсивного освещения кристалла.

Твердотельные лазеры с активными элементами в виде рубинового стержня обычно работают в импульсно-периодическом режиме излучения с длительностью импульсов 10^{-3}... 10^{-9} с на длине волны 0,69 мкм. Энергия излучения в импульсе 10^{-2}...10^{3} Дж при максимальной частоте повторения импульсов ≥10 Гц.

Твердотельные лазеры с использованием неодима генерируют излучение по схеме, несколько отличной от схемы аналогичного процесса в лазере с рубином. Генерация излучения в них создается по четырехуровневой системе, которая более приемлема для эффективного получения лазерного излучения.

Конструктивно твердотельные лазеры с неодимом незначительно отличаются от рубиновых лазеров. При использовании рабочих тел больших размеров однородное возбуждение достигается применением нескольких ламп накачки, устанавливаемых вокруг рабочего тела.

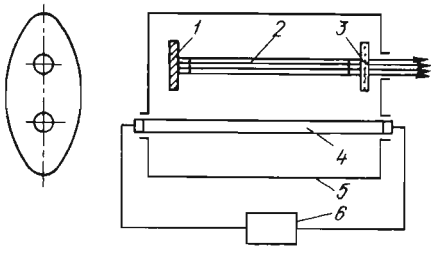


Рис. 6.22. Принципиальная схема твердотельного лазера

Твердотельные лазеры на стекле с неодимом и на гранате с неодимом генерируют излучение на длине волны 1,06 мкм и характеризуются высокой мощностью излучения в импульсе при импульсно-периодическом режиме генерации. Частотный режим твердотельных неодимовых лазеров изменяется в широких пределах: 0,05 Гц ... 50 кГц. При низких частотах (0,1...1 Гц) эти лазеры способны генерировать энергию в десятки джоулей в импульсе при длительности импульса порядка 100 мкс.

Отличительной особенностью твердотельных лазеров на АИГ : Nd является возможность генерации излучения не только в импульсно-периодическом, по и в непрерывном режиме. Мощность непрерывной генерации современных лазеров на АИГ : Nd достигает 0,5...2,0 кВт и выше. Электрооптический КПД твердотельных лазеров с использованием ламповой накачки активных элементов 1...3 %.

Последние годы характеризуются высокими темпами выполнения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в области твердотельных лазеров, уровень мощности излучения которых уже достиг 6...9 кВт.

В настоящее время в США, Западной Европе, Японии на рынке технологических лазеров по темпам роста объемов продаж мощные твердотельные технологические лазеры стоят на первом месте.

Весьма перспективны разработки новых систем возбуждения активных элементов, когда вместо ламп используются диоды. Это так называемые твердотельные лазеры с диодной накачкой.

Конструкция такого лазера становится более компактной и надежной в эксплуатации, обеспечивает высокий ресурс работы и значительное повышение электрооптического КПД до 10 % и выше. В настоящее время освоен промышленный выпуск твердотельных лазеров с диодной накачкой в широком диапазоне мощностей: от нескольких ватт до нескольких киловатт.

Твердотельные (АИГ : Nd)-технологические лазеры имеют более короткую длину волны излучения (1,06 мкм) в отличие от CO_2-лазера (10,6 мкм). Это дает возможность применять для фокусировки линзы из простого оптического стекла, в то время как для CO_2-лазера требуются линзы из таких дефицитных материалов, как арсенид галлия, германий, селенид цинка и др.

За счет более короткой длины волны излучения (АИГ : Nd)-лазера появляется исклю-

чительно важная возможность передачи энергии лазерного излучения по гибким оптоволоконным системам на значительные расстояния (до 100 м) с малыми потерями. Использование гибких волоконных кабелей позволяет одним лазером и более одновременно оснастить до шести рабочих мест. При этом на каждом из рабочих мест можно проводить самостоятельный технологический процесс, например сварку, резку и др. В случае установки фокусирующей головки на многопозиционном роботе эффективно осуществляются сварка, резка и другая обработка на изделиях сложного профиля и в труднодоступных местах без использования специально перемещающейся оснастки.

Следует также отметить, что эффективный КПД обработки материалов твердотельным лазером заметно превосходит значения КПД при сварке и в особенности при поверхностной обработке излучением CO_2-лазера.

Значительную перспективу представляет новое поколение твердотельных лазеров – так называемые диодные лазеры, обеспечивающие весьма высокие значения электрооптического КПД порядка 30...60 %, малые габаритные размеры, небольшую длину волны излучения (порядка 0,8...0,9 мкм) с возможностью транспортировки излучения по гибким световодам, высокие эксплуатационные показатели. Следует ожидать в ближайшие годы широкого распространения диодных лазеров в технологических процессах лазерной сварки, наплавки, пайки и в других видах лазерной обработки материалов.

Основные технические характеристики твердотельных лазеров представлены в табл. 6.10.

В последние годы обращается все большее внимание на развитие твердотельных лазеров, в особенности лазеров с диодной накачкой.

6.4.2. ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЕ СВАРОЧНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ НИКИМТа

Научно-исследовательский и конструкторский институт монтажной технологии (НИКИМТ, г. Москва), являясь головным предприятием отрасли по сварке в атомной энергетике и промышленности, экспериментальной физике, на протяжении более 40 лет проводит НИОКР в области высоких технологий сварочных процессов. Результатом этих работ стало создание базы для разработки и поставки на производство установок для электронно-лучевой сварки (ЭЛС) широкого круга изделий, характеризующихся исключительно высокими требованиями к уровню и стабильности качества сварных соединений в условиях массового производства.

На этот период создана база унифицированных узлов, технических решений, источников питания, электронно-лучевых и ионных пушек, программаторов процесса сварки и управления работой узлов установок, откачных и шлюзовых систем, систем визуального и телевизионного наблюдения, наведения и ведения луча по стыку, а также регистрации и документирования параметров сварки и технологического процесса (ТП). Специальные программы позволяют проводить паспортизацию и аттестацию изделий, основных параметров ТП и качества сварного соединения.

6.10. Технические характеристики твердотельных лазеров

Тип лазера	$P_{ср}^{изл}$, Вт	$A_{имп}$, Дж	$\gamma_{имп}$, кГц	$d_п$, мм	α, рад	M, кг
ЛТН-101-103	63...250	–		4	$1 \cdot 10^{-2}$	190...340
ЛТН-501-502	8...16	–	5...50	1,5...1,0	$(1...2)\ 10^{-3}$	225
«Квант-15-16»	100...125	10...30	$2 \cdot 10^{-2}...10^{-4}$	0,25...3,0	$(1,5...1,8)\ 10^{-2}$	815
«Фотон-500»	300	–	–	4	$2,5 \cdot 10^{-2}$	690
МЛТИ-1200	1000		$1 \cdot 10^{-3}...1,0$			Нет данных

Примечание. У лазеров всех типов $\lambda = 1,06$ мкм.

Условные обозначения: $A_{имп}$ – энергия в импульсном режиме; $d_п$ – диаметр пучка; α – расходимость; $P_{ср}^{изл}$ – средняя мощность излучения; λ – длина волны излучения; $\gamma_{имп}$ – частота повторения импульсов излучения.

Опираясь на научно-технический потенциал, накопленный опыт проектирования и имея свое опытное производство, НИКИМТ в короткие сроки и с высоким качеством способен разработать и изготовить по требованию заказчика оборудование для ЭЛС.

По своему назначению все оборудование для ЭЛС, выпускаемое НИКИМТом, состоит из следующих типов:

1) установок для сварки кольцевых швов трубчатых изделий диаметром 6...140 мм и длиной до 4000 мм с концевыми деталями (заглушки, хвостовики, переходники);

2) универсальных установок для сварки кольцевых, торцовых и продольных швов изделий диаметром до 500 мм, длиной продольного шва до 700 и поперечного до 400 мм;

3) специализированных установок для сварки различных швов конкретных изделий;

4) энергетического оборудования (энергоблоков) для комплектования и модернизации электронно-лучевого оборудования, имеющегося на предприятиях заказчика;

5) телевизионного оборудования для наблюдения и ведения луча по стыку;

6) систем регистрации и документирования параметров ТП сварки.

Первый тип установок создавался для нужд атомной энергетики, в частности для герметизации тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ), сварки технологических каналов и других элементов активных зон реакторов типа РБМК и ВВЭР в условиях массового производства.

К этому типу относятся установки СА-330, СА-340 и СА-413.

Установка СА-330 (рис. 6.23) предназначена для сварки трубчатых изделий диаметром 6...14 мм и длиной до 4000 мм с концевыми деталями того же диаметра.

Конструктивно установка состоит из цилиндрической вакуумной камеры, в которой помещается выкатываемый барабан емкостью на 120 изделий, вакуумной стойки, стойки автоматики, энергоблока и системы регистрации ТП сварки. Сварка изделий проводится в водоохлаждаемой цанге. Все системы установки работают в автоматическом режиме.

Установка может эксплуатироваться как автономно, так и в составе автоматической линии, при этом она оснащается агрегатами загрузки и выгрузки изделий.

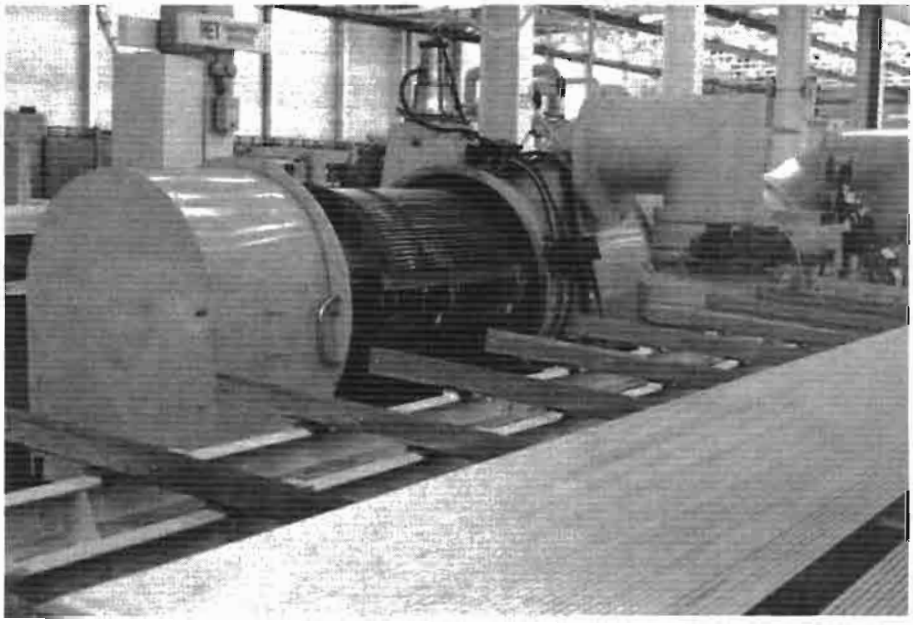


Рис. 6.23. Установка СА-330

Технические характеристики СА-330

Диаметр свариваемых изделий, мм	6…14
Длина свариваемых изделий, мм	600…3860
Скорость вращения изделия при сварке, мин$^{-1}$	3…45
Емкость барабана, шт.	120
Цикл работы	Автоматический
Ускоряющее напряжение, кВ	75
Ток электронного луча, мА	0,5…50
Объем рабочей камеры, м^3	2,0
Давление в камере и пушке, мм рт. ст.	(2…5) 10^{-5}
Потребляемая мощность, кВт	40
Производительность, сварок/ч	5
Расход охлаждающей воды при температуре (15 ±5) °С, л/ч	2500
Габаритные размеры, мм	8900×5000×2300
Масса, кг	8000

Установка СА-340 (рис. 6.24) рассчитана на герметизацию ТВЭЛов реакторов РБМК и ВВЭР.

Отличительными особенностями установки являются:

- непрерывный (роторный) цикл работы;
- ступенчатое, золотниковое вакуумирование только зоны сварного шва;
- малая металлоемкость;
- небольшая занимаемая площадь;
- высокая производительность;
- наличие встроенной транспортной системы.

Конструктивно установка состоит из четырехступенчатой камеры с торцовым уплотнением и золотника, на котором смонтировано 15 вакуумных вводов с возможностью вращения и перемещения относительно осей; стенда для загрузки и выгрузки изделий; вакуумной стойки; стойки автоматики; энергоблока; телевизионной системы наведения луча на стык и системой регистрации параметров ТП сварки.

Сварка изделий проводится в водоохлаждаемой цанге. Все системы работают в автоматическом режиме. Установка легко встраивается в автоматическую линию цеха.

Технические характеристики СА-340

Диаметр свариваемых изделий, мм	6…14
Длина свариваемых изделий, мм	2000…4000

Рис. 6.24. Установка СА-340

Скорость вращения изделия при сварке, мин$^{-1}$	3,6...30
Производительность, стыков/ч	80...120
Ускоряющее напряжение, кВ	75
Ток луча, мА	0,5...50
Объем рабочей камеры, м^3	0,3
Давление в камере и пушке, мм рт. ст.	(2...5) 10^{-5}
Потребляемая мощность, кВт	20
Расход охлаждающей воды, л/ч	400
Габаритные размеры, мм ...	6100×4500×2400
Масса, кг	3500

Установка СА-413 (рис. 6.25) предназначена для сварки труб диаметром 10... 140 мм, длиной ≥4000 мм с переходниками, заглушками и хвостовиками.

Отличительными чертами установки являются:

– герметизация только зоны сварного соединения;

– наличие шлюза внутри сварочной камеры для предварительной откачки с целью повышения производительности;

– наличие многопозиционных пеналов для сварки изделий малого диаметра;

– возможность сварки с присадочной проволокой;

– малая металлоемкость;

– ускоренная откачка.

Конструктивно установка состоит: из сварочной вакуумной камеры; вакуумного ввода для герметизации и вращения изделия; шлюза предварительной откачки; механизма присадочной проволоки, установленного внутри камеры и предназначенного для сварки труб с разделкой кромок; стенда для загрузки труб и многопозиционных пеналов; вакуумной стойки; стойки автоматики; энергоблока; телевизионной системы наведения луча на стык.

Все системы работают в автоматическом цикле. Загрузка и выгрузка осуществляются вручную.

Технические характеристики СА-413

Диаметр свариваемых изделий, мм	10...140
Толщина стенок, мм	До 4
Скорость сварки, мин$^{-1}$	0,075...0,3
Диаметр присадочной проволоки, мм	0,9...1,6

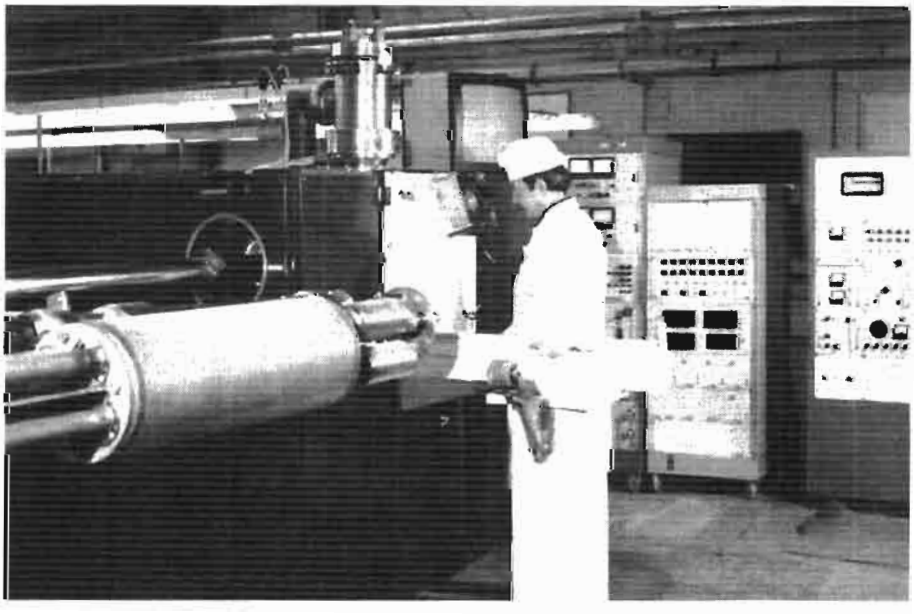


Рис. 6.25. Установка СА-413

Скорость подачи присадочной проволоки, мм/с	0,83...12,5
Объем рабочей камеры, $м^3$	0,17
Рабочее давление в камере, мм рт. ст.	$(2...5)\ 10^{-5}$
Ток луча, мА	250
Ускоряющее напряжение, кВ	30
Потребляемая мощность, кВт, не более	30
Расход, л/мин:	
воды	8
воздуха	5
Габаритные размеры, мм ...	7000×4400×2000
Масса, кг	7000

Регистрируемые параметры ТП сварки: ток луча; ускоряющее напряжение; скорость сварки; ток фокусировки.

Технические решения всех установок первой группы защищены авторскими свидетельствами. Все установки эксплуатируются на предприятиях отрасли с начала 80-х годов прошлого века.

Ко второму типу установок относятся универсальные установки для ЭЛС изделий из тугоплавких, химически активных и цветных металлов, специальных сталей и сплавов. Выполняется сварка кольцевых, торцовых и продольных швов изделий толщиной до 30, диаметром до 50 и длиной до 700 мм.

Наличие координатного стола с ЧПУ, на который устанавливается различное технологическое оборудование; энергоблока с широкими технологическими возможностями и современных систем управления технологическим циклом делают этот тип установок универсальным для сварки широкой номенклатуры изделий и различных типов швов с заданными параметрами соединения.

К этому типу относятся установки СА-424, СА-424М, СА-445, СА-451.

Установка СА-424 базовая и предназначена для сварки изделий диаметром до 300 мм кольцевых и торцовых швов длиной до 300 мм. Установки легко встраиваются в состав технологических цепочек производства.

Остальные установки этого типа являются ее модификациями и отличаются различным исполнением и размером вакуумной камеры, ходами координатного стола, откачными системами, наличием дополнительных механизмов и других систем, расширяющих технологические возможности установки при сварке самых разных изделий промышленного производства.

Так, установка СА-445 оснащена соосными, синхронными и раздвижными вращателями с изменяемой по углу осью вращения и дополнительной пушкой для ионной очистки поверхности изделий перед сваркой. Установка имеет безмасляную систему откачки и может встраиваться в технологический цикл сварки ответственных изделий.

Установка СА-451 (рис. 6.26) предназначена для работы в цеховых и лабораторных условиях и снабжена откатываемой дверью и приемным столом, на который выкатывается координатный стол с технологическим оборудованием для загрузки и выгрузки изделий.

Отличительными особенностями установки являются:

– безмасляная система откачки камеры и пушки;

– наличие ионной пушки, многопозиционного вращателя, телевизионной системы наведения луча на стык и системы регистрации параметров сварочного процесса.

Технические характеристики СА-451

Диаметр свариваемых изделий, мм	7...300
Длина свариваемых изделий, мм	880
Ток луча, мА	0,5...50
Номинальное ускоряющее напряжение, кВ	40...75
Скорость:	
вращения изделия, $мин^{-1}$ ...	0,2...10
перемещения стола, м/ч	1,5...240
Давление в камере и пушке, мм рт. ст.	$(2...5)\ 10^{-5}$
Объем камеры, $м^3$	0,6
Ход стола, мм:	
вдоль камеры	300
поперек камеры	200

Установка регистрирует те же параметры, что и СА-413.

Установка СА-424М (рис. 6.27) предназначена для ЭЛС кольцевых и торцовых швов изделий диаметром до 500 мм и длиной до 700 продольных и до 400 мм поперечных швов в цеховых или лабораторных условиях. Установка имеет координатный стол с расположенным

Рис. 6.26. Установка СА-451

Рис. 6.27. Установка СА-424М

на нем вращателем с изменяемой по высоте и углу осью вращения, а также стойку управления системами технологического цикла в автоматическом режиме. Кроме того, установка имеет форсированный режим работы откачной системы.

Технические характеристики СА-424М

Диаметр свариваемых изделий, мм	До 500
Длина шва, мм:	
продольного	700
поперечного	400
Скорость:	
вращения изделия, $мин^{-1}$	1…40
перемещения стола, м/ч	3…50
Номинальное ускоряющее напряжение, кВ	40…75
Максимальный ток луча, мА	100
Давление в камере и пушке, мм рт. ст.	$(2…5)\ 10^{-5}$
Размеры камеры, мм	1600×1000×1600
Максимальное отклонение луча от оси пушки, град	18
Точность ведения луча по стыку при помощи телевизионной системы, мм	±0,1

Эта установка регистрирует те же параметры, что и установки первой группы.

К третьей группе оборудования относятся специализированные установки для ЭЛС конкретных изделий различных отраслей промышленности.

В зависимости от свариваемых материалов и требований к качеству сварного соединения установки оснащаются безмасляными системами откачки, ионными пушками для ионной очистки изделий перед сваркой, датчиками активного контроля и управления параметрами ТП, устройствами параллельного переноса луча и т.д.

Для повышения производительности в установках предусмотрены шлюзовые устройства загрузки-выгрузки, позиционеры, питатели, накопители и другие устройства.

К этой группе относятся установки СА-252, СА-508, СА-558, СА-613, СА-472.

Установка СА-252 предназначена для герметизации химически активных материалов в алюминиевых оболочках, оснащена передаточным шлюзом, сборочным боксом с перчаточными узлами, позиционером на 12 изделий.

Установка СА-508 рассчитана на вварку труб в трубные доски, имеет блок параллельного переноса луча, позволяющий выполнять сварку в труднодоступных местах.

Установка СА-558 служит для сварки бытовых конвекторов в условиях серийного производства, содержит входные и выходные шлюзовые камеры и два сварочных энергоблока, обеспечивающих поточное производство изделий.

Установка СА-613, предназначенная для сварки деталей и узлов двигателя автомобиля ЗИЛ, оснащена шлюзом загрузки-выгрузки и двумя пушками для выполнения различных швов в различных пространственных положениях.

Установка СА-472 (рис. 6.28) рассчитана на сварку кольцевых швов при укрупнении деталей из металла монокристаллической структуры и приварку крышек к пеналам из тугоплавких материалов.

Конструктивно установка выполнена в модульном исполнении, для чего постоянная часть вакуумной камеры с установленной на ней пушкой имеет косой стыковочный фланец для подсоединения модулей с технологической оснасткой для различных изделий.

Рис. 6.28. Установка СА-472

Модуль для сварки изделий из монокристаллической структуры содержит накопитель заготовок и сборочно-сварочное приспособление, позволяющее ориентировать оси монокристаллов заготовок перед сваркой.

В модуле для приварки крышек к пеналам из тугоплавких металлов предусмотрен специальный четырехпозиционный загрузочный шлюз. Для контроля температуры поверхности изделий монокристаллической структуры имеется система бесконтактного метода измерения температуры. Установка оснащена безмасляной системой откачки вакуумной камеры и пушкой для ионной очистки поверхности изделия перед сваркой.

Технические характеристики СА-472

Диаметр свариваемых изделий, мм	7…30
Длина свариваемых изделий, мм	300
Ток луча, мА	0,5…50
Ускоряющее напряжение, кВ	40…75
Скорость вращения изделия, $мин^{-1}$	0,2…10
Давление в камере и пушке, мм рт. ст.	$(2…5)\ 10^{-5}$

Регистрирует установка ток луча, ток фокусировки, ускоряющее напряжение, скорость сварки.

Все рассмотренные установки оснащены унифицированным энергоблоком типа СА-505 (рис. 6.29) в различных исполнениях и различной комплектности.

Энергоблок состоит из источника питания ЭР224, в состав которого входят силовой шкаф на базе тиристорного инвертора частотой 5 кГц; высоковольтный масляный бак; электронно-лучевая пушка типа СА-449; стойка «Управление» СА-424; телевизионная система наблюдения, наведения луча на стык и пульт управления.

Силовой шкаф состоит из инверторов и блоков управления ими. Управление током луча и его стабилизация могут осуществляться как за счет обратной связи по накалу катода, так и по запирающему напряжению.

Высоковольтный масляный бак предназначен для размещения в нем высоковольтной части источника, для обслуживания и ремонта бак снабжен встроенным подъемником.

Стойка «Управление» предназначена для управления параметрами электронного луча – ТП сварки. Стойка включает в себя: программатор на базе микропроцессора для программирования в функции пути или времени

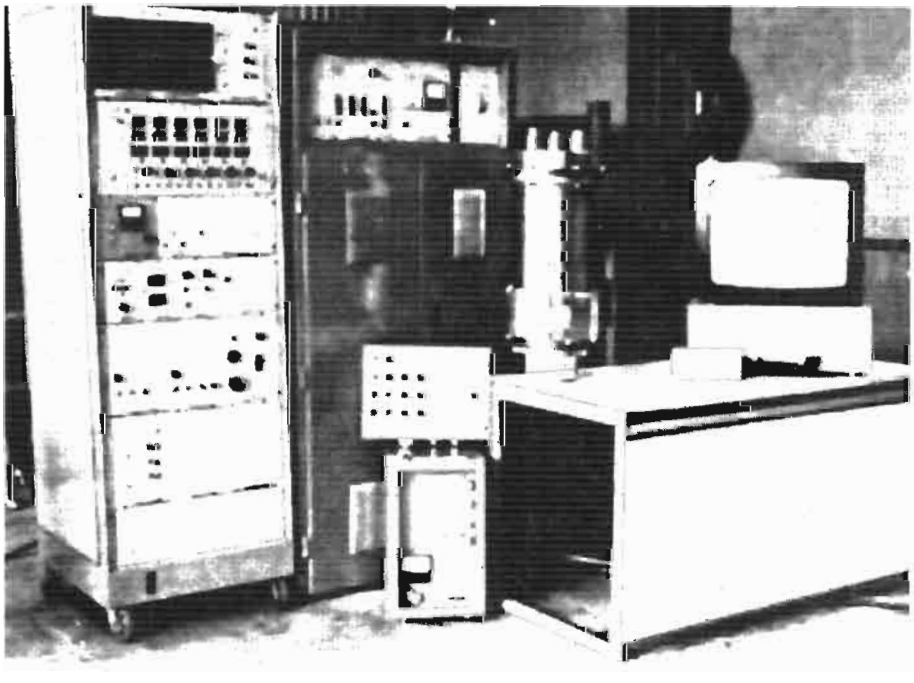


Рис. 6.29. Энергетический блок ЭЛС типа СА-505

основных параметров сварочного цикла с памятью на 64 программы и возможностью циклического перехода программ; блок регистрации параметров ТП сварки на основе микропроцессора с формирователем интерфейса; блок отклонения луча по осям с переключением выбора частоты, амплитуды и формы сигнала; блок фокусировки, работающий в режиме жесткой стабилизации тока фокусирующей катушки; блок автоматической фокусировки электронного с оптическим датчиком для обеспечения заданной глубины проплавления; генератор импульсов; блок запирающего напряжения и два стабилизированных привода.

Технические характеристики СА-505

Ускоряющее напряжение, кВ	30...75
Ток, мА:	
луча	0,1...100
фокусирующей катушки ...	50...2000
отклоняющих катушек	0...350
Допустимое изменение, %:	
ускоряющего напряжения	±0,5
тока луча	±0,5
Допустимая нестабильность, %:	
фокусировки	±0,5
тока отклонения	±0,2
Максимальный ток накала, А	30
Нестабильность скорости вращения, %, не более	±2
Максимальная потребляемая мощность, кВт	10

Электронно-лучевая пушка СА-449 (рис. 6.30) предназначена для формирования электронного луча и конструктивно состоит из законченных функциональных узлов с унифицированными стыковочными фланцами, что позволяет компоновать разные исполнения. Пушка трехэлектродная с прямонакальным катодом и дифференциальной системой откачки.

Высоковольтный изолятор выполнен на основе компаунда МБК-1 и материалов, исключающих образование токопроводящих следов на поверхности изолятора после возможных высоковольтных пробоев. Поверхность изолятора не накапливает электрических зарядов.

Конструкция катодного блока позволяет быстро заменять катод без нарушения юстировки, что обеспечивается специальной оснасткой для постановки катода в катодный узел.

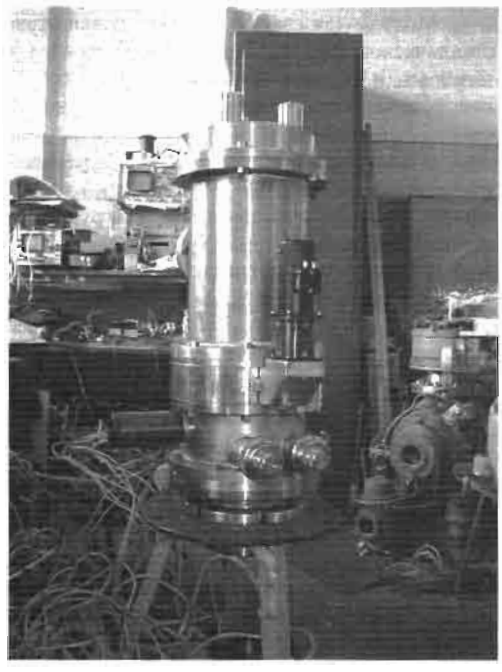


Рис. 6.30. Электронно-лучевая пушка СА-449

Пушка выпускается в нескольких исполнениях в зависимости от величины ускоряющего напряжения и комплектации дополнительными узлами, такими как устройство визуального осевого наблюдения зоны сварки, вакуумный затвор с ручным или электромеханическим приводом и т.д.

На базе энергоблока ЭР224 создан энергоблок М57/58 для применения совместно с газовой электронно- и ионно-лучевыми пушками. Газовая пушка СА-458 формирует пучок ионов или электронов из плазмы газового разряда. В качестве плазмообразующего газа используется воздух, аргон или гелий. Энергоблок применяется при сварке химически активных металлов со значительным коэффициентом испарения. Пушка СА-458М (рис. 6.31) предназначена для получения пучков ионов инертных газов при обработке изделий высокоактивных металлов, имплантации атомов инертных газов в поверхностный слой изделий.

Технические характеристики рассмотренных пушек приведены в табл. 6.11.

Технические решения устройств, систем защищены авторскими свидетельствами.

Рис. 6.31. Пушка СА-458М

6.11. Технические характеристики пушек

Параметр	СА-449.00, СА-449.02	СА-449.01, СА-449.03	СА-458
Ускоряющее напряжение, кВ	75	35	25
Максимальная мощность, кВт	7,5	12,0	2,5
Диапазон регулировки тока луча, мА	0,1…100	0,1…250	1…100
Тип катода	Танталовый или вольфрамовый	Танталовый	Газы аргон, гелий
Сила тока, мА:			
– отклонения	–350…+350		±350
– фокусировки	0…2000	10…150	
Угол отклонения, град	±10		
Рекомендуемое рабочее расстояние, мм	100…700	50…200	50…300
Габаритные размеры, мм:			
– диаметр	550		
– высота	305	405	
Масса, кг, не более	80		15

Системы управления некоторых установок, разработанных в НИКИМТе, были построены на базе микропроцессорных программируемых контроллеров, в частности установка СА-340 – на базе контроллера «Гранит-К3», ряд установок типа СА-330 (СА-330М, СА-330М1 и СА-330М2) – на базе контроллеров КМС-1. Внедрение этих контроллеров позволило создать систему управления нового поколения для данного типа сварочных установок.

Для автоматизации управления параметрами ТП сварки в НИКИМТе был разработан и внедрен специализированный программируемый контроллер (программатор) СА-424.10. Во встроенной энергонезависимой памяти контроллера можно хранить до 64 программ сварочных циклов. Данный контроллер позволяет проводить сложные исследования по усовершенствованию сварочной технологии и обеспечивает высокую повторяемость качества сварных швов по уже разработанным программам.

Специфика сварки ТВЭЛов потребовала внедрения особых методов разработки программного обеспечения для контроллеров, управляющих этими сварочными установками. Была предложена специальная методика параллельного программирования контроллеров, обеспечивающая их параллельную работу по единому алгоритму в жестком режиме реального времени.

В технологическом цикле сварки ТВЭЛов сбои в программе управления установкой влекут за собой поломку оборудования, повреждение оболочки ТВЭЛов, ликвидация последствий которых трудоемка и дорога. Для устранения подобных сбоев в программе управления была разработана и внедрена многоуровневая система блокировок, позволяющая контролировать состояние основных узлов и агрегатов установок в процессе их работы.

С помощью программной системы управления на базе контроллеров впервые была полностью автоматизирована работа вакуумной установки. Одна из самых продолжительных подготовительных операций теперь производится в автоматическом режиме и не требует от оператора постоянного внимания и присутствия у пульта управления.

В программе управления сваркой было введено несколько режимов:

– автоматический, в котором выполняется основная сварка изделий;

– ручной, когда отлаживается цикл сварки с устанавливаемыми в программаторе параметрами сварки;

– наладочный, используемый в основном для ремонта и последующей наладки отдельных узлов, а также для проверки работоспособности устройств и агрегатов при профилактических мероприятиях;

– настроечный, служащий для настройки электронного луча, программатора и системы управления высоковольтным источником питания.

В автоматическом цикле сварки при возникновении ситуаций сбоя в ходе выполнения некоторых операций (невыход изделия на позицию сварки за установленное время, нефиксирование изделия в определенной позиции также за фиксированное время и т.д.) в программе управления были предусмотрены выход из этих ситуаций без участия оператора и продолжение сварки остальных изделий в автоматическом режиме. Это существенно сэкономило время выхода из таких сбоев.

Программная система управления в процессе сварки изделий позволила проводить переключение автоматического режима на ручной и обратно без останова работы системы. Это обычно применяется при настройке режимов цикла сварки для получения необходимого качества сварного шва изделий.

Внедрение рассмотренных здесь систем управления в электронно-лучевые сварочные установки дает возможность удобно встраивать последние в единые, хорошо согласованные системы линий непрерывного изготовления ТВЭЛов для ядерных реакторов, что подтверждено практикой. Такие системы управления легко модернизируются и без больших трудозатрат могут быть оборудованы другими аналогичными контроллерами.

Надежность и перспективность разработанных и внедренных методик и принципов построения программно-аппаратного обеспечения подобных систем управления подтверждены многолетней эксплуатацией многих электронно-лучевых установок и отсутствием сбоев в работе их программного обеспечения.

6.4.3. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПЛАЗМЕННОЙ СВАРКИ

Для ручной и механизированной сварки плазменной дугой применяют как универсаль-

ные, так и специализированные установки. Плазменные установки представляют собой комплекты из плазмотрона (плазменной горелки), источника его питания, механизма подачи присадочной проволоки, механизма перемещения плазмотрона вдоль и поперек оси шва и системы управления электрическими и газовыми параметрами плазменной дуги.

Плазмотроны для сварки – это сочлененные в едином корпусе изолированные друг от друга катодный и сопловой узлы. Электрический ток, охлаждающая вода, рабочий и защитный газы подводятся к плазмотрону по кабельному шланговому пакету, который стыкуется с плазмотроном либо внутри рукоятки ручной плазменной горелки, либо посредством штуцерных соединений, расположенных в верхней части плазмотрона, предназначенного для механизированной сварки. В плазмотронах для сварки в качестве рабочего и защитного газов используется в основном аргон (реже гелий), а в качестве катода – тугоплавкий, стойкий к инертной среде вольфрамовый стержень, закрепленный в цанговом зажиме или впаянный в медный водоохлаждаемый катододержатель. Плотность тока в канале сопла, условно определяемая как $j = 4I / (\pi d^2)$, где I – ток дуги; d – диаметр канала сопла.

Обычно j невысокая (7...14 А/мм^2 на токах 200...300 А), чем обусловлено формирование слабообжатой плазменной дуги, обеспечивающей спокойный (без выплесков) процесс сварки или наплавки.

Высокие технологические показатели плазменных процессов сварки достигаются при определенной взаимосвязи между геометрией катодно-сопловой камеры плазмотрона, формирующей столб дуги, и параметрами режима работы плазмотрона (тока, расхода газа).

Источники электропитания плазмотронов для сварки выполнены на базе сварочных выпрямителей с падающими внешними вольтамперными характеристиками (ВАХ) и повышенным напряжением холостого хода (до 80 В) марок ВДУ-305, ВДУ-504-1 и др.

Система управления включает в себя пульт и при необходимости шкаф управления, в которых размещены устройство зажигания дуги УПД-1 (или осцилляторы ОСИ-300, ОСИ-500), регуляторы расхода газа, электроблокировки, отсекатели и другие элементы водяных и газовых коммуникаций, коллектор кабель-шлангового пакета плазмотрона, разъем электрокабеля для подключения к источнику питания. На пульте расположены приборы контроля и регулирования параметров плазменного процесса. В установках для ручных плазменных процессов пульт управления чаще всего встроен в корпус источника питания, а в установках для механизированных процессов вмонтирован в панель управления установок.

Для ручной сварки малоуглеродистых и низколегированных сталей толщиной до 5 мм ВНИИЭСО (г. Санкт-Петербург) разработаны и выпускаются заводом «Электрик» (г. Санкт-Петербург) установки УПСР-300-2 и УПСР-300-3. В состав установок входят источник питания ВД-303, шкаф управления и плазмотрон ПРС-0401.

Установки для плазменной сварки производятся двух типов: для ручной сварки УПС-301 и механизированной УПС-503. Технические характеристики установок представлены в табл. 6.12. Комплект установки УПС-301 содержит источник питания ВДУ-305, блок управления, комплект ротаметров и ручной плазмотрон ПРС-0301. Установка УПС-301 предназначена для сварки на постоянном токе прямой полярности меди и ее сплавов толщиной 0,5...3 мм; коррозионно-стойкой стали толщиной 0,5...5 мм и на постоянном токе обратной полярности алюминия и его сплавов толщиной 1...8 мм; может быть использована для ручной аргонодуговой сварки.

Наличие переносного пульта позволяет приблизить его к сварщику, облегчает зажигание дуги, настройку расхода газа и величину сварочного тока. Установка обеспечивает работу в трех режимах: непрерывном, импульсном, точечном. Длительность импульса и паузы регулируется в пределах 0,1...1 с.

Установка УПС-503 предназначена для сварки в среде инертных газов на постоянном токе прямой полярности меди и ее сплавов толщиной до 6 мм, коррозионно-стойкой стали толщиной 3...8 мм и на постоянном токе обратной полярности алюминия и его сплавов толщиной 5...16 мм. В состав установки УПС-503 входят самоходная подвесная головка с направляющей балкой, источник питания ВДУ-504-1, блок управления и блок газовой и водяной аппаратуры, плазмотроны ПМС-315 и ПМС-501 (табл. 6.13).

6.12. Технические характеристики универсальных установок для плазменной сварки

Марки			I, А	$U_р$ ($U_{х.х}$)*, В	Газ	
установки	источника	плазмотрона			плазмообразующий	защитный
УПС-201	ВДУ-305	ПРС-0201	80...200	70 (120)	Ar, He	He
УПСР-300-2	ВД-303	ПРС-0301	50...300	40 (85)	Ar	CO_2
УПСР-300-3		ПРС-0401				
УПС-301	ВДУ-305	ПРС-0301	25...315	40 (80)		Ar
УПС-404	ВДУ-506		100...500	45 (90)		
УПС-501	ВДУ-504	ПМС-501, ПМС-315	70...500	45 (80)	Ar, He	Ar, He
УПС-804	ВДУ-1000	ПМС-804	300...800	90 (180)	CO_2	CO_2
УПС-1002/3		ПМС-1002/3		65...75		

* $U_р$ и $U_{х.х}$ – рабочее напряжение и напряжение холостого хода.

6.13. Технические характеристики плазмотронов для сварки

Марка	I, А	δ, мм	Q, л/мин		Масса, кг
			газа	воды	
ПРС-0201	60	0,05...1,5	6,6	2,0	0,1
ПРС-0401	100	0,1...2,5			0,3
ПРС-0301	300	0,5...5	17	4,0	0,7
ПМС-315	315	0,2...6	16	6,0	1,5
ПМС-501	500	1...8	18	12,0	1,0
ПМС-804	800	6...12	22	28	1,8
ПМС-1002	1000	1...60	36		2,5

В качестве примера специализированной установки для плазменной сварки можно привести трубосварочный стан ЛДГ-43, созданный для производства сварных прямошовных особотонкостенных труб из коррозионно-стойкой стали.

Технические характеристики стана ЛДГ-43

Свариваемая толщина, мм 0,17…0,25
Диаметр свариваемых труб, мм ..... 4…10
Скорость сварки, м/ч ..... 420…720
Сила сварочного тока, А ... 20…100
Расход газа (аргона), л/мин:
плазмообразующего 4…7
защитного ..... 2…4
Потребляемая мощность, кВт 8
Габаритные размеры, мм ... 5240×2630×1630
Масса, кг 2500

Основа стана – трубосварочный автомат, состоящий из формирующего устройства, сварочной камеры с размещенной в ней плазменной горелкой и тянущего устройства. В состав стана также входят бухторазматыватель ленты и бухтонаматыватель сваренной трубы.

Для микроплазменной сварки выпускается оборудование серии МПУ. Установки этой серии предназначены для ручной сварки низколегированных сталей и цветных металлов толщиной 0,1…1,5 мм. Комплект оборудования включает в себя источник питания с крутопадающей внешней характеристикой, обес-

печивающий четыре режима сварки в непрерывном и импульсном режимах, плазмотрон и газовую аппаратуру.

Установка МПУ-4 рассчитана на сварку черных, цветных, легких и тугоплавких металлов и сплавов малых толщин (0,15...1,5 мм) в зависимости от физико-химических свойств свариваемых металлов и типа шва на постоянном и импульсном токах прямой и обратной полярности. Ступенчатая регулировка силы сварочного тока осуществляется переключением катушек трехфазного сварочного трансформатора, плавная – их перемещением.

Аппарат Н-146 служит для сварки черных и цветных металлов, в том числе алюминия и его сплавов, толщиной <2,5 мм на постоянном и переменном токах. Аппарат снабжен встроенной системой охлаждения и может быть использован как в стационарных, так и в полевых условиях. Сварочный ток регулируется перемещением подвижных катушек однофазного сварочного трансформатора.

Аппарат Н-155 предназначен для сварки переменным асимметричным током алюминия, магния и их сплавов при толщине 0,4...2,5 мм. Безынерционное регулирование сварочного тока осуществляется изменением угла открытия силовых тиристоров, раздельно включенных в цепи электрода и плазмообразующего сопла. Аппарат обеспечивает плавное нарастание и снижение величины сварочного тока, высокую устойчивость сварочной дуги вследствие ускоренного перехода сварочного тока через нулевое значение и включения при этом в дуговой промежуток стабилизирующих импульсов напряжения.

Аппарат И-167 рассчитан на сварку черных и цветных металлов (кроме алюминия, магния и их сплавов) толщиной 0,5...3 мм в непрерывном и импульсном режимах тока прямой полярности. Принцип работы аппарата основан на формировании крутопадающей (близкой к «штыковой») внешней ВАХ сварочного трансформатора, что достигается подмагничиванием постоянным током магнитного шунта, расположенного между первичными и вторичными обмотками трехфазного сварочного трансформатора. Аппарат характеризуется пониженными пульсациями сварочного тока и высокими нагрузочными параметрами (ПН = 100 %), что позволяет применять его в составе автоматических линий и механизированных участков при высоких скоростях сварки. В аппарате обеспечиваются снятие напряжения с плазмотрона при преднамеренном или случайном обрыве дежурной дуги и плавное гашение дуги (заварка кратера) в конце процесса сварки.

Установка УМПС-0301 предназначена для сварки черных и цветных металлов (кроме алюминия, магния и их сплавов) толщиной 0,1...1,5 мм в непрерывном и импульсном режимах горения дуги. Принцип безынерционного плавного регулирования сварочного тока в установке основан на изменении индуктивного сопротивления одного из двух трехфазных дросселей переменного тока, включенных последовательно со вторичными обмотками трехфазного сварочного трансформатора, имеющего жесткую ВАХ. В установке предусмотрено плавное гашение сварочной дуги (заварка кратера) в конце процесса сварки, а также обеспечено снятие напряжения с плазмотрона при преднамеренном или случайном обрыве дежурной дуги. Установка снабжена выносным пультом дистанционного управления.

Требования, предъявляемые к конструкции плазмотрона, достаточно высоки. Он должен обеспечивать:

– стабильное горение дежурной и основной дуг в рабочем диапазоне токов;

– диэлектрическую прочность при высокочастотном возбуждении дежурной дуги;

– надежную защиту металла сварочной ванны от воздействия атмосферы;

– безотказную работу наиболее теплонагруженных элементов – электрода и плазмообразующего сопла, а в случае необходимости – простоту их замены;

– возможность точной центровки электрода относительно канала плазмообразующего сопла и регулировки его продольного перемещения;

– удобство и маневренность при сварке.

Наиболее широкое применение нашли плазмотроны типов УСДС, Р-45 и Т-169, входящие в комплект установок МПУ-4, и выпускавшиеся ранее для микроплазменной сварки алюминия А-1281, А-1343, Н-136 и др. Плазмотроны ОБ-2592 и ОБ-2628 отличаются улучшенными техническими характеристиками, удобством в эксплуатации и обслуживании, ими комплектуются источники УМПС-0301, И-167, Н-155.

Специализированное оборудование для механизации и автоматизации процессов микроплазменной сварки изготовляется по техническому заданию заказчика.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Григорьянц А.Г.** Основы лазерной обработки материалов. М.: Машиностроение, 1989. 304 с.

2. **Еремин Е.Н.** Плазменно-дуговые технологические процессы в сварочном производстве: Учеб. пособие. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2000. 275 с.

3. **Зуев И.В.** Обработка материалов концентрированным потоками энергии. М.: Изд-во МЭИ, 1998. 162 с.

4. **Лазерная** техника и технология. В 7 т. Т. 2. Инженерные основы создания технологических лазеров: Учеб. пособие для вузов / В.С. Голубев; Под ред. А.Г. Григорьянца. М.: Высш. шк., 1988. 176 с.

5. **Лазерная** техника и технология. В 7 т. Т. 5. Лазерная сварка металлов: Учеб. пособие для вузов / А.Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов; Под ред. А.Г. Григорьянца. М.: Высш. шк., 1988. 207 с.

6. **Лазерная** и электронно-лучевая обработка материалов: Справочник / Н.Н. Рыкалин, А.А. Углов, И.В. Зуев, А.Н. Кокора. М.: Машиностроение, 1985. 496 с.

7. **Малаховский В.А.** Плазменная сварка. М.: Высш. шк., 1987. 80 с.

8. **Мамутов Е.Л.** Электронно-лучевая сварка деталей большой толщины: Инженерный поиск. М.: Машиностроение, 1992. 232 с.

9. **Машиностроение**: Энциклопедия; Оборудование для сварки. Т. IV-6 / В.К. Лебедев, С.И. Кучук-Яценко, А.И. Чвертко и др.; Под ред. Б.Е. Патона. М.: Машиностроение, 1999. 496 с.

10. **Микроплазменная** сварка / Б.Е. Патон, В.С. Гвоздецкий, Д.А. Дудко и др. Киев: Наукова думка, 1979. 248 с.

11. **Николаев Г.А., Григорьянц А.Г.** Лазерная обработка в машиностроении / Изв. АН СССР. Сер. физическая. 1983. Т. 47. № 8. С. 1458 – 1467.

12. **Петров А.В.** Плазменная сварка: Итоги науки и техники / ВИНИТИ. Сер. «Сварка». 1980. Т. 12. С. 53 – 109.

13. **Сварка** в машиностроении: Справочник. В 4-х т. / Редкол.: Г.А. Николаев и др. М.: Машиностроение, 1978. Т. 1 / Под ред. Н.А. Ольшанского. 1978. 508 с.

14. **Сварка** и свариваемые материалы. В 3-х т. Т. 2 Технология и оборудование: Справ. изд. / Под ред. В.М. Ямпольского. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1996. 574 с.

15. **Синев В.П.** Электронно-лучевая сварка. Т. 15. Сварка: Итоги науки и техники ВИНИТИ АН СССР. М., 1983. С. 117 – 182.

16. **Справочник** по сварке цветных металлов / С.М. Гуревич; Отв. ред. В.Н. Замков. 2-е изд., перераб. и доп. Киев: Наукова думка, 1990. 512 с.

17. **Шиллер З., Гайзиг У., Панцер Э.** Электронно-лучевая технология / Пер. с нем. М.: Энергия, 1980. 528 с.

18. **Щицын Ю.Д.** Устойчивость жидкой ванны при плазменной сварке проникающей дугой // Сварочное производство. 1997. № 10. С. 3 – 5.

19. **Электронно-лучевая** сварка / О.К. Назаренко, А.А. Кайдалов, С.Н. Ковбасенко и др.; Под ред. Б.Е. Патона. Киев: Наукова думка, 1987. 256 с.

Глава 7

ПАЙКА МАТЕРИАЛОВ

7.1. ОСНОВЫ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ПРОЦЕССЕ ПАЙКИ

При нагреве паяемых материалов наблюдается множество физико-химических явлений на границе их раздела. В зависимости от свойств материалов и припоя, концентрации окислителей на поверхности и ионов водорода, вида защитной среды, испарения и возгонки химических элементов, изменения структуры и фазового состава в твердом теле при нагреве и т.д. механизм паяемости может существенно меняться.

Паяемость – способность металлов при взаимодействии с расплавом припоя образовывать паяное соединение, удовлетворяющее конструктивным и эксплуатационным требованиям.

В основе паяемости твердых тел – металлов – с обеспечением прочных связей между ними лежит принцип их смачивания припоем. Оценкой смачивания является краевой угол, образованный касательной к поверхности жидкой капли припоя и линией раздела между твердым телом и жидкой каплей (рис. 7.1) или площадь растекания жидкого припоя по твердому телу. Чем меньше краевой угол θ и больше площадь растекания капли припоя, тем лучше смачивание поверхностей твердого тела. Возрастание θ свидетельствует об ухудшении смачивания (см. рис. 7.1). Смачивание на стадии контакта паяемых поверхностей и последующие физико-химические процессы достигаются, как правило, при условиях:

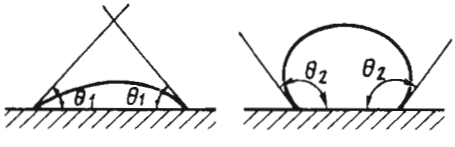


Рис. 7.1. Краевой угол смачивания на границе твердое тело – расплав

– химического сродства элементов твердого тела и припоя;

– оптимальных значений поверхностного натяжения твердого тела и припоя;

– наличия защитной среды, предотвращающей окисление твердого тела и расплава в процессе пайки.

Кроме того, на смачивание влияют технологические (шероховатость и волнистость), металлургические (структура, зерно, морфология частиц фаз) и физико-химические (прочность, пластичность и т.д.) факторы как в отдельности, так и в совокупности. По мере смачивания поверхности твердого тела могут образовываться химические и физические связи – при сближении расплава и твердого тела на расстояние соответственно <5 и >5 Å. При значениях >10 Å химические и физические связи практически отсутствуют. Поэтому для сближения соединяемых поверхностей, например при телескопическом соединении, до указанного выше расстояния необходимы усилие поджатия и избыточная энергия (энергия активации). Роль последней сводится к преодолению сил отталкивания между сближающимися частицами твердого тела. При наличии поджатия с подъемом температуры возрастающая энергия активации усиливает сближение частиц на границе контакта, интенсифицирует диффузионный обмен между атомами твердого тела и припоя и способствует образованию связей. Кристаллизация припоя и сохранение контакта между соединяемыми поверхностями обеспечивают паяное соединение.

7.2. РАЗНОВИДНОСТИ СПОСОБОВ ПАЙКИ

Качество паяного соединения в значительной мере зависит от способа пайки. По условию заполнения зазора пайка делится на капиллярную и некапиллярную; по механизму образования паяного шва капиллярная пайка подразделяется на пайку контактно-реактивную, реактивно-флюсовую, металлокерамиче-

скую и диффузионную. К некапиллярной пайке относится пайко-сварка.

По условиям нагрева пайка может осуществляться паяльником, газовым пламенем, электродугой, электросопротивлением, индукционным нагревом, электронным лучом, лазером, нагревом в печах, погружением в расплавленную соль или расплавленный припой и т.д.

По методу удаления оксидной пленки пайка подразделяется на абразивную, абразивно-кристаллическую, ультразвуковую, флюсовую, пайку в нейтральной газовой среде, вакуумную и пайку в активной газовой среде.

Каждому из названных способов присущи как свои достоинства, так и недостатки относительно друг друга, но тем не менее каждый из них может быть использован для соединения любых металлов и их сочетаний, в том числе с керамикой, композитами и т.д., при условии тщательной подготовки паяемых поверхностей, т.е. удаления оксидов и загрязнений, рационального выбора припоя, оборудования для нагрева, защиты от окисления в процессе пайки и оптимальной технологии пайки.

7.3. ПРИПОИ ДЛЯ ПАЙКИ И ПРОЧНОСТЬ ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Припой – металл или сплав, размещаемый между соединяемыми поверхностями и имеющий температуру плавления ниже температуры плавления паяемых металлов. Выбранный припой для пайки должен удовлетворять конструктивным и эксплуатационным требованиям, предъявляемым к паяным соединениям. Обычно требования включают в себя:

– отсутствие образования хрупких фаз в паяном шве и на границе раздела металл – расплав припоя;

– обеспечение смачивания и растекаемости припоя по поверхности паяемых металлов;

– достижение прочности и пластичности паяного соединения на уровне паяемых металлов;

– узкий интервал между температурами ликвидуса и солидуса;

– теплопроводность и коэффициент линейного расширения припоя на уровне паяемых металлов;

– образование паяного шва, состоящего преимущественно из твердого раствора.

По виду припои подразделяют на: листовые, трубчатые, пастообразные, порошковые, гальванические, таблетированные и др.

По форме припои изготовляют в виде: чушек, проволоки, ленты, зерен и т.д.

Припои классифицируют также по способу размещения припоя: в канавки – питатели, зазоры, на поверхность с прихваткой ленты припоя с помощью сварки, гальваническим осаждением и т.д.

По температуре плавления припои делят на несколько групп: особолегкоплавкие (до 145 °С), легкоплавкие (до 450 °С), среднеплавкие (до 1100 °С), высокоплавкие (до 1850 °С) и тугоплавкие (>1850 °С).

В различных областях техники широко используют самофлюсующиеся припои. Процесс самофлюсования обеспечивается за счет присутствия во флюсе фосфора, лития, индия, бора и т.д.

Припои, применяемые в промышленности, подразделяются на две группы: припои – технические металлы и припои на основе сплавов.

К первой группе обычно относятся олово, цинк, серебро, медь, никель, магний, золото, титан и т.д., ко второй - сплавы, например медно-серебряные, оловянно-цинковые, медно-цинковые, медно-фосфорные, никель-хромовые, марганцово-никелевые, железомарганцовые, алюминиево-кремниевые, титано-ванадиевые и др.

Для пайки конструкционных сталей и сплавов чаще всего используют припои с температурой плавления до 1050 °С, для меди и медных сплавов – до температуры 800 °С.

Для пайки углеродистых и малолегированных сталей обычно применяют припои на основе меди, иногда берут чистую медь.

При пайке тугоплавких металлов в основном используют следующие припои: титан, ванадий, их сплавы и другие композиции, содержащие, как правило, тугоплавкие элементы, такие как молибден, титан, ванадий, тантал и т.д.

Кроме того, при выборе припоя нельзя не учитывать и то, что в процессе взаимодействия с металлом возможно появление нежелательных физико-химических явлений: избирательной диффузии тугоплавких элементов металла в расплав припоя и диффузии элементов припоя по границам зерен металла.

В первом случае это может повлечь за собой ослабление пограничной зоны металла за счет обеднения ее тугоплавкими легирующими элементами; во втором – появление легкоплавких эвтектических и перитектических соедине-

ний по границам зерен, которые могут также снижать прочность приграничной зоны с паяным швом. Кроме того, проникающие по границам зерен химические элементы припоя могут оказывать расклинивающее давление, близкое к пределу текучести паяемых металлов, а в отдельных случаях и превышающее предел прочности.

Появлению первого и второго случаев при пайке могут способствовать:

– избыточная поверхностная энергия в металлах;

– структурные и фазовые изменения в металлах;

– наличие избыточных свободных электронов над верхним слоем металла.

Избыточная поверхностная энергия появляется вследствие скопления дефектов, таких как дислокации, вакансии, междуузельные атомы, поры и т.д. перед препятствием, например искаженной кристаллической решеткой в зоне контакта с расплавом припоя.

Проявлению структурных и фазовых изменений способствуют термомеханические процессы, которые наиболее интенсивно воздействуют на поверхностные слои, контактирующие с расплавом припоя, поскольку здесь первоначально возникают растягивающие напряжения и величина их в поверхностном слое больше, чем в теле зерна. Напряжения, как известно, интенсифицируют процессы структурных и фазовых превращений.

На основе элементарной квантовой механики за счет движущихся электронов может возникнуть поверхностное состояние, способное локализовать электроны на поверхности с образованием хемосорбционных связей, причем более облегченно по границам зерен. Вызвано это тем, что граница в сравнении с телом зерна, из-за ее разобщения обладает большей энергией; кроме того, здесь же наблюдается скопление сегрегаций в виде легкоплавких элементов, карбидных и других соединений. Легкоплавкие элементы, стремясь снизить свою поверхностную энергию, диффундируют в зону повышенных растягивающих напряжений, какой является поверхностный слой металла, контактирующий с расплавом припоя.

Выше указывалось, что припой является определяющим в получении высококачественного паяного соединения. Поэтому при его выборе рекомендуется для паяных конструкций, работающих в теплонапряженных условиях, на стадии, предшествующей пайке, провести анализ, учитывающий температуру распая, с учетом оптимальных параметров химического состава припоя, выбранного по диаграмме состояния и смачиваемости им паяемых поверхностей.

Далее будет приведен методический подход к выполнению данной работы, состоящий из трех этапов.

Первый из них включает в себя анализ и выбор вида припоя, удовлетворяющего конструктивным и эксплуатационным требованиям; второй – анализ диаграммы состояния и выбор по ней химического состава припоя; третий – проведение исследовательских и экспериментальных работ для подтверждения оптимальности выбранного припоя.

Рассмотрим данную этапность применительно к паяемой конструкции из сочетания металлов сталь – бронза, работающей в интервале температур 400…500 °С. Бронза к стали приваривается по вершинам ребер, выполненных на бронзе. Ширина каналов между ребрами переменная, минимальная величина 1 мм. Прочность паяного соединения при комнатной температуре должна быть ≥200 МПа, при T = 500 °С – 50…70 МПа.

Из опыта пайки подобных конструкций следует, что наиболее приемлемой композицией являются припои системы медь – серебро. Из диаграммы состояния медь – серебро (рис. 7.2) видно, что данная композиция эвтектическая. Однако помимо эвтектики существуют две области с ограниченной растворимостью: слева – область α-твердый раствор (α-тв.р.), являющийся доэвтектической составляющей, справа – β-твердый раствор (β-тв.р.) – заэвтектическая составляющая. Существование трех областей свидетельствует о том, что химический состав сплавов в этих областях различен. Следовательно, их физико-химические свойства будут также разными. Отсюда, чтобы выбрать оптимальный химический состав припоя, необходимо рассмотреть каждую из областей в отдельности.

Ниже будет рассмотрен подход к анализу химического состава припоя применительно к трем областям: доэвтектической I – II, эвтектической III, заэвтектической IV – V.

Сплав I выше точки T_1 находится в жидком состоянии (медно-серебряный расплав). В процессе охлаждения до T_1 из медно-серебряного расплава начинают выделяться кристаллы α-тв.ра (медь и серебро).

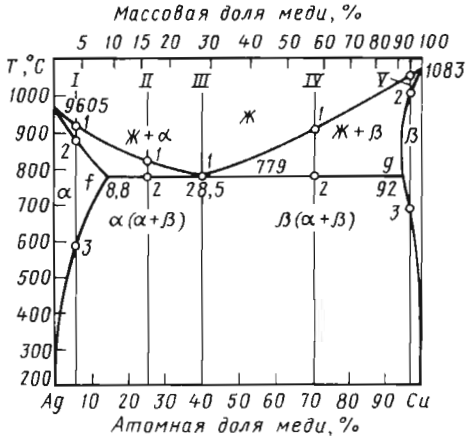


Рис. 7.2. Диаграмма состояния сплавов системы серебро – медь

В диапазоне температур $T_1 \ldots T_2$ сплав состоит из медно-серебряного расплава и кристаллов α-тв.ра. Концентрация последнего меняется по линии солидуса. В интервале $T_2 \ldots T_3$ закристаллизовавшийся сплав находится в состоянии однофазного пересыщенного α-тв.ра, в результате чего при температуре $<T_3$ из сплава одновременно выпадают вторичные кристаллы α-тв.ра и первичные β-тв.ра, образующие эвтектику.

Этот процесс протекает до полного охлаждения, т.е. до комнатной температуры (T = 20 °С). Следует отметить, что растворимость меди в серебре при T = 779 °С составляет 8,8 %, а при T = 20 °С ≤0,1 %.

Таким образом, сплав I представляет собой структуру, состоящую из частиц первичных кристаллов α-тв.ра и эвтектики – механической смеси. Количество первичных кристаллов α-тв.ра в сплаве будет (24,1/28,1) 100 % = = 85,76 %; количество эвтектики (4/28,1) 100 % = = 14,24 %.

Сплав II так же, как и сплав I, доэвтектический, однако в нем отсутствует область твердых растворов, как это имеет место в сплаве I. В процессе кристаллизации (точка T_1) из сплава II начинают выделяться первичные кристаллы α-тв.ра. В точке T_2 жидкость полностью кристаллизуется, образуя эвтектику из частиц α-тв.ра состава точки f и β-тв.ра состава точки g.

Количество первичных кристаллов α-тв.ра при T = 20 °С будет составлять 37,72 %, а эвтектики 62,28 %.

Эвтектический сплав III в отличие от сплавов I и II кристаллизуется при строго определенной температуре, составляющей 779 °С. При 20 °С сплав состоит из эвтектики α + β (α-тв.р. = 71,88 %, β-тв.р. = 28,12 %).

В сплаве IV на начальной стадии кристаллизации из жидкости при T_1 выделяются кристаллы β-тв.ра (серебро и медь), а при T_2 жидкий расплав полностью кристаллизуется, образуя эвтектику из частиц α-тв.ра + β-тв.ра. Причем частицы β-тв.ра вторичны. Количество первичных кристаллов β-тв.ра будет составлять 43 %, а эвтектики – 57 %.

В сплаве V так же, как и в сплаве IV, при достижении температуры T_1 начинают выделяться кристаллы β-тв.ра. Концентрация жидкой фазы при этом меняется по линии ликвидуса, а состав β-тв.ра – по линии солидуса. При T_2 сплав представляет собой пересыщенный однофазный β-тв.р., из которого при T_3 начинает выделяться эвтектика (α + β).

При комнатной температуре сплав состоит из первичных кристаллов β-тв.ра и эвтектики (α + β). Растворимость серебра в меди при T = 20 °С очень мала (<0,1 %). Количество первичных кристаллов β-тв.ра при T = 20 °С будет 93,17 %, а эвтектики – 6,83 %.

Для наглядности проведенных расчетов сведем данные в табл. 7.1.

7.1. Медно-серебряные сплавы

№ сплава по порядку	Структурные составляющие, %			Компонент, %	
	α	Эвтектика	β	Ag	Cu
I	85,76	14,24	–	95	5
II	37,72	62,28		84	16
III	–	100,00	28,12	72	28
IV		57,00	43,00	42	58
V		6,83	93,17	4	96

Из табл. 7.1 следует, что доэвтектический и эвтектический сплавы состоят из α-тв.ра и эвтектики, заэвтектические – из эвтектики и частиц β-тв.ра. В первых трех сплавах структура преимущественно состоит из серебра, а последних двух – из меди.

Анализ структуры в зависимости от температуры показал (см. рис. 7.2), что такие изменения имеют место только в сплавах I и V, причем в сплаве I наблюдается увеличение растворения меди с повышением температуры (предельная растворимость при 779 °С 8,8 %; в сплаве V отмечается аналогичная тенденция, но только с серебром (предельная растворимость серебра в меди при T = 779 °С 8 %).

Таким образом, из анализа полученных результатов следует, что наиболее эффективными для пайки являются сплавы III и IV. Остальные – доэвтектические и заэвтектические – менее эффективны, так как первые состоят преимущественно из серебра – дефицитного и дорогого металла, и к тому же такие припои вызывают повышенную склонность к эрозии бронзы. Отсутствие интереса к сплаву V связано с тем, что он представляет собой практически чистую медь, а, как известно, медь в сравнении с серебряными сплавами хуже смачивает поверхность стали, особенно при капиллярной пайке, и, кроме того, медь при определенных условиях может приводить к охрупчиванию стали.

Таким образом, выбрав сплавы III и IV, на следующем этапе определяли характеристики смачивания и растекаемости этих сплавов на образцах из стали и бронзы, покрытых гальванически как медью, так и никелем в отдельности.

Из теории смачивания известно, что эта характеристика определяется поверхностным натяжением, свободной энергией на единицу поверхности и краевым углом смачивания и предшествует более сложной характеристике – растекаемости. В данном случае оценку смачивания припоев проводили по углу θ и площади растекания.

Проведенные исследования в вакууме 10^{-2} мм рт. ст. показали, что как на медном, так и на никелевом покрытии угол θ = 0 для обоих медно-серебряных сплавов. Пятно растекания имеет бóльшую площадь на медном покрытии в сравнении с углом θ на никелевом покрытии.

Характерно также и то, что из двух исследуемых сплавов бóльшая площадь растекания отмечается для сплава III.

Таким образом, по результатам исследований установлено, что оптимальным покрытием является медь, а припоем – сплав III эвтектического состава.

С учетом выбранного вида покрытия и химического состава припоя на следующем этапе оценивали прочность паяного соединения. При этом учитывали величину зазора между паяемыми поверхностями.

Исследования проводили на цилиндрических образцах. В процессе пайки образцов создавали вакуум 10^{-2} мм рт. ст. Экспериментальной проверкой установлено, что прочность паяного соединения с использованием в качестве припоя сплава III в интервале температур 20…500 °С 220…100 МПа соответственно при зазоре 0,1 мм. С увеличением зазора прочность паяного соединения снижается.

Таким образом, исследования показали, что оптимальными являются припой (сплав III) и медное покрытие под пайку на деталях.

Из представленной методики следует, что при минимальной экспериментальной работе с использованием бинарных диаграмм можно подобрать оптимальный химический состав припоя на стадии, предшествующей пайке конструкций.

7.4. ЗАЩИТНЫЕ СРЕДЫ В ПРОЦЕССЕ ПАЙКИ КОНСТРУКЦИЙ

В атмосферных условиях поверхность металлов покрывается оксидной пленкой, интенсивно адсорбирующей из воздуха молекулы воды и газов, а при изготовлении на различных стадиях обработки – жировых составляющих. Окисление металлов в общей форме можно представить как

$$2\mathrm{Me} + \mathrm{O_2} \rightarrow 2\mathrm{MeO} + \Delta H.$$

Константа равновесия с учетом парциального давления будет

$$K_{\mathrm{p}} = \frac{p^2_{\mathrm{Me}} p_{\mathrm{O_2}}}{p^2_{\mathrm{MeO}}},$$

где p^2_{Me}, $p_{\mathrm{O_2}}$, p^2_{MeO} – парциальные давления металла, кислорода и оксида соответственно.

Данное уравнение справедливо, если и металл, и его оксид находятся в парообразном состоянии. При неизменной температуре реакции между металлом и кислородом парциаль-

ные давления металла p_{Me} и оксида p^2_{MeO} являются величинами постоянными. Поэтому $K_p = \alpha p_{O_2}$, где α – константа.

Из рассматриваемого уравнения следует, что условие равновесия между металлом и оксидом при неизменной температуре зависит от парциального давления кислорода. Зависимость давления диссоциации оксида от температуры определяется по формуле

$$\lg p_{O_2} = -\frac{Q_v}{4{,}571T} + 1{,}75 \lg T + 2{,}8,$$

где Q_v – теплота диссоциации оксида на 1 моль кислорода; T – температура, К.

При определенной толщине оксидной пленки происходит упорядочение структуры пленки по отношению к металлу, и, соответственно, увеличивается прочность сцепления ее с металлом. Наличие оксидной пленки и загрязнений на поверхности металлов затрудняет контактирование жидкого припоя с металлом и тем самым предотвращает смачивание и растекание припоя по паяемым поверхностям и обеспечение надлежащего паяного соединения в процессе пайки. Отсюда, чтобы обеспечить высококачественное паяное соединение необходимо удалить оксидную пленку и загрязнения с паяемых поверхностей.

7.4.1. ПОДГОТОВКА ПОВЕРХНОСТЕЙ ПОД ПАЙКУ

Для устранения оксидной пленки, жировых пятен, эмульсий и других загрязнений используют различные способы подготовки поверхностей. При выборе способа учитывают:

- конфигурацию деталей;
- химический состав металлов;
- твердость поверхностного слоя;
- структуру и фазовый состав металла;
- состояние поверхности, включая величину зерна, шероховатость, степень и вид загрязнения, искаженность решетки поверхностного слоя.

С учетом сказанного для обеспечения чистой поверхности используют либо механические, либо химические и электрохимические методы подготовки поверхностей.

При механическом методе обработки могут применяться шлифование, полирование, обработка абразивными лентами, галтование, виброгалтование, гидромеханическая и центробежная обработка, струйно-абразивные методы, пескоструйная, гидропескоструйная, дробеструйная обработка и др. Каждый из видов механической обработки позволяет полностью удалить с поверхности оксидную пленку и загрязнения. Наряду с указанным достоинством этому методу присущи и недостатки, одним из которых является возможность локального внедрения частиц, например абразива, песка и т.д., в поверхностные слои обрабатываемого металла. Наличие их на поверхности резко снижает качество паяного соединения. Поэтому в случае повышенных требований к прочности и пластичности паяного шва удалять оксидную пленку и загрязнения механическим путем нецелесообразно.

При этом более оптимальны химические и электрохимические методы подготовки поверхности. Жировые загрязнения минерального происхождения (смазки, полировальные пасты, минеральные масла) смывают органическими растворителями; растительного и животного происхождения – промывкой в водных растворах щелочей и их солей. Для усиления эмульгирующего действия щелочных растворов в них иногда добавляют поверхностно-активные вещества (ПАВ), например соли аминов, мыла карболовых кислот, алкилсульфокислоты, алкилсульфаты и т.д.

В ряде случаев для удаления жировых загрязнений, в том числе твердых металлических включений, используют эмульсионный (смесь органического растворителя, эмульгатора и слабощелочного раствора) двустадийный способ очистки. На первой стадии обработку ведут в смеси органического растворителя, на второй – в горячем растворе щелочей.

Для повышения качества очистки рекомендуется щелочные растворы или эмульсии подавать на обрабатываемую поверхность под давлением.

Широкое применение для удаления загрязнений находит электрохимическое обезжиривание на постоянном или переменном токе и при пониженном напряжении. Последнее позволяет избежать наводороживания деталей. Оно применяется главным образом для удаления оставшихся после других видов обезжиривания жировых загрязнений. Сущность способа заключается в ослаблении сил сцепления масел с поверхностью металла при выделении из него газовых пузырьков водорода (при катодном обезжиривании) или кислорода (при анодном обезжиривании) и всплытии вместе с ним на поверхность электролита.

В настоящее время весьма эффективное применение нашел совмещенный метод обработки поверхностей, включая обезжиривание и травление. В этом случае в растворы добавляют кислоты (серную, соляную, ортофосфорную, фосфорную и др.), а также ПАВ. Кислота, проникая через оксидную пленку к поверхности, вступает с ней в реакцию, в результате чего происходят ее отрыв и растворение.

С целью обеспечения высококачественной подготовки поверхности, необходимой для достижения сцепления с покрытием, наносимым под пайку, и предотвращения попадания загрязнений в ванны активации, гальванопокрытий, пассивации и др. рекомендуется промывать детали. Оптимальным является комбинированное погружение деталей в ванну со струйной обработкой поверхностей. Качество очистки поверхностей оценивают при непосредственном или косвенном контроле. В первом случае его осуществляют с помощью приборов или протиркой поверхностей салфеткой с дальнейшим контролем чистоты салфетки люминесцентными приборами; во втором оценивают содержание загрязнений в растворителе, используемом при очистке поверхностей, или салфетке после протирки ею деталей.

Традиционно после очистки деталей от загрязнений и снятия оксидной пленки на паяемые поверхности наносят покрытие, чаще всего, гальваническим путем. Вместе с тем для улучшения сцепления покрытий с поверхностью деталей в ряде случаев выполняют активацию или пассивирование поверхностей. Сущность первой операции заключается в удалении тончайших пленок оксидов химическим или электрохимическим способом в растворах, состоящих, как правило, из смеси кислот; второй – в образовании на поверхности деталей весьма тонкой пассивной пористой пленки, восстанавливаемой впоследствии при электролизе в процессе нанесения покрытия и обеспечивающей затем высокую активность поверхности подложки и прочное сцепление покрытия с ней.

7.4.2. СПОСОБЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЗАЩИТЫ ПАЯЕМЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОТ ОКИСЛЕНИЯ

На деталях, очищенных от загрязнений, в атмосфере даже сухого воздуха вновь отмечается образование оксидной пленки, причем появление ее определяется секундами. Поэтому, чтобы избежать ее возникновения, в ряде случаев на паяемые поверхности наносят покрытия, обладающие высокими защитными свойствами, например никель, медь, серебро, марганец, цинк и др., различными способами, включая гальванический, ионно-плазменный, электродуговой и др. Наиболее широкое применение из них в промышленности находит гальванический.

Наряду с защитными свойствами покрытия обеспечивают смачивание и растекаемость припоев при пайке.

Для защиты от окисления металлов при пайке широко используют активные и инертные газы, различные флюсы и вакуум.

К активным газам относят оксид углерода и водород, а также смеси, содержащие водород и оксид углерода, а к активным газовым средам – газообразные флюсы, применяемые как самостоятельно, так и как добавки. В качестве газообразных флюсов используют фтористый водород (HF), трехфтористый бор (BF_3), борорганические соединения и т.д. Получают флюсы из соединений NH_4F, NH_4BF_4, KBF_4 при разложении их в процессе нагрева при пайке.

К инертным газам относят главным образом аргон и гелий.

В отдельных случаях для защиты от окисления при пайке служат смеси активных и инертных газов. Активные газы обладают свойством восстанавливать оксиды металлов и тем самым способствуют получению высококачественных паяных соединений. Например, оксид меди легко восстанавливается углеродом даже при $T = 100$ °С, закись железа – при $T > 690$ °С, в то же время диоксид кремния – только лишь при $T > 1500$ °С. Повышение температуры восстановления оксидов объясняется большим сродством металлов к кислороду.

Механизм пайки в среде инертных газов и вакууме сводится к потере устойчивости оксидов и их разложению с выделением кислорода в процессе нагрева, причем температура разложения оксидов будет тем ниже, чем меньше парциальное давление кислорода в процессе пайки.

В случаях трудного восстановления оксидов металлов используют пайку в вакууме. Иногда для более тщательной очистки атмосферного воздуха при пайке в рабочий объем печи помещают стружку (титан или цирконий), которая обильно поглощает кислород.

Для защиты от окисления в процессе пайки тугоплавких металлов, сталей, сплавов и других материалов часто используют аргон, смесь аргона и гелия, вакуум. Для восстанов-

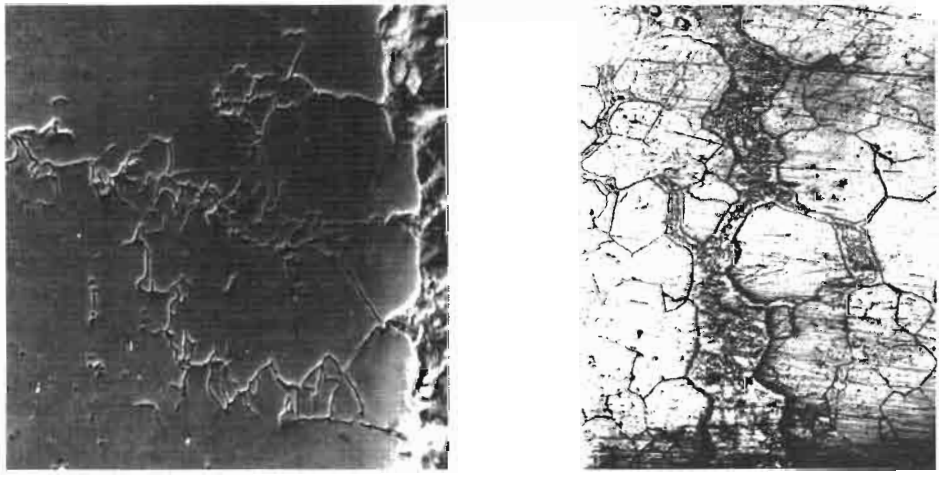
ления металлов из оксидов при пайке низкоуглеродистых сталей, конструкционных сталей и сплавов и т.д. применяют активные среды. При этом большое распространение в качестве восстановительной среды получили диссоциированный аммиак, газовые смеси: водород, оксид углерода и азот, а также газообразные флюсы. Иногда используют смесь (газообразный флюс с аргоном), подаваемую на проток.

7.5. СОВМЕСТИМОСТЬ ПАЯЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПРИПОЯМИ

В процессе пайки происходящие процессы в основном носят необратимый характер, особенно когда появляются трещины под паяным швом (рис. 7.3) или отмечается разрушение конструкции на отдельные фрагменты (рис. 7.4, *а*, *б* и 7.5, *а*). В случае визуального обнаружения трещин или выявления их при помощи техники дорогостоящую продукцию отбраковывают. Когда трещины расположены внутри объема металлов и их невозможно обнаружить, продукция признается годной к использованию. Это может привести к непоправимым последствиям, связанным с потерей значительных финансовых затрат, а иногда и с более серьезным исходом.

Из литературы известно, что такие трещины заполнены расплавом припоя (закристаллизовавшимся) и представляют собой неоднородное тело в локальной зоне с пониженной прочностью в сравнении с металлом (см. рис. 7.4, *а*).

Существование неоднородного тела под паяным швом свидетельствует о том, что появление его связано с воздействием расплава припоя в процессе пайки. Отсюда следует, что припой является ПАВ по отношению к паяемым материалам и сочетание материал – припой несовместимо. Пайку осуществляли на биметаллических конструкциях, состоящих в одном случае из дисперсионно-твердеющего сплава (наружная оболочка) и медного (внутренняя оболочка), в другом – из стали мартенситного класса (наружная оболочка), того же медного сплава (внутренняя оболочка). Использовали медно-серебряные припои, гальванически нанесенные на паяемые поверхности перед пайкой. Исследования показали, что совместимость медно-серебряного припоя с конструкционными сталями аустенитного класса удовлетворительная; близка к этой же оценке совместимость со сталями мартенситного и переходного классов, а также с гомогенными сплавами. В то же время совместимость с этим же припоем дисперсионно-твердеющих сплавов близка к нулю. Прочность их снижается примерно в 10 раз в сравнении с прочностью вне контакта с расплавом припоя, причем такое



а) *б*)

Рис. 7.3. Сетка трещин в дисперсионно-твердеющем сплаве (основа никель-хромовая) под паяным швом, увеличение 100× (*а*); трещина по границам зерен, заполненная расплавом серебряно-медного припоя, увеличение 400× (*б*)

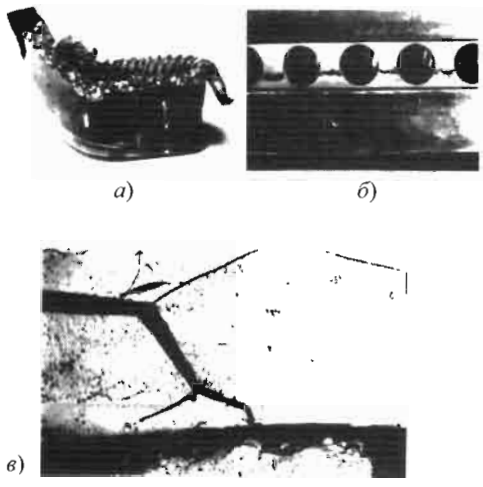


Рис. 7.4. Разрушение конструкции в процессе пайки серебряно-медным припоем:
а – излом высоколегированной стали мартенситного класса в зоне разрушения; *б* – трещина в этой же стали; *в* – микроструктура стали в зоне разрушения

резкое снижение прочности отмечается лишь в интервале многофазного состояния сплавов. При однофазном состоянии совместимость сплавов такая же, как и у сталей и гомогенных сплавов, т.е. удовлетворительная. Относительное удлинение всех материалов ≤2 %.

Факт низкой совместимости сплавов с многофазной структурой, в отличие от однофазной связан с появлением в сплавах при пайке растягивающих напряжений величиной, превышающей в локальных объемах предел их прочности. Здесь же отмечалось, что при сжимающих напряжениях совместимость всех сплавов удовлетворительная. Кроме того, известно также, что наряду с растягивающими напряжениями дополнительное влияние на снижение совместимости указанных материалов оказывают многие факторы:

– величина зерна >0,1 мм;

– длительность контакта с расплавом припоя >1 мин;

– содержание водорода в металлах $>3 \cdot 10^{-4}$ мас. %;

– наличие в материалах легкоплавких элементов, таких как свинец, сера, олово и др.;

– риски на поверхности глубиной >0,05 мм и т.д.

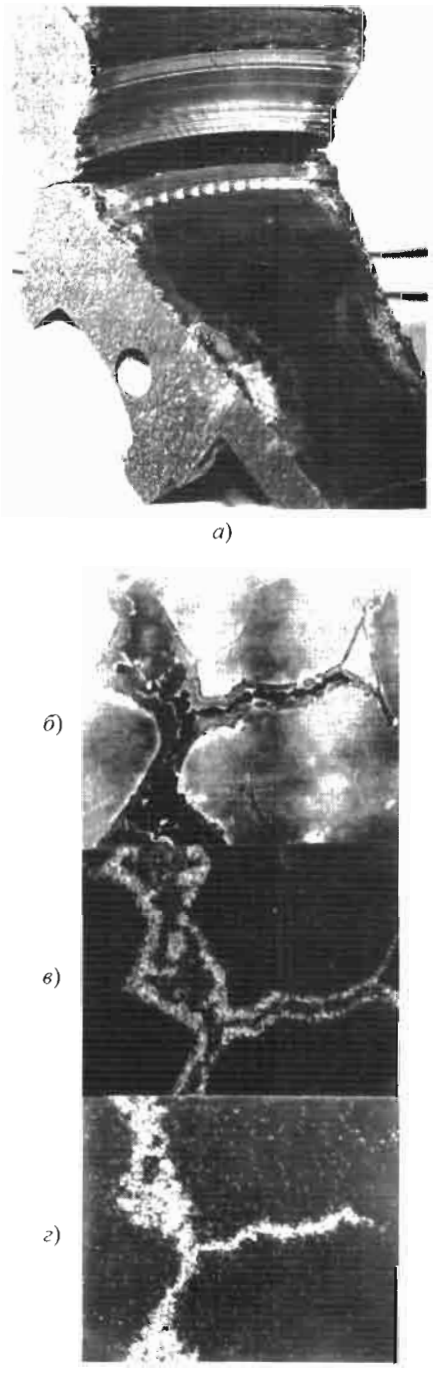


Рис. 7.5. Разрушение конструкции, паяной серебряно-медным припоем, увеличение 400× (*а*), трещина, заполненная расплавом припоя (*б*), распределение в ней меди (*в*), распределение в ней серебра (*г*)

В то же время при наличии толстослойного барьерного покрытия, обладающего сродством к припою, или при размещении этого же припоя на сплавах в однофазном (гомогенном) их состоянии совместимость сплавов удовлетворительная. Во всех приведенных примерах трещины образуются и растут, имея клинообразную форму (рис. 7.6). Характер трещин межкристаллитный (рис. 7.3, *в* и 7.4, *а*). В объеме трещин наблюдается избирательность процессов взаимодействия. Медь, например, в дисперсионно-твердеющем сплаве ЭП 202 и ему подобных по химическому составу адсорбируется сплошным слоем на поверхности основного металла и прерывистым внутри нее (см. рис. 7.5, *в*); серебро отмечается внутри трещины (см. рис. 7.5, *г*). Совместно с элементами припоя в трещине обнаружены никель и частично хром, диффундирующие сюда из сплава ЭП 202. Характерно то, что зоны взаимодействия отмечаются только в местах начального роста трещины, на конечной стадии разрушения они отсутствуют.

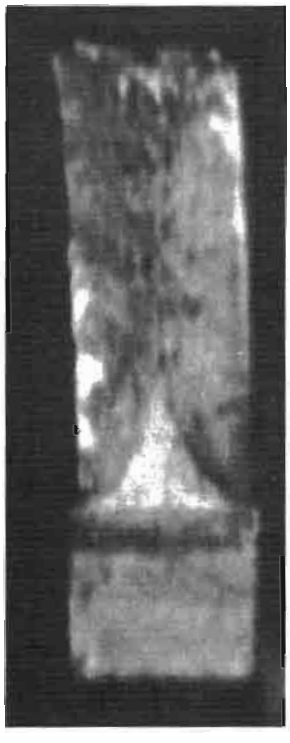


Рис. 7.6. Клинообразный рост трещины в изломе образца высоколегированной стали мартенситного класса при $T = 920$ °С в контакте с серебряно-медным припоем

Хотя проблема хрупкого разрушения в понимании физико-химических процессов на границе раздела твердого – жидкого тел весьма сложная, однако нами было найдено решение, позволяющее паять указанные выше материалы медно-серебряными припоями без образования в них трещин.

Это решение базируется на данных, полученных при комплексном проведении исследовательских и экспериментальных работ, результаты которых представляют научный и практический интерес. Комплекс работ включал:

– изучение физико-химических основ природы охрупчивания, зарождения и развития трещин в высокопрочных материалах различного класса при пайке;

– разработку теоретических основ предотвращения охрупчивания и образования трещин при пайке, т.е., другими словами, обеспечение совместимости паяемых материалов с припоями.

Ранее было сказано, что для достижения совместимости металла с припоем при пайке конструкций необходимо исключить появление растягивающих напряжений. Однако сделать это при пайке упомянутых конструкций не представляется возможным. Связано это с тем, что все дисперсионно-твердеющие сплавы и стали мартенситного и переходного классов имеют многофазную структуру, причем такая структура существует до температуры в сплавах 1000...1050 °С, в сталях 700...850 °С. Более того, в сплавах в интервале температур 750...900 °С влияние структуры на металл усиливается, о чем свидетельствует резкое снижение пластичности.

Такое влияние объясняется дополнительным выделением фаз в мелкодисперсном виде из твердого раствора. Поэтому изучение природы разрушения материалов при пайке потребовало учета не только структуры материалов, но и следующих факторов: химического состава, состояния поверхности, дефектности структуры, величины зерна, скорости деформации при нагреве, вида нагружения и других факторов. Необходимость этого была обусловлена тем, что в процессе изготовления конструкций под пайку паяемые материалы подвергаются различным видам обработки, включая штамповку, ковку, термообработку, сварку, гальванопокрытие, пайку и т.д. Отсюда следует, что каждая из указанных операций может быть причиной изменения структуры и фазового состава материалов, величины зерна, располо-

жения и морфологии частиц фаз и т.д. и, как следствие, при неблагоприятных условиях, например в интервале температур многофазного состояния, способна усилить «хрупкое» разрушение материалов при пайке, тем более что о влиянии факторов на охрупчивание материалов говорилось в литературе, хотя оттенок их влияния различен. Например, на одних материалах эффект усиливается, на других отмечается его замедление, на некоторых эффект хотя и проявляется, однако он незначителен.

Наряду с особенностями влияния различных факторов на эффект охрупчивания в работе предложено учитывать и изучать также влияние на него твердых покрытий. Такое предложение основывается на обнаруженном понижении прочности паяемых дисперсионно-твердеющих сплавов, контактирующих как с твердой медью, так и с твердым серебром. Проявление эффекта связано с образованием легкоплавких соединений по границам зерен.

Одновременно с рекомендациями, указанными выше, с этой же целью был предложен ряд новых методик, имитирующих процесс пайки, а в некоторых случаях, позволяющих создать условия испытаний образцов, аналогичные условиям пайки. При таком подходе обеспечиваются:

– достоверные результаты склонности паяемых материалов к хрупкому разрушению;

– возможность предвидения хрупкого разрушения и управления процессом пайки, исключающим появление хрупкости и трещин под воздействием расплава припоя в любых паяемых материалах независимо от композиции припоя.

7.5.1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Широкий спектр охватываемых вопросов при изучении этой проблемы был связан с недостаточностью литературных данных об эффекте «хрупкого» разрушения материалов в контакте с жидкометаллическими средами, а также порой прямо противоположным его объяснением в некоторых известных работах. Как правило, эти работы направлены на решение частных задач и относятся, в основном к изучению монокристаллов, чистых металлов и низколегированных сталей и сплавов в контакте с жидкостями или легкоплавкими средами. Существующие методики разработаны главным образом для низкотемпературных испытаний. Вместе с тем, указанная проблема была и остается до сих пор предметом внимания многих ученых и производственников всего мира. Для уменьшения пробела в вопросе совместимости материалов при пайке ниже приведена совокупность рекомендаций, состоящих из различных методов подхода к ее изучению.

7.5.2. МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ СОВМЕСТИМОСТИ МАТЕРИАЛОВ С ПРИПОЯМИ

Для механических испытаний рекомендуются образец (рис. 7.7) и разрывная машина, разработанная Научно-исследовательским институтом испытательных машин, приборов и средств измерения (НИКИМП, г. Москва). Испытания образцов проводят без припоя и в контакте с ним; интервал температур испытаний в пределах комнатная температура – температура пайки конструкции. Для материалов с многофазной структурой рекомендовано:

– конечную температуру испытаний выбирать исходя из температуры окончания растворения фаз и образования однородного твердого раствора;

– нагрев до заданной температуры испытаний проводить со скоростью, аналогичной скорости нагрева паяемой конструкции, предусмотренной в технологии на пайку;

– припой на образец наносить любым известным способом.

В данном случае апробирование двух видов припоев – ленточного и гальванически нанесенного на рабочую поверхность – показало использование последнего более целесообразным с позиции чистоты испытаний, экономичности и уменьшения времени эксперимента. Объясняется это тем, что установка ленточного припоя на образец требует специальных приемов, включая либо намотку поверх припоя проволоки, нерастворимой в расплаве, либо прихватку сваркой. Однако в природе не существует металлов, которые нерастворимы друг в друге. А как известно, даже ничтожно малые добавки к расплаву могут изменить физико-механические свойства твердого тела.

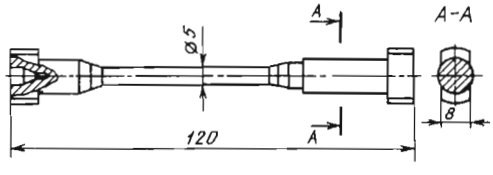


Рис. 7.7. Образец для определения механических свойств металлов вне припоя и в контакте с ним

От прихватки сваркой остаются концентраторы напряжений в местах сварки. Поэтому использование указанного приема приводит к искаженным результатам. В то же время гальванический припой, нанесенный послойно, позволяет получить жидкую фазу под верхним слоем покрытия, являющимся составной частью припоя и представляющим собой «наружную оболочку».

В развитии этого направления предложен еще один способ испытаний, когда используется образец, состоящий из двух трубок (рис. 7.8); припой на контактируемые поверхности наносят также гальванически. Перед нанесением покрытий-припоев с поверхности образцов удаляют оксидную пленку, жировые пятна и другие загрязнения в соответствии с существующими рекомендациями на подготовку материалов под пайку.

В рабочей камере испытание образцов рекомендовано осуществлять либо в вакууме, либо в инертной среде для предотвращения окисления образцов и припоя при испытаниях. Растягивающее напряжение на образец, являющееся критическим, создают при достижении заданной температуры испытаний и доводят затем образец до разрушения. Одновременно с приложением напряжения до разрушения фиксируют на диаграмме величину пластической деформации.

Наряду с кратковременными механическими испытаниями таким же образом проводят испытания на длительную прочность. Необходимость подобных испытаний связана с тем, что в процессе пайки конструкций обязательно устанавливают время выдержки при температуре пайки. Поэтому по аналогии следует иметь результаты испытаний во времени, адекватном времени выдержки при пайке. Растягивающее напряжение при этом устанавливают ниже критического.

По результатам испытаний вне контакта с припоем и при воздействии его оценивают потерю прочности и пластичности испытываемых материалов под воздействием расплава припоя в зависимости от температуры испытаний и времени выдержки при ней.

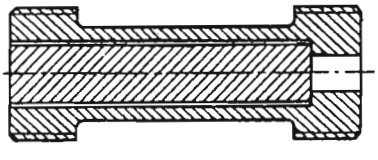


Рис. 7.8. Образец для определения механических свойств металлов в контакте с расплавом припоя

Таким образом, по результатам испытаний судят о совместимости материалов с припоем.

Ранее было сказано, что материалы паяемых конструкций могут подвергаться различным видам обработки перед пайкой, оказывающим влияние на их физико-механические свойства при пайке. Причем эти характеристики могут иметь существенные отличия, например из-за разницы размера зерна, фазового состава, концентрации фаз и морфологии их частиц и т.д., и тем большие, чем шире поле допуска, устанавливаемого при обработке заготовок. Так как практически каждый технологический, металлургический и другие факторы могут влиять на эффект охрупчивания, нами было предложено исследовать каждый из этих факторов. Испытания проводят также на образцах (см. рис. 7.7), однако на этапе, предшествующем испытаниям, материал образцов готовят, учитывая влияние того или иного фактора. Например, если необходимо оценить степень влияния размера зерна на кратковременную и длительную прочность материала, то в этом случае заготовки образцов перед испытаниями нагревают до температуры, при которой можно получить заданный размер зерна, охлаждают и затем, зная величину зерна, проводят испытания.

Как следует из сказанного, хрупкое разрушение материалов происходит при наличии растягивающих напряжений и воздействии жидкого расплава припоя. Источниками такого уровня напряжений являются внешние и внутренние факторы.

Внешний фактор – разница коэффициентов линейного расширения (КЛР) паяемых материалов (КЛР материала внутренней детали – бронзы больше КЛР материала наружной детали – хромоникелевого сплава). К тому же дополнительное влияние оказывает градиент температуры из-за имеющейся разницы в толщине стенки наружной детали.

Внутренний фактор – дисперсионное твердение в дисперсионно-твердеющих сплавах или превращение мартенсита в аустенит в сталях мартенситного и переходного классов при их нагреве. В процессе пайки внутренние напряжения, принявшие тот же знак, что и внешние, суммарно возрастают и величина их достигает предела прочности материала наружной детали – оболочки. Кроме того, значительное дополнительное влияние на возникновение внутренних напряжений оказывает искаженная кристаллическая решетка в поверхностном слое.

Ниже будут представлены методика определения величины напряжений в указанной паяемой паре и математический аппарат, позволяющий определить толщины паяемых деталей таким образом, чтобы величина возникающих напряжений в паяемой конструкции не превышала критическую и, соответственно, не возникали опасения за разрушение конструкции при пайке.

7.5.3. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В ПАЯЕМОЙ ПАРЕ

Данная методика относится к паяемой паре, состоящей из двух колец, выполненных из разнородных материалов; наружное кольцо – дисперсионно-твердеющий сплав на основе никель-хрома, внутреннее – бронза, основа медь.

На рис. 7.9 приведена схема паяемой конструкции. Радиальный зазор Δ между кольцами равен нулю. Пайку осуществляют медно-серебряным припоем при температуре пайки $T_п$ = 920 °С, выдержка при $T_п$ – 5 мин. Размеры колец обусловлены конструкторскими и технологическими соображениями, так чтобы $\delta_2 / R \leq 0{,}1$.

Для обеспечения работоспособности кольца *1* в процессе пайки, т.е. предотвращения разрушения конструкции, должно выполняться условие

$$\sigma_1 \leq [\sigma_1].$$

Здесь σ_1 – тангенциальное напряжение в кольце *1*; $[\sigma_1]$ – допустимое напряжение в кольце *1* при температуре $T_п$, определяемое как

$$[\sigma_1] = \frac{\sigma_{1дл} K}{n}, \qquad (7.1)$$

где $\sigma_{1дл}$ – предел длительной прочности материала кольца *1* в контакте с припоем в течение времени, соответствующего времени выдержки при $T_п$; K – коэффициент, характеризующий изменение прочности материала кольца *1* при воздействии припоя в зависимости от площади поперечного сечения (масштабный фактор); n – коэффициент запаса прочности. Радиальные напряжения в кольце *1* при $\delta_1 / R < 0{,}1$ можно не учитывать.

Величины $\sigma_{1дл}$ и K определяли экспериментальным путем. С этой целью на цилиндрических образцах (см. рис. 7.7) из материала кольца *1* строили зависимость $\sigma_в = f(T)$ (рис. 7.10) в случае отсутствия припоя и в контакте с ним, где $\sigma_в$ – кратковременная прочность материала кольца *1*; T – температура испытания.

Испытания проводили в интервале температур начала плавления припоя (780 °С) – температура $T_п$. Из рис. 7.10 видно, что в интервале температур 850...920 °С прочность материала кольца *1* с припоем резко снижается в сравнении с прочностью вне контакта с припоем. Учитывая, что минимальная длительная прочность под воздействием припоя 50 МПа в диапазоне температур 850... 920 °С, а пайку кольца проводят при температуре $T_п$ = 920 °С с выдержкой 5 мин, критическую температуру T_1 принимали равной $T_п$. Затем при $T_п$ для образцов, облуженных припоем, строили зависимость длительной прочности от времени (рис. 7.11). Как видно, минимальная длительная прочность при времени выдержки 5 мин (время пайки колец при $T_п$) 45 МПа. Проведенные исследования показали, что пределы

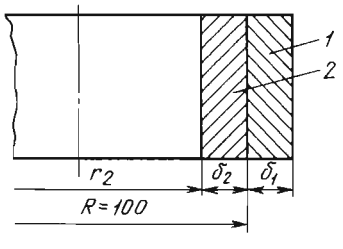


Рис. 7.9. Схема паяной конструкции

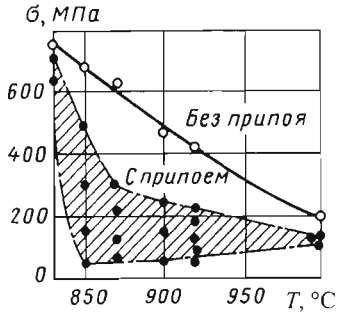


Рис. 7.10. Кратковременная прочность дисперсионно-твердеющего сплава на никель-хромовой основе в интервале температур 780...920 °С

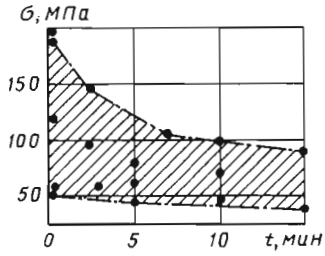


Рис. 7.11. Длительная прочность дисперсионно-твердеющего сплава на никель-хромовой основе в контакте с серебряно-медным припоем при температуре 920 °С

кратковременной прочности образцов с площадью поперечного сечения S = 3,2; 19; 27 мм^2 практически одинаковы, поэтому коэффициент K можно принять равным единице. Подставляя значения $\sigma_{1дл}$ = 45 МПа; K = 1 и принимая n = 2, из формулы (7.1) получаем $[\sigma_1]$ = 22,5 МПа.

Так как растягивающие напряжения в кольце *1* создаются за счет большого КЛР материала кольца *2* (см. рис. 7.9), необходимо рассчитать толщину последнего таким образом, чтобы уровень напряжений в кольце *1* не превышал $[\sigma_1]$. Для этого можно использовать равенство радиальных перемещений поверхности контакта колец *1* и *2*:

$$U_1 = U_2. \qquad (7.2)$$

Для тонкостенного кольца *1*

$$U_1 = \frac{p_к R^2}{E_1 \delta_1} + \alpha_1 T_п R. \qquad (7.3)$$

Для толстостенного кольца *2*

$$U_2 = -\frac{p_к R^2}{E_2 (R^2 - r_2^2)} \times \left[(1-\mu_2) R + (1+\mu_2) \frac{r_2^2}{R} \right] + \alpha_2 T_п R, \qquad (7.4)$$

где $P_к$ – контактное давление; E_1, E_2 – модули упругости материалов колец *1* и *2* при температуре $T_п$; μ_2 – коэффициент Пуассона материала кольца *2*; α_1, α_2 – КЛР материалов колец *1* и *2*; $T_п$ – температура пайки; R – радиус поверхности контакта; r_2 – внутренний радиус кольца *2*; δ_1 – толщина кольца *1*.

Чтобы напряжения в кольце *1* не превышали величины $[\sigma_1]$, контактное давление должно быть

$$p_к \le \frac{[\sigma_1]\delta_1}{R}. \qquad (7.5)$$

Подставив (7.3) – (7.5) в равенство (7.2), получим соотношение для определения допустимой величины внутреннего радиуса r_2 кольца *2*:

$$r_2 \ge R\sqrt{\frac{A-1}{A+1}}, \qquad (7.6)$$

где

$$A = \frac{RE_2}{[\sigma_1]\delta_1}\left[(\alpha_2 - \alpha_1) T_п - \frac{[\sigma_1]}{E_1} \right] + \mu_2.$$

Следовательно, при толщине $2\delta_2 \le R - r_2$ напряжения в кольце *1* не будут превышать величины $[\sigma_1]$.

Формула (7.6) выведена в предположении упругого состояния кольца *2*. Но может оказаться, что кольцо *2* целиком или частично работает в области пластических деформаций. Поэтому необходимо проверить уровень максимальных напряжений в кольце *2* при $r = r_2$:

$$\sigma_{2max} = \frac{2p_к}{1-K_2^2} = \frac{2[\sigma_1]\delta_1}{R(1-K_2^2)}, \qquad (7.7)$$

где

$$K_2 = \frac{r_2}{R}.$$

Если $\sigma_{2max} \le \sigma_{s2}$ (σ_{s2} – предел текучести материала кольца *2* при температуре $T_п$), то определение r_2 по формуле (7.6) верно.

В случае $\sigma_{2max} > \sigma_{s2}$ в проведенный ранее расчет следует внести коррективы, учитывая пластическое состояние кольца *2*. Для этого сначала определяют интенсивность напряжений в кольце *2* при $r = R$:

$$\sigma_{i2} = p_к\sqrt{1-B+B^2} = \frac{[\sigma_1]\delta_1}{R}\sqrt{1-B+B^2}, \qquad (7.8)$$

где

$$B = \frac{1+K_2^2}{1-K_2^2}.$$

Если $\sigma_{i2} \geq \sigma_{s2}$, то кольцо *2* целиком находится в пластическом состоянии, т.е. напряжения в нем по всей толщине

$$\sigma_2 \approx -\sigma_{s2}.$$

Тогда из условия равновесия тангенциальных сил

$$\sigma_1\delta_1 + \sigma_2\delta_2 = 0 \qquad (7.9)$$

следует

$$[\sigma_1]\,\delta_1 - \sigma_{s2}(R - r_2) = 0.$$

Отсюда

$$r_2 = R - \frac{[\sigma_1]\delta_1}{\sigma_{s2}}. \qquad (7.10)$$

При $\sigma_{i2} < \sigma_{s2}$ часть кольца находится в упругом состоянии (при $R > r > r_s$), а часть – в пластическом ($r_s > r > r_2$). Радиус $r = r_s$ является границей между упругой и пластической зонами. В этом случае упругую часть кольца *2* можно рассматривать как толстостенное кольцо, нагруженное наружным $p_к$ и внутренним давлением

$$p_s = \frac{\sigma_{s2}(K_s - 1)}{K_s},$$

где

$$K_s = \frac{r_2}{r_s}.$$

Так как при $r = r_s$ интенсивность напряжений $\sigma_{i2} = \sigma_{s2}$, то

$$\sigma_{s2} = \frac{p_к}{1 - K_2^2}\sqrt{1 + 3K_s^4} = \frac{[\sigma_1]\delta_1}{R(1 - K_2^2)}\sqrt{1 + 3K_s^4}. \qquad (7.11)$$

Радиальное перемещение кольца U_2 при $r = R$ будет другим:

$$U_2 = \frac{R}{E_2(1 - K_2^2)}\left\{\frac{2K_2^2\sigma_{s2}(K_s - 1)}{K_s} - \frac{[\sigma_1]\delta_1}{R}\left[1 - \mu_2 + K_2^2(1 + \mu_2)\right]\right\} + \alpha_2 T_п R, \qquad (7.12)$$

и условие (7.2) примет вид

$$\frac{[\sigma_1]}{E_1} + \alpha_1 T_п = \frac{1}{E_2(1 - K_2^2)}\left\{\frac{2K_2^2\sigma_{s2}(K_s - 1)}{K_s} - \frac{[\sigma_1]\delta_1}{R}\left[1 - \mu_2 + K_2^2(1 + \mu_2)\right]\right\} + \alpha_2 T_п. \qquad (7.13)$$

Система уравнений (7.11) и (7.13) позволяет определить искомые неизвестные K_s, K_2, а следовательно, и r_s, r_2.

Рассмотрим два примера. Пусть внутреннее кольцо *2* выполнено из нержавеющей стали, которая при температуре $T_п$ = 920 °С имеет следующие необходимые для расчета характеристики:

$$\alpha_2 = 21{,}0 \cdot 10^{-6}\ \text{град}^{-1};\quad E_2 = 14 \cdot 10^5\ \text{МПа};$$
$$\mu_2 = 0{,}3;\quad \sigma_{s2} = 75\ \text{МПа}.$$

Величины E_2 и σ_{s2} взяты из графика, приведенного на рис. 7.12, *б*. Так как для материала кольца *1* при $T_п$ = 920 °С α_1 = $= 20{,}5 \cdot 10^{-6}$ град$^{-1}$; $E_1 = 0{,}96 \cdot 10^5$ МПа (см. рис. 7.12, *а*), а $[\sigma_1] = 22{,}5$ МПа, то при $\delta_1 = 5$ мм и R = 95 мм (см. рис. 7.9) из формулы (7.6) следует, что

$$A = 26{,}8;\quad r_2 \geq R\sqrt{\frac{A-1}{A+1}} = 95\sqrt{\frac{25{,}8}{27{,}8}} = 91{,}5\ \text{мм}.$$

Следовательно, при толщине кольца *2*

$$\delta_2 \leq R - r_2 = 95 - 91{,}5 = 3{,}5\ \text{мм}.$$

напряжение в кольце *1* не будет превышать допустимую величину $[\sigma_1] = 22{,}5$ МПа.

Наибольшее напряжение в кольце *2* определяется по формуле (7.7):

$$\sigma_{2max} \leq 33{,}2\ \text{МПа}.$$

Так как

$$\sigma_{2max} < \sigma_{s2} = 75\ \text{МПа},$$

то предположение об упругом поведении кольца *2*, сделанное в начале расчета, справедливо и дальнейшие исследования не нужны.

Рассмотрим второй случай, когда кольцо *2* выполнено из медного сплава, для материала которого при $T_п$ = 920 °С $\alpha_2 = 22{,}0 \cdot 10^{-6}$ град$^{-1}$; $E_2 = 7 \cdot 10^4$ МПа; $\sigma_{s2} = 7$ МПа; $\mu_2 = 0{,}3$ (рис. 7.13). В этом случае при тех же параметрах и геометрии кольца *1* из формулы (7.6) получим $A = 68{,}2$; $r_2 \geq 93{,}6$ мм и $\delta_2 \leq 1{,}4$ мм.

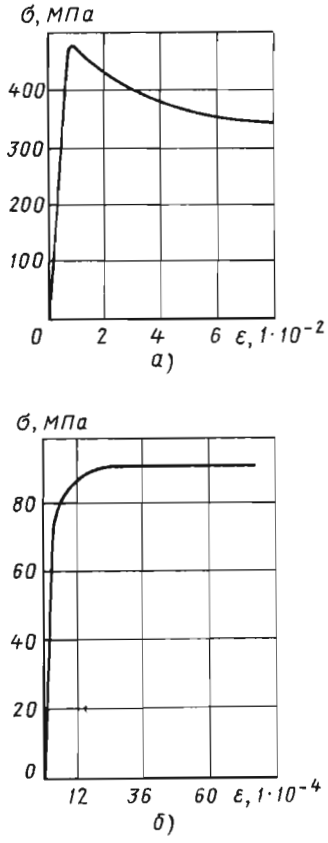


Рис. 7.12. Диаграмма напряжение – деформация дисперсионно-твердеющего сплава на основе никель-хрома (*а*), коррозионно-стойкой стали (*б*) при T = 920 °С

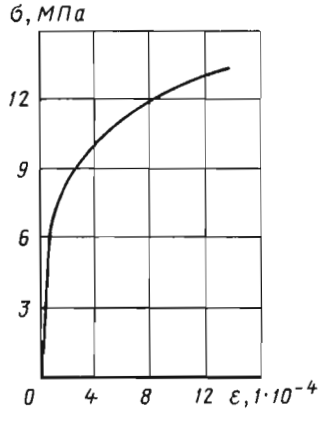


Рис. 7.13. Диаграмма напряжение – деформация сплава на основе меди при T = 920 °С

Определяя по формуле (7.7)

$$\sigma_{2max} = 82{,}3 \text{ МПа},$$

убеждаемся, что $\sigma_{2max} > \sigma_{s2} = 7$ МПа. Из формулы (7.8) следует, что при $r = R$

$$\sigma_{i2} = 7{,}73 > \sigma_{s2}.$$

Следовательно, кольцо *2* целиком находится в пластическом состоянии. Этот вывод позволяет решить поставленную задачу: найти допустимую толщину кольца *2* с помощью формулы (7.10):

$$r_2 = 95 - \frac{2{,}25 \cdot 5}{0{,}7} = 78{,}9 \text{ мм};$$

$$\delta_2 = R - r_2 = 16{,}1 \text{ мм}.$$

При этой толщине кольца *2* напряжения в кольце *1* не превысят допустимые: $[\sigma_1] = 22{,}5$ МПа.

Таким образом, разработанная методика, включающая математический аппарат анализа напряжения деформированного состояния двухслойных цилиндрических колец, и приведенные примеры расчета позволяют на стадии проектирования паяной конструкции заложить размеры деталей с учетом работоспособности в процессе пайки, т.е. обеспечить совместимость паяемых материалов с припоем.

7.5.4. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СНИЖЕНИЯ ПРОЧНОСТИ МАТЕРИАЛОВ С ТРЕЩИНОЙ

Известно, что дисперсионно-твердеющие сплавы на основе никеля под воздействием медно-серебряного припоя резко ухудшают свои механические свойства. При этом предел прочности их может уменьшаться в несколько раз; разрушение имеет хрупкий характер ($\delta \le 1 \ldots 2$ %). Аналогичное явление наблюдается и на сталях, хотя у них понижение предела прочности ≤25 %.

Ухудшение механических свойств материалов приводит к существенному снижению работоспособности конструкций при пайке припоями рассматриваемого типа и, как следствие, к возможному появлению как тупиковых, так и сквозных трещин.

Для снижения воздействия припоя на механические свойства материалов и предотвращения разрушения конструкций при пайке применяют различные конструктивно-технологические приемы. Вместе с тем, даже наиболее эффективные из них, например барьерные покрытия или снижение уровня растягивающих

напряжений в паяемой конструкции, не всегда гарантируют отсутствие мелких поверхностных трещин, заполненных расплавом закристаллизовавшегося припоя. Наличие таких трещин в материале спаянной конструкции влияет на ее прочностные характеристики.

С целью оценки влияния таких трещин на прочность материалов предложена методика. Сущность ее состоит в том, что образец для испытаний выполняют плоским с V-образным надрезом, наличие которого позволяет обеспечить зарождение и развитие трещины, исходящей из его вершины. Размеры образца соответствуют ГОСТ 20487–75.

Припой на образец рекомендовано наносить гальванически в последовательности медь – серебро – медь (толщиной 10; 5 и 25 мкм соответственно).

При испытаниях образца в процессе нагрева наружный слой меди, не растворившийся полностью в медно-серебряной эвтектике, создает капилляр, обеспечивая равномерное растекание припоя по поверхности образца.

Послойное нанесение покрытий осуществляют и их толщину определяют в соответствии с условиями подготовки деталей под пайку конструкций.

Для зарождения трещины в металле образцов их нагружают растягивающей силой, не превышающей разрушающую нагрузку, и выдерживают определенное время при температуре пайки, равной 920 °С.

Величину растягивающей нагрузки выбирают таким образом, чтобы можно было определить минимальную нагрузку, при которой происходят зарождение и развитие трещины в зависимости от времени выдержки в контакте с жидким припоем. После снятия нагрузки образец охлаждают до комнатной температуры, затем разрушают. По площади в изломе, облуженной расплавом припоя, узнают размер трещины (ее протяженность), а по величине разрушающей нагрузки – влияние длины трещины на прочность металла.

7.5.5. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОДНОВРЕМЕННОГО ВЛИЯНИЯ ТРЕХ ФАКТОРОВ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ РАСПЛАВА ПРИПОЯ

Из публикаций известно, что в процессе подготовки деталей под пайку конструкций одни параметры, такие как величина зерна, подвергают выборочному контролю, другие анализируют по режиму технологического процесса, например толщину никелевого покрытия, шероховатость поверхностей и т.д.

Однако, как показывают результаты металлографического исследования на шлифах, вырезанных из паяных конструкций, эти параметры иногда имеют отступления от требований технической документации, причем при совокупности некоторых отступлений от оптимальных, например таких, как величина зерна, химический состав припоя и толщина никелевого покрытия, эффект чувствительности металлов к хрупкому разрушению усиливается. В связи с этим была предложена методика расчета совместного влияния величины зерна, химического состава припоя и толщины никелевого покрытия на охрупчивание материалов при пайке.

Данные прочности при совместном влиянии трех указанных факторов на сплав ЭП 202 при $T = 920$ °С (припой медно-серебряный) представлены в табл. 7.2.

7.2. Прочность сплава ЭП 202 в контакте с медно-серебряным припоем в зависимости от трех факторов

Номер эксперимента	Номер серии	Полученные значения предела прочности σ_i, МПа	Среднее значение σ_i^*, МПа	Дисперсия
1	1	95	35,4	1250,8
2		20		
3		12		
4		40		
5		10		
6	2	250	272	370
7		290		
8		280		
9		280		
10		260		
11	3	250	278	370
12		300		
13		280		
14		290		
15		270		
16	4	310	318	70,0
17		320		
18		310		
19		320		
20		330		

Из полученных результатов (см. табл. 7.2) следует, что в первой серии экспериментов под воздействием расплава резко снижается прочность сплава. В исходном состоянии величина ее составляет $\sigma \approx 450$ МПа при $T_{\text{п}} = 920$ °С. В остальных сериях отмечается ослабление эффекта, на что указывают достаточно высокие значения напряжения разрушения, а в четвертой помимо этого наблюдается максимальная их стабильность.

Для получения аппроксимирующей функции, позволяющей определить напряжение до разрушения сплава в контакте с припоем, проводили статистическую обработку экспериментов по методике, согласно которой математическую модель для данных серий экспериментов выражали как

$$\sigma = f\left(\vec{\alpha}\vec{X}\right), \qquad (7.14)$$

где

$$\vec{X} = \left\{\left(1, X_1, ..., X_m\right)\right\}, \qquad (7.15)$$

σ – напряжение до разрушения – функция трех независимых факторов; $\vec{\alpha}$ – вектор неизвестных коэффициентов, описывающих поверхность отклика; $\vec{X}$ – вектор значений контролируемых факторов, характеризующий вид аппроксимирующей функции; 1, ..., m – номер серии эксперимента; X_m – функция контролируемых факторов.

Вектор $\vec{\alpha}$ представляется как $\vec{\alpha}$ (α_0, ..., α_m). С учетом векторов $\vec{X}$ и $\vec{\alpha}$ формулу (7.14) можно записать в виде

$$\sigma = \alpha_0 + \alpha_1 X_1 + ... + \alpha_m X_m . \qquad (7.16)$$

При планировании эксперимента исходили из условия, что

$$X_i = \sum \alpha_i X_i + b_i .$$

Тогда математическая модель выражалась в линейную, что позволило сократить число экспериментов (см. табл. 7.2). Кроме того, такой подход упрощал математическую обработку результатов экспериментов.

Среднее значение напряжения до разрушения (см. табл. 7.2) находили как частное от деления сумм результатов экспериментов каждой серии к числу испытаний в ней, а дисперсию как

$$\tilde{\sigma}^2_{d(i)} = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(\sigma_i - \sigma_i^*)^2, \qquad (7.17)$$

где σ_i^* – средняя величина предела прочности образца для каждой серии экспериментов.

Если дисперсия в каждой серии экспериментов находится в пределах

$$\tilde{\sigma}^2_{d(i)} V^2_{\frac{\varepsilon}{2}} \prec \tilde{\sigma}^2_{(1,2,3,4)} \prec \tilde{\sigma}^2_{d(i)} V^2_{1-\frac{\varepsilon}{2}}, \qquad (7.18)$$

где V^2 – функция распределения Фишера, показывающая вероятностный характер получения результатов испытаний; ε – уровень значимости, характеризующий достоверность принятой гипотетической дисперсии, то это упрощает нахождение чисел, описывающих значения аппроксимирующих функций на заданном числе факторов.

Гипотетическую дисперсию, равную 515, определяли как среднее значение дисперсий четырех экспериментов (см. табл. 7.2).

При заданной величине $\varepsilon = 0{,}05$ для пяти результатов любой серии экспериментов по таблице-приложению из работы [4] находим, что

$$V^2_{\frac{\varepsilon}{2}} \approx 0{,}14;$$

$$V^2_{1-\frac{\varepsilon}{2}} \approx 7{,}2.$$

Тогда формулу (7.18) можно записать так:

$$0{,}14\tilde{\sigma}^2_d \prec \tilde{\sigma}^2_{(1,2,3,4)} \prec 7{,}2\tilde{\sigma}^2_d . \qquad (7.18')$$

Из табл. 7.2 следует, что значения полученной дисперсии с вероятностью ошибки 0,05 для каждой серии экспериментов находятся в пределах формулы (7.18') и несущественно отличаются от некоторой принятой гипотетической. С учетом числа экспериментов формулу (7.16) можно записать в виде

$$\tilde{\sigma} = \alpha_0 + \alpha_1 X_1 + \alpha_2 X_2 + \alpha_3 X_3 . \qquad (7.16')$$

Согласно работе [4],

$$\alpha_i = \sum_{j=1}^{N} \frac{Y_i}{\sigma^2_d} X_{i(j)} / C_{ii} , \qquad (7.19)$$

где i – номер серии эксперимента (1, ..., n); j – порядковый номер эксперимента (1, ..., N), в данном случае $n = 4$, $N = 20$; C_{ii} – коэффициент матрицы, характеризующий ортогональность аппроксимирующих функций $X_{i(j)}$.

Ортогональность выполняется в том случае, когда соблюдается условие (7.14):

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^{N} \frac{1}{\sigma^2_{d(j)}} X_{i(j)} = 0; \\ \sum_{j=1}^{N} \frac{1}{\sigma^2_{d(j)}} X_{i(j)} X_{e(j)} = 0. \end{cases} \quad (7.20)$$

Тогда коэффициенты матрицы $||C_{ii}||$

$$C_{ii} = \delta_{ie} \sum_{j=1}^{N} \frac{1}{\sigma^2_{d(j)}} X_{i(j)} X_{e(j)}. \quad (7.21)$$

Здесь $i = 1 + n$; $j = 1 + N$; δ_{ie} – символ Кронекера, равный 0 при $i \neq e$ и 1 при $i = 1$.

Для выполнения условий ортогональности строим таблицу чисел, описывающих значения аппроксимирующих функций X_1, X_2, X_3 при заданном числе факторов и их значений (табл. 7.3).

Числа (+1) и (–1) в табл. 7.3, задающие значения аппроксимирующей функции на данном значении факторов, подобраны таким образом, чтобы удовлетворялось условие ортогональности.

В уравнении (7.21)

$$\frac{1}{\sigma^2_{d(j)}} = \frac{1}{515}$$

7.3. Таблица чисел, описывающих значения аппроксимирующих функций

Номер		X_1 – функция диаметра зерна	X_2 – функция толщины барьерного покрытия	X_3 – функция содержания серебра в припое
эксперимента	серии			
1...5	I	+1	–1	–1
6...10	II	–1	+1	–1
11...15	III	+1	+1	+1
16...20	IV	–1	–1	+1

есть величина постоянная. Поэтому в табл. 7.3 значение ее не указано. Подставляя в формулу (7.20) X_1, X_2, X_3, получаем $C_{ii} = 4$ для $i = 1, 2, 3, 4$; из формулы (7.19) находим α_0, α_1, α_2, α_3, которые равны 211,86; 55,15; 35,15 и 86,15 соответственно. Подставляя их значения в формулу (7.16′), находим

$$\sigma = 211{,}86 - 55{,}15X_1 + 35{,}15X_2 + 86{,}15X_3,$$

где X_1, X_2, $X_3 = X_i = \alpha_i X_i + B$.

Величину X_i определим из условия

$$X_1 = \begin{cases} +1 & X_1 = 0{,}11 \\ -1 & X_1 = 0{,}01 \end{cases} \qquad X_1 = 20X_1 - 1{,}2;$$

$$X_2 = \begin{cases} +1 & X_2 = 0{,}45 \\ -1 & X_2 = 0{,}10 \end{cases} \qquad X_2 = 5{,}7X_2 - 1{,}57;$$

$$X_3 = \begin{cases} +1 & X_3 = 83 \\ -1 & X_3 = 37 \end{cases} \qquad X_3 = 0{,}04X_3 - 2{,}48.$$

Окончательный вид функции с учетом значений X_1, X_2, X_3 будет

$$\sigma = 211{,}86 - 55{,}15(20X_1 - 1{,}2) + 35{,}15(5{,}7X_2 - 1{,}57) + 86{,}15(0{,}04X_3 - 2{,}48).$$

Подставляя в эту формулу значения параметров, находим, что полученные значения $\sigma_в$ мало отличаются от средних, например в первой серии экспериментов из формулы (7.16) $\sigma_в$ = 354 МПа (в эксперименте 354 МПа), во второй $\sigma_в$ = 266 МПа (в эксперименте 272 МПа), в третьей $\sigma_в$ = 278 МПа (в эксперименте 278 МПа), в четвертой $\sigma_в$ = 318 МПа (в эксперименте 318 МПа).

Проведенные испытания на образцах позволили получить аппроксимирующую функцию напряжения до разрушения ($\sigma_в$) сплава под действием различных факторов. Расчетные результаты $\sigma_в$ совпадают с результатами эксперимента. Найденная зависимость позволяет выбрать значения входящих в нее технологических параметров так, чтобы возникающие в паяемой конструкции растягивающие напряжения не разрушали ее.

Хотя и существует обширная информация о влиянии жидких сред на твердые тела, которая с каждым годом приумножается, и к ней проявляется интерес специалистов во мно-

гих высокоразвитых странах, но все же она остается недостаточной для предвидения процесса возможного разрушения металлов, а тем более для управления им. В полной мере не поддается прогнозированию разрушение материалов и при пайке. Как отмечалось выше, природа зарождения и развития трещин в металлах под воздействием припоя еще более сложная, поскольку она включает в себя воздействие комплекса металлургических, технологических и химических параметров, которые даже в отдельности оценить не всегда удается. Понимание природы разрушения при пайке усложняется еще и тем, что контактируемые металлы с припоем имеют сложный химический состав. Хотя уже достигнут значительный прогресс в понимании природы разрушения твердых тел как в теоретическом, так и в инженерном плане, однако в дальнейшем целесообразно расширить диапазон исследовательских работ и круг специалистов для его изучения, особенно в направлении механики хрупкого разрушения, физики твердого тела, капиллярного течения жидких металлов и т.д. Наряду с приведенными теоретическими, методическими и практическими результатами в сфере изучения природы хрупкого разрушения металлов при пайке автор располагает дополнительными сведениями о механизме зарождения трещин в металлах при пайке и обширной информацией, не нашедшей отражения в данном разделе.

7.6. ТЕРМООБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ И ПАЯНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Традиционно детали перед пайкой (в заготовках или после черновой механической обработки) подвергают термообработке (ТО) для обеспечения заданных конструктором механических свойств. Обычно это относится к материалам, малочувствительным к последующему нагреву, или к случаям, когда температура пайки не превышает критических значений, при которых могут быть объемные изменения. Такая ТО нередко включает закалку с охлаждением на воздухе, например стали аустенитного класса. Вместе с тем, в современном машиностроении широко применяются жаропрочные дисперсионно-твердеющие сплавы и высокопрочные высоколегированные стали мартенситного и переходного классов, которые чувствительны к последующему нагреву.

В процессе изготовления деталей из указанных материалов заготовки обычно также подвергают ТО. Однако последняя может быть неоднократной, а иногда частично совмещенной с пайкой. Режим ТО назначают в соответствии с критическими точками и диаграммами изотермического превращения. Он позволяет обеспечить однородную структуру и заданные прочностные характеристики в соответствии с требованиями конструкторской документации.

Для сплавов режим ТО включает закалку с 1050 до 1150 °С, охлаждение на воздухе, в ряде случаев закалку с последующим одно- или двухступенчатым старением при T = 700...750 °С; для сталей – закалку в интервале 750...1050 °С, охлаждение на воздухе, обработку холодом при –70 °С и отпуск в интервале 250...550 °С.

Закалка позволяет обеспечить однородный твердый раствор и некоторое упрочнение материалов; старение – стабилизировать структуру сплавов за счет коагуляции упрочняющих фаз. Получение гетерогенной структуры с определенной степенью дисперсности фаз кроме упрочнения позволяет повысить жаропрочность сплавов и их длительную прочность, необходимые в процессе работы паяных конструкций в составе изделия; обработка холодом, кроме аустенитных сталей, – повысить их прочность за счет уменьшения содержания остаточного аустенита, а отпуск – снять внутренние напряжения, возникшие при бездиффузионном переходе аустенита в мартенсит. Жесткий температурный регламент ТО вынуждает совмещать температуру закалки с температурой пайки. Поэтому пайку конструкций из указанных материалов проводят, как правило, в интервале температур, не превышающих 1000...1100 °С.

После окончания выдержки при температуре пайки конструкцию быстро охлаждают (~50 °С/мин) до полной кристаллизации припоя. Режим охлаждения позволяет сохранить плотный контакт между паяемыми поверхностями и обеспечить однородную структуру сталей, а также исключить появление в паяном шве рыхлот и пор.

Ускоренное охлаждение особенно важно для биметаллических конструкций, где внутренняя деталь изготовлена из сплава на основе меди. Имея КЛР больший, чем материал наружной детали (дисперсионно-твердеющий сплав или сталь), внутренняя деталь стремится «оторваться» от наружной. Поэтому быстрое охлаждение конструкции за счет разницы температур (наружная деталь скорее охлаждается,

чем внутренняя) позволяет сохранить плотный контакт, сформированный между паяемыми деталями, и обеспечить высококачественную пайку.

Вместе с тем, ускоренное охлаждение с температуры пайки существенно снижает прочностные свойства, например, дисперсионно-твердеющих сплавов. Происходит оно вследствие недостаточного выделения упрочняющих фаз из γ-твердого раствора.

Для компенсации указанной потери прочности рекомендуют старение сплавов проводить с большей продолжительностью по *времени*.

Температуры старения сплавов и отпуска сталей назначают с учетом указанных выше рекомендаций.

С целью предотвращения отрыва внутренней детали от наружной в процессе старения и отпуска следует создавать избыточное давление, препятствующее их разъединению и, значит, сохраняющее паяный шов, сформированный в процессе пайки конструкции.

7.6.1. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ СТАЛЕЙ МАРТЕНСИТНОГО КЛАССА В ПАЯНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

К настоящему времени накоплен значительный опыт по пайке биметаллических конструкций, состоящих из высоколегированной стали мартенситного класса (наружная оболочка) и медного сплава (внутренняя оболочка). Использование при этом высокотемпературной пайки отражено во многих работах. Однако книг или справочных пособий, содержащих рекомендации по обеспечению высокой плотности паяных швов и прочностных свойств сталей подобного класса после пайки конструкций, практически не существует.

Однако при пайке таких конструкций возникают некоторые проблемные вопросы: 1) обеспечить в процессе пайки минимальные и равномерные объемные изменения в стали и, соответственно, плотное прилегание к ней внутренней оболочки; 2) после пайки достичь заданных прочностных характеристик.

Из литературных источников известен ряд причин, которые могут вызвать эти вопросы: величина зазора, концентрация припоя, загрязнение поверхности и т.д. Но это всего лишь повод для обсуждения. Имеется другой путь решения проблемных ситуаций, а именно: за счет подбора различных ТО как на стадии, предшествующей пайке, так и после нее.

В данном конкретном случае структура стали (наружной оболочки) состоит из 80 % мартенсита и 20 % аустенита. Наряду с указанным содержанием составляющих в структуре стальной оболочки имеются зоны, в которых концентрация мартенсита и аустенита отличается от приведенной выше. Оболочка изготовлена из трех колец, сваренных между собой кольцевыми швами с помощью аргонодуговой сварки. В сварном шве структура стали состоит из ~80 % аустенита и 20 % мартенсита, а в зоне термического влияния – ~50 % аустенита и столько же мартенсита, а также ~0,5 % карбидной фазы типа $Me_{23}C_6$.

Известно, что при комнатной температуре параметр безуглеродистого Fe_α = 2,86 Å, Fe_γ = 3,56 Å. При T > 723 °С мартенсит переходит в аустенит, и только при температуре >900 °С структура полностью аустенитная. Температура пайки составляет 970 ±10 °С. Отсюда видно, что в процессе нагрева при пайке должны произойти существенные объемные изменения, особенно в зоне термического влияния, поскольку содержание здесь мартенсита максимальное. Такие изменения объема в разных зонах стали являются причиной неравномерной деформации и, соответственно, неравномерного прилегания паяемых поверхностей.

С целью предотвращения подобного эффекта заготовку-деталь, предварительно механически обработанную, нагревают на 1000 °С и затем охлаждают на воздухе. При этой температуре структура стали становится однородной, а карбидная фаза практически полностью растворяется. После закалки стабилизируют остаточный аустенит, нагревают его до T = 600…650 °С, что позволяет исключить объемные изменения и изменения размеров детали при последующих технологических операциях. Температуру пайки затем совмещают с температурой закалки. После пайки паяную конструкцию подвергают ТО при –70 °С. Обработка холодом дает возможность максимально перевести остаточный аустенит в мартенсит, а последующий отпуск при T = 250 °С – уменьшить внутренние напряжения.

Таким образом, комбинированный режим ТО в сочетании с пайкой позволил обеспечить хорошую пайку и высокие механические свойства стали в паяной конструкции.

7.7. ТЕХНОЛОГИЯ ПАЙКИ

К числу основных требований, определяющих качество паяного соединения, относятся:

– подготовка поверхностей к пайке, включая удаление масел, оксидной пленки и загрязнений;

– предотвращение попадания кислорода в рабочее пространство печи в процессе пайки конструкций;

– химическое сродство выбранного для пайки припоя к паяемым материалам;

– покрытие, предотвращающее окисление металла и обеспечивающее смачивание и растекаемость припоя по паяемым поверхностям в процессе пайки конструкций;

– равномерный зазор между паяемыми поверхностями при сборке и в процессе пайки конструкций;

– регламентированная дозировка припоя;

– обеспечение должного взаимного расположения паяемых деталей и их фиксация при сборке и в процессе пайки;

– равномерный нагрев паяемых поверхностей конструкций;

– оптимальный вид и режим контроля, подтверждающий хорошее качество паяного соединения и работоспособность паяной конструкции в условиях эксплуатации и т.д.

Говоря о принципиальных требованиях к достижению высокого качества пайки и управления этим процессом, целесообразно отметить также быстродействующий характер взаимодействия на границе раздела расплав припоя – подложка и, соответственно, предъявить требования к совместимости паяемых материалов и припоев и к системам прогнозирования и обнаружения трещин в паяемых материалах в случае их несовместимости с припоем.

Речь, однако, идет о том, что, каким бы прочным ни был металл, наступает момент, когда в нем появляются трещины под воздействием припоя в случае их несовместимости, конструкция может даже мгновенно распасться на отдельные фрагменты. Отсюда ясно, что при проектировании паяной конструкции требование такого рода нужно тоже учитывать, как и изложенные выше. С учетом названных требований ниже будут приведены некоторые достаточно общие положения пайки металлов, широко используемых в различных областях техники, а также примеры неординарных соединений, представляющих особый интерес с позиций инженерного подхода к технологическому процессу соединения материалов с резко отличающимися физико-химическими и механическими свойствами с помощью пайки.

7.7.1. ПАЙКА УГЛЕРОДИСТЫХ И НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

Стали данного класса являются сталями общего назначения и применяются в разных специальных областях техники (мосто- и судостроение, котельные и т.д.). Особенность этих сталей состоит в огромной масштабности их применения ввиду дешевизны. Свойства сталей зависят от содержания в них углерода и других элементов, например фосфора, марганца, серы и кремния, взаимодействующих как с железом, так и с углеродом.

Пайка этих сталей не вызывает трудностей и может быть осуществлена с использованием различных припоев и способов нагрева. Объясняется это тем, что оксидная пленка на поверхности этих сталей химически неустойчива. Она легко восстанавливается и растворяется во флюсах.

При тщательной подготовке поверхностей пайку чаще всего осуществляют медью или припоями на ее основе, иногда применяют оловянно-свинцовые или свинцовые припои. Самой распространенной средой при пайке является восстановительная атмосфера.

7.7.2. ПАЙКА КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ

Группа этих сталей (высокопрочные, коррозионно-стойкие и жаропрочные) обычно содержит хром, концентрация которого колеблется в пределах 5...20 %, в хромистых сталях – до 30 %. Наличие этого элемента вызывает определенные трудности в достижении высококачественной пайки. Объясняется это тем, что удаление химически устойчивой пленки (толщина которой может достигать 100 мкм), включающей в себя хром, весьма затруднительно. Поэтому пайку ведут, используя, в основном, активные флюсы, а в качестве газовой среды применяют трехфтористый бор с азотом или аргоном, иногда пайку выполняют в вакууме, газы чаще всего подают напроток.

При нагреве в процессе пайки указанных сталей очень часто используют специальную оснастку, аппараты непрерывного контроля состава защитных атмосфер или степени вакуума. С целью сокращения затрат на оснастку и специальные контрольные приборы на практике в ряде случаев перед пайкой на паяемые

поверхности наносят покрытия, например никель, медь, цинк и т.д. Покрытия изолируют паяемую поверхность от печной атмосферы и, следовательно, уменьшают диффузию атмосферного кислорода в поверхностные слои паяемых деталей. Кроме того, покрытия предохраняют металл от выгорания легирующих элементов в поверхностных слоях и образования на поверхности стойких оксидов железа, молибдена и вольфрама. При температуре >1100 °С пайку указанных сталей проводить не рекомендуется. Объясняется это тем, что при нагреве выше этой температуры, например, у высокопрочных сталей возрастает хрупкость; коррозионно-стойких сталей падает пластичность; жаропрочных уменьшается прочность.

Для пайки указанных сталей используют, как правило, припои на основе меди, никеля, серебра и др.

7.7.3. ПАЙКА ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ

В современной технике широко используют жаропрочные дисперсионно-твердеющие (многофазные) сплавы, реже гомогенные (однофазные). Основа их – никель – хром, никель – хром – железо и т.д. Все они обладают высокой прочностью, жаропрочностью и коррозионной стойкостью. Благодаря высоким механическим и физическим свойствам и удовлетворительной технологичности при ковке, штамповке, сварке и т.д. данные сплавы нашли также широкое применение в сварнопаяных конструкциях, работающих в теплонапряженных условиях.

Упрочнение сплавов достигается легированием твердого раствора хромом, молибденом, вольфрамом, титаном и т.д., а также присутствием упрочняющих фаз типа γ'-$Ni_3(Ti, Al)$; (Ni, Co, Cr) (W, Mo); $(NiCo)_7$ $(WMo)_6$; $(Fe, Cr, Ni)_7$ Mo_6 и др.

Пайку указанных материалов рекомендуется проводить при температуре ≤1100…1150 °С. Более высокая температура приводит к резкому росту зерна и снижению их пластичности. Падение пластичности ухудшает технологичность сплавов при операциях, связанных с нагревом в процессе ТО, ковки, штамповки, пайки и т.д. Кроме того, более высокая температура локализует вредные примеси по границам зерен в поверхностных слоях сплавов и вследствие этого вызывает пережог при пайке (рис. 7.14). Появление его может быть связано с образованием легкоплавкой эвтектики при

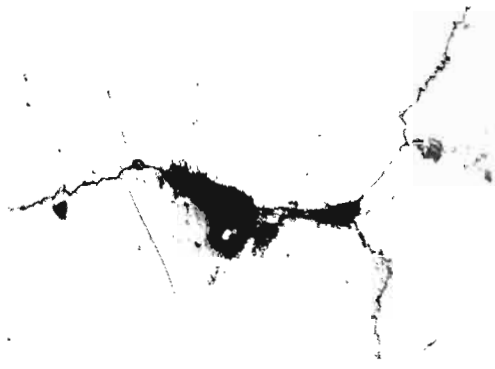


Рис. 7.14. Пережог на границе зерен в дисперсионно-твердеющем сплаве на никель-хромовой основе при пайке серебряно-медным припоем при T = 920 °С

взаимодействии, например, серы с никелем. Сера практически всегда существует в металлах как вредная примесь. Никель является основой или присутствует как легирующий элемент в сплавах.

Обилие легирующих тугоплавких элементов в сплавах способствует образованию на их поверхности стойких оксидных пленок. Как правило, перед пайкой их удаляют в кислотно-щелочных растворах. Затем после тщательной обработки на паяемые поверхности наносят покрытия, чаще всего никелевое. Пайку осуществляют, используя припои на основе никеля или меди. В качестве защитной среды служит вакуум или нейтральные газовые среды без применения флюсов.

7.7.4. ПАЙКА ЧУГУНА

Чугуны – железоуглеродистые сплавы, содержащие >2 % С. В практике чаще всего используют чугун с содержанием 2,5…4 % С. Кроме углерода в чугуне обычно содержатся кремний, марганец, сера и фосфор. Из-за наличия в структуре чугуна графита пайка его вызывает определенные трудности, так как места его залегания можно рассматривать как внутренние надрезы – концентраторы напряжений.

С поверхностных слоев графит удаляют пескоструйной обработкой с последующим выжиганием графита окислительным пламенем газовой горелки. Можно также удалить его при электрохимической обработке в соляной ванне при T = 450…510 °С. Пайку чугуна рекомендуют осуществлять с использованием флюсов № 209 и 284, которые растворяют графит на

поверхности чугуна в процессе пайки, обеспечивая растекаемость припоя по паяемым поверхностям. В качестве припоя служит медь или припои на ее основе. В ряде случаев применяют серебряные припои, позволяющие паять чугун без удаления графитового включения. Другими преимуществами в использовании серебряных припоев являются их низкая температура пайки (T < 900 °С), и, как следствие, предотвращение образования хрупкого цементита в структуре чугуна.

7.7.5. ПАЙКА ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СТАЛЕЙ И ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ

Стали, содержащие 0,65…1,35 % С, называют углеродистыми инструментальными. Обладая высокой твердостью и прочностью при дешевизне и недефицитности, эти стали нашли применение при изготовлении инструмента. Подготовку сталей под пайку ведут с учетом рекомендаций, приведенных в разд. 7.7.1. Недостаточная теплостойкость этих сталей и падение твердости с нагревом >200 °С сужают их использование. Погашение указанного недостатка преодолено легированием данных сталей вольфрамом. Это позволило достичь высокой теплостойкости сталей и повысить работоспособность инструмента до температуры 550…600 °С и скорость резания. Высокая теплоемкость обеспечивается за счет выделения карбидов (Fe_3C) из мартенсита при закалке их с температуры 1240…1280 °С. Исходя из этого пайку инструмента рекомендуется осуществлять припоями с температурой, близкой к температуре закалки. Обычно используют припои на основе никеля или ферросплавы. Пайку проводят в газопламенных печах, погружением в соляные ванны, а также индукционным способом с использованием боридно-фторидных флюсов № 200 и 201.

Для пайки инструмента из твердых сплавов берут те же флюсы № 200 и 201, в качестве припоев служат медно-цинковые (латунь Л62) с добавками никеля, марганца или алюминия. Иногда используют медно-марганцовые припои, применяя автоматизированный или механизированный способ нагрева. Для повышения производительности труда и снижения себестоимости широко распространен припой в виде таблеток, изготовленных из порошка припоя и флюса.

7.7.6. ПАЙКА ТИТАНА

Обладая многими ценными свойствами, включая большую удельную прочность, высокую коррозионную стойкость, малую плотность и высокую прочность при высоких температурах, титан нашел широкое применение в различных областях техники.

Однако применение его часто ограничивается недостаточной технологичностью – склонностью к охрупчиванию из-за высокой активности к кислороду, водороду и азоту. Кроме того, окисление и газонасыщение поверхности титана затрудняет обработку заготовок давлением (ковкой, штамповкой), а также резанием, деформированием и т.д.

При пайке титана, так же как и при его обработке, газонасыщенный (альфированный) слой приводит к значительным трудностям в обеспечении растекаемости припоя. Поэтому перед пайкой титана и титановых сплавов рекомендуется слой удалять известными способами, например механическим или травлением в кислотах. Пайку проводят в вакууме; в редких случаях – в аргоне повышенной чистоты при температуре 800…900 °С. Нагрев до такой температуры при указанном виде защиты от окисления способствует смачиваемости припоя и обеспечению пайки. Выше температуры 900 °С нагревать титан не рекомендуется из-за склонности его к росту зерна и, соответственно, падению пластичности, хотя прочность при этом практически не снижается. В качестве припоев для пайки титана и титановых сплавов находят применение припои на основе никеля или меди, а также серебра. Иногда как основу припоя используют алюминий, образующий с титаном ограниченную область твердых растворов. В ряде случаев на титан наносят барьерные покрытия, например молибден, а затем поверх его никель или медь. Такая композиция покрытий позволяет обеспечить пайку титана с другими металлами без хрупких фаз в паяном шве.

7.7.7. ПАЙКА ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ СО СТАЛЬЮ

В конструкциях, работающих в экстремальных условиях, иногда используют паяные конструкции, выполненные из разнородных металлов. Для обеспечения работоспособности конструкции со стороны высокой температуры, превышающей 1500 °С, применяют тугоплавкие металлы, например молибден, ниобий,

вольфрам и др., а со стороны низкой температуры – стали, причем соединение из указанного сочетания металлов выполняют в виде телескопического или стыкового.

7.7.7.1. ТЕЛЕСКОПИЧЕСКОЕ СОЕДИНЕНИЕ

Данное соединение включает в себя внутреннюю деталь, изготовленную из ниобия, и наружную из коррозионно-стойкой стали. Соединение осуществляют по конусу. На конусе детали из ниобия наносят кольцевые канавки, в которые устанавливают кольца из нержавеющей стали. Затем готовят поверхности под пайку, как указано в разд. 7.4.1, и наносят покрытие – никель или медь. Детали собирают с предварительно установленным припоем в канавки-питатели, выполненные в стальной детали. В качестве припоя используют медь, медно-серебряные и медно-марганцевые сплавы и др. Защитная среда – вакуум или инертные среды с флюсами, например, KBF_4, $Na_2B_4O_7$, BF_3 и др.

7.7.7.2. СТЫКОВОЕ СОЕДИНЕНИЕ

Одну из деталей изготовляют из молибдена, другую из стали. На поверхность молибденовой детали наносят покрытие из никеля или меди кругом. Это позволяет защитить молибден от окисления в процессе пайки. Перед покрытием удаляют оксидную пленку (см. разд. 7.4). Затем устанавливают фольгу припоя и собирают ее с ответной деталью. Детали поджимают, используя давление через мембрану. Дальнейшая технология аналогична указанной выше.

7.7.8. ПАЙКА ВОЛЬФРАМА

Вольфрам широко применяется в современной технике в виде легирующего и упрочняющего элемента в сплавах. Он относится к малораспространенным элементам. Температура плавления вольфрама 3380 ±10 °С.

Изучение кинетики окисления компактного вольфрама до 500 °С показало, что этот процесс протекает с малой скоростью, а в интервале 500…1000 °С скорость окисления быстро растет. Оксидная пленка двухслойная. Водород не вступает во взаимодействие с вольфрамом вплоть до его температуры плавления. Азот реагирует с компактным вольфрамом, образуя нитриды W_2N, WN, WN_2 и др. лишь при температуре >1500 °С. В оксиде углерода (CO) вольфрам устойчив до T = 1400 °С, с увеличением температуры происходит науглероживание с образованием карбидов. Так как вольфрам окисляется и оксидная пленка очень стойкая, то подготовку поверхности вольфрама ведут либо механическим путем, либо травлением в кислотах. Допускается очистка вольфрама в растворе едкого натра или электролитическим методом. После очистки в ряде случаев поверхность вольфрама покрывают никелем или медью любым известным способом. Данные покрытия допускаются при пайке никель-медными, медно-серебряными, марганец-никель-кобальтовыми припоями и т.д. Пайку ведут в вакууме, можно в качестве защиты использовать азот, водород и оксид углерода. При использовании тугоплавких припоев, например V–Nb+Ta; V–Nb-Ti и др., поверхности вольфрама механически зачищают и обезжиривают. Пайку ведут тугоплавкими припоями в вакууме $\geq 10^{-4}$ мм рт. ст.

7.7.9. ПАЙКА ПОРИСТОГО ВОЛЬФРАМА (ИЛИ МОЛИБДЕНА) С МЕДНЫМ СПЛАВОМ

Наряду с вольфрамом в промышленности, например, используют в ряде случаев тантал или сплав тантала с вольфрамом. В паяных конструкциях, представляющих собой смесительную головку, работающую при температуре >1000 °С, детали изготовляют из следующих материалов: сплава состава 95 % (мас.) Ta, остальное вольфрам; реже из чистого тантала. Паяная конструкция смесительной головки состоит из массивного диска и тонкостенных трубок диаметром 0,8 мм при толщине стенок 0,15…0,2 мм. Для обеспечения работоспособности конструкции пайку необходимо осуществлять высокотемпературными припоями с определенным сочетанием в нем элементов. Эти ограничения связаны с возможной эрозией тонких стенок трубок. Для ее предотвращения рекомендуют использовать припои следующего состава: ванадий + тантал + кремний + титан + + гафний + цирконий или тантал + алюминий + + железо + кремний + ванадий. Эти два припоя оптимальны и недефицитны по химическому составу. Пайка в вакууме обеспечивает герметичность паяных соединений без эрозии трубок и работоспособность смесительных головок. Для исключения окисления материала смесительной головки нецелесообразно пайку проводить в других защитных средах.

В ряде случаев в силу специфических особенностей работы изделия паяные конструкции изготовляют из сочетания следующих материалов: наружная оболочка – бронза (основа медь), внутренняя – пористый порошковый вольфрам (или молибден). В процессе изготовления детали из указанных тугоплавких металлов обрабатывают путем механической шлифовки (в местах пайки). Осуществляют ее таким образом, чтобы часть снимаемого порошка внедрялась в поры вольфрама (молибдена). После шлифовки поверхность полируют до полного закрытия пор на глубине 0,1…0,2 мм. Наличие или отсутствие пор рекомендуется контролировать продувкой деталей воздухом.

Перед пайкой детали обезжиривают (см. разд. 7.4.), а затем на уплотненную (шлифовкой и полировкой) поверхность вольфрама (молибдена) наносят слой никеля (10…15 мкм) и меди (10…15 мкм). Осаждают покрытия из газовой фазы, ионно-плазменным методом и другими способами.

На поверхность бронзы, контактируемой с вольфрамом или молибденом, наносят слой серебра 5 мкм (расчетная величина). Во избежание заплавления пор рекомендуется регламентировать дозировку припоя. В данном случае припоем являются покрытия из меди и серебра, образующие жидкометаллическую эвтектику при T = 779 °С. Пайку оболочек проводят при T = 970 °С с выдержкой 30 мин. Защитная среда – вакуум, допускается также в качестве таковой использовать аргон. После пайки рекомендуется проницаемость деталей в паяной конструкции контролировать воздухом или аргоном. Помимо проверки проницаемости следует от определенной партии вырезать образцы для металлографического и микрорентгеноспектрального анализов с целью оценки плотности паяных швов, спая и проницаемости.

7.7.10. ПАЙКА РАЗНОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ

В процессе пайки конструкции, состоящей из наружной оболочки – из высокопрочной стали и внутренней – из бронзы, возникают трудности, связанные с выбором зазора при ее пайке и сохранением плотного контакта между соединяемыми поверхностями в процессе охлаждения конструкции с температуры пайки. Решение этих проблем было достигнуто благодаря использованию избыточного давления для поджатия оболочек при пайке. Методика его расчета будет приведена ниже.

7.7.10.1. РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ДАВЛЕНИЯ ГАЗА ДЛЯ ПОДЖАТИЯ МЕДНО-СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ПАЙКЕ

Конструкцию, состоящую из двух оболочек, наружная из которых имеет КЛР α_1, меньший внутреннего α_2, паяют, обеспечивая плотный контакт между поверхностями. Этого достигают созданием вакуума в пространстве между оболочками, а также подачей в рабочий объем печи инертного газа под давлением, величину которого определяют экспериментально. Газ для поджатия используют следующего состава: аргон + 2,5…4 % (мас.) Не.

Внутренняя оболочка обладает существенно меньшим пределом текучести, чем наружная, т.е. $\sigma_{0,2_{(1)}} >> \sigma_{0,2_{(2)}}$.

Оболочки тонкие с $R_1 = R_2$, где R_1, R_2 – радиусы наружной и внутренней оболочек соответственно.

Справедлива безмоментная теория напряженного состояния.

Контактное давление в местах сопряжения оболочек должно быть ≥0,1 МПа для обеспечения высококачественного формирования паяного шва.

В основу рассмотрения было положено условие совместности деформаций оболочек в процессе пайки, включающее этапы нагрева оболочек до температуры пайки и последующего охлаждения их до комнатной температуры. При этом учитывали деформации (упругую, температурную и вызванную ползучестью материала оболочки под нагрузкой), определяемые по известным формулам.

В результате получены формулы для расчета необходимого давления газа на различных этапах процесса пайки. На этапе нагрева до температуры пайки возможны два случая. Если внутренняя оболочка находится в упругом состоянии, то

$$p = p_{к.о} \pm \pm \frac{[-(\alpha_2 - \alpha_1)(t_п - t_0) - \varepsilon_{п_2} - \varepsilon_{п_1} \pm \varepsilon_м]E_2\delta_2}{R\left(1 + \frac{E_2\delta_2}{E_1\delta_1}\right)}, \quad (7.22)$$

где $p_{к.о}$ – минимальное контактное давление между оболочками, обеспечивающее качественное формирование паяного шва; $t_п$ – температура пайки; t_0 – комнатная температура;

$\varepsilon_{п_1}$, $\varepsilon_{п_2}$ – деформации, вызванные ползучестью материалов наружной и внутренней оболочек под нагрузкой; $\varepsilon_м = u / R$ – отношение исходного монтажного зазора между оболочками к радиусу оболочки; E_1, E_2 – модули упругости наружной и внутренней оболочек; δ_1, δ_2 – толщины стенок наружной и внутренней оболочек.

Если внутренняя оболочка находится в пластическом состоянии, то

$$p = p_{к.о} + \frac{(\sigma_{0,2})_2 \delta}{R}. \qquad (7.23)$$

На этапе охлаждения от температуры пайки до температуры кристаллизации $t_{кр}$ шва при упругом состоянии внутренней оболочки

$$p = p_{к.о} + \frac{[(\alpha_2 - \alpha_1)(t_п - t_{кр}) - \varepsilon_{п_1} - \varepsilon_{п_2}]E_2\delta_2}{R\left(1 + \frac{E_2\delta_2}{E_1\delta_1}\right)} \qquad (7.24)$$

и при пластическом

$$p = p_{к.о} + \frac{(\sigma_{0,2})_2 \delta_2}{R}. \qquad (7.25)$$

На этапе охлаждения от температуры кристаллизации шва до комнатной

$$p = \frac{[(\alpha_2 - \alpha_1)(t_{кр} - t_0) - \varepsilon_{п_1} - \varepsilon_{п_2}]E_2\delta_2}{R\left(1 + \frac{E_2\delta_2}{E_1\delta_1}\right)} - q, \qquad (7.26)$$

где q – прочность паяного шва.

Расчеты по формулам (7.22) и (7.24) проводили, пользуясь методом последовательного приближения, причем в нулевом приближении деформации, вызванные ползучестью, принимали равными нулю. Знак в формулах (7.22) и (7.24) определяли по виду напряженного состояния оболочек (сжатие или растяжение).

Ниже будут приведены результаты расчета давления газа для конкретного примера пайки двух коаксиальных оболочек. Материал внутренней оболочки – сплав на основе меди, наружной – высокопрочная сталь; $p_{к.о} = 0{,}1$ МПа, $t_п = 1240$ К, $t_0 = 300$ К, $E_1 = 15 \cdot 10^4$ МПа, $E_2 = 9 \cdot 10^4$ МПа, $\delta_1 = 7{,}5$ мм, $\delta_2 = 4$ мм, $\alpha_2 = 21 \cdot 10^{-6}$ К$^{-1}$, $\alpha_1 = 18 \cdot 10^{-6}$ К$^{-1}$, $R = 50$ м, $u = 0{,}1$ мм, $\sigma_{0,2} = 7$ МПа.

Для упругого состояния внутренней оболочки в нулевом приближении из формулы (7.22) находим $p = -4{,}4$ МПа. Для пластического состояния внутренней оболочки из формулы (7.23) следует $p = -0{,}46$ МПа. Отрицательное значение p указывает на то, что плотный контакт между оболочками обеспечивается за счет различного теплового расширения оболочек и избыточного давления газа в печи можно не создавать.

Расчеты давления рабочего газа на этапе охлаждения от температуры пайки до температуры кристаллизации в нулевом приближении дают $p = 2{,}9$ МПа. При пластическом состоянии внутренней оболочки (принимая $\sigma_{0,2_{(2)}} = 12$ МПа) $p = 1{,}1$ МПа.

Из расчетов следует, что при отсутствии ползучести оболочек для сохранения плотного контакта в сопрягаемых оболочках при охлаждении конструкции до $t_{кр}$ необходимо создавать рабочее давление $p = 1{,}1$ МПа.

Однако, как показывает опыт, создание в печи для пайки давления газа, превышающего 0,5 МПа, представляет собой трудную техническую задачу. Поэтому для сохранения плотного контакта используют явление ползучести паяемых оболочек, для чего в процессе кристаллизации шва дают определенное время выдержки. Для данного конкретного случая ползучестью наружной оболочки можно пренебречь и учитывать только ползучесть внутренней оболочки. При этом предполагали, что давление в печи 0,5 МПа.

Используя выражение (7.24) и равенство $\varepsilon_{п_2} = A_{2\tau}$ (где A_2 – некоторая величина, зависящая от нагрузки и температуры; τ – время), находим:

$$\tau = \frac{1}{A_2}\left[(\alpha_2 - \alpha_1)(t_п - t_{кр}) - \frac{(p - p_{к.о})R\left(1 + \frac{E_2\delta_2}{E_1\delta_1}\right)}{E_2\delta_2}\right]. \qquad (7.27)$$

Для материала внутренней оболочки при $t_{кр}$ в рассматриваемом примере экспериментально было получено значение $A_2 = 1{,}35 \cdot 10^{-4}$ мин$^{-1}$. Тогда из уравнения (7.27) $\tau = 3{,}3$ мин.

При дальнейшем охлаждении оболочек от температуры $t_{кр}$ до комнатной отрыву внутренней оболочки от наружной препятствует прочность паяного шва.

В рассматриваемом примере пайки конструкции прочность полностью закристаллизовавшегося шва при $t_{кр}$ составляет 40 МПа. В то же время максимальная отрывающая нагрузка, которую определяет первое слагаемое в правой части уравнения (7.26), как нетрудно вычислить, всего 20 МПа. Отсюда следует, что после кристаллизации шва поджатия оболочек газом под давлением в рассматриваемом примере не требуется.

Разработанная методика может найти широкое применение и для других сочетаний металлов.

7.7.10.2. ПАЙКА РАЗНОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ С КОМПЕНСАТОРОМ

Не менее сложной проблемой создания плотных швов и, соответственно, хорошей пайки является пайка конструкций с оболочками, имеющими толщины стенок, не способные деформироваться под действием газа в печи (например, толщина стенки оболочки >10 мм). В этом случае для обеспечения высококачественной пайки было предложено использовать по торцам конструкции компенсаторы линейных перемещений, выполненные из тонколистового металла, например из коррозионностойкой стали. Оба компенсатора соединены с внутренней и наружной оболочками, что позволяет образовать между ними с помощью сварки герметичную внутреннюю полость. Форма компенсаторов может быть различной в зависимости от удобства их крепления к оболочкам. Компенсаторы должны быть достаточно гибкими, чтобы при любом линейном перемещении оболочек в процессе пайки могли скомпенсировать эти перемещения, а значит предотвратить нарушение герметичности конструкции. Подготовку под пайку и собственно пайку проводят известными способами, указанными выше.

7.8. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Качество паяного соединения зависит от многих показателей, в частности, от степени подготовки поверхностей под пайку, структуры и фазового состава материалов, величины зерна, шероховатости поверхности и т.д. Каждый из этих показателей как в отдельности, так и в совокупности может повлиять на качество паяного соединения. Например, при плохой подготовке поверхностей под пайку, т.е. при наличии оксидной пленки на поверхности, загрязнений и т.д., ухудшается растекаемость припоя. Припой собирается в виде капель, образуя «схватывание» в отдельных точках между соединяемыми поверхностями. Неоднородность структуры и изменение фазового состава приводит к увеличению или уменьшению объема металла. В обоих случаях будет изменяться зазор между паяемыми поверхностями, отчего появятся дефекты: при увеличении зазора – непропай из-за дефицита припоя, при его уменьшении до «молекулярного» значения – также непропай, но из-за ограничений проникновения припоя между паяемыми поверхностями. При крупно- и особенно разнозернистой структуре в паяемых металлах возможны эрозия металла по границам зерен и прожоги (см. рис. 7.14) с образованием непропаев. Шероховатость в значительной мере снижает прочность паяного соединения. Например, при шероховатости, переходящей в волнистость, площадь спая уменьшается в несколько раз, так как пайка происходит в основном только по вершинам гребешков.

Из сказанного следует, что для обеспечения полноценной пайки необходимо проводить тщательный контроль как качества металла, так и подготовки деталей на стадии, предшествующей пайке.

7.8.1. КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА МЕТАЛЛА

При пайке обычных сталей, цветных металлов и т.д. требования к структуре и размеру зерна ограничиваются государственными стандартами. В то же время к металлу паяных конструкций, работающих в широком диапазоне температур (от криогенных до высоких), предъявляют повышенные требования по чистоте его химического состава, величине зерна, структуре и т.д. Это позволяет достичь высокого качества паяного соединения и обеспечить работоспособность паяной конструкции в изделии. Обычно химический состав таких металлов регламентируется техническими условиями, где установлена допустимость некоторых элементов: бора, серы, фосфора и т.д. Требуемой величины зерна и стабильности структуры достигают с помощью ТО на стадии, предшествующей пайке. Химический состав металлов, а также примеси оценивают при входном контроле.

Величину зерна, структуру и фазовый состав, как правило, определяют на образцах, вырезанных из металла или готовой паяной конструкции.

7.8.2. КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТЕЙ И ПОКРЫТИЙ

Как уже было сказано, качество пайки во многом зависит от качества подготовки поверхностей и покрытий под пайку. Количественную оценку микрорельефа паяемых деталей определяют визуально (по эталону), иногда с помощью специальных приборов, например профилографов и профилометров. В ряде случаев для контроля шероховатости поверхностей используют эндоскоп, лупу, микроскопы и т.д. Из неполного перечня перечисленных способов контроля наиболее оптимален в условиях производства визуальный с помощью лупы и микроскопов различного типа. Они позволяют обнаружить трещины, поверхностные повреждения, забоины, риски, поры, зарезы, рельеф поверхности, т.е. высоту и шаг гребешков, и т.д.

При наличии дефектов, превышающих допустимые по конструкторской документации, детали обычно отбраковывают. Иногда деталь с дефектом, расположенным вне зоны пайки, может быть допущена к пайке при положительном заключении специалистов – паяльщика совместно с конструктором.

Контроль качества очистки обезжиренной поверхности перед нанесением покрытия оценивают путем непосредственного контроля или косвенным методом. В первом случае используют люминесцентные приборы: при осмотре собственно поверхности детали или салфетки из стеклянного волокна после протирки ею поверхности детали.

Во втором случае качество очистки поверхности оценивают по загрязнению растворителя после его использования для этой цели.

В ряде случаев чистоту обезжиренной поверхности контролируют по методу водяной пленки, являющемуся наиболее удобным и простым для производства. Сущность его заключается в том, что при чистой поверхности образуется сплошная водяная пленка; при наличии загрязнений вода скапливается в виде капель.

В процессе контроля качества покрытий под пайку учитывают:

– толщину покрытий и ее равномерность;

– прочность сцепления покрытий с подложкой;

– состояние поверхности покрытий;

– пористость покрытия, вмятины, риски и т.д.

Необходимость их оценки обусловлена тем, что каждый из них как в отдельности, так и в совокупности определяет качество паяного соединения. Например, при толщине покрытия сверх допустимого падает прочность паяного соединения; при уменьшении его толщины возможно растворение металла (рис. 7.15) или межграничное проникновение припоя в металл (рис. 7.16).

В случае плохого сцепления покрытия с подложкой могут быть непропаи из-за возможного окисления на границе раздела покрытие – подложка.

Неудовлетворительное состояние поверхности покрытия (шелушение, сколы, вздутие, растрескивание и т.д.) может привести к различного рода дефектам как в паяном шве, так и на границе раздела металл – покрытие. Разновидность их колеблется от непропая до пор. Пористость покрытия может вызвать несплошности в паяном шве и, соответственно, негерметичность паяного соединения.

Толщину покрытий контролируют неразрушающим и разрушающим способами. Среди неразрушающих методов контроля широко используются следующие: электромагнитные; измерения масс; прямого измерения. В ряде случаев для деталей со сложной геометрией применяют рентгенотелевизионный метод, иногда оптический или тепловой методы.

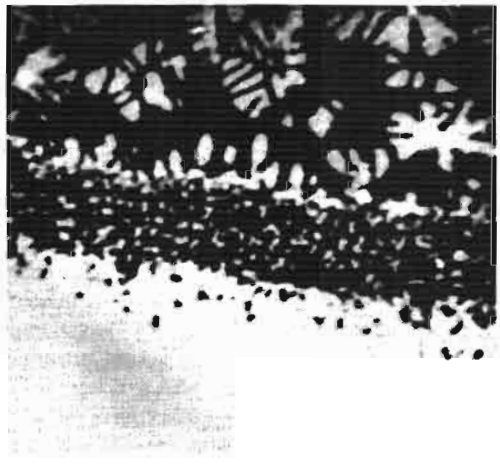
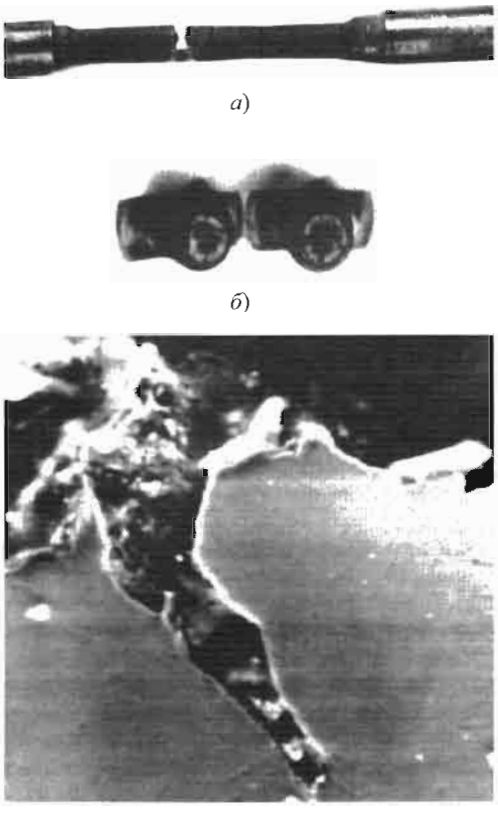


Рис. 7.15. Растворение дисперсионно-твердеющего сплава на основе никель-хрома при пайке серебряно-медным припоем при T = 920 °С, увеличение 3200×



а)

б)

в)

Рис. 7.16. Разрушение образца из дисперсионно-твердеющего сплава на основе никель-хрома в контакте с серебряно-медным припоем, T = 920 °С (*а*); вид разрушения в изломе (*б*); заполнение трещины припоем (*в*), увеличение 100×

К разрушающим методам относятся: химические и физические. В первом случае разрушается только покрытие, во втором – покрытие и металл изделия.

Помимо указанных способов контроля толщины покрытий с этой же целью используются: электромагнитный, магнитоиндукционный и вихретоковый методы, метод прямого измерения и радиометрический.

Вид и расположение дефектов в покрытии оценивают с помощью оптических методов неразрушающего контроля, а глубину дефекта – специальными автоколлимационными, а также растровыми микроскопами, позволяющими осуществлять их топографирование. Точность измерения данных приборов достигает ±1 мкм. Для измерения с большей точностью (±0,1 мкм) используют микроинтерферометры.

Для оценки пористости в покрытии используют метод погружения или наложения на покрытие фильтровальной бумаги или паст

При испытаниях на прочность сцепления покрытий с основным металлом пользуются качественным и количественным методами измерения. Тип измерения выбирают в зависимости от вида покрытий. На практике широко распространен качественный метод оценки, хотя им получают только относительные результаты.

7.8.3. КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ПАЙКИ

Как указано в предыдущих разделах, появление дефектов зависит от многих факторов. Для оценки дефектов прибегают к различным способам контроля, используя неразрушающие и разрушающие способы.

К неразрушающим способам относятся визуальный, проба на керосин, гидро- и пневмонагружение, рентгеноконтроль, газоэлектрический, метод контроля ультразвуком и магнитные методы контроля; разрушающие – это металлографический анализ на образцах, вырезанных из мест разрушения паяной конструкции (после разовых или циклических испытаний), а также механические испытания паяных образцов на растяжение, сжатие, срез и отрыв. Оптимальным вариантом для металлографических исследований является образец паяного соединения, не подвергавшийся растяжению при испытаниях.

Оптическая металлография позволяет на ранних стадиях оценить строение металла и определить его структурные составляющие, их качество, морфологию и распределение частиц, дефектность строения и природу ее появления, химическую неоднородность, размеры и ориентацию зерен и т.д., а также выявить участки для дальнейшего более глубокого исследования с привлечением тонких методов, в том числе просвечивающей электронной микроскопии (растровые, эмиссионные, отражательные), стереологии (количественная металлография, рентгеноструктурный анализ, рентгеноспектральный анализ и т.д.). Электронные микроскопы используются для решения метал-

ловедческих проблем, так как с их помощью можно получить не только изображение с высоким разрешением (до 1Å), но и дифракционную карту исследуемой зоны структуры металла, выявить механизм распада твердого раствора, изучить строение границ зерен, дислокаций, дефектов упаковки; динамику изменения параметров решетки, плотности дислокаций и т.д.

Для определения примесей в металлах и их распределения используется рентгеноспектральный анализ. Он позволяет получить информацию о ликвации микросегрегации, идентификации фаз и т.д.

Краткое изложение методов такого анализа дает представление об их возможностях для изучения физико-химических процессов, происходящих в процессе пайки на границе раздела твердое тело – расплав припоя. Использование данных методов в совокупности с другими, не рассмотренными здесь, позволило изучить природу образования трещин в материалах различного класса при пайке и разработать технологические приемы, предотвращающие их появление.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Баранов Е.И., Семенов В.Н., Маркович Л.А.** Способ изготовления конусной конструкции. Пат. № 2156181. 2000.

2. **Бычков Ю.Ф.** Металлургия и металловедение чистых металлов. Вып. 2. М.: Госатомиздат, 1960. 78 с.

3. **Грачева Р.А., Гофман И.П.** Основы теории металлургических процессов. М.: Металлургия, 1965. 274 с.

4. **Гришин В.Е.** Статистические методы анализа и планирования эксперимента. М.: Машиностроение, 1975. 127 с.

5. **Гуляев А.П.** Металловедение. М.: Металлургия, 1977. 646 с.

6. **Дубровский К.Е., Семенов В.Н.** Расчетная оценка давления газа для поджатия медно-стальных конструкций при пайке // Сварочное производство. 1982. № 5. С. 23 – 24.

7. **Зеликман А.Н., Никитина Л.С.** Вольфрам. М.: Металлургия, 1978. 271 с.

8. **Лашко Н.Ф., Лашко С.В.** Пайка металлов. М.: Машиностроение, 1977. 327 с.

9. **Лоцманов С.Н., Петрунин И.Е.** Пайка металлов. М.: Машиностроение, 1966. 327 с.

10. **Никитин В.И.** Физико-химические явления при воздействии жидких металлов на твердые. М.: Атомиздат, 1967. 441 с.

11. **Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В.** Справочник по сопротивлению материалов. Киев: Наукова думка, 1975. 413 с.

12. **Семенов В.Н.** Жидкометаллическое охрупчивание высокопрочных сплавов при их взаимодействии с медно-серебряными припоями и технология пайки ЖРД: Дис. … д-ра техн. наук. М., 1984.

13. **Семенов В.Н., Алексеева Л.Е., Хацинская И.М., Лубнин Е.Н.** О механизме разрушения сплава ХН67МВТЮ под воздействием медно-серебряного припоя // МИТОМ. 1982. № 8. С. 47 – 51.

14. **Семенов В.Н.** Диплом на открытие № 88 (приоритет – ноябрь 1991 г.) // Бюллетень ВАК России. 1998. № 2. С. 43 – 46

15. **Семенов В.Н.** Закономерности упрочнения и охрупчивания паяемых сталей и сплавов при нагреве их по техническому циклу пайки // МИТОМ. 1999. № 10. С. 20 – 24.

16. **Семенов В.Н.** Влияние неоднородности структуры материала на прочность паяного соединения // МИТОМ. 1999. № 10. С. 13 – 16.

17. **Семенов В.Н.** Влияние расплава медно-серебряного припоя на свойства высокопрочных и жаропрочных сплавов и сталей // МИТОМ. 1999. № 10. С. 6 – 12.

18. **Семенов В.Н., Сипягина Л.Е.** Способ испытания на прочность образца паяного соединения: Авт. св. № 1675735. 1991.

19. **Семенов В.Н., Чулков Ю.П., Комаров Л.П.** Определение допустимых напряжений в процессе пайки // Сварочное производство. 1981. № 3. С. 11 – 13.

20. **Семенов В.Н., Сипягина Л.Е., Дубровский К.Е.** Влияние трещин, заполненных закристаллизовавшимся расплавом припоя на прочность конструкционных материалов // Проблемы прочности. 1990. № 2. С. 21 – 23.

21. **Семенов В.Н., Недашковский К.И., Зайцев М.В., Козыков Б.А.** Способ термической обработки конструкций: Пат. № 2129166. 1999.

22. **Семенов В.Н., Кляжников Г.И., Недашковский К.И., Каменский С.Д.** Способ пайки двухслойных изделий: Пат. № 2104838. 1998.

23. **Семенов В.Н.** Способ пайки телескопических конструкций: Пат. № 2094190. 1997.

24. **Семенов В.Н., Сагалович В.В., Чепига Д.Д., Глиник Р.А.** Способ пайки пористых материалов: Авт. св. № 657913. 1978.

25. **Семенов В.Н., Сагалович В.В., Котельников В.Н. и др.** Припой для пайки танталового сплава: Авт. св. № 694334. 1979.

26. **Семенов В.Н., Деркач Г.Г., Шашелова Г.В., Туманов Л.А.** Способ пайки конструкций: Пат. № 2109607. 1998.

27. **Семенов В.Н., Сагалович В.В., Пестов Ю.А.** Способ термообработки жаропрочных дисперсионно-твердеющих сплавов на никель-хромовой основе перед пайкой: Пат. № 665509. 1977.

28. **Справочник** по пайке / Под ред. И.Е. Петрунина. М.: Машиностроение, 1984. 397 с.

29. **Справочник** по пайке / Под ред. С.Н. Лоцманова, И.Е. Петрунина, В.П. Фролова. М.: Машиностроение, 1975. 407 с.

30. **Хряпин В.Е.** Справочник паяльщика. М.: Машиностроение, 1981. 131 с.

Глава 8

СВАРКА ДАВЛЕНИЕМ

При сварке давлением неразъемное соединение образуется в результате деформационного или термодеформационного воздействия на соединяемые материалы в зоне контакта. Независимо от характера и интенсивности этого воздействия природа образования соединения едина. Различия заключаются в кинетике протекания отдельных стадий процесса, которые определяются условиями нагрева, характером и интенсивностью деформаций материалов, степенью локализации деформации и особенностями развития релаксационных процессов в приконтактной зоне.

Согласно общей теории получения неразъемного соединения любой процесс сварки развивается постадийно. Физика явлений, ответственных за формирование межатомных связей, сводится к трем наиболее важным стадиям: 1) образованию физического контакта; 2) активации контактных поверхностей; 3) объемному взаимодействию.

К отдельной группе следует отнести способы сварки давлением, при которых соединение завершается на стадии схватывания контактных поверхностей. В этой группе стадия объемного взаимодействия не получает развития вследствие низких температур (холодная сварка, сварка взрывом, магнитно-импульсная) или ввиду сравнительно высоких скоростей деформирования (сварка прокаткой, термокомпрессионная сварка). В этих условиях зона контакта, как правило, четко выражена. Способы этой группы сварки давлением наиболее пригодны для сварки разнородных материалов при опасности образования интерметаллидов в контакте.

8.1. ХОЛОДНАЯ СВАРКА

8.1.1. СУЩНОСТЬ МЕТОДА И ОСНОВНЫЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

Холодная сварка – метод получения неразъемного соединения однородных и разнородных пластичных металлов и сплавов при значительной совместной пластической деформации без внешнего нагрева соединяемых деталей. Соединение при холодной сварке образуется в результате возникновения металлических сил связи между соединяемыми частями при их совместной направленной пластической деформации, в процессе которой поверхностные оксидные пленки разрушаются и выносятся из зоны контакта, образуя при этом участки контакта ювенильных поверхностей. Пластическая деформация может происходить под действием нормальных к плоскости соединения или нормальных и тангенциальных сил.

Отсутствие внешнего нагрева в процессе холодной сварки позволяет сваривать упрочняемые металлы без ухудшения их свойств, соединять электрические провода, имеющие изоляционные покрытия, и разнородные металлы без образования в стыке хрупкой интерметаллидной прослойки, вести процесс в огне- и взрывоопасных средах, герметизировать емкости, нагрев которых недопустим.

Промышленное применение. Наиболее широко холодная сварка применяется в электротехнической промышленности. С ее помощью успешно заменяют дефицитную медь алюминием в качестве токопроводящего материала. Холодная сварка обеспечивает безотходное изготовление обмоток электрических машин и трансформаторов, замена штамповки медных коллекторных пластин электрических двигателей на холодную сварку позволяет сократить отходы металла в 8–10 раз.

В радиотехнике и радиоэлектронике холодную сварку применяют для герметизации корпусов полупроводниковых приборов, в цветной металлургии – для соединения алюминиевых или титановых катодных штанг с магистральными медными шинами; в приборостроении – для изготовления шасси приборов из алюминия и его сплавов; в автомобильной промышленности – при производстве радиаторов из алюминиевых сплавов; в машиностроении – при изготовлении переходных элементов из разнородных материалов, используемых в криогенной технике; на электрифицированном

железнодорожном и городском транспорте – для соединения медных контактных (троллейбусных) проводов, а также при изготовлении посуды, бачков, молочных фляг и других изделий из алюминия.

8.1.2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ СВАРКИ

Холодная точечная сварка может выполняться без предварительного (рис. 8.1, *а*, *б*) или с предварительным (см. рис. 8.1, *в*, *г*) зажатием деталей путем одностороннего (см. рис. 8.1, *а*, *в*) или двустороннего (см. рис. 8.1, *б*, *г*) деформирования пуансоном. Сварка по замкнутому контуру осуществляется для придания рабочему выступу пуансона требуемой конфигурации шва.

Шовная сварка реализуется двумя основными путями: при наличии на рабочей части ролика отдельных «выступов» можно получить многоточечную сварку с последовательным выполнением точек или одновременным соединением деталей по всей длине шва. В первом случае сварка проводится вращающимися роликами (см. рис. 8.1, *е*, *ж*) при одностороннем (см. рис. 8.1, *е*) или двустороннем деформировании (см. рис. 8.1, *ж*). Во втором случае сварка осуществляется вдавливанием пуансонов подобно точечной сварке (см. рис. 8.1, *з*, *и*). Пуансоны имеют рабочие выступы, как правило, кольцевой формы.

Схемы стыковой сварки отличаются между собой способами передачи силы осадки к месту сварки и ограничением объема материала, участвующего в пластической деформации (см. рис. 8.1, *к* – *м*).

При **сварке тавровых соединений** наиболее часто применяются на практике схемы, показанные на рис. 8.2, *а* и *г*.

При **холодной сварке сдвигом** одновременно создаются нормальные и тангенциальные силы (см. рис. 8.1, *н*). На сваренных заготовках отсутствуют вмятины от вдавливания пуансона и практически сохраняется исходная толщина соединяемых деталей, так как в пластической деформации участвуют тонкие слои металла, находящиеся в непосредственной близости от поверхности раздела.

8.1.3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ

Номенклатура свариваемых этим методом материалов ограничена, что связано с требованием высокой пластичности металла. Холодной сваркой чаще всего соединяют алюминий и медь как в однородном, так и в разнородном сочетании. К числу свариваемых металлов следует также отнести серебро, свинец, золото, никель, кадмий, цинк, олово, титан, ниобий. Возможность получения работоспособных соединений разнородных металлов, в том числе плохо свариваемых сваркой плавлением, делает холодную сварку особенно ценной и перспективной.

Точечной сваркой соединяют листы толщиной до 12…15 мм, причем сварка без предварительного зажатия заготовок возможна при толщине ≤4 мм по причине значительного коробления деталей. Удается соединять разнотолщинные заготовки. Есть примеры изделий, в которых разнотолщинность составляет 1 : 4 и более. Внахлестку заготовки могут соединяться в одной или нескольких точках одновременно или последовательно.

Стыковой сваркой соединяют проволоку и прутки круглого сечения диаметром 0,8…30 мм, полосы прямоугольного сечения с максимальной площадью для меди до 1000 мм^2 (100 × 10 мм) и для меди с алюминием до 1500 мм^2. Принципиальных ограничений по увеличению свариваемого сечения нет. При сварке встык не изменяется конфигурация сечения соединяемых деталей. Холодная сварка позволяет получать соединения различных типов при разнообразном конструктивном их оформлении. Возможно получение стыковых соединений на трубах при определенном соотношении толщины стенки и диаметра.

Шовной сваркой можно получать непрерывный нахлесточный герметичный шов; методом прокатки (обжатием между цилиндрическими валками) – нахлесточные соединения листов и пластин по большой площади. Толщина деталей 0,3…5 мм.

Сварка тавровых соединений – это способ холодной сварки двух деталей. Одна из заготовок, как правило, плоская, а другая (привариваемая) может быть прутком, полосой или иметь иную форму. Получены соединения при диаметре прутка до 30 мм, толщине плоской детали до 20 мм.

Сваркой сдвигом соединяют полосы из алюминия, меди, армко-железа, никеля толщиной до 4…8 мм.

При сварке наблюдается интенсивный наклеп металла. В силу этого прочность сварного соединения, выполненного без нарушений технологического режима, как правило, выше, чем у основного материала. Отсутствие значительного нагрева практически исключает воз-

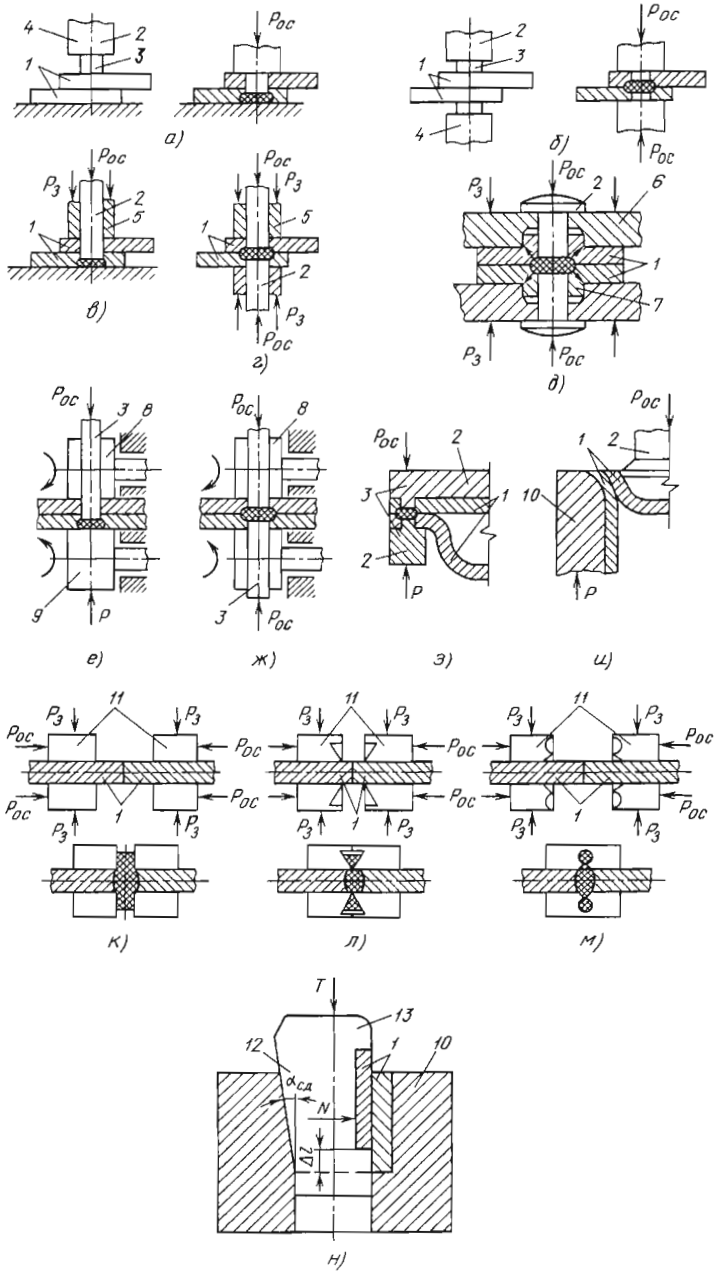


Рис. 8.1. Схемы холодной сварки:

а – д – точечная внахлестку; *е – и* – шовная; *к – м* – стыковая; *н* – сдвигом (*а*, *в*, *е*, *и* – с односторонним; *б*, *г*, *д*, *ж*, *з* – с двусторонним деформированием); *к* – с плоскими торцами; *л* – с заостренными; *м* – с конусной полостью зажимных губок; *1* – свариваемые детали; *2* – пуансоны; *3* – рабочий выступ; *4* – опорная ограничивающая поверхность; *5* – прижимы; *6* – зажимные плиты; *7* – кольцевые выточки; *8* – рабочий ролик; *9* – опорный ролик; *10* – матрица; *11* – зажимные губки; *12* – клин; *13* – выступ клина; $P_{ос}$ – сила осадки; $P_з$ – сила зажатия; P – сила деформирования; T – тангенциальная сила; N – нормальная сжимающая сила

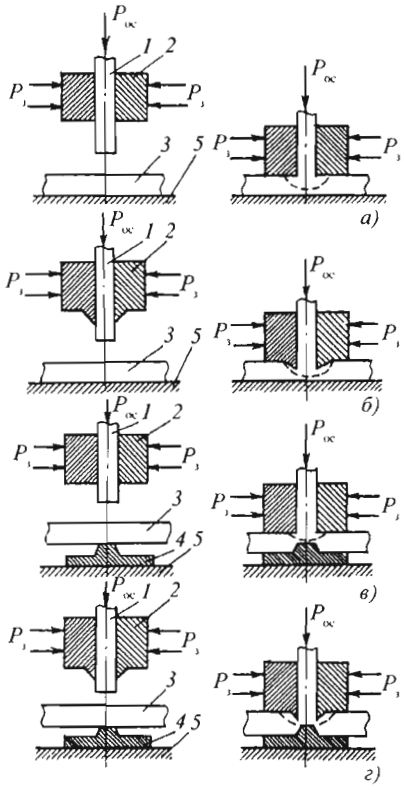


Рис. 8.2. Схемы сварки тавровых соединений:
а, *б* – с односторонним деформированием;
в, *г* – с двусторонним деформированием; *1* – пруток;
2 – зажимные губки; *3* – пластина; *4* – пуансоны;
5 – опора; $P_{ос}$ – сила осадки; $P_з$ – сила зажатия

можность появления хрупких интерметаллидных прослоек (например, при сварке алюминия с медью), обеспечивая тем самым высокую пластичность и прочность соединения. Сварной шов не загрязняется посторонними примесями, обладает высокой химической однородностью и поэтому имеет высокие показатели по коррозионной стойкости и стабильности электрического переходного сопротивления. По сравнению с соединениями, выполненными другими методами, простота подготовки деталей к сварке, легкость контроля параметров режима, отсутствие вспомогательных материалов, газо- и тепловыделений, возможность дистанционного управления и быстрота процесса позволяют легко автоматизировать холодную сварку. Процесс не требует высокой квалификации сварщика-оператора. Удельные затраты энергии на сварку приблизительно на порядок меньше, чем при сварке плавлением. Применение этого метода способствует улучшению гигиенических условий на производстве.

Однако следует учитывать, что сварка каждого конкретного изделия требует индивидуальной конструкции инструмента. При выполнении нахлесточных соединений на изделии остаются глубокие вмятины – следы от инструмента.

8.1.4. ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ

Технология сварки включает в себя следующие операции: подготовку соединяемых поверхностей; сборку; собственно сварку; удаление облоя (в случае стыковой сварки); контроль качества соединений.

8.1.4.1. ПОДГОТОВКА ПОВЕРХНОСТИ

Целью предварительной подготовки поверхностей является удаление жировых и масляных загрязнений. На производстве это достигается одним из следующих способов: механической зачисткой стальными вращающимися щетками при сварке внахлестку и при стыковой сварке больших сечений после механической резки; прокаливанием заготовок при температуре 350…400 °С при свободном доступе воздуха (для алюминиевых деталей); покрытием поверхности тонким (6…10 мкм) слоем никеля, хрома или анодированием (при сварке медных заготовок); обрезкой конца заготовки перпендикулярно к ее оси чистым инструментом, обеспечивающим удаление загрязнений вместе с частью срезаемого металла (широко применяется при стыковой сварке заготовок относительно небольших сечений); многократной осадкой концов заготовок при стыковой сварке.

8.1.4.2. ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА

Величина минимальной степени деформации ε_{min}, необходимая для образования работоспособного соединения при холодной **точечной сварке**, %: 60…70 Al, 85…90 Cu, 55…85 Pb, 86…88 Sn, 30…35 Au, 10…15 In, 50…86 Ag, 85…90 Ni.

При точечной сварке в основном применяют пуансоны с прямоугольными и круглыми рабочими выступами. Ширина рабочих выступов пуансонов прямоугольной формы B = = (1…3)δ (толщина листа); длина $L = (5…7)B$; диаметр рабочего выступа пуансонов круглой

формы d = (2…3,5)δ. Давление при точечной сварке в конце деформации, МПа: 300…600 для отожженного алюминия, 1100…1175 для нагартованного алюминия, 1150…1170 для отожженной меди, 1400…2500 для нагартованной меди.

Основные параметры холодной **шовной сварки** аналогичны параметрам точечной сварки. Скорость сварки 8…12 м/мин. Для шовной сварки алюминия рекомендуется применять ролики следующих размеров: диаметром d = = 50δ, шириной рабочего выступа a = (1…1,5)δ, высотой последнего h = (0,8…0,9)δ.

При **сварке встык** диапазон значений начального вылета заготовки может быть достаточно широким. При назначении этого параметра основным условием является получение симметричной картины деформации металла без потери устойчивости конца заготовки. С ростом толщины (диаметра) свариваемого сечения абсолютное значение вылета растет, но относительное, выраженное в долях толщины или диаметра заготовки, падает. При сварке заготовок прямоугольного сечения требуется при прочих равных условиях несколько большее значение вылета l_0, чем для круглых. Для алюминия этот параметр меняется от 0,5d (для d = 30 мм) до 1,0d (для d = 1…3 мм). Для меди l_0 = (0,75…1,1)d соответственно для диаметров 20…2 мм. При сварке разнородных материалов (например, меди с алюминием) начальный вылет более твердого и менее пластичного металла больше. Если нельзя получить необходимую степень пластической деформации за одну осадку из-за потери устойчивости конца заготовки, то может быть применено двукратное деформирование (сварка меди).

Давление осадки при холодной стыковой сварке составляет для алюминия 0,7…0,8 ГПа, отожженной меди и алюминия с медью 1,4…1,5 ГПа. Сила зажатия должна быть достаточной для полного предотвращения проскальзывания деталей в губках в процессе осадки. Она должна превышать силу осадки в 1,45–1,6 раза. Облой удаляется, как правило, одновременно с завершением процесса деформации благодаря специальной конструкции инструмента.

При **сварке сдвигом** основными технологическими параметрами (см. рис. 8.1, *н*) являются угол клина, или угол сдвига, $\alpha_{сд}$, сила сжатия свариваемых деталей перед началом сдвига, силы T и N, величина сдвига Δl.

8.1.5. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ХОЛОДНОЙ СВАРКИ

Оборудование для холодной сварки предназначено, как правило, для стационарных условий. Оно может иметь гидропривод, реже пневматический или пневмогидравлический. Различают оборудование для стыковой, точечной и шовной сварки. Ручной инструмент применяется только для стыковой сварки проводов небольших сечений.

Машины для точечной сварки содержат силовой привод, сварочный штамп (или сварочную головку), аппаратуру управления. Автоматы и полуавтоматы имеют механизмы для подготовки поверхностей деталей под сварку. Одним из наиболее важных узлов машины является сварочный штамп. В нем предусмотрены сменные пуансоны. Наиболее широкое применение в промышленности нашла машина МХСА-50-3.

Для шовной холодной сварки применяют в основном машины с гидроприводом МХС-801, МХС-1201, МХС-2501 и МХС-5001.

В состав установок для стыковой сварки в общем случае входят: сварочная головка, состоящая из двух плит – неподвижной и подвижной; механизм осадки; механизм зажатия; сменные зажимные губки; аппаратура управления; вспомогательные механизмы и приспособления для удаления грата и отрезки концов заготовки. Конструкция обеспечивает соосное положение свариваемых деталей в течение всего процесса осадки. Механизм зажатия должен предупредить проскальзывание деталей в губках в процессе осадки. Наиболее широкое применение в промышленности получили машины МСХС-5-3, МСХС-2005 и МСХС-12003.

Машины для сварки тавровых соединений позволяют получать соединения деталей, расположенных перпендикулярно одна по отношению к другой. Машины МХС-40001 и МХС-250.01 разработаны на базе серийно выпускаемого гидравлического пресса.

8.2. СВАРКА ВЗРЫВОМ

8.2.1. СУЩНОСТЬ МЕТОДА И ОСНОВНЫЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

Сварка взрывом – метод соединения материалов давлением, использующий энергию разложения взрывчатого вещества (ВВ). Под воздействием продукта разложения ВВ заготовки с большими скоростями соударяются.

Между свариваемыми поверхностями создается подобие кумулятивной струи, уносящей с них загрязнения, а высокие сжимающие давления обеспечивают физический контакт и возникновение металлических сил связи в результате пластического деформирования и активации атомов в приповерхностных слоях.

При сварке по одной из основных схем, получившей название угловой, неподвижную пластину *4* и метаемую пластину *3* располагают под некоторым углом α по отношению друг к другу так, что их края, обращенные к вершине угла, образуют зазор h (рис. 8.3).

Взрывчатое вещество *2* укладывается ровным слоем на поверхность метаемой пластины *3*. Взрыв инициируют детонатором *1*, при подрыве которого вдоль слоя ВВ распространяется плоская детонационная волна с постоянной скоростью, исчисляемой несколькими тысячами метров в секунду. С такой же скоростью перемещается область с высоким давлением продуктов разложения ВВ, значения которого в начальный момент могут достигать нескольких сотен атмосфер. Давление за фронтом снимается волнами разрежения, распространяющимися во все стороны и сообщающими каждому элементарному объему метаемой заготовки импульс силы, направленной по нормали к ее начальному положению. Под давлением продуктов детонации эти элементарные объемы получают ускорение.

Часть же пластины, находящейся впереди фронта, в силу инерции сохраняет свое первоначальное положение. Движение части пластины вызывает ее деформацию (перегиб) вблизи фронта. При соударении со второй заготовкой наблюдается второй перегиб. Образующийся между свариваемыми поверхностями угол $\gamma = \alpha + \beta$ зависит от соотношения значений скоростей детонации D и движения пластины v_0.

В «точке» (линии) соударения возникают огромные контактные напряжения, значительно превосходящие предел текучести свариваемого материала при статическом нагружении. Эти напряжения вызывают пластическое деформирование поверхностных слоев соединяемых заготовок. Наличие тангенциальной составляющей скорости $v_к$ приводит к сдвиговым перемещениям в зоне соударения, составляющим доли миллиметра.

Таким образом, при соударении заготовок создаются условия для очистки поверхности, активации атомов в приповерхностных слоях и образования физического контакта за счет пластической деформации. Сварка проводится на опоре *5* (металл, песок и т.д.).

В большинстве случаев сварки наблюдается волнообразность зоны соединения, связанная, по-видимому, с неустойчивостью кумулятивной струи. Микрорентгеновский анализ зоны сварки говорит о бездиффузионном ее характере. Под воздействием высоких давлений и резкой локализации повышения температуры в зоне сварки может наблюдаться появление новых фаз. Вблизи границ раздела имеет место неширокая (10...100 мкм) зона наклепанного металла. Поверхностный слой метаемой заготовки, испытывающий непосредственное воздействие продуктов детонации, также подвергается наклепу. Неравномерная деформация заготовок приводит к появлению остаточных напряжений.

Волнообразный характер границы, наклеп металла и механическое перемешивание способствуют повышению прочности соединения.

Промышленное применение. В отечественном машиностроении накоплен значительный опыт плакирования, получения биметаллических заготовок и деталей. В частности, освоено плакирование листов толщиной 70...100 мм, площадью 10...20 м^2 для сосудов давления ответственного назначения. Есть опыт получения в промышленном масштабе сваркой взрывом деталей узлов трения, сталеалюминиевых штырей электролизеров алюминия,

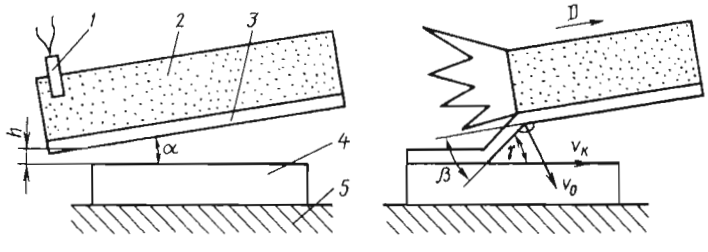


Рис. 8.3. Схема сварки взрывом под углом

биметалла сталь – медь, трехслойных заготовок с габаритными размерами 4200 × 1200 × 125 мм и толщиной плакирующих листов коррозионностойкой стали, равной 12,5 мм.

Сварка взрывом широко используется для получения слоистых заготовок с последующей прокаткой.

8.2.2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ СВАРКИ

Рассмотренная «угловая схема» и ее технологические варианты (рис. 8.4) применяются для сварки плоских и цилиндрических заготовок. Необходимый начальный угол α может задаваться начальным пространственным расположением заготовок, механической обработкой или местным прогибом свариваемого участка одной из деталей. Однако при использовании этой схемы не обеспечивается постоянство условий сварки на всей площади соединения. Поэтому применение ее ограничено относительно небольшими размерами заготовок. В силу этого схема с параллельным расположением свариваемых поверхностей (рис. 8.5) получила большее распространение. За исключением небольшого по протяженности отогнутого участка, условия сварки всюду одинаковые. Это позволяет применять ее для заготовок любых размеров.

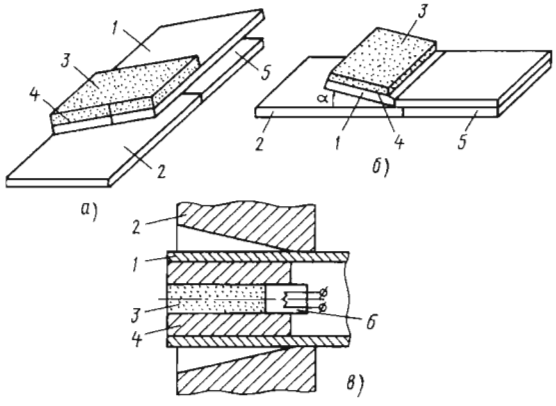


Рис. 8.4. Разновидности угловой схемы сварки:
а – плоских заготовок с ограниченной площадью соединения; *б* – с отгибом конца метаемой заготовки; *в* – с двусторонним расположением заряда; *1* – металл; *2* – неподвижная заготовка; *3* – ВВ; *4* – демпфирующий слой; *5* - подкладка; *6* – детонатор

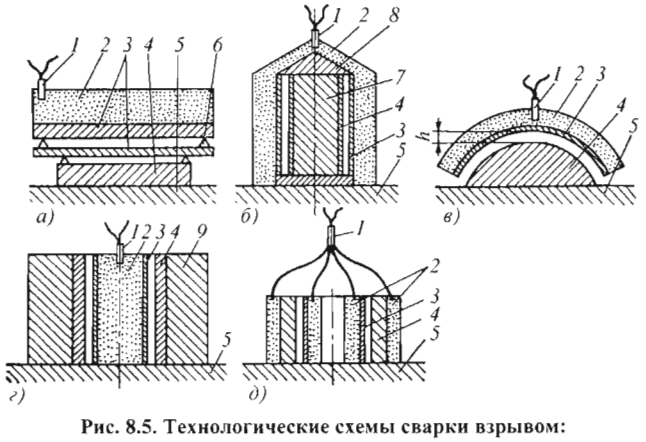


Рис. 8.5. Технологические схемы сварки взрывом:
а – параллельная для плоских изделий (многослойная); *б* – плакирование наружной поверхности труб; *в* – эквидистантная; *г* – плакирование внутренней поверхности труб; *д* – плакирование крупногабаритных обечаек с противозарядом; *1* – детонатор; *2* – заряд ВВ; *3*, *4*, *6* – соответственно метаемый, неподвижный и установочный элементы; *5* – опора; *7* - стержень; *8* – конус; *9* – матрица

8.2.3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ МЕТОДА

Сваркой взрывом освоена достаточно широкая номенклатура материалов как в однородном, так и в разнородных сочетаниях: малоуглеродистые, коррозионно-стойкие, инструментальные стали, медь, алюминий, титан и сплавы на их основе, ванадий, ниобий, серебро, молибден, вольфрам, цирконий, магний, цинк и др. Наибольший интерес представляет соединение разнородных материалов. Метод позволяет получать двух- и многослойные соединения, композиционные материалы.

Основным типом соединения является нахлесточное, выполняемое по плоскости, цилиндрическим и криволинейным поверхностям. Принципиальных ограничений по площади заготовок нет. Соотношения свариваемых толщин могут колебаться в широких пределах. Максимальная толщина неподвижной заготовки не лимитируется. Толщина метаемой заготовки обычно лежит в диапазоне 0,3…19 мм. Максимальная ее толщина определяется пластичностью материала. Минимальная толщина метаемой заготовки ограничивается нарушением устойчивости процесса детонации ВВ при уменьшении толщины заряда ниже определенного значения. Получаемые сварные соединения равнопрочны основному металлу. В них отсутствуют какие-либо загрязнения. Неравномерная деформация приводит к возникновению значительных остаточных напряжений, которые могут быть устранены последующей термической обработкой.

Этим методом можно соединять детали в труднодоступных для обычных сварочных аппаратов зонах, в различных пространственных положениях, во внутренних полостях изделий и при необходимости сварки одновременно в нескольких местах. Удается получать изделия с внутренними полостями и каналами, предварительно созданными на неподвижной заготовке и заполненными любым легко удаляющимся веществом (воск, парафин, свинец и т.п.). Производительность метода высока и определяется, по существу, только затратами времени на подготовительные операции. При внедрении метода не требуется больших единовременных затрат.

Однако следует иметь в виду необходимость строгого соблюдения техники безопасности при работе с ВВ. При использовании навесок ВВ больше нескольких килограммов сварку приходится вести на полигоне. Требуется защита персонала от звуковой волны. При сварке в помещении нужна вентиляция для удаления вредных газов.

8.2.4. ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ

Номенклатура операций при изготовлении изделий методом сварки взрывом включает в себя: механическую обработку соединяемых поверхностей; травление заготовок (с последующими мойкой и сушкой); обезжиривание свариваемых поверхностей; сборку заготовок, укладку ВВ и установку детонатора; производство взрыва (собственно сварка); термическую обработку и правку.

8.2.4.1. ПОДГОТОВКА К СВАРКЕ

Необходимость механической обработки, травления и термообработки готового изделия зависит от марки свариваемого материала, исходного состояния поверхностей заготовок и требований к соединению. Механическая обработка оказывается нужной, если на поверхностях имеется окалина (например, при плакировании слябов). При сварке труб с трубными досками может потребоваться расточка отверстия в доске или обточка трубы для создания зазора определенной геометрии между заготовками. Необходимый угол наклона может быть также получен за счет пластической деформации конца заготовки (обжатие или раздача на конус, отгиб края пластины). Для аустенитных сталей, алюминиевых и титановых сплавов, других материалов применяют травление. Эту операцию выполняют за 2…5 ч до сварки. Обезжиривание способствует стабилизации качества и проводится непосредственно перед сваркой.

Сборку осуществляют на месте производства взрыва. Основное внимание при этом обращают на обеспечение заданного зазора и равномерное распределение ВВ. Допускаемая местная кривизна или прогиб заготовки лежит в пределах 1…3 мм на 1 м длины. При сварке цилиндрических заготовок овальность и разностенность ограничиваются несколькими процентами. При наружном плакировании относительно тонкостенной заготовки для предотвращения ее деформации в процессе взрыва либо внутренняя полость заполняется какой-нибудь жидкостью (вода, битум), либо внутрь вставляется массивная оправка. При плакировании полой заготовки с внутренней стороны массивная оправка устанавливается снаружи.

На поверхность метаемой заготовки может укладываться прокладка (буферный слой) из неметаллических материалов для смягчения бризантного действия ВВ на металл.

Дозировка и крепление взрывчатого вещества зависят от его вида: порошок, гранулы, шнур, пластины. Сборка завершается установкой детонатора и монтажом электрической цепи подрыва.

8.2.4.2. ВЫБОР ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА

Условия сварки при конкретных заготовках в массе ВВ определяются тремя физическими параметрами: скоростью D распространения фронта детонации; скоростью v_0, развиваемой метаемой пластиной к моменту соударения заготовок, и углом γ, образованным соединяемыми поверхностями в «точке» соударения.

Реальная скорость соударения заготовок при сварке зависит также от зазора h. При $h = 0$ скорость равна нулю для любого значения толщины слоя ВВ. Сваривания при этом не происходит. При чрезмерном повышении скорости (при увеличении толщины слоя ВВ и h) в соединяемых заготовках образуются сколы и трещины. При очень большом зазоре сваривания также не происходит. Таким образом, существует оптимальное значение h.

Скорость детонации D зависит от природы взрывчатого вещества, его плотности, влажности, дисперсности частиц, геометрических размеров заряда. Для конкретной марки ВВ эти параметры известны. Поскольку контролировать физические параметры процесса неудобно, то за технологические параметры принимают для выбранной марки ВВ толщину его слоя, начальный зазор h и угол α.

При выборе значений параметров сварки можно руководствоваться следующими рекомендациями. В качестве взрывчатого материала выбирают ВВ и их смеси, имеющие скорость детонации меньше скорости распространения звуковой волны в свариваемом материале. При соблюдении такого условия в приповерхностных слоях во время соударения заготовок успевает развиться пластическая деформация. В противном случае возникают резко локализованные ударные волны, разрушающие металл. Примерами используемых ВВ могут быть:

1) механическая смесь аммонита 6ЖВ и гранулированной аммиачной селитры в соотношении по массе (1 : 4) – (1 : 2);

2) смесь тротила [3 % (мас.)] и аммиачной селитры [97 % (мас.)].

Для приварки тонких заготовок (2…3 мм) может использоваться низкоимпульсное листовое (НИЛ) ВВ, представляющее собой поролоновый лист, поры которого заполнены кристаллическим ВВ.

Давление p в зоне соударения должно быть $p > k\sigma_т$, где $\sigma_т$ – предел текучести металла при статическом нагружении; k – коэффициент, зависящий от механических свойств свариваемых материалов. Обычно k = 10…50 (большие значения относятся к отожженному, меньшие к наклепанному металлу).

При выборе установочного зазора h можно руководствоваться соотношениями $h > 0{,}5\delta_м$. Установочный угол α обычно выбирают в пределах 2…7°. При сварке по схеме с параллельным расположением заготовок конец метаемой заготовки со стороны установки детонатора отгибается на угол порядка 2° на длине ~150 мм. Зазор h обычно 6…8 мм. На практике при отработке технологии, как правило, выбирают ВВ со скоростью детонации 3000…4000 м/с и корректируют режим, изменяя зазор h в большую и меньшую стороны и тем самым меняя скорость соударения.

8.2.5. ОБОРУДОВАНИЕ

Сварка чаще всего ведется на полигонах. Заготовки устанавливают на массивных плитах или грунте. В заводских условиях процесс можно вести в специальных камерах, в которых создается разрежение порядка 500… 1000 Па. Сварка в камере производится при массе ВВ, не превышающей нескольких килограммов. В полигонных условиях мощность может составлять 10…100 кг. Для сварки больших по размеру заготовок полигоны должны быть оборудованы транспортными средствами, подъездными путями.

8.3. МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНАЯ СВАРКА

8.3.1. СУЩНОСТЬ МЕТОДА И ОСНОВНЫЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

Магнитно-импульсная сварка – сварка с применением давления, при которой соединение осуществляется в результате соударения свариваемых частей, вызванного воздействием импульсного магнитного поля (ГОСТ 2601–84). Свариваемые метаемую *1* и неподвижную *2*

детали с зазором δ вводят в рабочую зону индуктора *3* (рис. 8.6), питаемого током от мощной батареи конденсаторов *C*. При разряде конденсаторных батарей ток, протекающий через индуктор *3*, образует в окружающем его пространстве электромагнитное поле, которое наводит вихревой ток в металлическом слое заготовки. Взаимодействие двух встречнонаправленных токов приводит в движение деталь *1*, которая мгновенно с большой скоростью перемещается до соударения с неподвижной деталью *2*, обеспечивая их сварку.

Сила, действующая на заготовку, пропорциональна плотности тока. С уменьшением удельного сопротивления металла будет возрастать и ток при прочих равных условиях. Напряженность магнитного поля зависит от электрических параметров батареи конденсаторов и параметров разрядной цепи, формы и размеров рабочей индуктивности инструмента.

Минимизация индуктивности разрядной цепи обеспечивается высокой частотой тока разряда, что, в свою очередь, ведет в результате скин-эффекта (поверхностного эффекта) к генерации тока в пределах толщины стенки метаемой заготовки. В противном случае соударение невозможно из-за образования «магнитной подушки».

В процессе магнитно-импульсной сварки при соударении заготовок на их поверхностях возникают контактные давления, соизмеримые с контактными напряжениями при сварке взрывом. Природа образования соединения имеет много общего со сваркой взрывом.

8.3.2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ

Наилучшую свариваемость при использовании рассматриваемого метода проявляют пластичные металлы и сплавы с высокой электропроводностью (алюминий, медь в однородном и разнородных сочетаниях, циркониевые и титановые сплавы, алюминий со сталью и др.).

Основной тип соединений – нахлесточное, выполняемое главным образом на цилиндрических заготовках. Возможна сварка плоских элементов. Свариваемые в настоящее время толщины лежат в диапазоне до 1 мм. Применение схемы с предварительным нагревом свариваемых поверхностей позволяет увеличить толщину свариваемых этим методом заготовок. Возможна приварка рифленых заготовок к гладким поверхностям. Затраты энергии на сварку 10...20 % от затрат при использовании дуговой и контактной сварки. Длительность процесса исчисляется единицами и десятками микросекунд. Производительность очень высока и определяется, по существу, затратами времени на установку заготовок и съем готовых изделий. Нагрев металла происходит в весьма тонком слое. Основная доля энергии расходуется на пластическую деформацию.

Распределение давления в пределах толщины стенки заготовки неравномерное: на поверхности со стороны индуктора оно равно нулю и максимально у свариваемой поверхности. При сварке металл не загрязняется посторонними примесями. Соединения обладают высокой механической прочностью, коррозионной стойкостью, вакуумной плотностью и

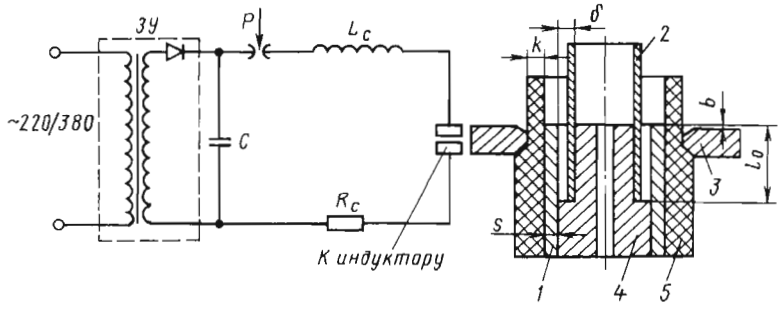


Рис. 8.6. Принципиальная схема магнитно-импульсной сварочной установки:
1 – метаемая деталь толщиной *s*; *2* – неподвижная деталь; *3* – индуктор-концентратор; *4* – центрирующая металлическая оправка; *5* – фторопластовая втулка; *ЗУ* – зарядное устройство; *C* – емкость накопителя (батарея конденсаторов); *P* – коммутирующее устройство (разрядник); L_c, R_c – собственная индуктивность и сопротивление разрядного контура; *b* – величина ввода метаемой детали в рабочую зону индуктора; l_0 – длина метаемого участка свариваемой детали

стабильностью свойств. В шве отсутствуют интерметаллиды, не наблюдается роста зерна, нет волн и завихрений, характерных для сварки взрывом. Протяженность зоны сварки по толщине заготовки составляет десятые доли миллиметра. Оборудование обеспечивает дозировку энергии с точностью до ±5 %, что гарантирует стабильность качества.

Процесс ведется без непосредственного контакта с рабочим инструментом, легко поддается автоматизации, что позволяет встраивать его в автоматические сборочные линии. Не требуется высокой квалификации сварщика-оператора. Процесс можно вести в вакууме и любой газовой среде. Удается получить высококачественное герметичное соединение на изделиях с замкнутыми внутренними полостями.

8.3.3. ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ

Подготовка заготовок под сварку может включать в себя механическую обработку щетками или шкуркой, химическую очистку свариваемых поверхностей, обезжиривание. С увеличением шероховатости поверхности прочность возрастает, при этом появляется опасность снижения герметичности. Очистке поверхностей может предшествовать развальцовка или другой метод формообразования для придания концу заготовки нужной геометрии. При сборке деталей в индукторе необходимо обеспечить постоянство зазора.

Параметрами процесса являются: U – напряжение заряда конденсаторной батареи; C – емкость батареи конденсаторов; L – индуктивность цепи; δ – зазор между неподвижной и метаемой деталями; l – длина индуктора и др. На образование сварного соединения влияет взаимосвязь следующих основных динамических параметров: нормальной скорости соударения метаемой детали (140…300 м/с), скорости движения точки контакта свариваемых материалов (1500…2400 м/с), нормального (радиального) давления соударения (400…5000 МПа), угла соударения (порядка 4…7°).

Обобщенных рекомендаций по выбору режимов сварки нет. Параметры процесса подбирают всякий раз экспериментально.

8.3.4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ СВАРКИ

Магнитно-импульсная сварка выполняется по разным схемам (рис. 8.7). При сварке индуктор устанавливают снаружи (см. рис. 8.7, *б*, *г*, *е*) или внутри трубчатой детали при диаметре >25 мм (см. рис. 8.7, *а*, *в*, *д*). Свариваемые трубы можно одновременно приводить во встречное движение путем использования двух индукторов, включенных в цепь установки последовательно (см. рис. 8.7, *ж*). Для сварки плоских деталей по наружному и внутреннему контурам используются плоские индукторы (см. рис. 8.7, *з*).

8.3.5. ОБОРУДОВАНИЕ

Установки для сварки аналогичны установкам для магнитно-импульсной штамповки и отличаются только конструкцией рабочего органа – индуктора. В состав установки входят зарядное устройство, батарея конденсаторов, индуктор, разрядник (прерыватель), система управления и контроля параметров процесса. Зарядное устройство состоит из повышающего трансформатора и выпрямителя. Включение батареи конденсаторов в цепь индуктора осуществляется тиристорным прерывателем или с помощью воздушного разрядника открытого типа. Конденсаторы импульсные с рабочим напряжением до 10…20 кВ, емкость батареи до 1400 мкФ (табл. 8.1).

Для обеспечения минимальной индуктивности и сопротивления в разрядной цепи токоподводы выполняются из плоских медных шин, изолированных друг от друга тонкой диэлектрической прокладкой, или в виде коаксиального кабеля.

Индуктор во время работы испытывает значительные механические, тепловые и электрические нагрузки, что может привести к выходу его из строя. Современные конструкции индукторов имеют водяное охлаждение, надежную электроизоляцию и способны выдерживать до 50…100 тыс. сварок.

При ручной загрузке и управлении производительность до 350…400 изделий/ч.

8.4. СВАРКА ПРОКАТКОЙ

8.4.1. СУЩНОСТЬ МЕТОДА И ОСНОВНЫЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

Сварка прокаткой – метод соединения металлических материалов в твердой фазе при совместной горячей или холодной с последующим отжигом пластической деформации свариваемых заготовок, обеспечивающей механическое разрушение оксидных пленок при изоляции соединяемых поверхностей от контакта с атмосферным воздухом. Необходимая

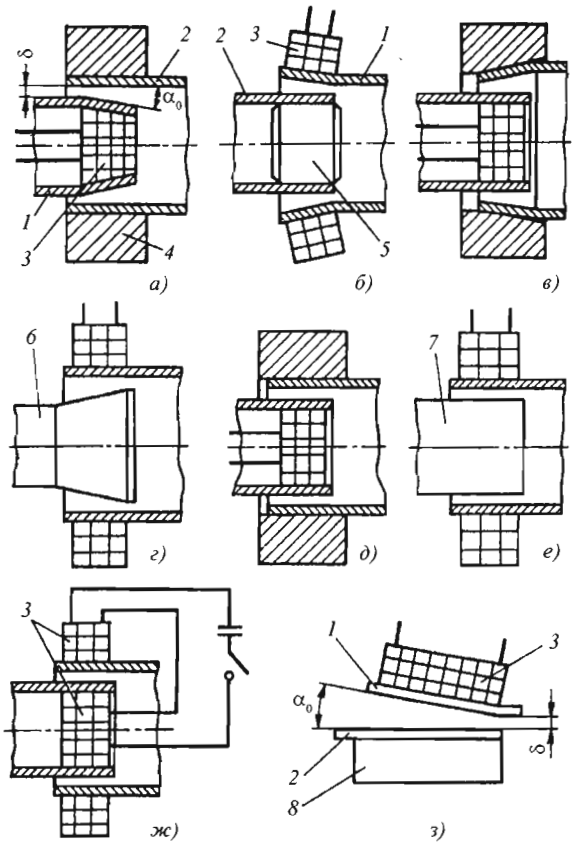


Рис. 8.7. Схемы магнитно-импульсной сварки:
1 – метаемая деталь; *2* – неподвижная деталь; *3* – индуктор;
4 – металлические обойма и оправка; *6* – тяга; *7* – стержень; *8* – опора

8.1. Характеристики отечественных и зарубежных установок

Тип установки	W, кДж	U_{min}, кВ	C, мкФ	L, мкГн	F, кГц
МИУ = 20/5	20	5	1600	0,0159	30
МИУ = 40	40	5	3360	0,012	25
МИУ = 100	100	50	80	0,175	42,5
«Magneform-36» (США)	36	8,3	1044	Нет данных	
ВВС (Германия)	10	10	200	0,391	18

Условные обозначения: W – максимальная запасаемая энергия; U_{min} – минимальное напряжение; C – емкость батареи конденсаторов; L – индуктивность разрядного контура; f – собственная частота разрядного контура.

пластическая деформация может быть обеспечена путем совместной прокатки, волочением, прессованием и другими способами обработки давлением. Большие степени деформации достигаются многократным обжатием. Деформирование происходит в направлении, перпендикулярном к поверхности соединения, вызывает течение металла вдоль свариваемых поверхностей и, как следствие, механическое разрушение менее пластичных оксидных пленок.

При сварке разнородных материалов эффект разрушения усиливается из-за различия в их пластических свойствах. Металл заготовок на чистых от загрязнений участках проявляет способность к схватыванию. Это состояние рассматривают как первую стадию процесса. Дальнейшее распространение процесса сварки на всю площадь соединяемых заготовок при последующей деформации зависит от ассимиляции оставшихся газов в контактной зоне материалом заготовок. Возможными механизмами, способствующими этому, являются растворение газов в металле и химическое взаимодействие их (связывание) с компонентами самого материала и оксидами.

В процессе многократного деформирования происходят дробление и растворение оксидов. Для предотвращения образования устойчивых оксидов поверхность заготовок предварительно покрывают тонким слоем пластичного металла для облегчения физического контакта (например, никель). В зону соединения могут вводиться барьерные промежуточные прослойки для предотвращения непосредственного контакта металлов в случае их металлургической несовместимости.

В качестве подслоя при сварке коррозионно-стойкой стали применяют чаще всего никель, который наносят гальваническим методом или напылением. Толщина подслоя 40…100 мкм. Используются и другие материалы: медно-никелевые, железохромистые, железованадиевые и другие сплавы. Эти подслои могут выполнять и роль барьерных покрытий.

Промышленное применение. Сварка прокаткой получила достаточно широкое распространение в металлургическом производстве при изготовлении слоистых лент и листов, биметаллической проволоки и других полуфабрикатов, используемых в производстве химической аппаратуры, при изготовлении изделий, работающих в различных агрессивных средах. В машиностроении из слоистых материалов изготовляют лемеха и диски культиваторов сельскохозяйственных машин, режущий и деревообрабатывающий инструмент, тормозные колодки, ножи для наборных фрез и других деталей, в которых должны сочетаться поверхностная твердость и вязкость сердцевины. Этим же методом получают сталемедный контактный провод.

8.4.2. ВЫБОР ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА

Основными регулируемыми параметрами сварки прокаткой являются температура нагрева заготовок перед сваркой T, общая величина обжатия Δh, %, число обжатий, режим отжига. На качество соединения влияет и ряд других факторов (состав и толщина подслоя, качество очистки поверхности, окончательная термическая обработка и т.д.).

8.4.3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ СВАРКИ

Наибольшее распространение получила схема обжатия между цилиндрическими валками (пакетный метод) при производстве слоистых листов и лент (рис. 8.8). Различают горячую и холодную сварку прокаткой. В первом случае подготовленные и собранные в блок (пакет) заготовки нагреваются до температур, достаточных для прокатки, и подвергаются многократному обжатию между валками. Во втором случае собранный блок проходит последовательно несколько раз чередующиеся операции обжатия в ненагретом состоянии и отжига. Этот вариант используется для сварки достаточно пластичных материалов (медь + + алюминий, алюминий + титан, алюминий + + латунь и др.) и изделий относительно малой толщины (тонкие ленты из сочетаний сталь + + алюминий, алюминий + сталь + алюминий, сталь + латунь и др.).

Пакетный метод позволяет получать двух- и трехслойные материалы. Одновременно могут свариваться два и три комплекта заготовок, между которыми помещают специальный разделительный слой, препятствующий свариванию заготовок различных комплектов. Чаще всего применяют симметричный двойной пакет. Собранный пакет герметизируется с помощью сварки. Аналогично выглядят схемы и для сварки цилиндрических заготовок. Этим методом получают исключительно нахлесточные соединения.

Диапазон толщин слоистых листов и полос, изготовленных сваркой прокаткой, лежат в пределах 4…25 мм. При этом следует помнить, что исходные заготовки имеют много большие толщины. Размеры заготовок – слябов и листов могут быть вплоть до (700…1200) × (1700… 2500) × (100…150) мм.

Максимальная площадь соединения ограничивается, по существу, только возможностями оборудования.

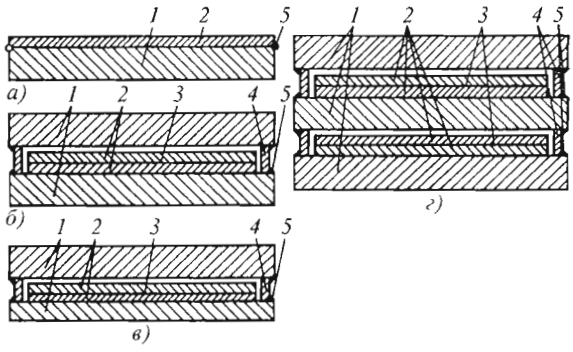


Рис. 8.8. Конструкция одинарного (*а*), двойного симметричного (*б*), двойного несимметричного (*в*) и тройного (*г*) пакетов:
1 и *2* – соответственно основной и плакирующий слои; *3* – промежуточный разделительный слой; *4* – планки из углеродистой стали; *5* – сварной шов

Кроме тонких и толстых листов и полос, этим методом получают слоистые трубы, проволоку, профиль и т.д. Диапазон соотношений толщин основного и плакирующего слоев достаточно широк.

Подготовительные и отделочные операции не особенно трудоемки. Сам процесс сварки имеет такую же производительность, как и прокатка. Можно применять рулонную прокатку ленты.

Из-за неравномерностей пластической деформации каждого слоя, различия в коэффициентах термического расширения материала соединяемых заготовок и неравномерного охлаждения могут появляться значительные остаточные напряжения и, как следствие, микротрещины.

При сварке легкоокисляющихся металлов (например, титана) пакет может продуваться инертным газом. В отдельных случаях внутрь герметичного пакета помещают пирофорный материал (церий или его сплавы), который при нагреве связывает кислород находящегося в нем воздуха.

Высокое качество соединения получается при горячей прокатке в вакууме. Однако этот процесс значительно более дорогой и требует специализированного оборудования.

Режимы термической обработки назначаются в зависимости от марок свариваемых материалов.

8.4.4. ОБОРУДОВАНИЕ

Сварка ведется на обычных прокатных или волочильных станах. Заготовки нагревают в камерных и методических печах, в нагревательных колодцах. Для сбора пакетов требуется сварочный пост, для нанесения подслоя – гальванические ванны или установки напыления.

Вакуумные прокатные станы позволяют сваривать прокаткой легкоокисляющиеся металлы. Такой стан включает в себя переднюю и заднюю форвакуумные камеры, вакуумные камеры с нагревательной печью и рабочей клетью и вакуумную систему откачки. Однако мощность вакуумных станов и размеры прокатываемых листов ограниченны. Примером вакуумного прокатного стана является стан МИСиС-210.

8.5. КЛИНОПРЕССОВАЯ СВАРКА

В холодной сварке известна схема, получившая название «сварка сдвигом» (см. рис. 8.1, *н*). Идея, заложенная в этой схеме, состоит в том, что необходимая для образования соединения пластическая деформация приповерхностных слоев заготовок обеспечивается путем создания в этой зоне сложного напряженного состояния. Нормальная сжимающая сила при этом такова, что не вызывает изменения формы заготовок. По данной схеме получены соединения высокопластичных материалов, поддающиеся холодной сварке.

В клинопрессовой сварке используется идея создания пластической деформации в зоне соединения по схеме сварки сдвигом, но при этом высокая пластичность достигается нагревом заготовок. Нагрев способствует и термической активации. Специальные оправки и конусовидная (клиновидная) заточка заготовки из более твердого металла (сечение внедряемой заготовки имеет вид треугольника или трапе-

ции) обеспечивают пластическое течение «мягкого» металла вдоль свариваемых плоскостей. При этом наблюдается пластическая деформация приповерхностных слоев и заготовки из твердого материала.

Параметрами процесса являются температура заготовок T_1 и T_2, сила запрессовки P, скорость запрессовки v, угол заточки «твердой» заготовки α.

На ход процесса влияют также те геометрические параметры заготовок, от соотношения которых зависит ход пластического течения металла без потери устойчивости (соотношение толщины стенки диаметра и высоты заготовки).

Имеется несколько **технологических схем** процесса (рис. 8.9). При внедрении конуса (клина) в пластичный металл условия сваривания неодинаковые для вершины конуса и верхней его части, где деформации минимальны.

Технологические возможности этого метода ограниченны, но он представляет особый интерес для сварки тех сочетаний разнородных материалов, в которых одна из заготовок имеет существенно большую твердость. Подогрев более пластичного металла увеличивает это различие. Возможна сварка материалов, близких по своей твердости, но в этом случае требуется разная степень нагрева каждой из заготовок. Этим методом получают стыковые соединения. Наиболее удобны для сварки заготовки в форме трубы или стержня. Получены высококачественные соединения труб из АМц, АД1, АМг6, АМг3, меди с трубами из коррозионно-стойкой аустенитной стали 12Х18Н10Т. Успешно сваривают по этому методу молибден с ниобием, сплав вольфрам – никель – железо с алюминиевым сплавом, алюминий с титаном, титан со сталью.

Особый интерес этот метод представляет для соединения композиционных материалов, в том числе боралюминиевых композитов.

Чаще всего таким способом изготовляют биметаллические переходники. Принципиальных ограничений на размеры заготовок нет. Если одна из свариваемых деталей должна иметь размеры, не позволяющие обеспечить требуемые условия сварки, то ее размеры увеличивают и в последующем подвергают механической обработке сваренную заготовку.

Соединения обладают высокой механической прочностью, коррозионной стойкостью, герметичны, хорошо работают в условиях термоциклирования и термоудара. Угол загиба сталеалюминиевых образцов 180°. Очень мало меняются исходные свойства материала. Процесс можно вести при температуре ниже температуры рекристаллизации более твердого материала. Не требуется сложное специальное оборудование. Одна из заготовок сохраняет исходную форму. Производительность, по существу, определяется длительностью нагрева и затратами времени на механическую обработку, установку и съем изделия.

Технология сварки включает в себя операции механической обработки с целью придания необходимой геометрии концу заготовки из «твердого» металла; обезжиривания поверхности; нагрева; собственно сварки. Угол заточки 15…20°.

Температура нагрева при сварке алюминия со сталью порядка 400 °С. Вопрос о защите металла от окисления решается в зависимости от марки материала. Для повышения прочности соединения сварку можно вести через пластичную прокладку.

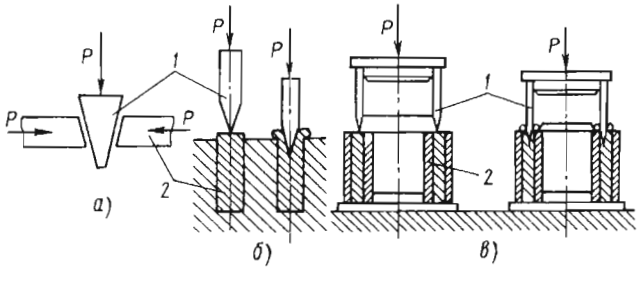


Рис. 8.9. Технологические схемы клинопрессовой сварки:
а – сварка в специальном штампе; *б* и *в* – стыковая сварка стержней и трубчатых заготовок соответственно; *1* – конусовидная заготовка из более твердого материала; *2* – заготовка из более пластичного материала

Специальное оборудование для клинопрессовой сварки не выпускают. Заготовки нагревают в печах для термообработки. Собственно сварку выполняют на прессах. Удобно использовать установки для диффузионной сварки с гидроприводом и механизмом давления.

Промышленное применение процесс нашел в авиакосмической технике. Основная решаемая задача – снижение массовых показателей изделий.

8.6. СВАРКА ТРЕНИЕМ

8.6.1. СУЩНОСТЬ МЕТОДА И ОСНОВНЫЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

Сварка трением – метод соединения материалов в твердой фазе, при котором зону соединения нагревают за счет работы против сил трения, возникающих на свариваемых поверхностях, находящихся в относительном движении и прижатых друг к другу нормальным усилием. Разрушение и удаление загрязнений обеспечивают путем термического воздействия, механического износа и пластического течения металла вдоль поверхности скольжения. После достижения в зоне соединения необходимой сварочной температуры и определенной деформации материала относительное движение заготовок практически мгновенно прекращается, и процесс заканчивается естественным охлаждением изделия.

Особенности метода связаны с кинетикой тепловыделения и пластического деформирования материала. На рис. 8.10 представлены схемы типовых осциллограмм основных параметров режима сварки трением с непрерывным приводом.

Промышленное применение. Сварка трением достаточно широко применяется в машиностроении, ядерной энергетике, инструментальном производстве, электротехнической промышленности, тракторо- и автомобилестроении, а также в авиакосмической технике, химическом и нефтяном машиностроении. Мировая практика использования сварки трением в промышленности показывает, что этот метод сварки является одним из наиболее интенсивно развивающихся технологических процессов. Зарубежные источники сообщают о перспективах использования процесса сварки трением с перемешиванием в судо-, вагоно-, ракето- и авиастроении, электротехнической и пищевой промышленности. Так, норвежская

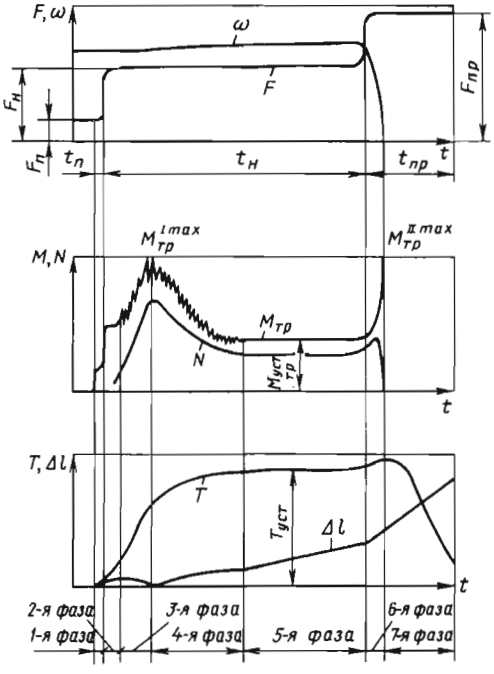


Рис. 8.10. Схема типовых осциллограмм основных параметров режима сварки трением:
F – осевая сжимающая нагрузка, Н;
ω – частота вращения, $с^{-1}$; N – мощность тепловыделения, Вт; $M_{тр}$ – момент трения, Н · м;
$t_п$, $t_н$, $t_{пр}$ – соответственно время притирки, нагрева и проковки, с; T – температура в зоне соединения, °С; Δl – осадка, мм

судостроительная компания «Marine Aluminium» впервые применила промышленную установку «ESAB SuperStir» для изготовления алюминиевых панелей размером 6 × 16 м корпусов скоростных катеров и крупнокорпусных паромов. Шведская фирма «SAPA» разработала и освоила производство сварных панелей для холодильных установок быстрой заморозки.

8.6.2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ СВАРКИ ТРЕНИЕМ

Сварка трением с **непрерывным приводом** (рис. 8.11). Одной из заготовок сообщается вращательное движение. Заготовки соприкасаются, и к ним прикладывается осевая сила нагрева. Стадия нагрева в существующих машинах сварки трением регламентируется либо временем нагрева, либо степенью деформации заготовок.

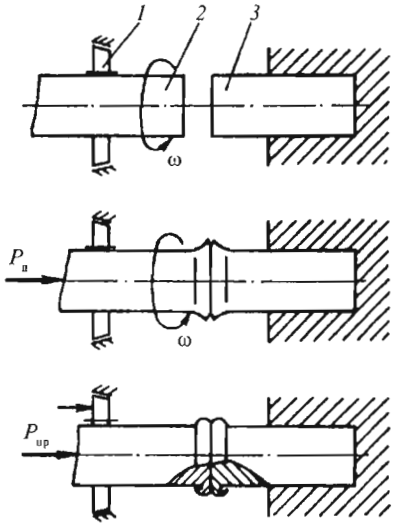


Рис. 8.11. Схема сварки трением с непрерывным перемешиванием:
1 – тормоз; *2*, *3* – свариваемые заготовки

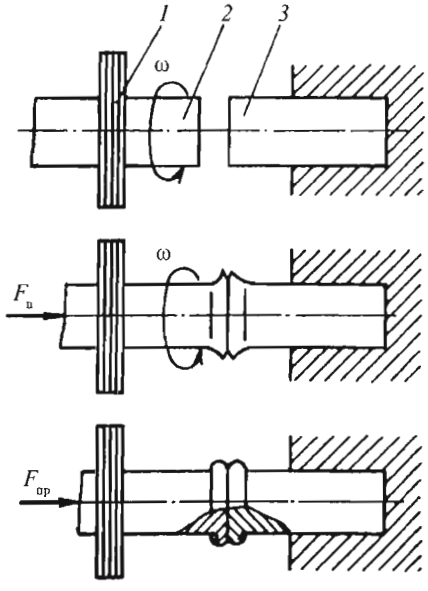


Рис. 8.12. Схема инерционной сварки трением:
1 – маховик; *2*, *3* – свариваемые элементы

Инерционная сварка трением (рис. 8.12) – это сварка, при которой относительное движение заготовок обеспечивается массивным маховиком, предварительно разогнанным до определенной скорости специальным двигателем небольшой мощности. При прижатии свариваемых торцов заготовок друг к другу энергия, накопленная во вращающейся массе маховика, трансформируется в теплоту, выделяющуюся в процессе трения в стыке.

Орбитальная сварка трением осуществляется движением прижатых с силой $F_{пр}$ одна к другой заготовок по круговой орбите без вращения вокруг собственных осей (рис. 8.13). Оси заготовок смещены во время нагрева на величину эксцентриситета. По завершении стадии нагрева оси совмещают, прекращая тем самым относительное движение заготовок, и выполняют проковку. Этот способ позволяет избежать трудностей, связанных с неравномерным нагревом $F_н$ свариваемого элемента по сечению из-за различия в значениях линейных скоростей на его центральных и периферийных участках.

Радиальная сварка трением основана на использовании теплоты трением наружного или внутреннего кольца, вращающегося с заданной угловой скоростью, о скошенные концы труб, прижатых одна к другой с определенной силой (рис. 8.14).

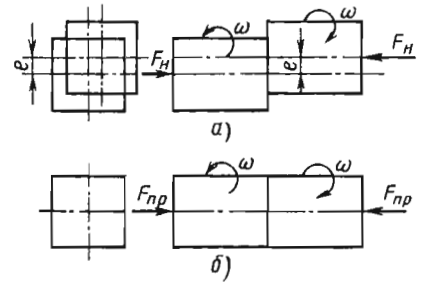


Рис. 8.13. Схема орбитальной сварки трением:
а – стадия нагрева; *б* – стадия проковки

Сварка трением с перемешиванием применяется для сварки заготовок из тонколистовых материалов. К концам заготовок подводят ролик, вращающийся со скоростью 200…3000 мин$^{-1}$. Скорость перемещения ролика относительно свариваемых заготовок составляет 4,5…6,0 м/мин при удельном давлении на ролик 0,2…0,5 МПа.

Технологическая схема (рис. 8.15) способа включает в себя три основных этапа. На первом вращающийся с высокой скоростью инструмент *1* цилиндрической или ступенчатой (с малым углом конусности) формы с буртом *2* в месте перепада диаметров рабочего

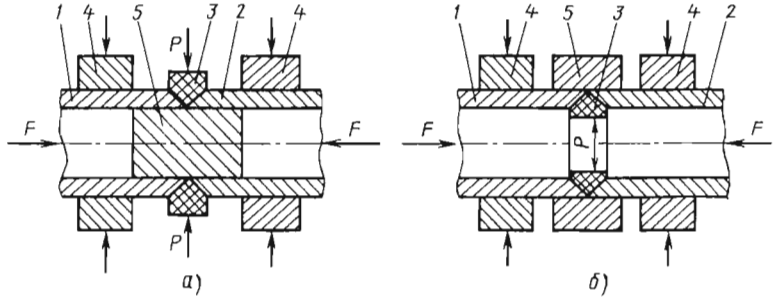


Рис. 8.14. Схема радиальной сварки трением:
а – с наружным разжимным кольцом; *б* – с внутренним разжимным кольцом; *1*, *2* – свариваемые заготовки; *3* – вращающееся кольцо из присадочного материала; *4* – зажимные элементы; *5* – оправка

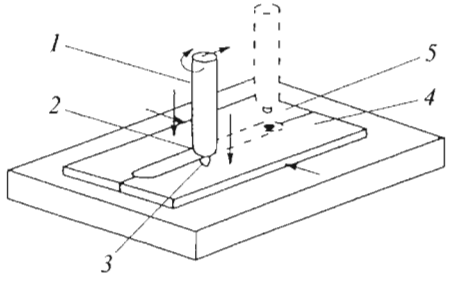


Рис. 8.15. Технологическая схема процесса сварки трением с перемешиванием

наконечника *3* и корпуса инструмента погружают в стык соединяемых деталей *4* и *5*, жестко закрепленных в оснастке, на глубину, примерно равную их толщине. Когда бурт инструмента войдет в контакт с поверхностью деталей, прекращают погружение и приступают ко второму этапу процесса – перемещению вращающегося инструмента по линии соединения. На третьем этапе (окончание сварки) вращающийся инструмент поднимают и выводят из стыка. Нагретый в результате работы сил трения до пластичного состояния и перемешанный вращающимся инструментом материал вытесняется в освобождающийся позади движущегося по линии стыка инструмента и ограниченный сверху буртом объем, в котором и формируется шов.

8.6.3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СВАРКИ ТРЕНИЕМ

Номенклатура свариваемых материалов достаточно широка: малоуглеродистые, углеродистые, инструментальные, высоколегированные стали различных классов, алюминиевые, медные, титановые сплавы, цирконий как в однородном, так и в разнородных сочетаниях, термопласты.

Варианты конструктивного оформления соединений, выполняемых этим методом, в силу специфики самого процесса ограниченны. Стыковые соединения выполняются на стержнях, трубах и других элементах, имеющих форму тел вращения (сплошных и полых). Возможно тавровое соединение стержней с плоскими элементами.

Диапазон размеров свариваемых заготовок достаточно широк. Считают, что сваркой трением целесообразно сваривать сечения площадью 30…8000 мм^2. В производственных условиях минимальный диаметр свариваемых прутков 6 мм.

Для сварных соединений, получаемых этим методом, в большинстве случаев характерны высокие (не ниже основного материала) показатели механических свойств и высокая их стабильность. Разброс показателей прочности и пластичности ≤7…10 %. В шве отсутствуют поры, раковины, инородные включения. Структура мелкозернистая, зерно равноосное. Это объясняется спецификой процесса сварки трением, при котором обеспечиваются эвакуация из зоны соединения всякого рода загрязнений, значительная пластическая деформация металла нагретой зоны при малой ее протяженности, а сами соединяемые поверхности изолированы от контакта с воздухом.

Сварка трением дает высокие экономические показатели. Удельная затрачиваемая мощность (в расчете на единицу площади свариваемого сечения) 15…20 Вт/мм^2 по сравнению со 120…150 Вт/мм^2 для контактной сварки, а расход в 5–10 раз меньше. При этом коэффициент мощности cos φ = 0,7…0,8 (для контактной сварки 0,4…0,5). Производитель-

ность до 60...450 сварок / ч. Машинное время сварки 1...30 с. Настройка оборудования для сварки заготовок разных диаметров несложна и не требует больших затрат времени. Выполнение вспомогательных операций (укладка и зажатие заготовок, съем деталей и т.п.) легко механизируется, а сам цикл сварки автоматический.

Небольшая номенклатура типов соединений, получаемых этим методом, образование трудноудаляемого грата, ограничения по размерам и конфигурации вращающейся заготовки, неодинаковые условия нагрева периферийных и центральных участков сечения являются недостатками метода.

8.6.4. ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ

8.6.4.1. ПОДГОТОВКА ЗАГОТОВОК К СВАРКЕ

Основное требование сводится к обеспечению перпендикулярности поверхности трения к оси вращения заготовки. При сварке одноименных металлов допускается непараллельность торцов 5...7 %. При сварке материалов с различной степенью пластичности (например, алюминия со сталью) биение торца не должно превышать 0,2 мм. К чистоте поверхности этот метод менее требователен, чем другие способы сварки.

Фигурная обработка концов заготовок проводится при сварке деталей разных диаметров (рис. 8.16).

Создание на соединяемых поверхностях необходимых для сварки условий возможно после определенной пластической деформации металла в зоне соединения. Осадку можно использовать в качестве параметра для регламентации процесса нагрева, т.е. по достижении определенной осадки будет подаваться команда на прекращение относительного движения. Можно осуществлять регламентацию и по времени.

Наличие на поверхности загрязнений сказывается на результатах в различных условиях сварки неодинаково. Как правило, тонкие оксидные пленки не влияют на качество соединения. Во всех случаях недопустима окалина. Загрязнения (ржавчина, толстые оксидные пленки, жиры, масла и т.п.) могут влиять на длительность первых двух фаз процесса сварки, а при регламентации по времени это может привести к нестабильности качества соединения.

8.6.4.2. ВЫБОР ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА

Основными параметрами процесса являются скорость относительного перемещения (для сварки с вращением заготовок – ω, мин$^{-1}$; для возвратно-поступательного движения – частота f; амплитуда колебаний A, давление нагрева p_1 (для конкретной заготовки – сварочная сила P); давление проковки p_2; время сварки t; осадка Δ.

От скорости относительного вращения в значительной мере зависят мощность тепловыделения в стыке, производительность процесса и характер температурного поля. В большинстве случаев линейные скорости лежат в пределах 0,6...3 м/с. Возможно получение высококачественных соединений при разных значениях скоростей, но с соответствующей корректировкой других параметров. Некоторые режимы сварки трением представлены в табл. 8.2.

Сварные соединения могут иметь значительную зону термического влияния. Возможно образование дефектов в виде пустот. При малых скоростях затрачиваемая мощность увеличивается. При повышении скорости она снижается. Меньшее влияние оказывает на результат исходное состояние (чистота) торцов.

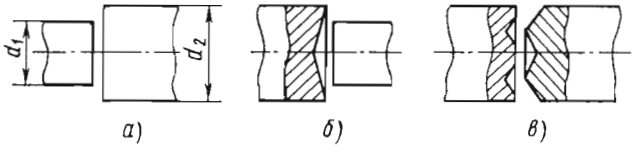


Рис. 8.16. Подготовка контактных поверхностей заготовок из разнородных материалов к сварке:
а – из быстрорежущей стали и конструкционной; *б* – из коррозионно-стойкой стали и алюминия; *в* – из коррозионно-стойкой стали и цинка; $d_2 = (1{,}15...1{,}25)d_1$

8.2. Некоторые режимы сварки трением

Материал	Диаметр заготовки, мм	Частота вращения, $с^{-1}$	Давление, МПа		Суммарная осадка, мм	Время нагрева, с
			нагрева	проковки		
Ст3	40	16,6	100	100	12	20
Сталь 35	30	21	35	70	7	30
25Г2С	22	25,0	45	45	4	10
1Х18Н9Т	18	16,6	70	170	5,0	8
9ХС	30		100	200	5	15
Р18 +40Х	18				2,2	9
АД1 + Ст3	40	12,5	50	120	14	4
Ст3 + медь М1	20	25,0	35	70	12	7,5

8.6.5. ОБОРУДОВАНИЕ

В состав машин для сварки трением в общем случае входят привод вращения с устройством для торможения шпинделя; механизмы создания рабочей (сварочной) силы, перемещения заготовки, зажатия деталей; станина; аппаратура управления и контроля (рис. 8.17). В определенных случаях могут предусматриваться механизмы и устройства для торцовки заготовок, удаления грата, регулирования соосности свариваемых деталей, автоматизации загрузки деталей и съема готовых изделий.

В подавляющем большинстве машин привод шпинделя электромеханического типа с передачей вращения от асинхронного двигателя через клиноременную передачу. Машины, как правило, односкоростные. Скорость выбирается такой, чтобы в пределах определенного диапазона свариваемых сечений можно было получать высококачественное соединение за счет варьирования других параметров режима.

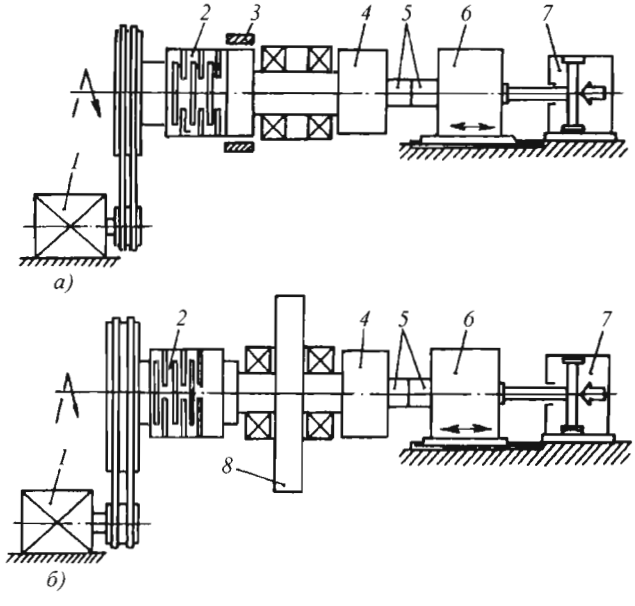


Рис. 8.17. Схемы машин для сварки трением:
а – конвекционной; *б* – инерционной; *1* – двигатель; *2* – муфта сцепления; *3* – тормоз; *4* – шпиндель; *5* – свариваемые заготовки; *6* – задняя бабка; *7* – привод силы; *8* – маховое колесо

В машинах для сварки трением находят применение пневматические, гидравлические и пневмогидравлические приводы для создания осевой силы. Пневматические приводы последней использованы в специализированных машинах сер. МФ, пневмогидравлические – в универсальных машинах МСТ-23, МСТ-35 и других с максимальными силами при проковке 50...400 кН. В машинах средней (>300 кН) и большой (с осевой силой до 3000 кН и более) мощности применяют гидропривод. Мировой парк машин для сварки трением имеет десятки модификаций и насчитывает ~4500 шт.

8.7. УЛЬТРАЗВУКОВАЯ СВАРКА

8.7.1. СУЩНОСТЬ МЕТОДА И ОСНОВНЫЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

Ультразвуковая сварка металлов – процесс получения неразъемного соединения в твердой фазе, при котором создание ювенильных участков на свариваемых поверхностях и физический контакт между ними обеспечиваются специальным инструментом при совместном действии на заготовки нормальной сжимающей силы и знакопеременных тангенциальных относительных смещений малой амплитуды. Эти смещения происходят с ультразвуковой частотой в плоскости деталь – деталь и вместе с нормальной силой вызывают пластическое деформирование микронеровностей приповерхностного слоя металла и эвакуацию из зоны сварки загрязнений (рис. 8.18).

Механические ультразвуковые колебания к месту сварки передаются от инструмента через толщу материала заготовки с внешней ее стороны. Процесс организуется так, чтобы не допустить значительного проскальзывания инструмента и опоры по поверхностям заготовок. Прохождение колебаний через металл деталей сопровождается рассеянием энергии за счет внешнего трения между свариваемыми поверхностями в начальный период (плоский источник теплоты) и внутреннего трения в объеме материала, находящегося между инструментом и опорой в условиях интенсивных ультразвуковых колебаний после образования зоны схватывания (гистерезисные потери, объемный источник теплоты). Это проявляется в повышении температуры в соединении до значений $(0{,}4...0{,}7)T_{пл}$. Повышение температуры, в свою очередь, облегчает пластическую деформацию. Наложение ультразвуковых колебаний вносит определенную специфику в поведение металла и кинетику процесса сварки в

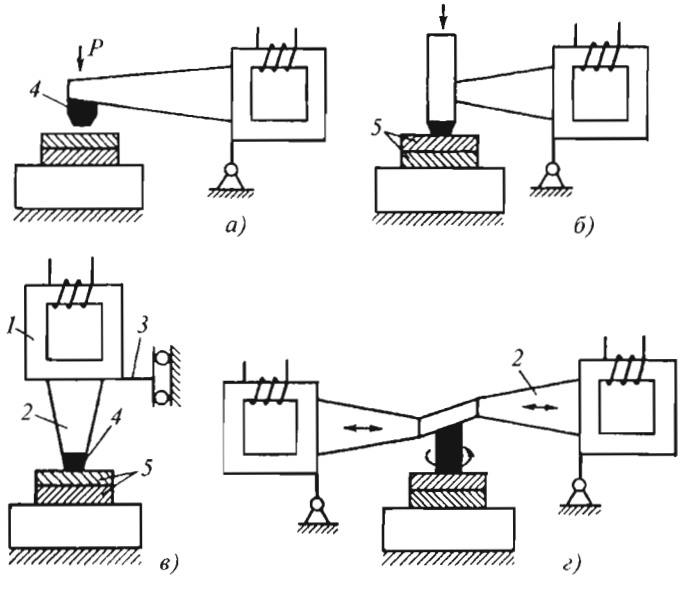


Рис. 8.18. Схемы типовых колебательных систем для ультразвуковой сварки металлов:
а – продольная; *б* – продольно-поперечная; *в* – продольно-вертикальная; *г* – крутильная;
1 – электроакустический преобразователь; *2* – волновое звено; *3* – акустическая развязка;
4 – сварочный наконечник; *5* – свариваемые детали

целом. Тангенциальные перемещения в плоскости деталь – деталь и вызываемые ими напряжения, действующие совместно с напряжениями сжатия от сварочной силы P (сложное напряженное состояние), локализуют интенсивную пластическую деформацию в малых объемах приповерхностных слоев. При этом значение нормальных сжимающих напряжений существенно ниже предела текучести $\sigma_т$ свариваемых материалов. Этот процесс сопровождается дроблением и механическим выносом оксидных пленок и других загрязнений. Пластическая деформация облегчается благодаря снижению предела текучести металла при пропускании через него ультразвуковых колебаний.

Промышленное применение. Ультразвуковую сварку применяют для соединения относительно тонких фольги, листов, проволок и др. Особенно предпочтителен этот процесс для соединения разнородных материалов. Области использования – микроэлектроника, производство полупроводниковых приборов, нагревателей бытовых холодильников, приборов тонкой механики и оптики, сращивание концов рулонов различных тонколистовых материалов (медь, алюминий, никель и их сплавы).

8.7.2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ МЕТОДА

Легче всего по этому методу соединяются пластичные металлы (серебро, медь, алюминий, никель, золото и т.п.) как между собой, так и с твердыми малопластичными материалами. С увеличением твердости свариваемость этим методом ухудшается. Металлические заготовки могут привариваться к стеклу, керамике, полупроводниковым материалам (кремний, германий). Успешно свариваются тугоплавкие металлы: вольфрам, ниобий, тантал, цирконий, молибден. Можно проводить сварку заготовок через прослойку из третьего металла, например, сталь со сталью через алюминий. Успешно свариваются металлы, покрытые слоем искусственного оксида, естественных оксидов, лаками, полимером и т.п.

При сварке металлов основным типом соединения является нахлесточное с различным конструктивным оформлением его элементов (рис. 8.19). Сварка может выполняться одной или несколькими точками, непрерывным швом, по замкнутому контуру. В отдельных случаях специальной предварительной формовкой конца проволочной заготовки осуществляются тавровые соединения проволоки с плоскостью. Возможна сварка одновременно нескольких заготовок (пакетом).

Диапазон свариваемых толщин металла ограничен верхним пределом. С повышением толщины заготовки необходимо использовать колебания большей амплитуды для компенсации потерь энергии в толще материала. Увеличение же амплитуды допустимо до определенного предела, связанного с опасностью появления усталостных трещин и образованием значительных вмятин от инструмента на поверхности заготовок. Практически осуществляется сварка плоских элементов толщиной от 3...4 мкм до 0,5...1 мм или диаметром 0,01...0,5 мм. Толщина второй детали, контактирующей с опорным элементом, может быть существенно больше. Известны случаи сварки при разнотолщинности ≥1 : 1000. Минимальная свариваемая толщина 3...4 мкм.

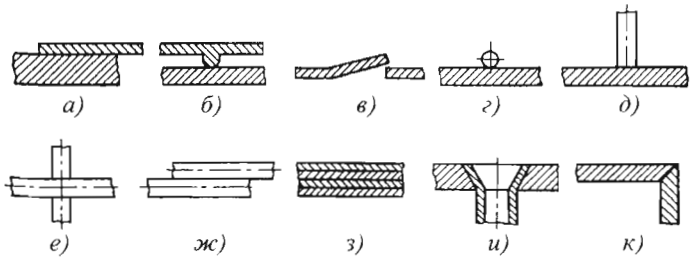


Рис. 8.19. Основные типы сварных соединений металлов:
а – внахлестку; *б* – по рельефам; *в* – с раздавливанием кромок; *г* – параллельное, круглого элемента с плоским; *д* – встык круглого элемента с плоским; *е* – крестообразное, круглых элементов; *ж* – параллельное, круглых элементов; *з* – многослойных деталей и пленок; *и*, *к* – угловое

Кратковременность пребывания при повышенных температурах позволяет получать высококачественное соединение разнородных материалов, склонных к образованию интерметаллидов. Свариваемый материал при сварке незначительно меняет свои свойства, не загрязняется посторонними примесями. Соединения обладают высокой химической однородностью. Применение ультразвуковой сварки создает хорошие гигиенические условия.

Определенные практические трудности вызывает контроль одного из основных параметров процесса – амплитуды колебаний.

При использовании метода следует учитывать опасность усталостного разрушения уже выполненных соединений в деталях. Заготовки во время сварки могут разворачиваться по отношению друг к другу. На поверхности свариваемых деталей остаются вмятины от инструмента. Сам инструмент имеет ограниченный срок службы из-за эрозии его рабочей поверхности. Материал детали приваривается в отдельных точках к инструменту, что и ведет к его износу. Ремонт сопряжен с определенными трудностями, так как инструмент – это элемент единой неразборной конструкции акустического узла, размеры и конфигурация которого строго рассчитаны на рабочую частоту.

8.7.3. ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ

8.7.3.1. ПОДГОТОВКА ПОВЕРХНОСТЕЙ

Метод ультразвуковой сварки не требует сложной предварительной подготовки. Для повышения стабильности качества соединения бывает целесообразно лишь обезжирить растворителем поверхности деталей. Процесс передачи энергии в свариваемые заготовки, определяющий кинетику сварки, протекает в непрерывно меняющихся условиях трения соединяемых деталей между собой и с инструментом.

8.7.3.2. ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА СВАРКИ

Основными параметрами процесса являются амплитуда A колебаний рабочей части инструмента, мкм; сжимающая статическая сила P, Н; время сварки t, с; частота колебаний f, кГц.

Значения параметров режима выбираются обычно экспериментально на основании обработки результатов механических испытаний серии образцов, сваренных при варьировании в определенных пределах одного из параметров и при фиксированных значениях остальных. Обычная последовательность подбора: $P - t - A$. Значения параметров ультразвуковой сварки лежат в таких пределах: P = 0,3...4000 Н (меньшее значение относится к случаю сварки малых толщин); A = 14...25 мкм, t = 0,1...4 с; f = 15...75 кГц.

При выборе параметров режима сварки для конкретного случая надо принимать во внимание следующее. При правильном ведении процесса соотношение сил трения в парах инструмент – деталь, деталь – деталь, деталь – опора должно быть таким, чтобы отсутствовало сколько-нибудь значительное проскальзывание инструмента и опоры по поверхности заготовок. В значительной степени условия трения могут регулироваться изменением статической сжимающей силы. При малой P инструмент проскальзывает по детали и сварка становится невозможной. Чрезмерное увеличение этого параметра приводит к значительным пластическим деформациям заготовок (вмятинам) и делает невозможным относительные сдвиговые смещения в плоскости деталь – деталь. Отсутствие же внешнего трения между поверхностями заготовок в начальный период не позволяет избавиться от поверхностных загрязнений, что является причиной некачественного соединения.

При увеличении толщины свариваемого материала и размера сварной точки значение силы сжатия должно возрастать. Пропорционально должна увеличиваться и амплитуда колебаний. Увеличение амплитуды колебаний и сжимающей силы требует большей подводимой к ультразвуковому инструменту электрической мощности. Передача сдвиговых деформаций через толщу металла заготовки к плоскости сварки сопровождается рассеянием энергии в материале, что, в конечном счете, сказывается на амплитуде относительных смещений деталь – деталь.

Поэтому с увеличением толщины заготовки необходимо назначать и более высокие значения амплитуд, причем тем больше, чем больше коэффициент внутреннего трения материала. Появление усталостных разрушений особенно характерно для наклепанного материала. В таких случаях может быть применен, если это возможно, предварительный отпуск заготовок, но наиболее эффективным путем остается снижение до определенного предела амплитуды колебаний.

Во время многоточечных соединений, а также при сварке заготовок сложных геометрических форм и значительных габаритных размеров во избежание разрушений как уже выполненных точек, так и основного материала можно применять специальные зажимы с резиновыми прокладками, ограничивающие зону воздействия на материал ультразвуковых колебаний. Некоторую компенсацию амплитуды колебаний для сохранения подводимой акустической мощности может дать повышение частоты. Такой прием тем целесообразнее, чем тоньше свариваемый материал. Однако переход на другую частоту возможен лишь при использовании оборудования, акустическая система которого рассчитана на эту частоту.

Длительность t процесса сварки является наименее критичным параметром и выбирается тем больше, чем больше толщина материала и его твердость и меньше подводимая к инструменту мощность. Процесс ультразвуковой сварки металла регламентируется по времени.

В случае использования схемы, сочетающей ультразвуковую сварку с нагревом от постороннего источника, необходимо выбрать параметры теплового импульса и определить момент его наложения. Оптимален для сварки пластичных металлов цикл с запаздыванием теплового импульса по отношению к моменту включения ультразвука. При относительно большой твердости материала заготовки целесообразно включать ультразвук после некоторого нагрева. Эта разновидность метода находит применение при производстве конструкций микроэлектроники.

8.7.4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ СВАРКИ

Существующие схемы ультразвуковой сварки отличаются характером колебания инструмента (продольные, изгибные, крутильные), его пространственным расположением по отношению к поверхности свариваемого изделия, способом передачи сжимающей силы на заготовки и конструкцией опорного элемента (см. рис. 8.19). Для точечной, контурной и шовной сварки металлов используются варианты с продольными и изгибными колебаниями. Воздействие ультразвуковых колебаний может сочетаться с местным импульсным нагревом заготовок от отдельного источника теплоты. При этом достигаются определенные технологические преимущества: возможность снижения амплитуды колебаний, силы и времени пропускания ультразвука. Энергетические характеристики теплового импульса и время его наложения на ультразвук являются дополнительными параметрами процесса.

8.7.5. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СВАРКИ

В состав установок для сварки металлов входят генератор электрических колебаний, акустический узел, механизм давления, аппаратура управления и контроля за процессом. Акустический узел включает в себя электромеханический преобразователь, волновод с резонирующими элементами, сварочный наконечник (инструмент), обеспечивающий непосредственную передачу энергии свариваемым заготовкам. Источниками механических колебаний являются электромеханические преобразователи, работа которых основана на использовании (чаще всего) магнитострикционного или (реже) пьезоэлектрического эффекта.

Материалами для преобразователей служат обычно пермендюр (К49Ф2, К65), реже чистый никель, альфер (Ю14, Ю12), ферриты. Применение феррита целесообразно в установках малой мощности (до 50 Вт). Все более широкое применение находят пьезокерамические преобразователи как наиболее эффективные, отличающиеся меньшими потерями. Используются конструкции преобразователей двухстержневого и реже одно- и трехстержневого типов. Обмотки возбуждения и подмагничивания располагаются непосредственно на стержнях. Во избежание перегрева предусматривается принудительное водяное охлаждение магнитострикторa, для чего он помещается в специальный бачок. Маломощные преобразователи имеют естественное воздушное охлаждение.

Передача колебательной энергии от электромеханического преобразователя к инструменту обеспечивается волноводом, который одновременно увеличивает амплитуду колебаний. В волноводах возбуждаются стоячие продольные волны. По широте диапазона резонансных частот выгодно выделяется экспоненциальный волновод.

В качестве источников питания ультразвуковых преобразователей, как правило, используются ультразвуковые генераторы универсального типа: УЗГ1-0,04/22, УЗГ11-0,1/22, УЗГ5-0,63/22, УЗГ5-1,6/22 и др. Специализированные генераторы могут выполняться с различными вариантами получения сигнала обратной связи для управления мощностью, подводимой к ультразвуковому преобразователю.

Разработан ряд серийно выпускаемых установок для ультразвуковой микросварки (нахлесточное соединение): ЭМ-425-А, УЗП-02, НПВ-2 и др. Разработано три типоразмера машин для сварки металлической фольги (табл. 8.3). На них можно сваривать фольгу из меди, никеля, алюминия, ниобия, титана и других металлов.

8.8. ДИФФУЗИОННАЯ СВАРКА

8.8.1. СУЩНОСТЬ МЕТОДА И ОСНОВНЫЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

Диффузионная сварка входит в группу способов сварки давлением, при которых соединение проходит за счет пластической деформации микронеровностей на поверхности свариваемых заготовок при температуре ниже температуры плавления. Отличительной особенностью является применение повышенных температур при сравнительно небольшой остаточной деформации. Ее технологическая характеристика была предложена Н.Ф. Казаковым и принята Международным институтом сварки в следующей формулировке: «Диффузионная сварка материалов в твердом состоянии – это способ получения неразъемного соединения, образовавшегося вследствие возникновения связей на атомарном уровне, появившихся в результате сближения контактных поверхностей за счет локальной пластической деформации при повышенной температуре, обеспечивающей взаимную диффузию в поверхностных слоях соединяемых материалов».

В практике диффузионной сварки известно применение двух технологических схем процесса, различающихся характером приложения нагрузки или напряжения, действующих в течение цикла. В одной из них используют постоянную нагрузку по величине ниже предела текучести (рис. 8.20, *а*). При этом процессы, развивающиеся в свариваемых материалах, аналогичны ползучести. Такую технологию называют *диффузионной сваркой по схеме свободного деформирования*. На практике подобная схема осуществима наиболее просто, поэтому очень широко распространена.

По другой схеме нагрузка и пластическая деформация обеспечиваются специальным устройством, перемещающимся в процессе сварки с контролируемой скоростью (см. рис. 8.20, *б*). Эту технологию называют *диффузионной сваркой по схеме принудительного деформирования* (ДСПД-процесс). Этот процесс осуществляют при напряжениях, как правило, превышающих предел текучести. Таким образом, скорость деформации $\dot{\varepsilon}$ задается приложенной нагрузкой P и условиями, в которых она действует: прежде всего температурой T и временем действия t.

Промышленное применение. Технологические возможности диффузионной сварки позволяют широко использовать этот процесс в приборостроительной и электронной промышленности при создании металлокерамических и катодных узлов, вакуум-плотных соединений из разнородных материалов, полупроводниковых приборов, при производстве штампов и т.п.

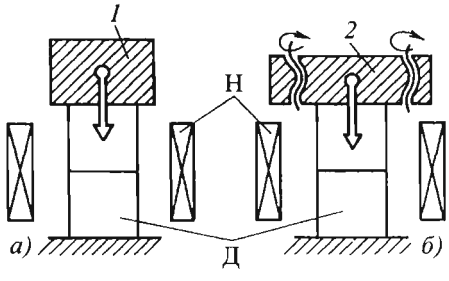


Рис. 8.20. Схема деформирования при диффузионной сварке:
1 – система нагружения;
2 – система деформирования;
Н – нагреватель; *Д* –детали

8.3. Технические характеристики машин для сварки металлической фольги

Параметр	МШУ-0,63	МШУ-1,6	МШУ-4
Мощность колебательной системы, кВт	0,63	1,6	4,0
Рабочая частота, кГц	22		18
Сила сжатия, Н	500	1500	2500
Толщина (по алюминию) свариваемого металла, мм	0,2	0,5	0,8

Диффузионная сварка находит применение для изготовления крупногабаритных заготовок деталей сложной формы, получение которых механической обработкой, методами обработки давлением или литьем невозможно или неэкономично. Особенно эффективно такое применение диффузионной сварки в опытном и мелкосерийном производстве.

Перспективно получение многослойных пустотелых конструкций типа панелей из титановых или алюминиевых сплавов с наполнителем сложной формы (гофры, соты, ребра и др.) методом совмещения диффузионной сварки и формообразования в режиме сверхпластичности.

8.8.2. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ РЕЖИМА

При сварке по схеме свободного деформирования основными параметрами процесса являются температура нагрева заготовок T, °С; сжимающее давление p, МПа; время сварки t, мин; давление в вакуумной камере $p_к$, Па; в случае проведения процесса в другой среде – характеристика этой среды с позиции протекания окислительно-восстановительных реакций (тип и химический состав среды, точка росы, парциальное давление кислорода). Кроме того, к важным параметрам процесса относятся подготовка поверхности под сварку: чистота поверхности, ее шероховатость и волнистость.

При ДСПД-процессе главными параметрами являются: температура T, скорость роста нагрузки P, скорость деформирования ε, время деформирования t (или степень накопленной деформации $\varepsilon_{св}$), время выдержки в режиме релаксации $t_{рел}$. Сопротивление деформированию P в этом случае – зависимый параметр. Его величина, а также $\varepsilon_{св}$ регистрируются непосредственно в течение всего цикла сварки. Оба параметра могут быть использованы для контроля и управления качеством соединения.

Диффузионная сварка может проводиться в вакууме, нейтральных и восстановительных газах, жидких средах. Вакуум создает наилучшие условия для защиты нагретого металла и очистки свариваемых поверхностей от загрязнения. Однако в отдельных случаях особенности материала могут налагать определенные ограничения на применение вакуума или делать его вовсе невозможным. В большинстве случаев процесс диффузионной сварки ведется при давлении в вакуумной камере $p_к = 10^{-2}$... 10^{-3} Па. Использование более высокого вакуума оправдано, когда необходимо обеспечить высокую размерную точность изделия (уменьшение остаточной деформации заготовок) за счет соответствующего снижения температуры, давления и времени. Тугоплавкие металлы удается таким образом сваривать при температурах ниже порога рекристаллизации и тем самым избегать охрупчивания материала.

На ход диффузионной сварки существенно влияет парциальный состав остаточных газов в камере. Попадание в рабочую зону паров вакуумного масла приводит в увеличению парциальных давлений газов-окислителей (CO_2, H_2O) по сравнению с газами-восстановителями (CO, H_2). Специальные меры (азотные ловушки, использование безмасляных средств откачки) улучшают условия ведения диффузионной сварки, особенно при пониженных температурах.

Широко применяют в качестве защитных сред инертные (аргон, гелий) и активные газы (водород, реже углекислый газ). Состав защитного газа подбирают исходя в первую очередь из химической активности системы металл – газ в условиях сварки.

Состав соляных ванн для диффузионной сварки определяется необходимой температурой, °С, например 850...870 при использовании расплава NaCl, 1000...1150 для $BaCl_2$, 700... 950 для смеси из 70 % $BaCl_2$ + 30 % KCl.

Подготовка заготовок в общем случае может складываться из механической обработки, очистки от загрязнений и нанесения подслоев. Механическая обработка обеспечивает: возможно более плотное начальное прилегание свариваемых заготовок; удаление с поверхности загрязненного слоя; повышение размерной точности готового изделия; возможность снижения температуры, давления и времени сварки с улучшением микрогеометрии поверхности.

С повышением чистоты обработки облегчается развитие второй стадии процесса.

Очистка поверхностей от загрязнений (следов жиров, масла, полировальной пасты) может проводиться растворителями (ацетон, спирт, четыреххлористый углерод и др.), путем нагрева и выдержки в вакуумной камере. В отдельных случаях применяют отжиг заготовок в среде водорода. Положительные результаты получают при обработке в растворах кислот H_2SO_4, HCl с последующими промывкой и сушкой. При сварке изделий из некоторых сортов керамики после механической обработки

заготовки отжигают с целью «залечивания» поверхностных дефектов. Для этого же проводят травление стекла в плавиковой кислоте.

8.8.3. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫБОРУ РЕЖИМА

Для выбора температуры, давления и времени нет строгих рекомендаций. Высококачественные соединения можно получать, изменяя в определенных пределах значения каждого из этих параметров с соответствующей корректировкой других. При выборе их значений необходимо учитывать особенности свариваемых материалов и требования к изделию: возможность разупрочнения из-за роста зерна, ограничения по температуре нагрева и деформации изделия и т.п. Совместное влияние T и p на прочность соединения хорошо иллюстрируется объемными диаграммами (рис. 8.21).

Температуру сварки обычно назначают в пределах $(0{,}5\ldots0{,}8)T_{пл}$, для жаропрочных сплавов – несколько выше. При соединении разнородных материалов расчет ведется по температуре плавления наиболее легкоплавкого из них. В случае появления эвтектики температуру сварки выбирают ниже температуры ее плавления.

Скорости нагрева и охлаждения зависят от источника тепла и в большинстве случаев их не регламентируют. При сварке разнородных сочетаний материалов, термический коэффициент линейного расширения которых различается более чем на $2 \cdot 10^{-6}$ град$^{-1}$, скорость охлаждения целесообразно уменьшать до 10…15 °С/мин.

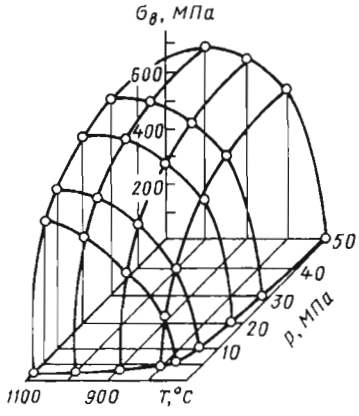


Рис. 8.21. Влияние на прочность соединения температуры и удельного давления

Разгерметизацию камеры при сварке деталей из черных металлов рекомендуют проводить при температуре ≤120 °С, а для цветных и активных металлов – при 60 °С.

Время выдержки в зависимости от T и p, допустимой остаточной деформации, чистоты обработки контактных поверхностей и деформационной способности материала может колебаться от нескольких секунд до нескольких часов (чаще 5…10 мин).

Давление выбирают в диапазоне 0,8…0,9 предела текучести при температуре сварки. Для известных конструкционных материалов оно может изменяться в диапазоне 1…50 МПа. Для сварки тугоплавких и твердых материалов эти значения могут быть в несколько раз выше.

Ориентировочные режимы сварки представлены в табл. 8.4.

8.4. Ориентировочные режимы сварки

Сварочный материал	T, °С	p, МПа	$T_{св}$, мин
Никель НП1 с никелем НП1	1000	15,0	10
Медь МВ с медью МВ	850...900	7,0	20
Сплав АМц со сплавом АМц	590...600	5,0	
Титан ВТ1 с алюминием АВ	560	12,0	10
Титан ВТ1 с титаном ВТ1	800	7,0	6
Молибден МЧ с молибденом МЧ	1900	10,0	20
Сталь 12Х18Н10Т со сталью 12Х18Н10Т	1100	10,0	15
ХН75МБТЮ (ЭИ602) с ХН75МБТЮ (ЭИ602)	1150...1175	20...30	6

Примечание. Во всех случаях $p_{ост} = 1 \cdot 10^{-2}$ Па.

8.8.4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРОЦЕССА

Диффузионная сварка позволяет сваривать:

– большинство конструкционных материалов на металлической основе, ферриты, керамику, стекла, кварц, сапфир, графит, полупроводниковые материалы в однородном и разнородных сочетаниях;

– пористые, металлокерамические, композиционные материалы без нарушения их текстуры и ухудшения служебных свойств;

– при использовании соответствующих барьерных покрытий и проставок – разнородные металлы и сплавы, склонные к образованию хрупких фаз, тугоплавкие металлы (вольфрам, ниобий, тантал и др.) при температурах ниже порога рекристаллизации.

Диффузионная сварка дает возможность также избежать охрупчивания металла. С использованием промежуточных проставок можно также соединять материалы с резко отличными значениями коэффициентов термического расширения.

Диффузионной сваркой можно выполнять все типы соединений при самом разнообразном конструктивном их оформлении: встык, вскос, соединять пересекающиеся стержневые элементы между собой и с плоскими или криволинейными поверхностями; сваривать заготовки любых сечений; при применении местного нагрева и вакуума – соединять заготовки неограниченной длины; сваривать пленки, фольгу толщиной в несколько микрометров и достаточно массивные детали; осуществлять сварку при практически любой разнотолщинности заготовки.

После диффузионной сварки не нужна механическая обработка сварного шва, получаемые изделия обладают высокой размерной точностью (остаточные деформации в пределах 0,1…6 %); швы имеют высокие показатели механической прочности и пластичности на уровне основного материала.

При использовании этого метода создаются хорошие гигиенические условия на производстве.

К недостаткам метода следует отнести значительную длительность процесса, сложность оборудования, определенные трудности с загрузкой заготовок и выгрузкой готовых изделий из рабочей камеры при организации непрерывного процесса изготовления сварных изделий, требования достаточно высокой точности сборки и чистоты обработки свариваемых поверхностей, необходимость контроля температуры заготовки в зоне шва. Высокие требования к качеству контактных поверхностей удорожают процесс в целом.

8.8.5. РАЗНОВИДНОСТИ СПОСОБОВ СВАРКИ

Диффузионная сварка с промежуточными прокладками. Промежуточные прокладки могут быть расплавляющимися и нерасплавляющимися. Подслои на свариваемые поверхности наносят с целью:

– увеличения прочности сцепления (сваривания);

– предотвращения появления нежелательных фаз при сварке разнородных материалов (барьерные подслои);

– интенсификации стадии объемного взаимодействия;

– облегчения установления физического контакта по всей свариваемой поверхности за счет использования подслоев из пластичных материалов;

– снижения температуры и давления при сварке и, значит, уменьшения остаточных деформаций.

В зависимости от конкретной задачи выбирают материал подслоя. Чаще всего это никель, медь, серебро, золото. Толщина подслоя порядка 2…7 мкм.

Для предотвращения появления нежелательных фаз (интерметаллидов, карбидов и т.д.) или во избежание обеднения одного из свариваемых материалов каким-либо легирующим элементом наносятся более толстые покрытия, служащие барьером. Эту задачу могут выполнять и прокладки из фольги.

Материал барьерной прокладки должен выбираться так, чтобы коэффициент его диффузии в основной материал был выше, чем для элементов основного металла в прокладку.

В случае сварки материалов на основе оксидов (керамики, стекла) наносимый металлический слой подвергают термической обработке с целью его окисления или облегчения диффузии в материал заготовки. При сварке кварцевого стекла с медью на стекло наносят слой меди с последующим ее окислением при температуре 800 °С в течение 3…5 мин до закиси. При сварке меди с оптической керамикой на основе сульфидов цинка применяют предварительное сульфидирование металла для повышения прочности сцепления.

В качестве расплавляющихся прокладок наиболее часто используют высокотемпературные припои. Их применение позволяет уменьшить давление сжатия и пластические деформации, облегчает удаление оксидных пленок, повышает эксплуатационные свойства соединений.

Диффузионная сварка с применением ударной нагрузки. Для предотвращения интерметаллидов в зоне сварного соединения помимо использования соответствующих промежуточных прокладок эффективен прием заметного сокращения времени сварки. На практике этот прием реализован так называемой «ударной сваркой в вакууме». Суть способа в том, что к локально нагретым зонам контакта детали «прикладывается» одиночный импульс силы со скоростью 1...30 м/с. В свариваемых деталях под воздействием динамической нагрузки происходят локальная пластическая деформация в зоне контакта и образование сварного соединения. Сварное соединение образуется за 1...10 мс.

8.8.6. ОБОРУДОВАНИЕ

Наиболее широко применяют сварочные диффузионные вакуумные установки. В состав этих установок в общем случае входят рабочая вакуумная камера, механизм для создания сварочного давления, источник нагрева, вакуумная система, аппаратура управления и контроля. Конкретные установки (П-114, П-115, ДФ-101, УСДВ-630, ДСВ-901, УДС-3М и др.) для диффузионной сварки могут иметь различное конструктивное оформление отдельных функциональных узлов и систем.

Рабочая вакуумная камера, в которой размещаются свариваемое изделие, нагреватели, механизм давления, выполняется обычно цилиндрической или прямоугольной формы из коррозионно-стойкой стали. Стенки водоохлаждаемые. Свариваемое изделие может располагаться на специальной опоре или в приспособлении. В большинстве случаев установка имеет одну камеру. Для увеличения производительности могут предусматриваться несколько камер с целью получения непрерывной загрузки и выгрузки заготовок и изделий (камеры шлюзования).

Необходимая сварочная сила создается гидравлическим, пневматическим или механическим устройством. В отдельных случаях сжатие заготовок обеспечивается специальными приспособлениями, принцип действия которых основан на различии коэффициентов линейного расширения материалов свариваемых заготовок и охватывающих их элементов приспособления. Такие приспособления позволяют вести сварку в серийно выпускаемых вакуумных и водородных печах. Возможно использование «мягких» оболочек-камер. Сжатие заготовок происходит за счет перепада давлений внешней газовой среды и вакуумированного пространства. В большинстве же случаев в установках для диффузионной сварки используются гидравлические и механические системы.

Для нагрева заготовок наибольшее распространение получили индукционный, радиационный и контактный способы. Источником питания являются генераторы высокой частоты и трансформаторы. Нагрев током высокой частоты (ТВЧ) наиболее универсален и позволяет нагревать заготовки в разведенном состоянии (в отличие от контактного метода), что важно для интенсификации процесса очистки свариваемых поверхностей. Однако этот метод неприменим при сварке диэлектрических материалов: керамики, кварца, стекла. Для нагрева годятся тлеющий разряд, расфокусированный электронный луч, световое излучение.

8.9. ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ СВАРКА

8.9.1. СУЩНОСТЬ МЕТОДА И ОСНОВНЫЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

Высокочастотная сварка – это способ сварки давлением, при котором кромки деталей нагреваются ТВЧ до температуры оплавления.

В основе эффекта нагрева при высокочастотной сварке металлов лежит закон электромагнитной индукции. В массе материала, имеющего электронную проводимость (металл, графит), в переменном магнитном поле наводится ЭДС, изменяющаяся с той же частотой, что и внешнее магнитное поле. В результате появляются индукционные токи (вихревые токи, или токи Фуко), которые и вызывают нагрев.

Идея высокочастотного нагрева металла в технологических целях, в частности при сварке, по существу, сводится к задаче концентрации магнитного поля в малом объеме материала и, как следствие, к повышению плотности индуцируемых токов в месте желаемого нагрева.

Этот ток может подводиться к свариваемым деталям двумя способами:

– при помощи проводников (кондуктора), подключающих свариваемые детали к источнику ТВЧ (*кондуктивный* способ подачи энергии);

– индуктированием в свариваемых деталях ТВЧ с помощью токопроводящего витка (индуктора), подключенного к источнику ТВЧ (*индукционный* способ подачи энергии).

Нагрев свариваемых поверхностей при высокочастотной сварке обеспечивается за счет использования основных эффектов, связанных с прохождением ТВЧ по металлическим проводникам. К этим основным эффектам относятся поверхностный эффект и эффект близости.

Поверхностный эффект проявляется в неравномерном распределении плотности тока по сечению проводника в силу повышенного индуктивного сопротивления его центральной зоны, охватываемой полным магнитным потоком, в отличие от периферийной части, где индуцируемая ЭДС определяется только магнитным полем, расположенным вне проводника. В результате ток течет по тонкому наружному слою. Этот эффект оценивается глубиной Δ проникновения тока – толщиной слоя, на котором плотность тока уменьшается в e раз ($e \approx 2{,}72$) по сравнению с плотностью тока на поверхности. Глубина проникновения тока, м, определяется выражением

$$\Delta = \sqrt{\frac{\rho}{\mu_0 \mu \pi f}},$$

где ρ – удельное сопротивление материала, Ом · м; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ – магнитная проницаемость вакуума, Гн/м; μ – относительная магнитная проницаемость материала; f – частота изменения тока, Гц. Если глубина проникновения тока намного меньше радиуса проводника, то это означает сильное проявление поверхностного эффекта (табл. 8.5). Поверхностный эффект позволяет получить высокую плотность тока в поверхностных слоях, сконцентрировать в них выделение энергии и обеспечить быстрый нагрев металла.

Эффект близости заключается в перераспределении линий плотности тока, протекающих в соседних проводниках, вследствие их взаимного влияния.

Он способствует еще большей концентрации энергии в поверхностных слоях нагреваемого металла и проявляется тем сильнее, чем меньше расстояние между проводниками и выше частота тока.

Большое влияние на распределение тока в проводнике оказывает магнитопровод. Ферромагнитные массы, обладающие большим удельным сопротивлением (ферриты, электротехническое расслоенное железо) и расположенные вблизи элемента (медного проводника), по которому протекает ток, перераспределяют магнитный поток в пространстве и, как следствие, изменяют индуктивное сопротивление части проводника. На различных его участках (рис. 8.22) в результате этого ток распределяется неравномерно. Данный эффект усиливается с повышением частоты. Применение П-образных магнитопроводов, надетых на проводник, заставляет ток концентрироваться на внешней (противоположной дну паза) стороне проводника. Этим приемом часто пользуются для концентрации нагрева в нужных местах и повышения эффективности нагревательного устройства.

8.5. Глубина проникновения тока в неферромагнитные материалы

Материал	Температура, °С	$\rho \cdot 10^8$, Ом · м	Глубина проникновения, мм, при частоте тока, кГц				
			10	70	440	1760	5280
Сталь	1000...1300	130,00	5,57	2,10	0,86	0,32	0,20
Медь	20	1,84	0,67	0,26	0,10	0,04	0,025
Алюминий		2,95	0,96	0,30	0,13	0,055	0,032
Латунь		7,0	1,35	0,50	0,20	0,07	0,046
Молибден		5,80	1,21	0,45	0,183	0,062	0,043
Титан		175,0	6,65	2,50	0,94	0,30	0,20
Серебро		1,65	0,64	0,247	0,10	0,029	0,020

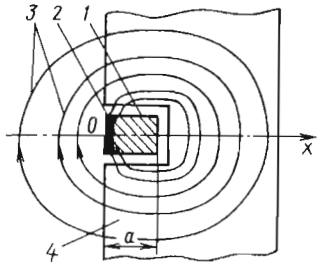


Рис. 8.22. Влияние магнитопровода на распределение тока в проводнике:
1 – проводник; *2* – ТВЧ;
3 – магнитные силовые линии; *4* – магнитопровод

Использование перечисленных электрофизических эффектов и закономерностей позволяет добиваться резко локализованного выделения теплоты при высокочастотном нагреве на соединяемых поверхностях.

Промышленное применение высокочастотной сварки связано главным образом с трубным производством, где этот процесс во многих случаях заменяет контактную и дуговую сварку. Высокочастотной сваркой изготовляют прямошовные трубы (из сталей, алюминиевых сплавов, латуни и др.) малого и среднего диаметров (12...150 мм) при толщине стенки 0,8...6 мм, а также большого диаметра (400...600 мм) при толщине стенки до 8 мм. Наряду с основными их потребителями (машиностроение и строительные конструкции) они находят все большее применение в нефте- и газодобыче. Так, в США производство сварных труб для этих целей достигло 30 % от общего выпуска; крупные мощности по производству обсадных и насосно-компрессорных труб введены в Японии. В ряде стран применяется высокочастотная сварка при производстве прямошовных труб большого (450...1220 мм) диаметра с толщиной стенки до 16 мм из листов длиной 12 м.

Высокочастотная сварка получила распространение для изготовления биметаллических полос толщиной до 14 мм и металлических оболочек электрических кабелей.

Индукционная сварка находит менее широкое применение (сварка толстостенных труб котлоагрегатов, корпусов железоникелевых аккумуляторов и т.п.)

8.9.2. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ РЕЖИМА

Основными параметрами, определяющими нагрев при высокочастотной сварке, являются индуктирующий (сварочный) ток, его частота, подводимая колебательная мощность; дополнительными – факторы, влияющие на эффективность передачи колебательной энергии в металл (геометрические размеры и конструкция индуктора, концентратора магнитного поля, зазор между индуктором и нагреваемым изделием, угол схождения кромок, расстояние от токоподвода до места сварки и т.д.). В номенклатуру параметров, определяющих режим сварки, могут также входить сварочное давление (для соответствующих схем сварки), скорость сварки и время нагрева.

8.9.3. РАЗНОВИДНОСТИ СПОСОБОВ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ СВАРКИ

Существует большое разнообразие схем высокочастотной сварки. Среди них можно выделить следующие основные технологические схемы (рис. 8.23).

Индукционный подвод тока наиболее распространен при высокочастотной сварке продольных швов труб, замкнутых профилей и изделий аналогичной формы. В зависимости от диаметра свариваемых труб применяются либо охватывающие (см. рис. 8.23, *б*), либо внутренние (см. рис. 8.23, *в*) индукторы. При сварке по

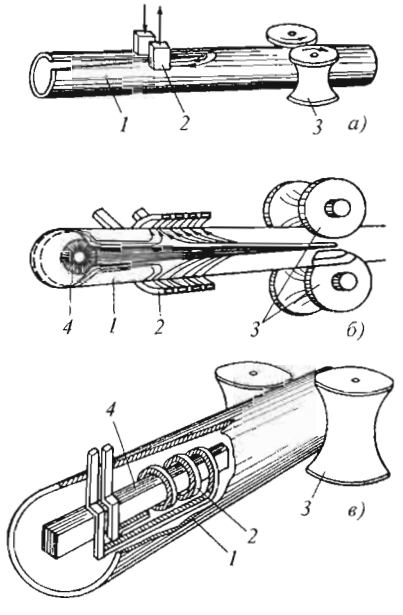


Рис. 8.23. Системы подвода тока при высокочастотной сварке труб:
а – контактный подвод; *б* – охватывающий индуктор;
в – внутренний индуктор; *1* – свариваемая труба;
2 – токоподвод (кондуктор или индуктор);
3 – шовообжимные валки; *4* – магнитопровод

схеме (см. рис. 8.23, *б*) магнитный поток индуктора индуцирует в металле изделия ЭДС. Это приводит к появлению тока, протекающего по периметру заготовки. У зазора (открытая щель) он отклоняется к точке схождения кромок.

Таким образом, ток течет по периметру сечения трубы, и при этом плотность его невелика (паразитный ток), а также вдоль кромок к «очагу» сварки (полезный ток). Благодаря двум эффектам – близости и поверхностного – достигается концентрация энергии (большие плотности тока) на узких участках кромок заготовок. В месте их контакта, в вершине угла, металл доводится до плавления. Для повышения эффективности нагрева внутрь кольцевого контура (в трубную заготовку) вводится ферромагнитная масса – ферритовый стержень.

Реализация этой схемы возможна при высоких частотах, что и определило ее название: радиочастотная. Сварка по этой схеме применяется для изделий, имеющих замкнутое поперечное сечение. Она целесообразна для непрерывной последовательной шовной сварки труб.

С увеличением диаметра труб эффективность охватывающих индукторов резко снижается, наиболее эффективным оказался подвод тока с помощью внутренних индукторов (см. рис. 8.23, *в*) или совмещенной системы, использующей одновременно как охватывающие, так и внутренние индукторы. Основной эффект от применения внутренних индукторов связан с возможностью уменьшения потерь в теле трубной заготовки.

Кондуктивный токоподвод при непрерывной высокочастотной сварке (см. рис. 8.23, *а*) применяется чаще всего при производстве электросварных труб. Эта схема позволяет существенно расширить номенклатуру свариваемых изделий, более экономно расходовать энергию, но при этом приходится считаться с ограниченным ресурсом токоподводов. Износостойкость контактов и надежность систем со скользящими контактами зависят от ряда факторов, важнейшими из которых являются материал контактов, сила прижима, условия охлаждения, величина тока.

Обе эти схемы по сути процесса сварки аналогичны стыковой контактной сварке оплавлением.

Стыковая индукционная сварка с охватывающим индуктором (рис. 8.24) соответствует газопрессовой сварке или стыковой контактной сопротивлением. Стыковая индукционная сварка с линейным индуктором возможна для непрерывной шовной сварки труб и изделий аналогичного профиля, но ограниченной длины, соответствующей размеру индуктора. Имеющийся зазор между индуктором и изделием позволяет сваривать горячекатаный материал без специальной обработки поверхности и торцов заготовки.

Высокочастотная сварка металлических изделий по отбортованным кромкам. Суть способа сварки плавлением по отбортованным кромкам (рис. 8.25) заключается в том, что через сварочный индуктор, индуктирующий провод которого повторяет контур свариваемых кромок, пропускается ТВЧ, индуктирующий в кромках сварочный ток.

8.9.4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ

Принципиальных причин для ограничения номенклатуры свариваемых материалов нет. Возможно соединение разнородных материалов.

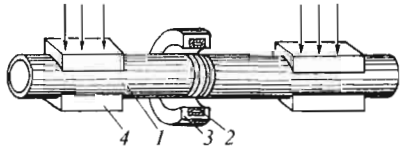


Рис. 8.24. Схема стыковой высокочастотной сварки труб:
1 – свариваемая труба; *2* – индуктор; *3* – магнитопровод; *4* – зажимы для фиксации свариваемых труб и создания осадки

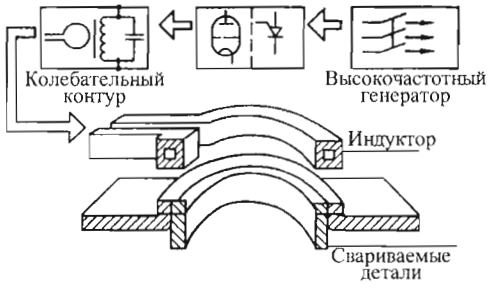


Рис. 8.25. Схема процесса высокочастотной сварки плавлением по отбортованным кромкам

Из-за быстрого нагрева и охлаждения металла в большинстве случаев не происходит существенных структурных изменений в шве и околошовной зоне. Скорость нагрева (8...150) 10^3 °С/с. Появляющиеся при сварке высокоуглеродистых и низколегированных сталей закалочные структуры могут быть устранены термообработкой. При сварке заготовок толщиной 1...3 мм на частоте 440 кГц ширина зоны нагрева порядка 1,5...2 мм.

Процесс можно вести в любой нейтральной или активной газовой среде, вакууме, с применением жидких флюсов. Для местной защиты используются аргон, природный газ (при неполном сгорании которого образуются H_2, CO, CO_2), смесь CO_2 с ацетиленом, раствор нитроклетчатки в метиловом спирте, наносимый на поверхность заготовки, и другие составы.

Скорость радиочастотной сварки доходит до 200 м/мин, но это не предел. Основные трудности повышения скорости связаны главным образом с конструкцией стана. Удельная мощность при сварке достигает 10 кВт/см^2. Время нагрева до температур плавления может составлять сотые доли секунды.

При организации непрерывной сварки подготовительно-заключительное время в расчете на единицу длины шва становится малым. Производительность при сварке цветных и редких металлов этим методом в 20–30 раз выше сварки плавлением или контактной.

Более локализованный нагрев требует меньших мощностей сварочных источников по сравнению с другими методами. Так, при контактной сварке труб с толщиной стенки 2... 3,5 мм потребляется мощность 500...650 кВт, а при радиочастотной 100...200 кВт.

При контактном токоподводе снижаются требования к чистоте поверхности заготовок, а при индуктивном способе энергии можно сваривать горячекатаный материал без предварительного травления – в состоянии поставки.

Высокочастотной сваркой можно выполнять на листовых материалах стыковые, косостыковые, нахлесточные соединения при ограниченной ширине нахлестки; тавровые, стыковые по отбортовке; на элементах компактного сечения (стержни, полосы и т.д.) – стыковые, нахлесточные.

Радиочастотной сваркой соединяют элементы толщиной 0,8...14 мм. Дальнейшее увеличение этого размера приводит к значительной неравномерности нагрева по толщине заготовки, что требует увеличения длительности нагрева, отчего возрастает ширина нагретой зоны. Сваривают трубы малого и среднего диаметров (12...150 мм при толщине стенки 0,8...6 мм), большого диаметра (400...600 мм при толщине листа 4...8 мм), спиралешовные (диаметром до 1000 мм), газопроводные (диаметром до 1420 мм), оребренные трубы, биметаллические ленты и проволоку, незамкнутые профили при таком соотношении толщин и размеров полос, которые невозможно получить методами прокатки или прессования в силу специфики свойств материала.

При сварке трубы большое значение имеет отношение толщины стенки к ее диаметру. Оно обычно составляет 1 : 10...1 : 50.

Процесс идет без разбрызгивания металла. Получаемый грат имеет более выигрышную овальную форму в отличие от грата при сварке сопротивлением, при которой он прерывистый, с наличием небольших кратеров – очагов будущей коррозии. Высота грата меньше, имеет тенденцию к снижению с ростом скорости сварки. Шов характеризуется высокой механической прочностью и стабильностью качества.

При переходе от контактной сварки к радиочастотной количество разрушений по шву при гидроиспытаниях уменьшалось в 10–15 раз. Термообработкой добиваются равнопрочности соединения, улучшения пластических и технологических свойств (угол загиба 150...180°).

Однако следует иметь в виду, что, как правило, при непрерывно-последовательной высокочастотной сварке начало и конец шва оказываются бракованными (непровар) на значительной длине. Процесс требует проведения мероприятий по подавлению радиопомех. Для индуктора необходима экранировка в случае, если напряженность электрического поля превышает 5 В/м (допускается кратковременное воздействие 10 В/м). Номенклатура изделий сильно ограничена спецификой организации процесса нагрева.

8.9.5. ТЕХНОЛОГИЯ

Технология сварки включает в себя те же операции, что и контактная стыковая сварка. Однако при непрерывной высокочастотной сварке добавляются операция обрезки ленты-заготовки по ширине, пристыковка очередной бухты, зачистка поперечного шва, формовка заготовки, удаление грата, резка изделия на мерные куски складского размера.

Равнопрочное соединение можно получить в достаточно широком интервале пара-

метров. При радиочастотной сварке они находятся в следующих пределах: сварочный ток I = 100...2000 А, мощность P = 25...280 кВт, скорость сварки v = 10...120 м/мин для стали и 8...80 м/мин для цветных металлов, f = 440 кГц. При индукционной сварке I = 30...200 кА, P = 100...2000 кВт, f = 50...400 Гц, сварочное давление 20...60 МПа. Эти режимы при сварке стали обеспечивают температуру 1360...1420 °С.

Для обеспечения требуемого сварочного давления, например при сварке труб, необходимо выдержать допуски на ширину и толщину заготовки соответственно – 0,2...– 0,3 и – 0,07...– 0,12 мм для толщины 1...2,5 мм.

Значения этих параметров для каждого конкретного случая выбираются с учетом всего комплекса факторов.

При малой толщине заготовки угол схождения кромок 1,5...2°. При уменьшении этого угла процесс становится неустойчивым; при сварке больших толщин данный угол 4...5°.

Радиочастотная сварка может вестись в трех режимах.

1. Температура кромок при сварке стали 1300...1400 °С. В точке касания материал дополнительно нагревается, но не плавится. При осадке пластическая деформация обеспечивает удаление загрязнения. Удельное давление порядка 50 МПа. Грат имеет высоту 0,3...0,8 мм и овальный профиль сечения.

2. Кромки при подходе к точке схождения нагреваются до температур, близких к $T_{пл}$, и в зоне контакта расплавляются. При осадке жидкий металл удаляется вместе с оксидами. Жидкостная прослойка выполняет защитную роль. Сварочное давление 20...30 МПа. Грат представляет собой непрерывную строчку застывшего металла.

3. Кромки оплавляются, и в месте контакта сильно перегревается расплав, который под действием электромагнитных сил выбрасывается вместе с оксидами из зоны шва. Оставшийся на кромках жидкий металл выдавливается аналогично предыдущему варианту. Давление 20...30 МПа. В грате имеются капли застывшего металла.

Низкоуглеродистые стали целесообразно сваривать по первому и второму режимам, коррозионно-стойкие стали, алюминий, медь, латунь – по третьему (с соответствующей корректировкой температур), так как на поверхности есть трудноудаляемые тугоплавкие оксиды.

Выбор частоты является центральным моментом определения режима. Частота не может быть связана с каким-либо одним фактором или условием сварки. На ее выбор влияют теплофизические, магнитные, электрические свойства свариваемого материала, наличие оксидов, возможные фазовые превращения в нем, толщина металла, размеры поперечного контура заготовки, предельная мощность источника, удобство канализации высокочастотной энергии, необходимость экранирования сварочных устройств. С учетом всего комплекса требований и условий чаще всего используют частоту 440 кГц при работе с заготовками толщиной 0,8...14 мм.

При сварке трубы критериями выбора частоты являются также ее диаметр и толщина стенки, что связано с глубиной проникновения тока.

Выбор частоты при индукционной сварке труб необходимо связывать с гарантированным прогревом кромок на всю толщину. При этом должно соблюдаться соотношение $0,3 < (\delta/\Delta_{ср}) < 0,6$, где $\Delta_{ср}$ – глубина проникновения тока выбранной частоты в сталь при температуре выше точки Кюри.

Ширина зоны нагрева всегда должна быть несколько больше осадки при этом способе сварки. Для последнего чаще всего используют машинные генераторы с рабочей частотой 8 и 2,5 кГц. Есть критическая скорость, ниже которой процесс становится неустойчивым. Скорость сварки при индукционном токоподводе меньше, чем при контактном, и не зависит от размера заготовки за пределами рабочей зоны (диаметр трубной заготовки на нее не влияет). Скорость сварки заготовок из коррозионно-стойкой стали, алюминия, меди на 15...20 % ниже, чем из малоуглеродистой стали.

При сварке заготовок большой толщины их концы скашивают под углом 42...70°, а сварочные усилия прикладывают нормально к их поверхностям. Угол схождения кромок порядка 5...6°. Расстояние от места токоподвода до вершины угла 120...200 мм.

При сварке встык сплошных компактных сечений необходим равномерный нагрев по площади торцов, чему мешает скин-эффект. Температура выравнивается за счет теплопроводности, а это ведет к увеличению длительности процесса и протяженности зоны нагрева вдоль заготовки. Поэтому ограничивается предельный диаметр заготовки или ее толщина

(~30 мм). С увеличением сечения следует снижать и частоту колебаний [при диаметре или толщине заготовки <15 и 15...30 мм соответственно 70 и 8 кГц].

8.9.6. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ СВАРКИ

Оборудование для высокочастотной сварки по характеру производства является мелкосерийным и единичным. Оно состоит из источника питания, элементов для подвода тока к свариваемому изделию, механических устройств для формирования, фиксации, перемещения и обжатия изделий в процессе сварки. При частоте 8 и 10 кГц источниками питания являются электромашинные преобразователи, состоящие из двигателя и индукторного генератора, соединенных общим валом, и инверторы.

При использовании частот 66, 220, 440 и 1760 кГц в качестве источников питания применяют ламповые генераторы, в которых ток промышленной частоты с помощью выпрямителей, трехэлектродных вакуумных ламп и резонансных колебательных контуров преобразуется в ТВЧ.

В специализированных установках кроме перечисленных могут быть дополнительные устройства и механизмы различного назначения: для удаления грата, формовки заготовок и т.д. Примером высокочастотных установок для непрерывной сварки металлов являются ВЧС-160/0,44, ВЧС-250/0,44, ВЧС-1000/0,44 и др.

Основная часть индуктора – индуктирующий провод. Он выполняется из медных трубок прямоугольного сечения размером 10 × 6 × 1 и 17 × 10 × 1,5 мм. Внутренний размер охватывающего индуктора такой, чтобы зазор с заготовкой был 2,5...9 мм. Индукторы, как правило, имеют один, реже несколько витков. Расстояние между витками берется минимальным, при котором еще нет опасности пробоя (2...4 мм). В стыковой сварке могут использоваться разъемные индукторы. Для повышения КПД индуктирующий провод может быть окружен П-образным магнитопроводом, набранным из тонких пластин электротехнической стали (трансформаторное железо Э-44 для частот 8...10 кГц) или из феррита (НН-400 или НМ-2000 для радиочастотной сварки). При сварке труб внутрь заготовок вводится стержень, который набирается из ферритовых колец на медной трубке. Максимально возможный диаметр ферритового стержня определяет и наименьший размер свариваемой трубы. Выбор длины стержня зависит от диаметра и толщины стенки трубы. Зазор между стержнями и заготовкой 1...7 мм.

В случае контактного подвода энергии рабочая трущаяся часть выполняется из износостойкого материала (вольфрам, молибден, порошкообразный композит вольфрам – серебро или молибден – серебро). Рабочая площадь (2...4) (6...15) мм^2 при высоте h = 4 мм.

Токоподводы и индукторы имеют водяное охлаждение и электрически разобщены с механической частью установки. Плотность тока в индукторе порядка 500 А/мм^2. Обязательно внутреннее и наружное охлаждение ферритового стержня.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Голованенко С.А.** Сварка прокаткой биметаллов. М.: Металлургия, 1977. 160 с.

2. **Дубин А.А.** Магнитно-импульсная сварка металлов. М.: Металлургия, 1978. 128 с.

3. **Каракозов Э.С.** Сварка металлов давлением. М.: Машиностроение, 1986. 280 с.

4. **Каракозов Э.С., Мустафаев Р.И.** Сварка трением: Итоги науки и техники. М.: ВИНИТИ АН СССР, 1988. Т. 19. С. 87 – 168.

5. **Каракозов Э.С., Сапрыгин В.Д.** Холодная сварка труб. М.: Металлургия, 1987. 175 с.

6. **Квасницкий В.Ф.** Сварка и пайка жаропрочных сплавов в судостроении. Л.: Судостроение, 1986. 222 с.

7. **Лашко С.В., Врублевский Е.И.** Технология пайки изделий в машиностроении: Справочник проектировщика. М.: Машиностроение, 1993. 464 с.

8. **Машиностроение**: Энциклопедия / Ред. совет: К.В. Фролов (пред.) и др. М.: Машиностроение. М38. Оборудование для сварки. Т. IV-6 / В.К. Лебедев, С.И. Кучук-Яценко, А.И. Чвертко и др.; Под ред. Б.Е. Патона, 1999. 496 с.

9. **Мусин Р.А., Конюшков Г.В.** Соединение металлов с керамическими материалами. М.: Машиностроение, 1991. 224 с.

10. **Сварка** и сварочные материалы. В 3-х т. Т. 2. Технология и оборудование:

Справ. изд. / Под ред. В.М. Ямпольского. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1996. 574 с.

11. **Сварка** в машиностроении: Справочник. В 4-х т. / Редкол.: Г.А. Николаев и др. М.: Машиностроение, 1978. Т. 1 / Под ред. Н.А. Ольшанского, 1978. 508 с.

12. **Сварка** трением: Справочник / Под ред. В.К. Лебедева, И.А. Черненко, В.И. Вилля. Л.: Машиностроение, 1987. 236 с.

13. **Седых В.С.** Классификация, оценка и связь основных параметров сварки взрывом // Сварка взрывом и свойства сварных соединений. Тр. ВолгПИ. Волгоград: ВолгПИ, 1985. С. 3 – 30.

14. **Справочник** по сварке цветных металлов / С.М. Гуревич; Отв. ред. В.Н. Замков. 2-е изд., перераб. и доп. Киев: Наукова думка, 1990. 512 с.

15. **Стройман И.М.** Холодная сварка металлов. Л.: Машиностроение, 1985. 224 с.

16. **Пейсахович В.А.** Оборудование для высокочастотной сварки металлов. Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд., 1988. 209 с.

17. **Теория**, технология и оборудование диффузионной сварки: Учебн. для вузов / В.А. Бачин, В.Ф. Квасницкий, Д.И. Котельников и др.; Под ред. В.А. Бачина. М.: Машиностроение, 1991. 352 с.

18. **Технология** производства титановых самолетных конструкций / А.Г. Братухин, Б.А. Колачев, В.В. Садков и др. М.: Машиностроение, 1995. 448 с.

19. **Холопов Ю.В.** Ультразвуковая сварка пластмасс и металлов. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд., 1988. 224 с.

20. **Штрикман М.М.** Новый способ сварки трением и перспективы его применения // Технология машиностроения. 2001. № 5. С. 24 – 29.

Глава 9

ГАЗОВАЯ СВАРКА И РЕЗКА. ГИДРОРЕЗКА

9.1. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ СВАРКИ И РЕЗКИ

Несмотря на всемерное развитие процессов дуговой сварки при изготовлении металлоконструкций газопламенная обработка по-прежнему остается одним из основных процессов в заготовительном производстве при раскрое металла, сварке тонколистовой стали, сварке специальных металлов и сплавов, наплавке, металлизации и др. Свыше 100 типов оборудования для реализации различных процессов газопламенной обработки выпускают ведущие фирмы России, ближнего и дальнего зарубежья.

В числе этих фирм ОАО «Термика» (г. Железногорск Курской обл.), ОАО «Гелиймаш» (г. Москва), ОАО «Барнаульский аппаратурно-механический завод» (далее – «БАМЗ»), АП «Завод им. В.В. Воровского» (г. Екатеринбург), ФГУП «ВНИИавтогенмаш» (г. Москва), ФГУП «Судоремонтный завод "Нерпа"» (далее – СРЗ «Нерпа», г. Снежное Мурманской обл.), ОАО «Автоген» (г. Воронеж), ВНИИЖТ (г. Москва), АП «Кристалл» (г. Санкт-Петербург), Завод специальной технологической оснастки (г. Минусинск), ПТФ «Пелла» (г. Отрадное Ленинградской обл.), ТОО «Вэлса» (г. Вязьма), НИКИМТ (г. Москва), научное объединение «Ивтан» РАН (г. Москва), Институт теплофизики СО РАН и ТОО «СДК» (г. Новосибирск), ВПТИтяжмаш (г. Москва), ЦНИИТС (г. Санкт-Петербург), ОАО «Алтайский научно-исследовательский и технологический институт сельскохозяйственного машиностроения» (далее – АНИТИМ, г. Барнаул), ОАО «Электрик» (г. Санкт-Петербург), ООО «Автоген-М» (Армения), «Ро-Ар» (Россия – Армения, г. Москва), НПП «Донмет» (г. Краматорск, Украина), ОАО «Эффект» (г. Одесса, Украина), НПО «Кислородмаш» (г. Одесса), Степановский завод высокочастотного электрооборудования (далее – СЗВЧЭО, Армения), Опытный завод сварочного оборудования ИЭС им. Е.О. Патона (далее – ОЗСО ИЭС, Украина), НПП «Технология» (г. Киев, Украина), предприятие «Плазмотех» (Молдова), «Факел» (г. Одесса), НПО «ВИСП» (г. Киев), Новокраматорский машиностроительный завод (Украина), «Messer Griessheim» (Германия), «ESAB Hancock» (Германия), «Mueller Opladen» (Германия) и др.

Все оборудование для газопламенной обработки можно классифицировать следующим образом:

по назначению – аппаратура для газовой сварки, для кислородной резки, для дуговой резки, а также специальное оборудование;

по применению – универсальное оборудование (сварка, резка, наплавка, пайка, подогрев), специализированное (только для сварки, или резки, или закалки, или пайки и т.д.);

по способу применения – для ручных способов газопламенной обработки, для механизированных процессов.

9.1.1. РУЧНАЯ АППАРАТУРА ДЛЯ ГАЗОВОЙ СВАРКИ И РЕЗКИ

Основным инструментом для газопламенных технологий являются горелки и резаки.

Горелка – это устройство, предназначенное для получения устойчиво горящего пламени необходимых тепловой мощности, размеров и формы. Конструкция горелок обеспечивает смешение горючего газа и кислорода в требуемых соотношениях и плавное регулирование мощности пламени и состава горючей смеси.

В конструкции резака кроме устройства, создающего подогревающее пламя, предусмотрен центральный канал для подачи режущего кислорода.

9.1.1.1. УНИВЕРСАЛЬНЫЕ ГОРЕЛКИ

Универсальные ручные горелки выпускаются в однопламенном исполнении. По способу смешения горючего газа с кислородом различают инжекторные и безынжекторные горелки (рис. 9.1, *а* и *б*).

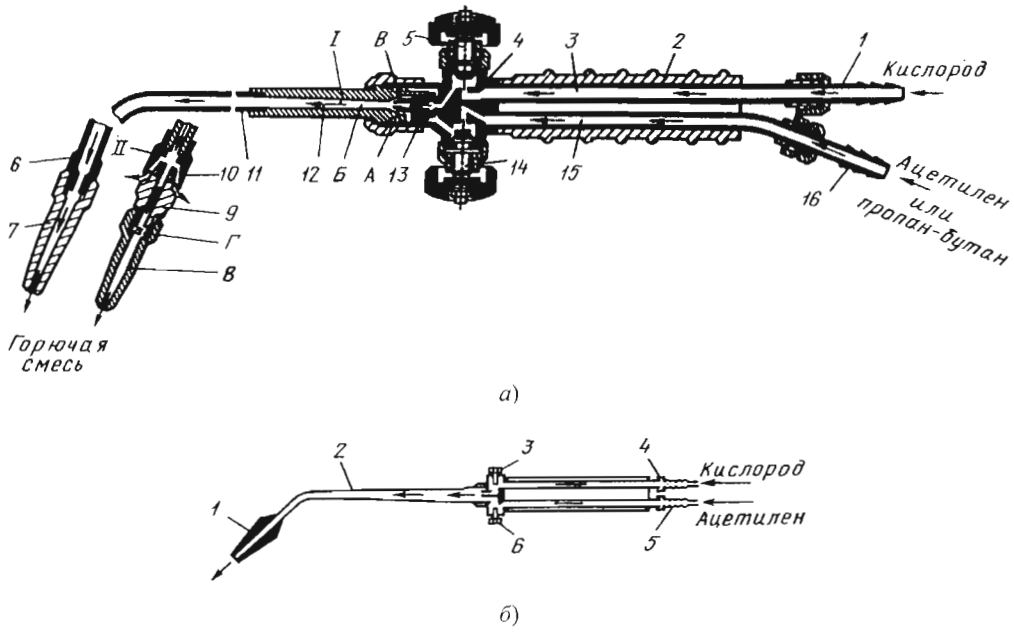


Рис. 9.1. Универсальные ручные горелки:

а – инжекторная (*I* – ниппель кислорода; *2* – рукоятка; *3* – трубка кислорода; *4* – корпус; *5* – регулирующий вентиль для кислорода; *6* – ниппель наконечника; *7* – мундштук ацетиленовой горелки; *8* – мундштук пропан-бутановой горелки; *9* – штуцер; *10* – подогреватель; *11* – трубка горючей смеси; *12* – смесительная камера; *13* – инжектор; *14*, *15* и *16* – соответственно вентиль, трубка и ниппель горючего газа; *А* – канал малого сечения; *Б* – канал смесительной камеры; *В* – зазор между стенками смесительной камеры и корпусом инжектора; *Г* – боковые отверстия в штуцере; *I* – сменный наконечник для ацетиленокислородной горелки; *II* – то же, для пропан-бутанкислородной горелки); *б* – безынжекторная (*1* – мундштук; *2* – трубка наконечника; *3* – вентиль для кислорода; *4* и *5* – ниппели кислорода и ацетилена соответственно; *6* – вентиль ацетилена)

В инжекторных горелках кислород поступает в инжектор, размещенный в стволе горелки, а из него через отверстие малого диаметра в смесительную камеру. Вследствие мгновенного расширения кислорода в смесительной камере возникает разрежение, что обеспечивает благоприятные условия для подачи в нее горючего газа при низком давлении (до 0,001 МПа) в сети.

У безынжекторных горелок горючий газ и кислород поступают в смесительное устройство под одинаковым давлением, благодаря чему сохраняется постоянный состав смеси в течение всего времени работы горелки независимо от нагрева наконечника отраженным теплом пламени. В инжекторных же горелках нагрев мундштука и смесительной камеры уменьшает инжектирующее действие струи кислорода и смесь обогащается кислородом. Это приводит к хлопкам и обратным ударам пламени. Для их предотвращения приходится прерывать сварку и охлаждать наконечник. Однако из-за небольшого давления горючего газа в сетях и переносных ацетиленовых генераторах большинство ручных горелок выпускается инжекторного типа. По мощности пламени газовые горелки делятся на горелки микромощности для сварки стали толщиной до 1 мм, средней (до 10 мм) и более высокой. Технические характеристики универсальных ручных горелок для ручной сварки и пайки ацетиленокислородным пламенем приведены в табл. 9.1.

Универсальные ручные горелки для сварки и пайки с использованием ацетиленокислородного пламени, выпускаемые по ГОСТ 1077–79, обеспечивают хорошее качество сварных и паяных соединений и высокую производительность процесса, так как этот вид пламени дает наиболее высокую температуру в зоне сварки.

9.1. Технические характеристики универсальных ручных ацетиленовых горелок

Параметры	«Искра-6 ММ»	«Малютка»	Г2-05	Г2-06	Г3-05	Г-3	«Звезда»	«Star»
Мощность	Микро	Малая	Средняя		Высокая	Средняя	Высокая	
Толщина свариваемой стали, мм	0,05...0,6	0,2...4	0,2...9	0,5...10	0,5...30	1...9	0,5...30	0,5...30
Расход, $м^3$/ч:								
– ацетилена	0,05...0,06	0,25...0,4	0,035...0,77	До 0,9	0,075...2,5	0,13...0,91	0,05...2,8	0,68...5,5
– кислорода		0,035...0,44		До 1,0		0,12...0,9	0,055...8,1	0,75...6,1
Давление, МПа:								
– ацетилена	0,01...0,08	0,03...0,12	0,003...0,12	0,003...0,01	0,003...0,1	0,03...0,12	0,001...0,01	0,02...0,07
– кислорода		0,05...0,4	0,18...0,25	0,2...0,3	0,01...0,25	0,2...0,4	0,1...0,4	0,25...0,4
Длина в сборе, мм	300	430	480	540	600	500	618	Нет данных
Масса, кг	0,4	0,54	0,85	0,6	1,25	1,22	0,85	
Изготовитель	ОАО «Термика»	ОАО «Гелиймаш»	ООО «Автоген-М» (Армения)	ОАО «БАМЗ»	ООО «Автоген-М»	ОАО «Гелиймаш»		«Messer Griessheim»

Наряду с горелками, работающими на ацетиленокислородных смесях, выпускаются также горелки для работы на газах – заменителях ацетилена (пропан-бутан, природный газ, МАП-газ и др.). Эти горелки используют более дешевые виды горючих газов, однако ими довольно трудно получить хорошее качество сварного соединения на металле толщиной >3 мм. В табл. 9.2 приведены технические характеристики универсальных сварочных горелок для работы на газах – заменителях ацетилена.

В последние годы промышленность освоила выпуск ручных горелок, которые могут работать как на ацетилене, так и на газах – заменителях ацетилена. Для этого они снабжены необходимым количеством наконечников и запасных частей, обеспечивающих при небольшой перестройке переход на работу с другим горючим газом. Технические характеристики этих горелок приведены в табл. 9.3.

9.2. Технические характеристики ручных горелок для газов – заменителей ацетилена

Параметр	ГЗУ-3-02	ГСТЗ-3	АСГ-1П
Толщина обрабатываемой стали, мм	0,5…7		1,2…6
Расход, $м^3$/ч:			
– пропан-бутана	0,025…0,34	0,03…0,38	0,021…0,35
– природного газа	0,07…0,83	0,07…0,92	Не используется
– кислорода	0,09…1,26	0,11…1,38	0,72…1,2
Давление, МПа:			
– пропан-бутана	≥0,001	0,03…0,12	0,02…0,03
– природного газа			Не используется
– кислорода	0,2…0,3	0,2…0,4	0,15…0,4
Габаритные размеры, мм	456 × 160 × 56	425 × 157 × 70	550 × 140 × 67
Масса, кг, не более	1,1	1,52	1,0
Температура окружающей среды, °С	–15…+45	–20…+40	
Изготовитель	ООО «Автоген-М»		Фирма «Ро-Ар»

9.3. Технические характеристики горелок для сварки на ацетилене и газах-заменителях

Параметр	Г2-06 АП	ГСВ-1	«Норд»	«Starlet»
Толщина свариваемой стали, мм	0,5…4	0,5…6		0,2…9
Род горючего и его давление, МПа	Ацетилен, 0,003		Ацетилен, 0,05…0,11	Ацетилен, 0,03
	Пропан-бутан, природный газ, 0,2…0,3		Пропан-бутан, природный газ, 0,05…0,15	Пропан-бутан, природный газ, 0,2…0,3
Габаритные размеры, мм	470×165×160	558×103×68	505×123×56	770 (длина)
Масса, кг	0,65	0,6	1,3	0,6
Изготовитель	ОАО «БАМЗ»	АП «Завод им. В.В. Воровского»	ФГУП «ВНИИавтогенмаш», ФГУП «СРЗ "Нерпа"»	«Messer Griessheim»

9.1.1.2. СПЕЦИАЛЬНАЯ АППАРАТУРА

Горелки для газопорошковой наплавки предназначены для нанесения на поверхность металла слоя металла в виде порошка с различными свойствами, обеспечивающими высокую стойкость поверхности при абразивном износе, при воздействии агрессивных газовых или жидких сред, а также для восстановления изношенных деталей.

В отличие от сварочных газопорошковые наплавочные горелки снабжаются бункерным устройством для металлического порошка (рис. 9.2) и системой каналов, обеспечивающих подачу порошка в кислородно-газовое пламя. Горелки работают по схеме двухступенчатой инжекции, при которой кислород в смесительной камере сначала смешивается с горючим газом, а затем горючая смесь во второй смесительной камере инжектирует металлический порошок и подает в мундштук горелки. Поступающие в пламя частицы порошка расплавляются и наносятся на нагретую этим же пламенем поверхность обрабатываемого металла. Технические характеристики наплавочных горелок приведены в табл. 9.4.

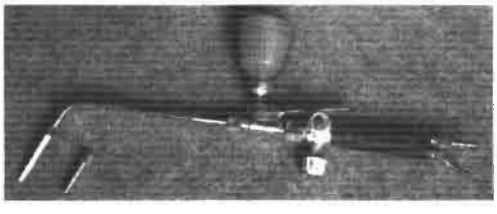


Рис. 9.2. Горелка ГН-2 для газопорошковой наплавки

Горелка ГН-4 обеспечивает работу на экзотермических смесях порошков. Поэтому в данной горелке предусмотрено раздельное формирование горючей смеси и флюсонесущего потока (рис. 9.3). Одна часть кислорода поступает в инжектор, размещенный в смесительной камере, присоединяемой к корпусу *4*, где инжектируется горючий газ, после чего горючая смесь приходит в концентрически расположенные подогревающие отверстия наконечника. Другая часть кислорода инжектирует металлический порошок из бачка и подает в центральный канал наконечника.

Горелки для пайки, нагрева и очистки поверхности. Горелки ГВП-1-02, ГВЮ-1 (рис. 9.4) рассчитаны на работу от сети сжатого или атмосферного воздуха. Первая из них предназначена для пайки, оплавления битумных рулонных материалов при гидроизоляционных работах, сушки литейных форм, обжига старой краски, а вторая – для низкотемпературной пайки и нагрева. В качестве горючего в горелке ГВ-1-02 используется пропан-бутан давлением ≥0,1 МПа, который инжектирует воздух из атмосферы в количестве, необходимом для сжигания горючего. Вследствие этого горелки типа ГВ не нуждаются в подводе воздуха. Ее недостатком является невозможность работы при низких давлениях горючего газа. Технические характеристики специальных горелок для пайки, нагрева и очистки приведены в табл. 9.5.

Для пайки высокотемпературными припоями, правки, предварительного подогрева при дуговой сварке могут применяться горелки ГЗУ-4, ГСТЗ-4, работающие на газах – заменителях ацетилена.

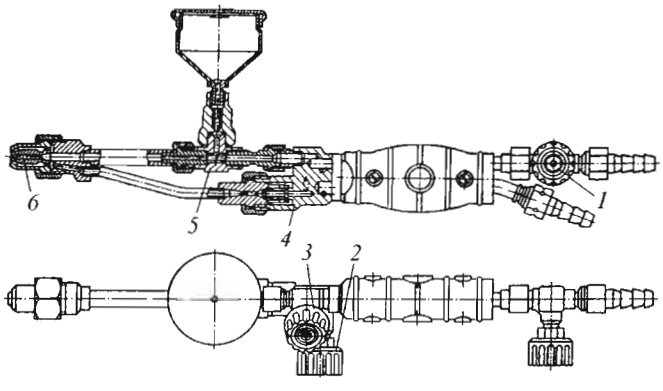


Рис. 9.3. Горелка ГН-4:
1 – вентиль подачи кислорода; *2* и *3* – вентили для ацетилена и кислорода соответственно; *4* – ствол; *5* – дозатор; *6* – наконечник

9.4. Технические характеристики ручных газопорошковых наплавочных горелок

Параметр	ГН-1	ГН-2	ГН-3	ГН-4	ГН-2П	ГН-5П
Наплавляемый материал	Самофлюсующиеся и другие твердые сплавы, экзотермически реагирующие компоненты					
Горючий газ	Ацетилен				Пропан-бутан	
Рекомендуемая толщина наплавляемого слоя, мм	0,3…2					
Расход порошка, кг/ч	До 0,9	До 2,0	До 5,0	До 3,6	2	5
Грануляция порошка, мкм	40…100					
Расход, $м^3$/ч:						
– ацетилена	0,14…0,3	0,35…0,6	1,5…1,75	0,8…1,1	Не используется	
– пропан-бутана	Не используется				0,2…0,4	0,9…1,0
– кислорода	0,14…0,3	0,35…0,6	1,5…1,75	1,0…1,4	0,7…1,4	3,2…3,5
Давление, МПа:						
– ацетилена	≥0,01	0,01…0,03	≥0,02	0,01…0,07	Не используется	
– пропан-бутана	Не используется				≥0,02	0,2
– кислорода	0,1…0,3	0,2…0,3	0,3…0,4	0,4…0,6	0,1…0,3	0,3…0,4
Габаритные размеры, мм	485 × 80 × 170	510 × 85 × 170	615 × 75 × 255	470 × 90 × 140	380 × 85 × 305	580 × 60 × 60
Масса , кг	0,75	0,77	1,1	1,3	1,4	1,35
Изготовитель	ООО «Автоген-М»		ФГУП «ВНИИавтогенмаш» (Москва)			

9.5. Технические характеристики специальных горелок

Параметр	ГВП-1-02	ГВЮ-1	ГВ-1-02	ГЗУ-4	«Норд-ГВ»
Назначение	Пайка, оплавление битумных материалов, сушка литейных форм при $T \le 500$ °С	Низкотемпературная пайка	Нагрев до 300 °С изделий из черных и цветных металлов и неметаллических материалов	Сварка чугуна, правка металлоконструкций и нагрев	Нагрев до 500 °С, пайка, оплавление битумных материалов
Рабочий газ	Пропан-бутан, природный газ, воздух с принудительной подачей		Пропан-бутан, воздух с подсосом из атмосферы	Пропан-бутан, природный газ, кислород	Пропан-бутан, природный газ, воздух с подсосом из атмосферы
Давление, МПа:					
– пропан-бутана и природного газа	0,01	0,01…0,05	0,1…0,15	0,16	0,05…0,15
– воздуха	0,01…0,05		Не используется		
– кислорода	Не используется			≥0,02	Не используется
Расход, $м^3/ч$:					
– пропан-бутана	30…600	25…60	670…1700	350…1600	200…1600
– природного газа	75…1200	60…110	Не используется	930…4270	500…4000
– воздуха	850…6000	300…1200		Не используется	
– кислорода	Не используется			1400…6400	Не используется
Габаритные размеры, мм	470 × 160 × 65	775 × 125 × 65	840 × 190 × 65	605 × 135 × 66	1000 × 150 × 57
Масса, кг	0,68	0,60	0,72	1,5	1,3
Изготовитель	ООО «Автоген-М»				ФГУП «ВНИИавтогенмаш», ФГУП «СРЗ "Нерпа"»

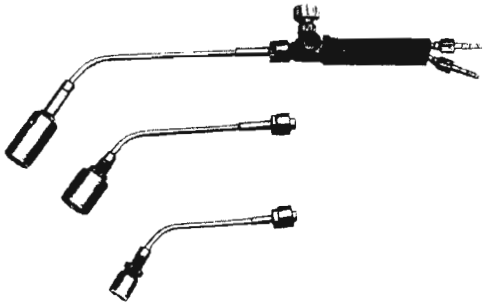


Рис. 9.4. Воздушно-пропановая горелка ГВП-5 для нагрева и пайки

При ручной сварке и пайке сложных изделий типа автомобильных и тепловозных радиаторов, криогенных приборов значительные трудности представляет подача в зону пайки флюса. Эта задача решается применением при сварке и пайке меди, цинка, черных металлов газового флюса БМ-1, представляющего собой пары смеси метанола с метилборатом. На рис. 9.5 показана установка УГФ-90 для газофлюсовой сварки и пайки. Установка смонтирована на раме *1* и содержит флюсопитатель *2* фитильного типа, осушитель ацетилена *3*, экономизатор *4*, февку *5* для зажигания пламени горелки. На щитке *6* смонтирован газовый пульт с кислородным редуктором и запорными вентилями, а также пламепреградитель. Установка комплектуется универсальной сварочной горелкой Г2-05.

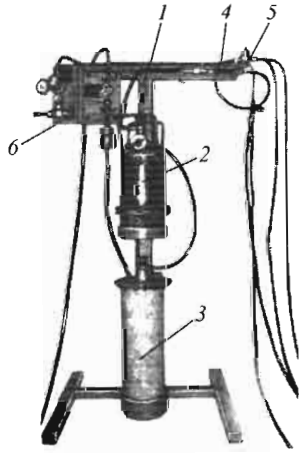


Рис. 9.5. Установка УГФ-90 для газофлюсовой сварки и пайки:
1 – стойка; *2* – флюсопитатель; *3* – осушитель; *4* – пламепреградитель; *5* – экономизатор; *6* – ПГК-10

Технические характеристики установки УГФ-90

Горючий газ	Ацетилен
Давление на входе, МПа:	
ацетилена	0,001…0,1
кислорода	0,15…0,5
Толщина свариваемой стали, мм	До 9
Наибольший расход, м^3/ч:	
ацетилена	2,8
кислорода	3,6
Объем флюсопитателя, л	7,5
Газовый флюс	Борсодержащая жидкость БМ-1
Расход флюса, г/м^3 горючего газа	3…100
Материал газоосушителя	Селикагель КСМГ (ГОСТ 3956–76)
Загрузка силикагеля в осушитель, кг	7,3
Расход силикагеля, кг/м^3 горючего газа	0,1
Габаритные размеры, мм	930×800×1650
Масса, кг	85

Выпускает установку УГФ-90 ФГУП «ВНИИавтогенмаш».

В комплект входят также предохранительные клапаны, газоразборные посты ацетилена ПГУ-5, кислорода ПГК-10, каркас, рукава, комплект ЗИП.

Точное дозирование подачи флюса непосредственно в зону сварки обеспечивает высокие качество сварных и паяных соединений и производительность процесса.

9.1.1.3. РУЧНЫЕ КИСЛОРОДНЫЕ РЕЗАКИ

Там, где объем резки невелик, а к точности и качеству вырезаемых заготовок не предъявляются повышенные требования, применяется ручная резка. В этом случае предварительно размечают контур резки, и резчик вырезает деталь.

Резак служит инструментом для кислородной резки и содержит узлы для смешения горючего газа и подогревающего кислорода, подачи режущего кислорода, подсоединения к источнику питания газами, а также вентили для

регулировки состава и мощности пламени и запорный вентиль или клапан для режущего кислорода. Ручные резаки для кислородной резки классифицируются по роду применяемого горючего газа, на котором они работают: по принципу смешения горючего газа с подогревающим кислородом и по назначению.

По виду горючего, используемого для резки, резаки делятся на аппаратуру, работающую на ацетилене и газах – заменителях ацетилена (природный газ, пропан-бутан, метан, МАП-газ и др.), а также аппаратуру, функционирующую на жидком горючем (керосин, бензин, бензол).

По типу смешения горючего газа с подогревающим кислородом резаки подразделяются на инжекторные, внутрисоплового и внешнего смешений.

По назначению различают резаки универсальные (для прямолинейной и фигурной резки стали толщиной до 300 мм) и специальные (для резки металла больших толщин, срезки заклепок, вырезки отверстий, подводной резки и т.п.).

Универсальные ручные резаки выпускаются в соответствии с ГОСТ 5191–79 и предусматривают возможность использования различных видов горючего, в соответствии с этим они имеют конструктивные отличия. Ацетиленовые резаки и резаки, рассчитанные на применение в качестве горючего газа заменителей ацетилена, аналогичны по принципиально-конструктивным схемам и различаются главным образом сечениями каналов мундштуков и газосмесительных устройств. Смесительные устройства отечественных универсальных ручных резаков выполняются в виде инжекторных систем. Это обусловлено широким использованием у нас ацетилена низкого давления (от переносных генераторов и стационарных с аналогичными параметрами) или магистрального природного газа низкого давления.

На рис. 9.6 показан наиболее распространенный в промышленности резак Р2А-02 для работы на ацетилене. Для работы на газах – заменителях ацетилена используют резак РЗП-01. В табл. 9.6 и 9.7 приведены технические характеристики универсальных ручных резаков для работы на ацетилене и газах – заменителях ацетилена.

У резаков «Норд» и «Essen» смешение горючего газа и подогревающего кислорода осуществляется непосредственно в выходных каналах мундштука (внутрисопловое смешение), что обеспечивает их более высокую надежность без хлопков и обратных ударов пламени.

Выпускаются также резаки для работы на жидких горючих. Такие резаки используются преимущественно в полевых условиях, на строительных, заготовительных и разделочных площадках, в том числе при работе в условиях отрицательных температур. Комплект аппаратуры для резки на жидком горючем состоит из резака специальной конструкции, бачка для жидкого горючего, кислородного баллона с редукторами, рукавов – резинотканевого с внутренним диаметром 9 мм для кислорода и изготовленного из бензостойкой резины с внутренним диаметром 6,3 мм для жидкого горючего. В качестве горючего обычно служит осветительный керосин. При резке на морозе к керосину добавляют почти всегда 10 % бензина, который способствует улучшению испарения жидкого горючего.

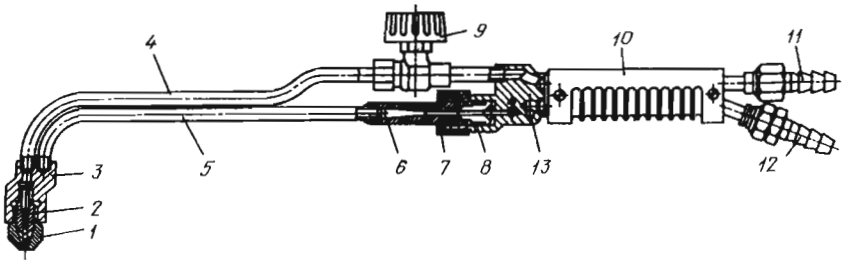


Рис. 9.6. Ручной универсальный резак Р2А-02:
1 и *2* – наружный и внутренний мундштуки соответственно; *3* – головка; *4* – трубка режущего кислорода; *5* – трубка для подвода горючей смеси; *6* – смесительная камера; *7* – накидная гайка; *8* – корпус; *9* – вентиль режущего кислорода; *10* – рукоятка; *11*, *12* – ниппели кислорода и ацетилена соответственно; *13* – вентиль для ацетилена

9.6. Технические характеристики универсальных ручных ацетиленокислородных резаков

Параметр	Р2А-02	Р1-01А	«Огонь-1»	«Факел»	«Норд 200 А»	«Essen»
Толщина разрезаемой стали, мм	3...200	3...100	До 200	3...300	5...300	3...200
Расход кислорода, $м^3/ч$	1,62...21,2	До 10	2...21	3...40	2...36	До 18
Давление кислорода на входе в резак, МПа	0,2...0,75	0,25...0,5	0,3...0,7	0,3...1,2	0,25...1,0	До 1,0
Расход ацетилена, $м^3/ч$	0,4...1,26	≤0,7	0,4...1,25	0,4...1,2	0,8...1,35	
Давление ацетилена на входе в резак, МПа	0,003...0,1	0,003...0,12	0,001...0,1	0,001	0,02...0,11	0,04...0,07
Габаритные размеры резака, мм	530 × 70 × 170	500 × 55 × 155	580 × 70 × 170	537 × 72 × 189	550 × 65 × 166	480 × 55 × 155
Масса, кг, не более	1,3	1,0	1,4	1,78	1,1	0,93
Изготовитель	ООО «Автоген-М»	ОАО «БАМЗ»	АП «Завод им. В.В. Воровского»	ОАО «Гелиймаш»	ФГУП «ВНИИавтогенмаш», ФГУП «СРЗ "Нерпа"»	«Messer Griessheim»

9.7. Технические характеристики универсальных ручных резаков для газов – заменителей ацетилена

Параметр	РЗП-02	Р1-01П	«Огонь-2»	«Дальник»	АСР-1П	«Норд-300П»
Толщина разрезаемой стали, мм	3...300	3...100	До 300	3...200	3...70	3...300
Расход кислорода, $м^3/ч$	2...33,2	До 10	2...32	До 17	2,5...7,2	3,2...27,5
Давление кислорода на входе в резак, МПа	0,2...1,0	0,25...0,5	0,3...1,0	0,2...1,2	0,3...1,5	0,3...1,0
Расход, $м^3/ч$:						
– пропан-бутана	0,33...0,83	До 0,5	0,3...1,0	0,25...0,75	0,2...0,4	0,36...0,85
– природного газа	0,6...1,86	До 1,3	0,6...2,0	0,65...2,0	0,53...1,0	1,0...2,2
Давление горючего газа на входе в резак, МПа	0,02...0,15	0,03...0,12	0,02...0,15	0,015...0,12	0,02...0,1	0,01...0,06
Габаритные размеры, мм	530 × 70 × 170	500 × 55 × 155	580 × 70 × 170	500 × 72 × 189	550 × 67 × 140	535 × 65 × 166
Масса, кг, не более	1,3	1,0	1,4	1,5	1,15	1,1
Изготовитель	ООО «Автоген-М»	ОАО «БАМЗ»	АП «Завод им. В.В. Воровского»	Фирма «Ро-Ар»	НПП «Донмет»	ФГУП «ВНИИавтогенмаш», ФГУП «СРЗ "Нерпа"»

Аппаратура для резки на жидком горючем может поставляться как в виде отдельных изделий (керосино-кислородного резака и бачка для жидкого горючего), так и в виде полного комплекта, смонтированного на транспортной тележке. Выпускаемые промышленностью керосинорезы работают по принципу испарения жидкого горючего. С этой целью резак (рис. 9.7) снабжен трубчатой испарительной камерой. Проходя через ее асбестовую набивку, жидкий керосин испаряется. Для этого камера нагревается дополнительным испарительным пламенем, формируемым специальным соплом головки. Для защиты от пламени на испарительной камере крепится фигурный щиток. Регулировка подачи горючего и кислорода, а также пуск и перекрытие режущего кислорода обеспечиваются вентилями, расположенными на корпусе резака.

Бачок для жидкого горючего представляет собой цилиндрический сосуд с днищем и крышкой. На крышке смонтирован насос с рукояткой, служащей для переноски бачка, имеются горловина для заливки горючего и ниппельное устройство с манометром и запорным вентилем.

Более безопасен и устойчив в работе бензорез «Норд-РБ», у которого горючее испаряется непосредственно в мундштуке и в нем же смешивается с подогревающим кислородом. Технические характеристики резаков, работающих на жидких горючих, приведены в табл. 9.8.

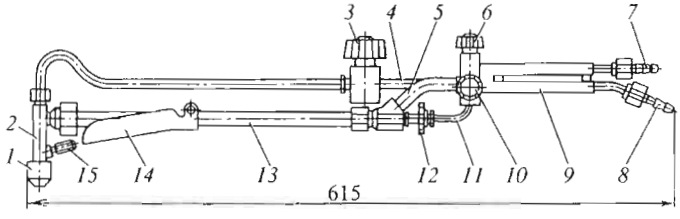


Рис. 9.7. Керосинорез РК-02:

1 – сменные мундштуки; *2* – головка; *3* – вентиль для режущего кислорода; *4* и *5* – кислородные трубки; *6* и *12* – вентили для керосина; *7* и *8* – ниппели; *9* – ствол; *10* – вентиль для подогревающего кислорода; *11* – керосиновая трубка; *13* – трубка с испарителем; *14* – щиток; *15* – подогревающее сопло

9.8. Технические характеристики резаков на жидком горючем

Параметр	РК-02М	«Эффект РК-1»	«Термика-7»	РК-03	«Норд-РБ»
Толщина разрезаемой стали, мм	3...200	5...200	До 200	3...200	5...300
Расход кислорода, $м^3/ч$	2,3...20		3...25	11...20	2,8...27
Расход, кг/ч:					
– керосина	0,5...1,5			0,8...1,3	1,2...1,5
– бензина	Не используется				1,0...2,4
Давление, МПа:					
– кислорода	0,35...0,7		0,35...0,75	0,35...0,65	0,35...0,7
– керосина	0,15...0,3			0,3	
Длина, мм	615	544	515	615	600
Масса, кг	1,68	1,2	1,3	1,6	1,3
Изготовитель	АП «Завод им. В.В. Воровского»	ОАО «Эффект»	Фирма «Термика»	ООО «Автоген-М»	ФГУП «ВНИИавтогенмаш», ФГУП «СРЗ "Нерпа"»

9.1.1.4. СПЕЦИАЛЬНЫЕ РЕЗАКИ

Резаки для резки стали больших толщин используются в металлургическом производстве для отрезки прибылей большого сечения, резки проката и т.д. Для этих целей выпускаются резаки, способные разрезать сталь толщиной >300 мм.

На рис. 9.8 показано устройство резака РЗР-3, наиболее распространенного в практике. Резак снабжен более мощными головкой *3* и мундштуками *1*, чем универсальные резаки, так как расход газов при резке металла больших толщин значительно выше; он имеет большую длину для того, чтобы обезопасить резчика от воздействия большого количества тепла и дыма, выделяющихся в процессе резки. Резаки комплектуются, как правило, мундштуками с внутрисопловым смешением горючего газа и подогревающего кислорода, что обеспечивает их надежную работу (без хлопков и обратных ударов) в сложных условиях металлургического производства. Резаки могут работать от цеховых сетей горючего газа и кислорода или от 10-баллонной кислородной рампы с редуктором ДКР-500 и 10-баллонной пропановой рампы с редуктором БПО-5-1. В табл. 9.9 приведены технические характеристики резаков для резки стали больших толщин.

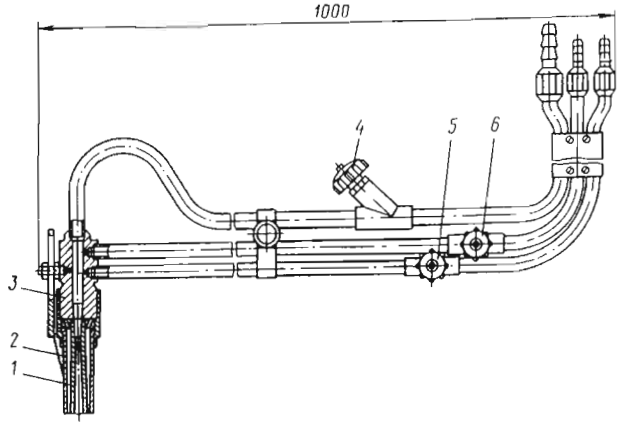


Рис. 9.8. Резак РЗР-3 для резки стали больших толщин:
1 – мундштук; *2* – гильза; *3* – головка; *4* – вентиль для режущего кислорода; *5* – вентиль для горючего газа; *6* – вентиль для подогревающего кислорода

9.9. Технические характеристики резаков для кислородной резки стали больших толщин

Параметр	РЗР-3	Резак для больших толщин	РГР-500	РГР-700
Толщина разрезаемой стали, мм	300...800	100...500	100...500	300...700
Расход, $м^3/ч$:				
– кислорода	43...114	До 75	34...82	78...135
– пропан-бутана	2,5...7	До 3	2,8	3...10
– природного газа	6,5...19,0	До 8	Не используется	
Давление, МПа:				
– кислорода	0,5...0,75	0,6...1,2	0,5...1,2	
– пропан-бутана	0,05	0,08...0,2	0,08...0,12	
– природного газа	0,1...0,2		Не используется	
Длина резака, мм	950	1650	–	
Масса, кг	8,4	1,4	1,6	2,15
Изготовитель	ООО «Автоген-М»	НПО «Кислородмаш»	НПП «Донмет»	

Вставные резаки используются для монтажных, ремонтных и других работ в условиях индивидуального рабочего поста, когда часто одному газосварщику приходится выполнять сварку и резку. Вставные резаки (рис. 9.9) представляют собой сменные блоки, содержащие корпус с вентилем для управления подачей режущего кислорода и инжекторным устройством и резаковую головку, к которой крепятся сменные наружные и внутренние мундштуки. Корпус и головка резака соединены между собой трубками для горючей смеси и режущего кислорода. Вставной резак используется в комплекте с газосварочной горелкой. Для соединения с ней корпус резака имеет переходник с ниппелем и накидной гайкой. При необходимости резки сварочный наконечник отвинчивают и вместо него на штуцере горелки укрепляют вставной резак. Наиболее распространен в нашей промышленности вставной резак РВ-1А-02, работающий в комплекте с горелкой Г2-05, он обеспечивает резку стали толщиной до 100 мм. В табл. 9.10 приведены технические характеристики вставных резаков.

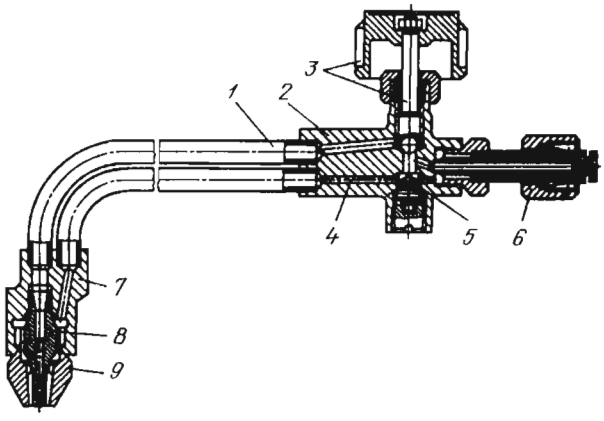


Рис. 9.9. Вставной резак РВ-1А:
1 – трубка режущего кислорода; *2* – корпус; *3* – вентиль для режущего кислорода; *4* – подвод горючей смеси; *5* – отверстие для горючей смеси; *6* – накидная гайка; *7* – головка; *8* и *9* – внутренний и наружный мундштуки соответственно

9.10. Технические характеристики вставных резаков

Параметр	РВ-1А-02	РВ-2А-02	РСВ-1	РСВ-2	«Норд-РВ»	«Starlet»
Толщина разрезаемой стали, мм	3...100	3...200	3...100	3...200	3...100	
Расход, $м^3$/ч:						
– кислорода	1...9	1,9...17	1,7...12,3	1,7...18,6	До 11,7	1,9...20,0
– ацетилена	0,35...0,7	0,35...1,1	0,44...0,83	0,44...1,4	0,4...0,8	0,22...1,16
– пропан-бутана	Не используется		0,33...0,67	0,33...0,75	0,3...0,5	0,15...0,7
– природного газа			0,62...1,4	0,62...1,6	0,8...1,3	0,35...2,0
Габаритные размеры, мм	295 × 30 × 142		290 × 30 × 138		315 × 28 × 102	Нет данных
Масса , кг	0,62	0,65	0,85	0,88	1,1	1,0
Изготовитель	ООО «Автоген-М»				ФГУП «ВНИИавтоген-маш», ФГУП «СРЗ "Нерпа"»	«Messer Griessheim»

Резаки для поверхностной кислородной резки обеспечивают удаление кислородной струей плен, раковин, закатов, шлаковых включений и других местных дефектов на стальных слитках, фасонных отливках и др. Эти резаки позволяют также удалять дефектные участки сварных швов на низкоуглеродистых и низколегированных сталях и выполнять U-образную подготовку кромок листов под последующую сварку. При необходимости поверхностные резаки могут быть использованы для разделительной резки стали толщиной до 500 мм. Во всех резаках для подготовки горючей смеси применяется инжекторное устройство. Содержащий смесительное устройство корпус ствола имеет рукоятку с ниппелями для подсоединения рукавов горючего газа и кислорода, регулировочные вентили этих газов и пусковой клапан для режущего кислорода. К стволу накидной гайкой крепится наконечник.

С помощью длинных газоподводящих трубок горючая смесь и режущий кислород подаются в головку, в которой закрепляются сменные наружные и внутренние мундштуки. Большая длина резака обеспечивает обработку горячих отливок и проката с размещением резчика на некотором удалении от объекта. Глубина съема металла за один проход 2...6 мм, ширина дорожки 50...60 мм, скорость зачистки 3...18 м/мин. Техническая характеристика резаков для поверхностной резки приведена в табл. 9.11.

Установки для кислородно-флюсовой резки коррозионно-стойких сталей, цветных металлов, чугуна применяются на заготовительных, литейных, монтажных участках и в цехах этого же профиля.

Установки (рис. 9.10) включают в себя ручной резак, флюсопитатель, флюсонесущую оснастку и комплект рукавов. В качестве горючего предусмотрено применение газов – заменителей ацетилена (пропан-бутана, природного газа). Как флюс используется железный порошок марки ПЖ-5М по ГОСТ 9849–86. Флюсонесущим газом может служить обезжиренный и осушенный воздух или азот. Установки УРХС-5 и УГПР комплектуются универсальными серийно выпускаемыми резаками инжекторного типа, в установке УКФР используется более надежный в работе резак с внутрисопловым смешением горючего газа и подогревающего кислорода. В табл. 9.12 приведены технические характеристики установок для кислородно-флюсовой резки, наиболее часто применяемых в отечественной промышленности.

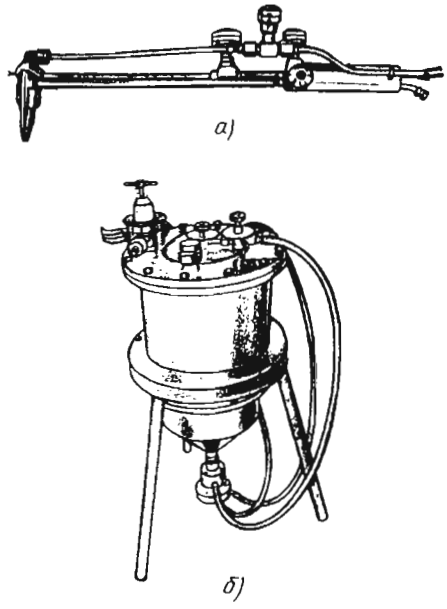


Рис. 9.10. Установка для кислородно-флюсовой резки:
а – резак; *б* – флюсопитатель

9.1.1.5. КОМПЛЕКТЫ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ СВАРКИ И РЕЗКИ

Назначение газогорелочных комплектов состоит в обеспечении возможности выполнения одним рабочим операций газовой сварки и сопутствующей термической резки без перестановки рукавов для смены технологического инструмента. С этой целью на стволе горелки вместо сварочного наконечника закрепляют вставной резак.

На рис. 9.11 показан наиболее распространенный в нашей промышленности комплект для сварки и резки КГС-1, а в табл. 9.13 приведены технические характеристики комплектов.

Изготовители автогенной аппаратуры предлагают также аппаратурные комплекты, содержащие наряду со сварочными и резательными устройствами баллонные редукторы для горючего газа и кислорода, необходимые рукава (комплект КСР-1-01). В состав других комплектов вместе с горелкой, резаком, рукавами, кислородным редуктором входит ацетиленовый генератор АПК-3-07, АСП-10 (комплект КГП-1, переносной) или АГМ (монтажный переносной комплект КГМП).

9.11. Технические характеристики резаков для поверхностной резки

Параметр	РПА-2			РПК-2			Резак «Эффект»
	Назначение наружного и внутреннего мундштуков для резки						
	поверхностной		разделительной	поверхностной		разделительной	
Наружный мундштук	1А			1П		1	–
Внутренний мундштук	1А	2А	1АР	1П	2П	1ПР	
Масса выплавляемого металла, кг/ч	140	186,5	Не используется	140	186,5	Не используется	
Расход, $м^3$/ч:							
– кислорода	38…52	52…63		41…55	55…68		До 137
– ацетилена	1,15…1,2		1,8…1,9	Не используется			
– природного газа	Не используется			3,4		3,8…4,0	До 10
– пропан-бутана				1,9…2,0			До 4,8
– коксового газа				4,8…5,0			–
Давление, МПа:							
– кислорода	0,6…0,8	0,8…1,0		0,6…0,8	0,8…1,0		
– ацетилена	0,01…0,12			Не используется			
– природного газа	Не используется			0,02…0,3			0,08…0,15
– пропан-бутана							0,06…0,12
– коксового газа							Не используется
Габаритные размеры, мм:							
– длина	1300						2020
– ширина	150						Нет данных
– высота	165			170			
Масса, кг	2,5						2,1
Изготовитель	ФГУП «ВНИИавтогенмаш», ООО «Автоген-М»						ОАО «Эффект»

9.12. Технические характеристики установок для кислордно-флюсовой резки

Параметр	УРХС-5	УГПР	УКФР
Толщина разрезаемой стали, мм	10…100	До 250	10…400
Расход, $м^3/ч$:			
– кислорода	6,5…22,5	40	10…65
– пропан-бутана	0,6	1,0	0,3…3,0
– природного газа	1,5	2,0	–
Расход железного порошка, г/мин	100…300	100…400	100…650
Давление газов, МПа:			
– кислорода	1,0		1,4
– горючего газа, не ниже	0,03		0,08
Масса, кг	17	20	72
Изготовитель	ФГУП «ВНИИавтогенмаш»		

9.13. Техническая характеристика комплектов для сварки и резки

Параметр	КГС-1-02	КГС-2-02	ГСТУ-2	ГСТУ-3	«Starlet»
Состав комплекта	Горелка Г-2-05, резак РВ-1А-02, футляр, ЗИП	Горелка Г3-05, резак РВ-2А-02, футляр, ЗИП	Горелка ГСТ-2, резак РСВ-1А, футляр, ЗИП	Горелка ГСТ-3, резак РСВ-2А, футляр, ЗИП	Горелка, «Starlet 2201», резак 1701
Сварка					
Толщина стали, мм	0,5…9	0,5…20	1…9	6…20	0,5…14
Расход, $м^3/ч$:					
– кислорода	0,075…0,77	0,075…1,75	0,12…0,91	0,55…2,15	Нет данных
– ацетилена					
Давление, МПа:					
– кислорода	0,25	0,15…0,25	0,2…0,4		
– ацетилена	0,003…0,01		0,03…0,12		
Резка					
Толщина стали, мм	3…50	3…100	3…50	3…100	
Расход, $м^3/ч$:					
– кислорода	1,9…7,0	1,9…9	1,7…7,4	1,7…12,3	
– ацетилена	0,35…0,6	0,35…0,7	0,44…0,74	0,44…0,83	
Давление, МПа:					Нет данных
– кислорода	0,25…0,42	0,25…0,5	0,45…0,7	0,25…0,75	
– ацетилена	0,001…0,1		0,03…0,05	0,03…0,06	
Изготовитель	ООО «Автоген-М»				«Messer Griessheim»

Рис. 9.11. Комплект для сварки и резки КГС-1

Переносной комплект ПГУ-3-02 включает малолитражные кислородный и пропан-бутановый баллоны с редукторами, горелку со вставным резаком и сменными наконечниками. Эти элементы, соединенные рукавами, смонтированы на легком каркасе, что делает установку удобной для ремонтных и аварийных работ.

На рис. 9.12 показана комплектная переносная установка ПГУ-3-02 для ручной сварки, пайки и резки, а в табл. 9.14 приведены технические характеристики комплектов для газопламенной обработки.

Рис. 9.12. Переносная установка ПГУ-3-02 для ручной сварки, пайки и резки

9.1.2. РЕЗАКИ ДЛЯ ВОЗДУШНО-ДУГОВОЙ РЕЗКИ

Резаки для воздушно-дуговой резки выпускаются по ГОСТ 10796–74 и представляют собой устройства, содержащие рукоятку, выполненную из электроизоляционного материала, со штуцером для подвода воздуха и клеммой для подсоединения кабеля, а также головку для закрепления цилиндрического или пластинчатого электрода (рис. 9.13). Головка снабжена каналами для подачи воздуха в зону дуги. В табл. 9.15 приведены технические характеристики воздушно-дуговых резаков, наиболее часто применяемых в заводской практике.

Крепление электрода обеспечивает простое перемещение последнего вдоль оси при обгорании его рабочего участка. Обращенный к обрабатываемому металлу торец головки резака имеет сопловые устройства, из которых при резке вытекают скоростные струи сжатого воздуха, выбрасывающие из разреза образовавшийся расплав. В результате перемещения резака вдоль линии реза получается канавка с чистой гладкой поверхностью.

В качестве источника электропитания при воздушно-дуговой резке используют сварочные (ВДУ-500, ВДУ-1202 производства ОАО «Электрик») или специализированные выпрямители, преобразователи, а для больших переменных токов – трансформаторы, отвечающие номинальным параметрам резака. В зависимости от конструктивных схем, мощности и других параметров резаки могут различаться по назначению на литейные, монтажные и ремонтные.

Литейные резаки наиболее мощные и массивные, предназначены для обрубки и зачистки литья и поковок, могут быть использованы для других операций, где требуется высокая производительность.

Монтажные резаки служат в основном для удаления прихваток, дефектных сварных швов, зачистки выпуклостей швов, подготовки кромок листов под сварку.

Рис. 9.13. Воздушно-дуговой ручной монтажный резак РВДм-500

9.14. Технические характеристики комплектов для газопламенной обработки

Параметр	Комплект КСР-1-01	Генератор АПК-3-07 с КГ-1-СРП	ПГУ-3-02	ПГУ-5А	ПГУ-5П	ПГУ-10П
Сварка						
Толщина стали, мм	0,5...10	0,5...20	0,2...6	0,2...9	1,0...3,0	
Расход, $м^3/ч$:						
– кислорода	До 1,0	0,075...1,75	0,045...1,07	0,035...0,77	0,09...1,26	
– ацетилена	До 0,9		–		–	
– пропан-бутана	–		0,013...0,31	–	0,025...0,34	
Давление, МПа:						
– кислорода	0,2...0,3	0,15...0,25	0,2...0,5	0,05...0,75	0,2...1	
– ацетилена	0,003...0,12	0,02...0,07	–	0,003...0,01	–	
– пропан-бутана		–	0,003	–	0,02...0,15	
Резка						
Толщина стали, мм	3...100		3...50	3...200		
Расход, $м^3/ч$:						
– кислорода	9		7	1,62...21,2	2,0...33,2	
– ацетилена	0,7		0,6	0,4...1,26	–	
– пропан-бутана	0,4		0,25	0,25...0,7	0,33...0,83	
Емкость баллона, л:						
– кислорода	–		5			10
– пропан-бутана			4	–	5	
Габаритные размеры, мм	1200 × 950 × 500		430 × 292 × 586	230 × 500 × 670		240 × 520 × 1100
Масса, кг	–	135	27,5	35,5	29,5	40,5
Изготовитель	ОАО «БАМЗ»	ОАО «Автоген» (Воронеж)	ООО «Автоген-М»	Фирма «Ро-Ар»		

9.15. Технические характеристики ручных воздушно-дуговых резаков

Параметр	РВДл-1600	РВДм-500	ВДР-400
Род тока	Переменный	Постоянный (обратная полярность)	
Рабочий ток, А	1600	500	400
ПВ, %	100		
Напряжение холостого хода, В	80		
Мощность, кВт	48	30	25
Размеры электродов, мм: – стержневых	–	∅ 8, 10, 12	∅ 8, 10
– пластинчатых: сечение	До 25 × 15	Не используют	
длина	250	По условиям поставки	До 285
Давление воздуха, МПа	0,6		0,62
Расход воздуха, $м^3/ч$	До 50	До 20	До 16
Производительность при зачистке, кг/ч: – стали	До 25	≥15	До 8
– чугуна	До 28	Не используют	
Длина, мм: – без кабель-шланга	730	230	170
– с кабель-шлангом	8760	5200	4700
Масса, кг: – без кабель-шланга	2,8	0,9	0,5
– с кабель-шлангом	19,5	3,6	3,5
Изготовитель	ООО «Автоген-М» и ФГУП «ВНИИавтогенмаш»		ВНИИЖТ

Ремонтные резаки применяют для разделки трещин, срезки болтов, заклепок, гаек, вырезки дефектных мест, пробивки отверстий и др. При ремонте в труднодоступных местах это наиболее подходящий технологический процесс. Воздушно-дуговые резаки работают в широком диапазоне температур окружающего воздуха (–35…+40 °С).

9.1.3. ГАЗОВЫЕ КОММУНИКАЦИИ И ОБОРУДОВАНИЕ РАБОЧИХ ПОСТОВ

Для снабжения горелок и резаков газами газосварщик, газорезчик собирают пост. По своему назначению посты могут быть передвижными или стационарными, причем на передвижных сварочных постах, которые могут быть собраны в любом месте на предприятии или в цехе, газопитание выполняют по схеме, приведенной на рис. 9.14.

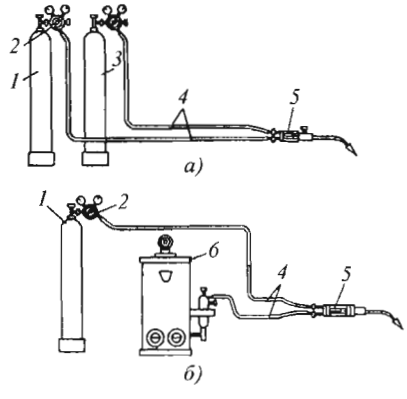


Рис. 9.14. Схема газопитания передвижного сварочного поста:
а – от баллонов; *б* – от генератора ацетилена; *1* – баллон с кислородом; *2* – регулятор кислорода; *3* – баллон с ацетиленом; *4* – рукава; *5* – горелка; *6* – передвижной генератор ацетилена

Газопитание стационарных постов осуществляется централизованно: газ подается по газопроводам к местам потребления, если число постов превышает 10 ед. При меньшем их числе, когда устройство газопроводов нерационально, разрешается использовать передвижные посты.

Типовая схема постов централизованного газопитания приведена на рис. 9.15. Кислород поступает к стационарным рабочим постам по газопроводу *5* от соответствующего источника питания (кислородной установки, газификатора или перепускной рампы). Ацетилен подается по газопроводу *10* от установки, где он хранится, стационарного генератора или перепускной рампы. При ее использовании ацетилен поступает непосредственно в газопровод. В случае других источников питания ацетиленом на входе в ацетиленопровод устанавливается групповой предохранительный жидкостный или сухой затвор *1*, предназначенный для защиты межцеховых трубопроводов от проникновения обратных ударов пламени.

На входе кислородопровода в цех, так же как и на каждом ответвлении внутрицеховой разводки газопроводов, размещается запорная арматура *7*. В местах потребления газов на газопроводах должны находиться газоразборные посты *3* и *4*, в состав которых входят запорные, регулирующие и предохранительные устройства. Питание огневой аппаратуры кислородом ведется от редуктора газоразборного поста, если давление в газопроводе >1,6 МПа. В том случае, когда давление в газопроводе не превышает 1,6 МПа, а расход 10 $м^3$/ч, используется газоразборный пост с сетевым редутором. Допускается работа непосредственно от запорного вентиля, если аппаратура не требует регулировки давления. Газосварочная аппаратура к газопроводу ацетилена должна присоединяться через сухие или жидкостные затворы. Предохранительные постовые затворы должны соответствовать максимально возможному давлению в ацетиленопроводе и расходу газа аппаратурой.

Для подсоединения огневой аппаратуры к газораздаточным постам применяют рукава по ГОСТ 9356–75. Для горючего газа применяют рукава типа I, для кислорода – типа III.

Газы – заменители ацетилена поступают к постам, как правило, от заводской газорегулирующей станции и реже от перепускных рамп. Типовая схема питания газами – заменителями ацетилена отличается от типовой для работы на ацетилене составом оборудования.

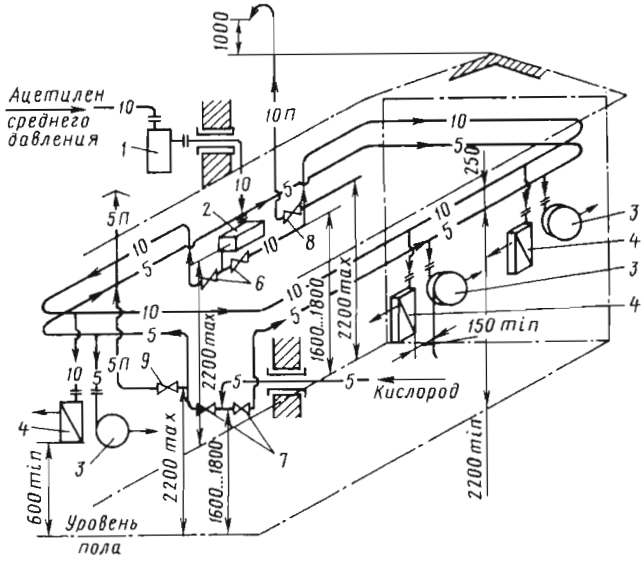


Рис. 9.15. Типовая схема централизованного газопитания сварочных постов:
1 – центральный групповой затвор; *2* – шкаф ввода ацетилена; *3* и *4* – газоразборные посты кислорода и ацетилена соответственно; *5* – газопровод кислорода; *6* и *7* – запорные вентили для ацетилена и кислорода соответственно; *8* и *9* – сбросные вентили для ацетилена и кислорода соответственно; *10* – газопровод ацетилена; *5П* – сбросной трубопровод; *10П* – сбросной газопровод ацетилена

9.1.3.1. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ГАЗОПИТАНИЯ СВАРОЧНЫХ ПОСТОВ

Для газопламенной обработки применяют различные горючие газы, а в качестве окислителя – кислород.

Ацетиленовые установки и генераторы являются источниками питания постов ацетиленом. Они включают технологическое и вспомогательное оборудование, необходимое для производства ацетилена из карбида кальция. Существует два типа установок: для получения газообразного и растворенного ацетилена. Отечественные установки разработаны по блочно-модульному типу и содержат узлы низкого, высокого и среднего давления. Узел низкого давления служит для получения газообразного ацетилена, очищенного от примесей, и подачи его в газопровод низкого давления (до 0,01 МПа) и далее к сварочным постам.

Узел среднего давления предназначен для подачи газообразного ацетилена в газопровод водокольцевым насосом под давлением до 0,12 МПа.

Узел высокого давления рассчитан на получение растворенного ацетилена за счет его компримирования под давлением 2,3 МПа.

Унифицированные узлы выпускают на различную производительность ацетилена (20, 40 и 80 $м^3$/ч), и на их основе комплектуют установки производительностью 20...160 $м^3$/ч ацетилена.

Стационарные генераторы, как правило, входят в состав рассматриваемых установок, однако они могут использоваться самостоятельно для питания ацетиленом нескольких сварочных постов. К таким генераторам относятся стационарные генераторы среднего давления АСК (рис. 9.16) производительностью 8...10 $м^3$/ч. Их применяют на производствах с относительно небольшим числом сварочных постов. При большем количестве последних используют генераторы низкого и среднего давления производительностью ≥20 $м^3$/ч. Технические характеристики стационарных генераторов приведены в табл. 9.16.

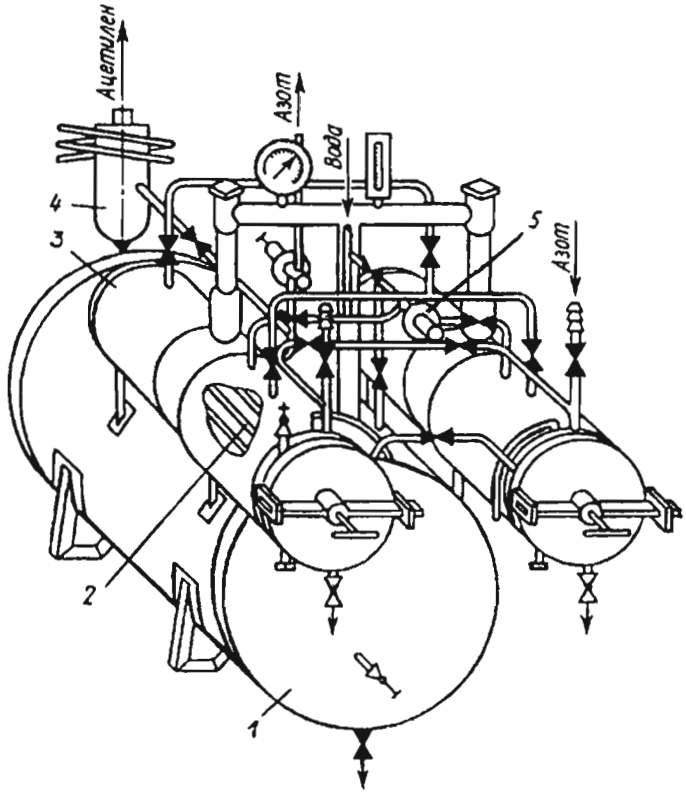


Рис. 9.16. Генератор ацетиленовый АСК-5:
1 – газгольдер; *2* – корзина; *3* – реторта; *4* – затвор; *5* – регулятор давления

9.16. Технические характеристики стационарных ацетиленовых генераторов

Параметр	АПК-5	АСК-5	АСК-3	ГСД-20
Номинальная производительность,	5		10	20
Рабочее давление ацетилена, МПа	0,02…0,07		0,069	0,04…0,07
Наибольшая единовременная загрузка карбида кальция, кг	–	До 11 + 11	До 50	До 130
Размеры кусков карбида кальция, мм		25…80		2…80
Рабочая температура окружающей среды, °С	5…35			1…45
Габаритные размеры, мм:				
– газообразователя	1350 × 840 × 2370	1970 × 950 × 1540	1885 × 1305 × 1716	1900 × 1400 × 1915
– водяного затвора	–	920 × 490 × 330	870 × 350 × 1260	–
– влагосборника		900 × 240 × 152	–	
Масса, кг:				
– газообразователя	170	180	485	2540
– водяного затвора	–	–	58	–
– влагосборника			27	
Изготовитель	ОАО «Автоген»			

Передвижные ацетиленовые генераторы применяются, как правило, в передвижных сварочных постах в строительстве, промышленности и сельском хозяйстве, куда доставка растворенного баллонного ацетилена затруднена или экономически невыгодна. Они представляют собой комплектные устройства, включающие газообразователь, газосборник и предохранительное устройство для защиты от обратного удара. На рис. 9.17 показан наиболее распространенный генератор АСП-10, а в табл. 9.17 приведены технические характеристики передвижных генераторов.

Кислородные установки, газификаторы. Для газопламенной обработки используют кислород, получаемый в установках разделения воздуха. Кислород можно транспортировать в газообразном состоянии и перевозить в жидком виде с последующей газификацией у потребителя.

Источником питания газообразным кислородом служат:

– индивидуальные баллоны вместимостью 40 л;

– разрядная рампа с баллонами вместимостью 40 л;

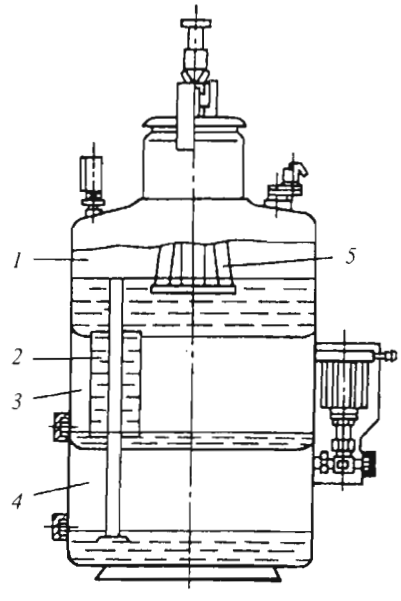


Рис. 9.17. Передвижной ацетиленовый генератор АСП-10:
1 – газообразователь; *2* – переливной патрубок; *3* – вытеснитель; *4* – газосборник; *5* – корзина

9.17. Технические характеристики передвижных ацетиленовых генераторов

Параметр	АПК-1	АПК-3-1,5	АПК-3-0,7	АСП-10	АГМ
Номинальная производительность, $м^3/ч$	2	3		1,5	1,25
Единовременная загрузка карбидом кальция, кг		5 + 5		До 3,2	3
Размеры кусков карбида, мм	25…80				
Рабочее давление ацетилена, МПа	0,15	0,02…0,15	0,02…0,07	0,01…0,15	0,07
Габаритные размеры, мм	430×320×750	1200×950×600		400×500×1000	Нет данных
Масса, кг	22	120	120	16,5	
Изготовитель	ОАО «Автоген»				

– автореципиенты, на которых смонтированы в одном коллекторе баллоны вместимостью 400 л с одним присоединительным штуцером. Автореципиент перевозится к потребителю и подключается к сети потребления давлением 20 МПа;

– стационарный реципиент потребителя, к которому кислород поступает от УРВ.

Реципиент подключается непосредственно к сети потребления.

Источниками питания кислородом в сжиженном виде могут быть:

– автомобильные газификационные установки (АГУ), которые заполняются жидким кислородом из заводского хранилища и направляются к потребителю, где при помощи испарителя жидкий кислород снова превращается в газообразное состояние и подается потребителю;

– стационарная насосная газификационная установка, которая находится у потребителя и заполняется жидким кислородом, доставляемым в транспортных емкостях;

– стационарный безнасосный газификатор, рассчитанный на максимальное давление продукта (1,5 или 4 МПа). Жидкий кислород из заводского хранилища доставляется потребителю в АГУ или транспортных резервуарах (танках) типа ТРЖК. Наиболее распространены транспортные резервуары объемом 0,3…8 $м^3$.

При потреблении предприятием до 300 $м^3/ч$ газообразного кислорода наиболее эффективна его доставка автомобильными реципиентами, при большем потреблении становится целесообразно транспортировать его по трубопроводам.

Производительность источника питания техническим кислородом определяется исходя из единовременной работы суммарного числа сварочных постов для газовой сварки и резки. Приведем данные типового расхода кислорода, $м^3/ч$, существующим на предприятиях оборудованием.

Многорезаковые стационарные портальные машины для кислородной резки листовой стали	120
Портально-консольные машины с четырьмя резаками	50
Трехрезаковые шарнирные машины	40
Двухрезаковые переносные машины для кислородной резки	25
Металлизационные аппараты типа УГПТ	6
Газораздаточный пост кислорода:	
– ПГК-10	10
– ПГК-40	40
Универсальная сварочная горелка	До 1

Перепускные разрядные рампы предназначены для питания газами постов одновременно от нескольких баллонов. Они применяются, как правило, при отсутствии на предприятии ацетиленовых или кислородных станций, резервуарных установок, газификаторов и т.п. Технические характеристики перепускных рамп приведены в табл. 9.18.

Баллоны. Большинство потребителей получает газы со специализированных предприятий, где они производятся, в баллонах, снабженных запорными вентилями со штуцерами для подсоединения редукторов (рис. 9.18). Технические характеристики баллонов приведены в табл. 9.19.

9.18. Технические характеристики перепускных рамп

Параметр	Рампа		
	ацетиленовая РАР-15	пропан-бутановая 2 × 5	кислородная 2 × 10
Число присоединяемых баллонов:			
– в одной ветви	6	5	10
– в двух ветвях	12	10	20
Наибольшая пропускная способность, $м^3/ч$:			
– одной ветви	7,5	12,5	125
– двух ветвей	15	25	250
Наибольшее рабочее давление, МПа:			
– до редуктора	2,5	2,5	20
– после редуктора	0,02…0,1	0,02…0,3	0,3…1,6
Масса, кг	80	54	130
Изготовитель	ФГУП «ВНИИавтогенмаш»		

9.19. Технические характеристики баллонов для газопламенной обработки

Параметр	Для негорючих газов					Для горючих газов			
	кислорода	аргона	гелия	азота	углекислого газа	водорода	метана	ацетилена	пропан-бутана
Форма хранения газа	Сжатый				Сжиженный	Сжатый		Растворенный	Сжиженный
Вместимость (водяная), л	40								50
Давление газа, МПа	15							2,5	
Вместимость газа, $м^3$	6				12,6	6		4,6…5,3	12,5
Цвет корпуса	Голубой	Серый	Коричневый	Черный		Темно-зеленый	Красный	Белый	Красный
Габаритные размеры*, мм:									
– диаметр	219								299
– высота	1370								960
Масса*, кг	58,5							До 90	22
Температура окружающей среды, °С	–50…+60							–50…+40	–40…+45

* Приведены масса и габаритные размеры стандартных баллонов.

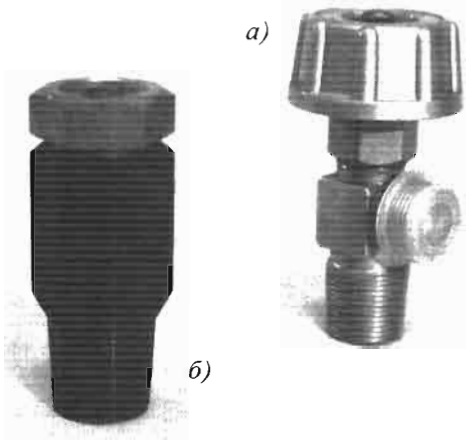


Рис. 9.18. Баллонные вентили для кислорода (*а*) и ацетилена (*б*)

Рис. 9.19. Редукторы:
1 – баллонный одноступенчатый для кислорода БКО-50-2; *2* – сетевой одноступенчатый для ацетилена САО-10-2; *3* – рамповый для пропан-бутана РПО-25-1

Редукторы. Газовые редукторы предназначены для регулирования и поддержания постоянными давления и расхода газа и различаются по уровню рабочего давления, расходу, виду газа и по условиям его отбора: из отдельного баллона – баллонные редукторы, от группы баллонов – рамповые редукторы, а при сетевой разводке газа к сварочным постам на трубопровод устанавливают сетевые редукторы. Технические данные баллонных одноступенчатых редукторов приведены в табл. 9.20, а двухступенчатых – в табл. 9.21.

Двухступенчатые редукторы обеспечивают более точное поддержание заданных параметров по сравнению с одноступенчатыми и не склонны к замерзанию при отрицательных температурах окружающего воздуха.

В табл. 9.22 приведены технические характеристики рамповых редукторов, а в табл. 9.23 – сетевых.

На рис. 9.19 показаны редукторы, выпускаемые ОАО «БАМЗ».

Газоразборные (газораздаточные) посты предназначены для отбора и подачи газа от газопроводов к аппаратуре для газопламенной обработки материалов. Они устанавливаются в местах ответвления от газопровода к потребителю.

Газоразборные посты ацетилена содержат запорный вентиль и предохранительное устройство жидкостного или сухого типа. На рис. 9.20 показан газоразборный пост ПГА-3,2-70 с жидкостным постовым затвором ЗСП-8.

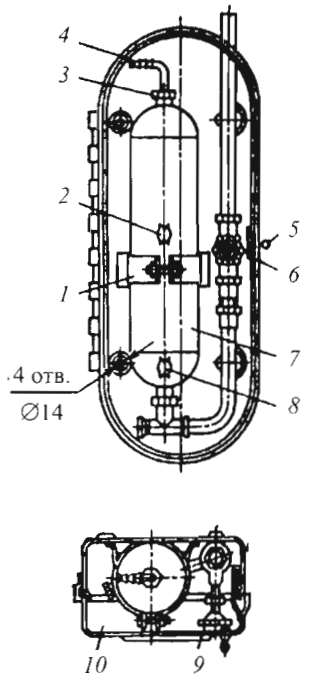


Рис. 9.20. Газоразборный пост ацетилена ПГА-3,2-70:
1 – хомут; *2*, *8* – пробки; *3* – гайки; *4* – ниппель; *5* – ключ; *6* – замок; *7* – предохранительный затвор; *9* – вентиль; *10* – шкаф

9.20. Технические характеристики баллонных одноступенчатых редукторов

Параметр	БКО-25-2	БКО-50-2	БКО «Норд»	БАО-5-2	БАО «Норд»	БПО-5-2	БПО-5 «Норд»	БПО-80-2
Рабочий газ	Кислород			Ацетилен		Пропан-бутан		Водород
Пропускная способность, $м^3/ч$	25	50	30	5				80
Давление газа, МПа:								
– наибольшее на входе	20			2,5				20
– рабочее	0,1…0,8	0,1…1,2	1,0	0,01…0,12	0,15	0,3		0,1…1,2
Вид крепления на баллонном вентиле	Накидной гайкой 3/4", трубная резьба			Хомутом		Накидной гайкой 21,8 мм, левая резьба		
Габаритные размеры, мм	280 × 150 × 145		198 × 182 × 60	280 × 150 × 145	245 × 182 × 60	280 × 150 × 145	196 × 182 × 60	280 × 150 × 145
Масса, кг	1,75			1,98	1,2	1,6	1,2	1,7
Температура окружающей среды, °С	–30...+50		–15...+15	–25...+30	–15...+15	–15...+45	–15...+15	–30...+50
Изготовитель	ОАО «БАМЗ»		ФГУП «СРЗ "Нерпа"»	ОАО «БАМЗ»	ФГУП «СРЗ "Нерпа"»	ОАО «БАМЗ»	ФГУП «СРЗ "Нерпа"»	ОАО «БАМЗ»

9.21. Технические характеристики баллонных двухступенчатых редукторов

Параметр	ДКД-8	ДАД-1
Рабочий газ	Кислород	Ацетилен
Пропускная способность, $м^3/ч$	25	5
Давление газа, МПа:		
– на входе	20	2,5
– рабочее	0,05…0,8	0,01…0,12
Вид крепления на баллонном вентиле	Накидной гайкой 3/4", трубная резьба	Хомутом
Габаритные размеры, мм	230 × 190 × 180	230 × 250 × 180
Масса, кг	3,6	3,5
Рабочая температура окружающей среды, °С	–30…+50	–25…+50
Изготовитель	ОАО «БАМЗ»	

9.22. Технические характеристики рамповых одноступенчатых редукторов

Параметр	РКЗ-500-2	РАО-30-1	РПО-25-1
Рабочий газ	Кислород	Ацетилен	Пропан-бутан
Пропускная способность, $м^3/ч$	500	30	25
Давление газа, МПа:			
– наибольшее на входе	20	2,5	2,5
– рабочее	0,3…1,6	0,02…0,1	0,02…0,3
Габаритные размеры, мм	285 × 230 × 225	305 × 285 × 205	
Масса, кг	10	6,5	
Рабочая температура окружающей среды, °С	5…50		
Изготовитель	ОАО «БАМЗ»		

9.23. Технические характеристики одноступенчатых сетевых редукторов

Параметр	СКО-10-2	САО-10-2	СПО-6-2	СМО-35-2
Рабочий газ	Кислород	Ацетилен	Пропан-бутан	Метан
Пропускная способность, $м^3/ч$	10		6	35
Давление газа, МПа:				
– наибольшее на входе	1,6	0,12	0,3	
– рабочее	0,01…0,5	0,01…0,1	0,02…0,15	
Габаритные размеры, мм	140 × 140 × 150			
Масса, кг	1,5			
Рабочая температура окружающей среды, °С	–30…+50	–25…+50	–15…+45	
Изготовитель	ОАО «БАМЗ»			

9.24. Технические характеристики газоразборных постов

Параметр	ПГК-10	ПГК-50	Пг-3,2	ПГА-3,2	ПГА-3,2С	Пг-5ПГ	ПГУ-5
Рабочий газ	Кислород		Ацетилен			Природный газ	Растворенный ацетилен и природный газ
Пропускная способность, $м^3/ч$	10	50	3,2			5	
Давление газа, МПа	0,01…0,5	0,1…1,2	0,03…0,15	0,07	0,15	0,03…0,15	
Исполнение	Открытое 2		Закрытое 1, открытое 2			Закрытое 1	Закрытое 1, открытое 2
Габаритные размеры, мм:							
– исполнение 1	–		150 × 186 × 410	800 × 282 × 185	830 × 270 × 195	445 × 180 × 345	182 × 150 × 425
– исполнение 2	280 × 190 × 200	280 × 190 × 190	144 × 180 × 346	625 × 284 × 180	850 × 284 × 180	–	144 × 168 × 385
Масса, кг:							
– исполнение 1	–		4,5	14,2	23	5,1	6,4
– исполнение 2	3,7	3,8	2,1	7,4	13	–	3,7
Рабочая температура окружающей среды, °С	–30...+50		–5...+40	По параметрам жидкости затвора		–25...+40	

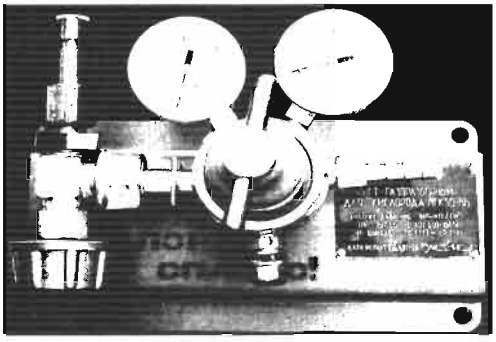


Рис. 9.21. Газоразборный пост кислорода

Газоразборные посты для газов – заменителей ацетилена в отличие от ацетиленовых комплектуются не постовым затвором, а обратным клапаном ЛЗС-2 конструкции ВНИИавтогенмаш. Газоразборные посты кислорода в отличие от предыдущих не комплектуются предохранительным устройством, а в соответствии с назначением снабжаются помимо вентиля сетевым или баллонным редуктором. На рис. 9.21 показан внешний вид газоразборного поста для кислорода ПГК-50, а в табл. 9.24 приведены технические характеристики выпускаемых Воронежским ОАО «Автоген» газоразборных постов.

9.1.4. МАШИНЫ ДЛЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ РЕЗКИ

В настоящее время в промышленности широко применяется механизированная резка, выполняемая с помощью машин, оснащенных, как правило, несколькими резаками. Механизированная термическая резка в металлообработке обеспечивает весьма ощутимое повышение производительности труда резчика по сравнению с ручной, точность в выполнении заготовок, сокращение трудоемкости последующих сборочных и сварочных работ, улучшение условий труда резчика и др.

По конструктивному исполнению машины термической резки делятся на стационарные, устанавливаемые в определенном месте заготовительного участка, и переносные, перемещаемые оператором в рабочую зону. В зависимости от вида обрабатываемого материала имеются машины для резки листового проката, труб, профильного проката, стальных отливок и т.д. По устанавливаемой на машине режущей оснастке различают машины для кислородной, плазменной, лазерной, водоструйной резки.

В целях унификации выпускаемых в стране наиболее многочисленных типов машин для резки листовой стали введен ГОСТ 5614–86, который предусматривает разделение стационарных машин на портальные, портально-консольные, шарнирные. В зависимости от способа управления машинами различают машины с числовым программным, фотоэлектронным, магнитокопировальным и механическим управлением. На машинах портального типа обрабатываемый лист размещается под ходовой частью машины (порталом), на большинстве портально-консольных машин он располагается под консолью, на шарнирных машинах обрабатываемый лист размещается под шарнирной рамой (рис. 9.22).

9.1.4.1. МАШИНЫ ДЛЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ РЕЗКИ ЛИСТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

9.1.4.1.1. Портальные машины

Портальные машины имеют перемещающийся по рельсовому пути продольного хода портал (рис. 9.23). На передней стороне последнего закреплена направляющая, по которой перемещаются ведущая и холостые каретки со смонтированной на них режущей оснасткой. Они наиболее пригодны для раскроя листов, а также для обработки сварных полотнищ или нескольких листов одновременно (широкопортальные машины).

В кинематической схеме портальных машин заложена высокая точность перемещения резательного инструмента по контуру резки. Наиболее высокую точность резки портальными машинами обеспечивают устройства числового программного управления (УЧПУ) контурным движением и технологическими переходами. УЧПУ дает также возможность встраивания таких программных машин в комплексно-автоматизированные системы поточных линий и переналаживаемых участков, где они могут быть сопряжены с управляющей ЭВМ верхнего уровня. Портальные программные машины с УЧПУ имеют высокую стоимость и в связи с этим наиболее эффективны на металлообрабатывающих предприятиях с большими объемами резки. Машины поставляют в комплекте с суппортом, резательной оснасткой, рельсовым путем, коммуникациями и ЗИП. В комплект входят также устройства управления и приводы.

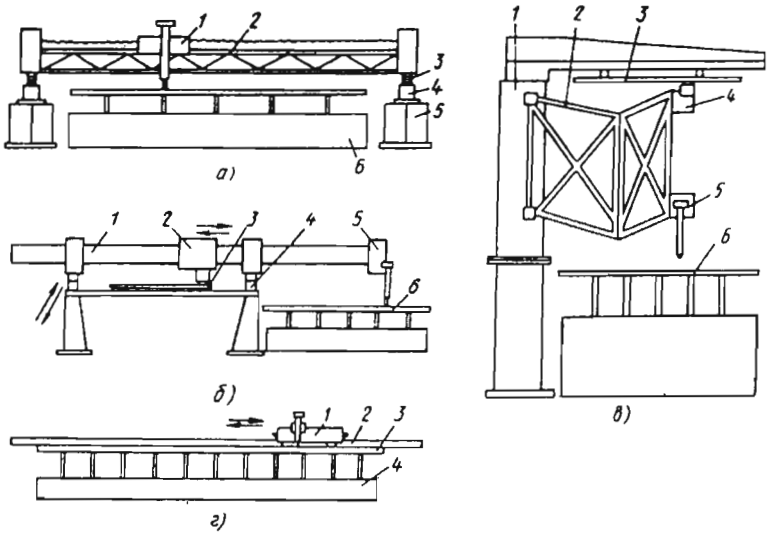


Рис. 9.22. Схемы машин для термической резки листовой стали:
а – портальной (*1* – каретка; *2* – портал; *3* – привод продольного хода; *4* – рельсовый путь с опорой *5*; *6* – раскройный стол); *б* – портально-консольной (*1* – портал; *2* – привод поперечного хода с фотоголовкой; *3* – копировальный стол; *4* – привод продольного хода с системой управления; *5* – опора; *6* – разрезаемый лист); *в* – шарнирной (*1* – колонна; *2* – шарнирная рама; *3* – шаблон; *4* – ведущий механизм; *5* – державка с резаком; *6* – разрезаемый лист); *г* – переносной (*1* – тележка; *2* – направляющая; *3* – разрезаемый лист; *4* – стол)

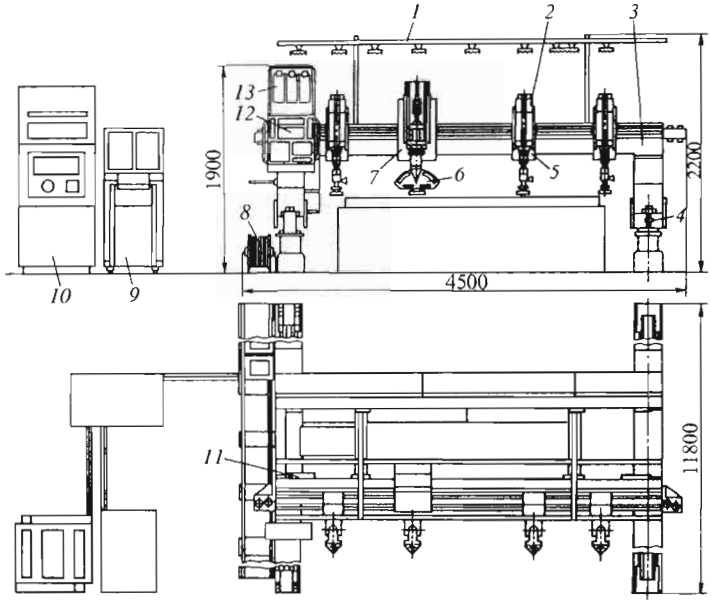


Рис. 9.23. Конструктивная схема машины «Искра-2,5К»:
1 – рама для подвески шлангов; *2* – суппорт; *3* – портал; *4* – рельсовый путь; *5* и *7* – каретки поперечного хода соответственно неприводная и приводная; *6* – поворотный трехрезаковый блок; *8* – коммуникационный блок; *9* – шкаф электрооборудования и автоматики; *10* – УЧПУ; *11* – привод продольного хода; *12* – пульт управления; *13* – газовый пульт

Портальные машины для кислородной резки. Наиболее широко применяются в промышленности машины для кислородной резки листов из низкоуглеродистой и низколегированной сталей. Они оснащаются несколькими (≥8) резаками и могут одновременно обрабатывать большое количество однотипных деталей, обеспечивая при этом высокие точность заготовок и качество поверхности реза. При установке на машине трехрезаковых поворотных блоков они обеспечивают наряду с прямолинейными кромками резку со скосом кромок под сварку как с притуплением, так и без него, чашеобразную разделку кромок. Они наиболее эффективны при полной загрузке и минимальных затратах вспомогательного времени (в поточных линиях, технологических комплексах, двухпозиционных системах). В резательной оснастке используются ацетиленокислородное, пропанокислородное пламя или смеси кислорода с природным газом.

Машины различаются по техническим параметрам, комплектности, ширине обработки и конструктивным особенностям.

На рис. 9.24 показана портальная машина «Алмаз-ПКЦ2.5», оснащенная УЧПУ «Burny-2,9», а в табл. 9.25 приведены технические характеристики портальных машин кислородной резки листов.

Все современные машины термической резки оснащены УЧПУ на базе одноплатного промышленного компьютера с процессором «Pentium». Устройство обеспечивает перемещение рабочих органов машины по требуемой траектории в соответствии с картой раскроя листа; реализацию алгоритмов управления технологической оснасткой машины в процессе резки; графический интерфейс при просмотре деталей в раскрое; возможность редактирования программ; обмен программ с внешней ЭВМ; диагностику электрооборудования.

Для подготовки управляющих программ к машинам термической резки с УЧПУ ведущие производители оборудования разработали систему автоматизированного проектирования – САПР «Раскрой». Она обеспечивает создание карт раскроя и выдает управляющие программы для машин термической резки.

Пакет прикладных программ «Раскрой» представляет собой CAD-систему, в которой учтена специфика технологических процессов термической резки.

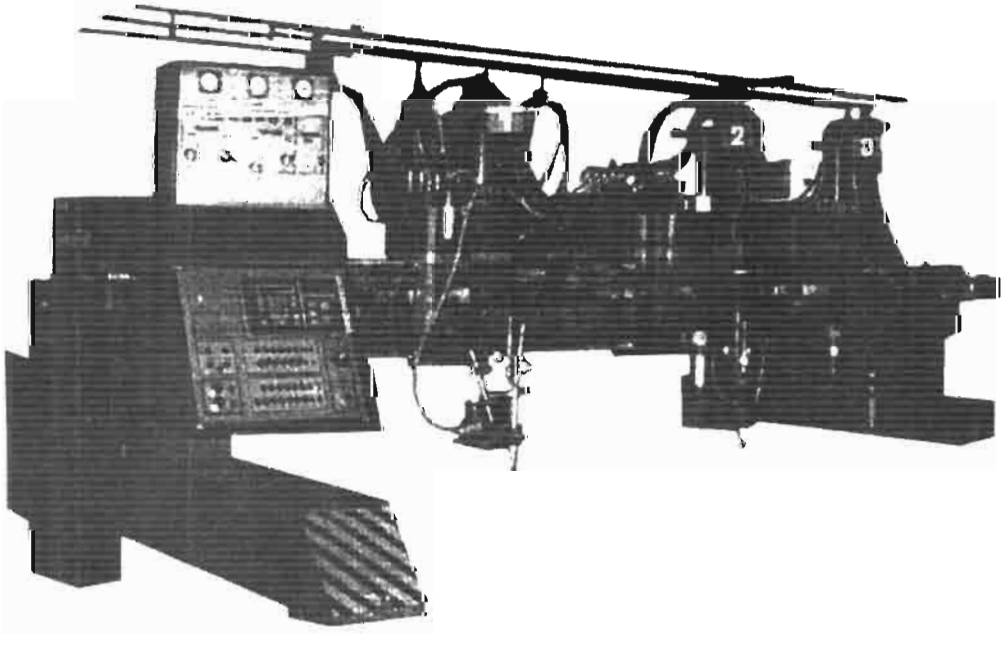


Рис. 9.24. Машина «Алмаз» для кислородной и плазменной резки листов с УЧПУ «Burny-2,9»

9.25. Техническая характеристика портальных машин с УЧПУ для кислородной резки листов

Параметр	«Комета»		«Omnimat»	«Corta»	«Suprarex SXE-P»	«Алмаз ПКЦ-2,5»	«Кристалл ТК-2,5»
	2,5 К	3,2 К					
Наибольшие размеры разрезаемых листов, мм:							
– длина	8000						10 000
– ширина	2500	3200	3600	2300	2500…5000		2500
Толщина разрезаемого листа стали, мм:							
– одним резаком	3…200						5…100
– двумя и более резаками	3…100						–
– со скосом кромок	5…80						–
Скорость перемещения резака, мм/мин	50…12 000				50…6000		100…4000
Максимальное отклонение от контура, мм	±0,35						±0,5
Число резаков	2…4		До 6			4	1
Энергопитание:							
– напряжение, В	380						
– частота, Гц	50						
Потребляемая мощность, кВ · А	3,5						
Расход на один резак, $м^3/ч$:							
– кислорода	6						10
– ацетилена	1						–
– пропан-бутана	0,6						0,84
– природного газа	1,8						
Давление, МПа:							
– кислорода	1						1,4
– горючего газа	0,1						0,08
Габаритные размеры, мм	20 600 × 6900 × 2550		20 600 × 10 900 × 2550		20 600 × 12 100 × 2550	20 600 × 12 600 × 2550	12 000 × 4050 × 1696
Изготовитель	НПО «Кислородмаш»		«Messer Griessheim»		«ESAB Hancock»	ФГУП «ВНИИавтогенмаш»	АП «Кристалл»

В качестве аппаратных средств, несмотря на некоторое различие систем, используются персональный компьютер IBM PC/AT на базе процессора «Intel» или совместимые с ним; принтер, совместимый с IBM PC; плоттер, совместимый с IBM PC, работающий в стандартах DMP 2000, или «Hewlett-Packard». Фирмой «ESAB Hancock» разработана система подготовки программ раскроев «Columbus», нашедшая широкое применение. Она близка по своим возможностям системе «Omnidata» фирмы «Messer Griessheim». Из отечественных систем можно отметить систему, разработанную АП «Кристалл».

Для портальных машин с УЧПУ применяются резаки с внутрисопловым смешением горючего газа и подогревающего кислорода, обеспечивающие их работу без хлопков и обратных ударов даже во время пробивки в листе начального отверстия. Это особенно важно для безаварийной работы многорезаковых машин в автоматическом режиме. Ряд фирм применяют для контроля процесса резки оптические

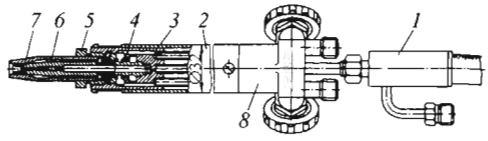


Рис. 9.25. Резак с внутрисопловым смешением, имеющий датчик контроля процесса:
1 – датчик контроля процесса резки; *2* – кожух; *3* – головка резака; *4* – смеситель; *5* – гайка; *6* – внутренний мундштук; *7* – гильза; *8* – корпус

датчики специальной разработки ВНИИавтогенмаша. На рис. 9.25 показан резак с внутрисопловым смешением, содержащий датчик контроля процесса. Наличие в машинах датчиков контроля процесса позволяет полностью автоматизировать процесс кислородной резки.

В том случае, если сеть потребителя не может обеспечить среднее или высокое давление горючего газа (>0,06 МПа), на машинах кислородной резки используются серийно выпускаемые инжекторные резаки типа РМ-3. Технические характеристики машинных резаков приведены в табл. 9.26.

9.26. Технические характеристики машинных резаков

Параметры	Марка резака				
	«Маяк-300»	«Норд»	«Gricut»	BGB-320	РМ-3
Толщина разрезаемой стали, мм	3…300	5…200	3…300	3…300 (500)	3…300
Давление, МПа: – режущего кислорода	0,3…1,2	0,25…0,8		0,22…0,75	0,2…1,0
– подогревающего кислорода	0,2…0,4	0,2…0,5	0,2…0,7	0,15…0,5	0,2…0,5
– ацетилена	0,01	0,02…0,11	0,05	0,02…0,03	0,02…0,1
– пропан-бутана	0,02…0,05	0,02…0,15	0,03…0,04	0,015…0,02	0,02…0,12
– природного газа	0,02…0,10		0,02…0,03	0,03…0,05	
Расход, $м^3$/ч: – кислорода	2…40	1,6…24,4	1,4…34	0,86…30	5…42
– ацетилена	0,4…1,2	0,5…0,9	0,4…0,9	0,22…1,25	0,5…0,9
– пропан-бутана	0,25…0,70	0,3…0,5	0,25…0,55	0,14…0,53	0,3…0,5
– природного газа	0,8…1,8	0,9…1,5	0,65…1,45	0,34…1,25	1…1,8
Посадочный диаметр, мм	32				28
Длина резака, мм	550	450	Нет данных		450
Масса, кг	1,25	1,0			1,25
Изготовитель	ФГУП «ВНИИавтогенмаш»	ФГУП «СРЗ "Нерпа"»	«Messer Griessheim»	«ESAB Hancock»	ООО «Автоген-М»

Портальные машины для плазменной резки. Сущность процесса плазменной резки заключается в следующем. В качестве источника нагрева разрезаемого металла используется столб сжатой электрической дуги, обдуваемой газом. Сжатая дуга интенсивно расплавляет разрезаемый металл по линии реза, а плазменная струя, состоящая из высокоионизированного газа с температурой порядка 15 000 °С, удаляет расплав из разреза.

Поэтому плазменная резка применяется прежде всего для резки цветных металлов и их сплавов, а также крупногабаритных деталей из листовой конструкционной стали толщиной до 30...40 мм. В этих случаях она более производительна, чем кислородная резка.

Портальные машины для плазменной резки по конструктивной схеме и системам контурного управления полностью унифицированы с портальными машинами для кислородной резки и отличаются в основном лишь режущей оснасткой и упрощенной системой газопитания.

Плазменная режущая оснастка помимо резака (плазмотрона) включает в себя специализированный выпрямитель с устройством поджига дуги и автоматикой управления. Вследствие этого портальные машины для плазменной резки, как правило, более дороги, чем машины для кислородной резки. Однако благодаря указанным преимуществам они находят широкое применение в судостроении, химическом машиностроении, авиации и ряде других отраслей. Технические характеристики портальных плазменных машин с УЧПУ приведены в табл. 9.27.

Газопитание портальных машин для плазменной резки предусматривает подачу сжатого воздуха из заводской магистрали под давлением 0,4...0,6 МПа. После запорного вентиля на газопроводе рекомендуется устанавливать масловлагоотделитель, рассчитанный на заданные давления и расход воздуха.

При использовании плазмообразующих смесей, содержащих водород, подача его к машине осуществляется от рампы с установкой в месте отбора газа газового поста ПГУ-5 с сухим затвором ЗСУ-1. В отечественной аппаратуре для плазменной резки в качестве плазмообразующего газа используют наиболее дешевый воздух. Поэтому российские портальные машины для плазменной резки оснащаются преимущественно установками этого типа. Ведущие иностранные изготовители поставляют машины термической резки с возможностью использования различных газов, в том числе азота, смесей азота и водорода, аргона и водорода, кислорода, а также воздуха. Это обеспечивает высокую стойкость режущего инструмента, отличное качество реза.

Технические характеристики установок, применяемых для механизированной плазменной резки, приведены в табл. 9.28.

Фирмы «ESAB Hancock» и «Messer Griesheim» могут поставлять портальные машины для плазменной резки под водой, устраняющие неблагоприятные воздействия на организм человека токсичных газов, шумов и светового излучения, выделяющихся в процессе резки. Несмотря на большое разнообразие конструкций режущих плазмотронов, все они содержат два основных блока: электродный и сопловый. Они электрически изолированы друг от друга и включают узлы для подачи плазмообразующих газов, основного и вспомогательного тока, крепления электрода, а также систему охлаждения электрода и сопла (рис. 9.26). Электродный и сопловый узлы образуют дуговую камеру, в которой возбуждается дуговой разряд при подаче плазмообразующих газов.

Резательные плазмотроны изготовляют и поставляют не только в составе комплектных машин и резательных установок, но и как самостоятельные изделия. Предлагаются машинные плазмотроны для резки металлов в различных диапазонах толщин (табл. 9.29).

В ассортименте плазмотронов представлены в качестве штатных резаки комплектных установок (ПВР-402, ВПР-15, ПВ-47 и др.). Практически все плазмотроны (кроме ПВ-47) могут быть использованы в составе различных плазморезательных установок, в том числе взамен штатных плазмотронов. Указанные плазмотроны, как правило, предназначены для воздушно-плазменной резки. Однако они могут служить и для резки воздушно-смесевыми плазмообразующими средами, обогащенными кислородом или содержащими углеводороды. Плазмотрон ПВР-402 предусматривает штатную возможность стабилизации дуги кислородом при условии замены катода на специальный. Это возможно и для большинства других плазмотронов (например, ПКД-4). Для воздушно-плазменной резки с инжекцией воды используются специальные или модифицированные плазмотроны (например, специальное исполнение плазмотрона ПМР-74, модификация блочно-модульного плазмотрона ПКД-4 и др.).

9.27. Технические характеристики портальных плазменных машин

Параметр	«Енисей ППлЦ-2,5»	«Кристалл»			«Алмаз ППлЦ-2,5-6»	«Пелла»	Combirex «CXD-P»	«Cortina»
		ППлЦ-2,5	ППлЦ-3,2	ТПл-3,2×2				
Наибольший размер разрезаемых листов, мм:								
– длина	10 000				8000	10 000	По требованию заказчика	
– ширина	2500		3200	8000	2500		2500…3500	1500…2500
Наибольшая толщина резки, мм:								
– стали	80/40	60/28		28/28	100/40	80/60	2…75	2…100
– алюминия	80/40	70						
– меди	50/30	40			80/30	–		
Скорость перемещения резака, мм/мин	70…6000	50…4000			50…6000	70…12 500	50…6000	До 15 000
Максимальное отклонение от контура, мм	±0,5						±0,3	
Тип УЧПУ	«Енисей»	РМ33	РМ33	2Р32Т	2Р32М	КМ-65	NCE	OMNICOM
Плазморежущая установка	АПР-404 (УПРК-302)	АПР-404					–	
Число резаков	1			2		1	2	
Энергопитание	Трехфазная сеть переменного тока							
Напряжение, В	380							
Частота, Гц	50							
Потребляемая мощность, кВ · А	130	129			258,5	130	Нет данных	75…150

Окончание табл. 9.27

Параметр	«Енисей ППл-Ц2,5»	«Кристалл»			«Алмаз ППлЦ-2,5-6»	«Пелла»	Combirex «CXD-P»	«Cortina»
		ППлЦ-2,5	ППлЦ-3,2	ТПл-3,2×2				
Расход, $м^3/ч$:								
– сжатого воздуха	4…10	3,6…9,6		7,2…20	16	До 10	2,8	4…5
– охлаждающей воды	0,25	0,36		0,6	0,3		–	0,3…0,5
Давление, МПа:								
– сжатого воздуха	0,3…0,6	0,3…0,5			0,3…0,6	0,3…0,5	0,4…0,6	0,3…0,5
– охлаждающей воды	0,35…0,45	0,5			0,35…0,45	1	0,5	
– азота	Не используется						0,6	0,8
Ширина колеи направляющих, мм	3300		4000	8800	3300		3300…4300	2300…3300
Габаритные размеры, мм:								
– длина	12 000		18 000		11 760	11 980	11 500…11 800	По требованию заказчика
– ширина	4150	4050	4750	10 510	5500	4510	3900…4500	2650…3750
– высота	1710				1600	1860	1500…1800	1800…2100
Масса, кг:								
– комплекта	5000	5100	6300	7300	5400	Нет данных		
– ходовой части	700	800	900	950	1500			
Изготовитель	Завод СТО	АП «Кристалл»			ФГУП «ВНИИавтогенмаш»	ПТФ «Пелла»	«ESAB Hancock»	«Messer Griesheim»

9.28. Технические характеристики установок для механизированной плазменной резки

Параметр	АПР-404	«Киев-6» А1810	ОПР-6-3М (СА-199)	АПР-405К	Установка плазменной резки	PA-S-40 CNC75-150	RPC-600 (два)
Наибольшая толщина разрезаемого металла, мм:							
– стали	130	120	160/80	130	120	150	130
– алюминия	130	120	200/100	130	120	150	150
– меди	100	80	100/40	100	80	–	–
Номинальный рабочий ток, А	400	315	300,700	400		500	
Пределы регулирования тока, А	200...500	100...315	120...700	150...450	150...500	100...600	100...750
Режим включения, % ПВ	100						
Напряжение, В:							
– холостого хода	320^{+5}_{-10}	330	340/180	320	300/180	400	
– условное рабочее	270	140...260	170/100	270	130...200	–	
Расход, $м^3/ч$:							
– сжатого воздуха	2,5...8	3,8	4,0	1,8...7,2	2...3	2,8	4,5...7,5
– азота, аргона	–			–		1,0...1,5	3
Давление, МПа:							
– сжатого воздуха	0,4	0,5...0,6	0,4	0,5...0,6	0,4	0,8	0,35...0,65
– азота, аргона, водорода	–		0,5...0,6	–		0,6...0,8	0,85

Окончание табл. 9.28

Параметр	АПР-404	«Киев-6» А1810	ОПР-6-3М (СА-199)	АПР-405К	Установка плазменной резки	PA-S-40 CNC75-150	RPC-600 (два)
Расход охлаждающей воды, $м^3/ч$	3,6	1,2...1,8	0,72	0,36	0,2	0,36	–
Давление охлаждающей воды, МПа	0,4	0,25...0,5	0,2			0,5	
Скорость резки, мм/мин (толщина стали, мм)	2400 (20)	2500 (20)	5000 (10)	–	150 (120)	1800 (20)	120 (150)
Энергопитание	Трехфазная сеть переменного тока						
Напряжение питающей сети, В	380						
Частота, Гц	50						
Потребляемая мощность при номинальном токе, кВ · А	128	106	220	128		100	50/60
Габаритные размеры выпрямителя, мм	880×1040×1706	850×800×1365	855×1800×1720	500×1500×1750	880×1040×1706	1320×844×1476	1115×816×1196
Масса, кг (без ЗИП)	1040	950	1200	800	1040	2 × 566	1000
Комплектующие плазмотроны	ПМР-403 или ПВР-402	ВПР-15	Для ручной, машинной и поверхностной резки	ПМР-405	Для ручной и машинной резки	–	
Изготовитель	СЗВЧЭО	ОЗСО ИЭС	НИКИМТ	ТОО «Вэлса»	НО «Ивтан»	«Messer Griessheim»	«ESAB Hancock»

9.29. Технические характеристики плазмотронов для резки металлов больших толщин

Параметр	ПВР-402	ВПР-15	ПКД-4	РПВ-401	ПВ-47	РПТ-1	РПТ-2
Комплектуемые установки	К АПР-404	Аппараты типа «Киев»	–		УПРК	–	
Плазмообразующие газы	Воздух, кислород	Воздух	Воздух, возможен кислород	Воздух			
Наибольшая толщина разрезаемого металла, мм (по стали)	130	100	90	80	200		140
Номинальный рабочий ток, А	400	315		400	500	800	400
То же, при кислородно-плазменной резке	250	Не используется					
Режим включения, % ПВ	100						
Наибольший ток, А	500	–		500	600	1000	500
Наибольшая мощность, кВт	108	72	85	108	250	250	120
Скорость резки, мм/мин (толщина стали, мм)	840 (40)	750 (40)	1980 (20)	–	2000 (40)	2500 (40)	950 (40)
Расход, $м^3/ч$:							
– воздуха	4...10	4,8	3,8	3,5...4,6	2,9...6,6	4...10	
– кислорода	3,5...6	Не используется					
– охлаждающей воды	0,24	0,2...0,3	0,3...0,5	0,24	0,1...0,3	0,5	0,3
Давление, МПа:							
– воздуха	0,25...0,6	0,5...0,6		0,25...0,4	0,3...0,5	0,25...0,6	
– кислорода		Не используется					
– охлаждающей воды	0,15...0,3	0,25...0,5		0,16...0,3	≥0,15	0,5	0,25...0,5
Габаритные размеры, мм:							
– диаметр	50	65		54	60	65	50
– длина без шлангов	240	300	180	300	150	250	250
Масса без шлангов, кг	1,5	1,25	1,1	1,25	1,4	1,7	1,55
Изготовитель	СЗВЧЭО	ФГУП «ВНИИ-автоген-маш»	НПП «Техмо-ноплазма»	Завод точной механики (г. Екатеринбург)	Предприятие «Плазматех»	ИТ СО РАН, ТОО «СДК»	

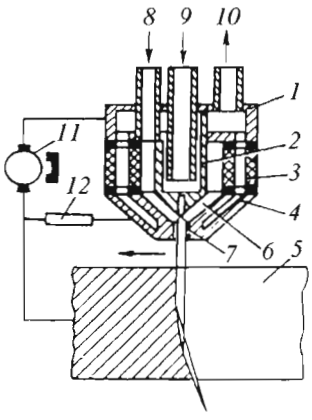


Рис. 9.26. Схема режущего плазмотрона:
1 – катодный блок; *2* – катодная вставка; *3* – изолирующая втулка; *4* – сопло; *5* – разрезаемый металл; *6* – дуговая камера; *7* – плазменная дуга; *8* – штуцер подачи плазмообразующего газа; *9* – то же, охлаждающей воды; *10* – штуцер слива воды; *11* – источник электропитания; *12* – балластное сопротивление

Средний срок эксплуатации плазмотронов характеризуется общей наработкой ≥500…600 ч. В плазмотронах ПВ-47 используются внутренние медные электроды, обладающие наиболее высоким ресурсом (≥20 ч) даже в условиях питания дуги сильными токами и часто повторяющихся включений. В других воздушно-плазменных плазмотронах применяют циркониевые или гафниевые катоды. Ресурс этих катодов 4…8 ч в зависимости от количества зажиганий дуги, силы рабочего тока и других условий.

Фотокопировальные портальные машины. Наряду с портальными машинами термической резки с УЧПУ в отечественной промышленности работает большое количество машин с дистанционно-масштабным управлением типа ПКФ, «Комета», применяемых на предприятиях с относительно небольшим годовым объемом переработки проката.

Исходные данные для этих машин вычерчиваются на бумаге в уменьшенном в 5–10 раз изображений детали или всего раскроя листа. В этом случае не требуются затраты на вычислительную технику для подготовки управляющих программ, как необходимо для машин термической резки с УЧПУ. Однако относительно невысокая стоимость персонального компьютера для подготовки программ раскроев, более низкая точность фотокопировальных машин из-за ошибок при вычерчивании копирчертежей, величина которых умножается системой управления в соответствии с масштабом копирования, делает эти машины неперспективными. Несмотря на это, фотокопировальные машины данного класса работают на многих предприятиях, в будущем они будут заменены на прогрессивные машины с УЧПУ.

Технические характеристики портальных машин термической резки с фотокопировальным дистанционно-масштабным управлением приведены в табл. 9.30.

9.30. Портальные машины с фотокопировальным управлением

Параметр	ПКФ-2,5-2-2-6	ПКФ-3,5-2-2-10	ПКФ-2,5-2-2	ППЛФ-2,5-2
Назначение	Фигурная резка заготовок со скосом кромок под сварку и без него		Фигурная резка заготовок без скоса кромок под сварку	
Ширина обрабатываемого листа, мм	2500	3500	2500	
Наибольшая толщина разрезаемого листа, мм	100			
Скорость перемещения, мм/мин	50…1600			50…6000
Число резаков	3		2	1
Класс точности	2			
Габаритные размеры, мм	4400 × 11 760 × 2000		4350 × 10 350 × 2100	
Масса ходовой части, кг	2450	2650	2300	4500
Изготовитель	НПО «Кислородмаш»			

Портальные раскройные машины предназначены для резки полос из листов: прямолинейного раскроя с одновременной подготовкой кромок для сварки; вырезки заготовок простейших форм (прямоугольники, квадраты, треугольники, круги и др.) с упрощенной относительно портальных машин с УЧПУ оперативно-позиционной системой управления движением резака по заданной траектории. Такие машины для кислородной резки заготовок простой формы предусматривают управление путем набора управляющих команд на пульте управления без подготовки рабочих программ.

Наряду с газопламенными кислородными раскройными машинами могут изготовляться также машины в плазменном варианте.

Технические характеристики портальных раскройных машин приведены в табл. 9.31.

9.31. Технические характеристики портальных раскройных машин

Параметр	«Комета КЛ-2,5-8»	«Комета КЛ-3,6-8»	Раскройно-полосовая многорезаковая машина «Искра»	«Комета КО-2,5»	«Комета КО-3,2»	«Комета КО-3,6»	ППлП-2,5
Наибольший размер разрезаемых листов, мм:							
– длина	8000		12 500	8000			
– ширина	2500	3600	3600	2500	3200	3600	2500
Наибольшая толщина разрезаемой заготовки из стали, мм	100			200			100
То же, при резке со скосом кромок	–			100			–
Скорость перемещения резака, мм/мин	50...12 000		50...6000	50...12 000			70...1000
Число резаков	8		12	2...4			2
Энергопитание	Трехфазная сеть переменного тока						
Напряжение, В	380						
Частота, Гц	50						
Потребляемая мощность, кВ · А	2,5		1,2	3,5			–
Расход на один резак, $м^3/ч$, не более:							
– кислорода	1,8						
– ацетилена	1,0						
– пропан-бутана	0,6			Не используется			–
– природного газа	1,6						
– воздуха	–						16

Окончание табл. 9.31

Параметр	«Комета КЛ-2,5-8»	«Комета КЛ-3,6-8»	Раскройно-полосовая многорезаковая машина «Искра»	«Комета КО-2,5»	«Комета КО-3,2»	«Комета КО-3,6»	ППлП-2,5
Давление, МПа: – кислорода	0,4…1						
– ацетилена	0,015…0,03			0,06…0,08			
– пропан-бутана	0,04…0,07			Не используется			–
– природного газа							
– воздуха	–						0,16
Ширина колеи направляющих, мм	3300	4000	4300		4000	4500	2950
Габаритные размеры (с рельсовым путем), мм	20 600× ×6000× ×2000	20 600× ×6900× ×2000	15 000× ×4400× ×2000	20 600× ×6000× ×2800	20 600× ×6900× ×2800		10 350× ×6675× ×1980
Масса ходовой части, кг	935		1200	Нет данных			4300
Изготовитель	НПО «Кислородмаш»		ФГУП «ВНИИавтогенмаш»	НПО «Кислородмаш»			

9.1.4.1.2. Портально-консольные машины для кислородной и плазменной резки

Портально-консольные машины, как и портальные, имеют перемещающийся в продольном прямолинейном направлении портал с приводом, управляющим устройством, плазменной или газопламенной резательной оснасткой и другими устройствами. В отличие от портальных портально-консольные машины имеют поперечную балку с консолью, расположенной вне межрельсового пространства (рис. 9.27). Такая конструктивная схема позволяет использовать для управления движением резака по контуру реза фотоследящую систему, работающую по копирчертежу, выполненному в масштабе 1 : 1. Эти фотоследящие устройства, так же, как и копирчертежи в натуральном масштабе, относительно недороги и доступны в подготовке, обслуживании и эксплуатации даже на малых и ремонтных предприятиях.

Портально-консольные машины могут быть оборудованы также магнитокопировальным устройством, характеризующимся наибольшей простотой и дешевизной. В этом случае вырезаемый контур копируется по отдельному плоскому или наборному копиру с помощью приводного магнитного пальца.

Управление технологическими командами в начале и конце резки, а также необходимые корректировки режима резки в ходе ее выполнения реализуются полуавтоматическим способом – путем ручного включения кнопки или тумблера с последующим релейным командным циклом. Наряду с отмеченными позитивными свойствами портально-консольным машинам свойственны некоторые недостатки. По кинематической схеме точность воспроизведения контура резаком, перемещающимся по консоли, тем ниже, чем он более удален от направляющих рельсов. Точность портально-консольных машин почти вдвое ниже, чем точность портальных машин.

Другое негативное свойство этих машин состоит в том, что ввиду параллельного размещения раскраиваемого листа и натурально-масштабного копира для установки машины требуется практически двойная площадь. Некоторые такие машины предусматривают возможность наряду с копирчертежами использовать для контурного управления УЧПУ.

Технические характеристики портально-консольных машин приведены в табл. 9.32.

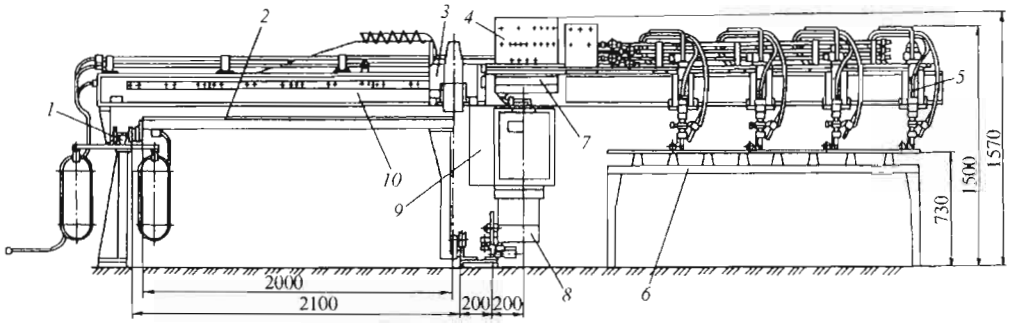


Рис. 9.27. Портально-консольная машина для резки листовой стали с фотоэлектронным управлением:
1 – направляющий рельс продольного хода; *2* – стол для копирчертежей;
3 – каретка поперечного хода с фотоголовкой; *4* и *9* – соответственно пульт и система электроуправления;
5 – суппорт с резаком; *6* – стол для обрабатываемого листа; *7* – газовый пульт;
8 – каретка продольного хода; *10* – направляющая поперечного хода

9.32. Технические характеристики портально-консольных машин

Параметр	ПкК Ф 2-4-2	«Бугаз»	ПкПл Ф 2-6-2
Вид резки	Кислородная		Плазменная
Наибольшие размеры разрезаемых листов, мм:			
– длина	8000	6000	8000
– ширина	2000		
Толщина разрезаемых металлов, мм:			
– стали	До 200	3…200	10…60
– алюминия	–		10…70
– меди			10…40
Число резаков	1…4		1…2
Скорость перемещения резака, мм/мин:			
– наибольшая	2000	1500	6000
– наименьшая	50		
Точность машины (предельные отклонения), мм	±1,0		
Энергопитание	Трехфазная сеть переменного тока с нулем	Трехфазная сеть переменного тока	
Напряжение, В	380		
Частота, Гц	50		
Потребляемая мощность, кВ · А	1	–	155
Расход на резак, $м^3/ч$:			
– кислорода	12		
– ацетилена	0,8	–	Не используется
– природного газа	1,35		
– пропан-бутана	0,55		
– сжатого воздуха	Не используется		2,16…6,84
– охлаждающей воды			0,36

Окончание табл. 9.32

Параметр	ПкК Ф 2-4-2	«Бугаз»	ПкПл Ф 2-6-2
Номинальный рабочий ток, А	Не используется		300
ПВ, %			100
Напряжение холостого хода источника электропитания, В			220
Тип источника электропитания			«Киев-4М»
Габаритные размеры ходовой части, мм	1500 × 4500 × 2200	Не используется	1500 × 4500 × 2200
Изготовитель	ФГУП «ВНИИавтогенмаш»	«Факел»	ФГУП «ВНИИавтогенмаш»

9.1.4.1.3. Магнитокопировальные шарнирные машины для кислородной и плазменной резки

Шарнирные машины предназначены для точной вырезки из листового металла заготовок произвольных форм малых и средних размеров. В отличие от портальных, портально-консольных и других машин, работающих по системе прямоугольных координат, шарнирные машины по их конструктивной схеме реализуют полярную координатную систему перемещения резака с помощью установленных на опорной колонне сочлененных шарнирных поворотных рам (рис. 9.28). Резак и копировальное устройство шарнирных машин располагаются соосно по вертикальной оси, что при безлюфтовой шарнирной системе обеспечивает наименьшие металлоемкость и стоимость этих машин, высокую точность воспроизведения резаком контура копира, размещаемого непосредственно над вырезаемой заготовкой. При этом машина занимает минимальную производственную площадь, обрабатывая заготовки наиболее приемлемых для этой машины размеров. Максимальная обрабатываемая этими машинами площадь практически представляет собой полукруг с радиусом, равным суммарной длине вытянутых рам.

Однако шарнирным машинам свойственны также негативные особенности. Одна из них – малая площадь раскраиваемого листа. Ввиду этого стандартные листы обычно раскраивают на карты соответствующих размеров (вручную или на той же машине, последовательно перемещая лист). Затем из таких карт на машине по копиру вырезают необходимые заготовки. Такой способ рационален для небольших и опытных предприятий с небольшими объемами резки заготовок малых или средних размеров.

На более крупных предприятиях можно использовать шарнирные машины в комплекте с передвижными раскройными столами или устанавливать машины на раме передвижной опорной тележки.

Шарнирные резательные машины оснащаются простейшими и наименее дорогими магнитокопировальными устройствами с соосным резаку приводным магнитным пальцем, работающим по стальным копирам, изготовляемым самим пользователем.

Шарнирные машины для кислородной резки могут комплектоваться одним – тремя резаками. Трехрезаковая резка с применением пантографного устройства используется для одновременной вырезки до трех идентичных заготовок.

Для расширения возможностей и упрощения управления резкой разнообразных по размерам массовых деталей типа фланцев и других круговых контуров шарнирные машины могут оснащаться бескопирным циркульным устройством. Помимо различных способов резки, комплектации, конструктивных размеров и особенностей предлагаемые современным рынком шарнирные машины характеризуются различными технологическими параметрами. Наиболее целесообразную для потребителя модель необходимо выбирать с учетом всех этих особенностей (табл. 9.33).

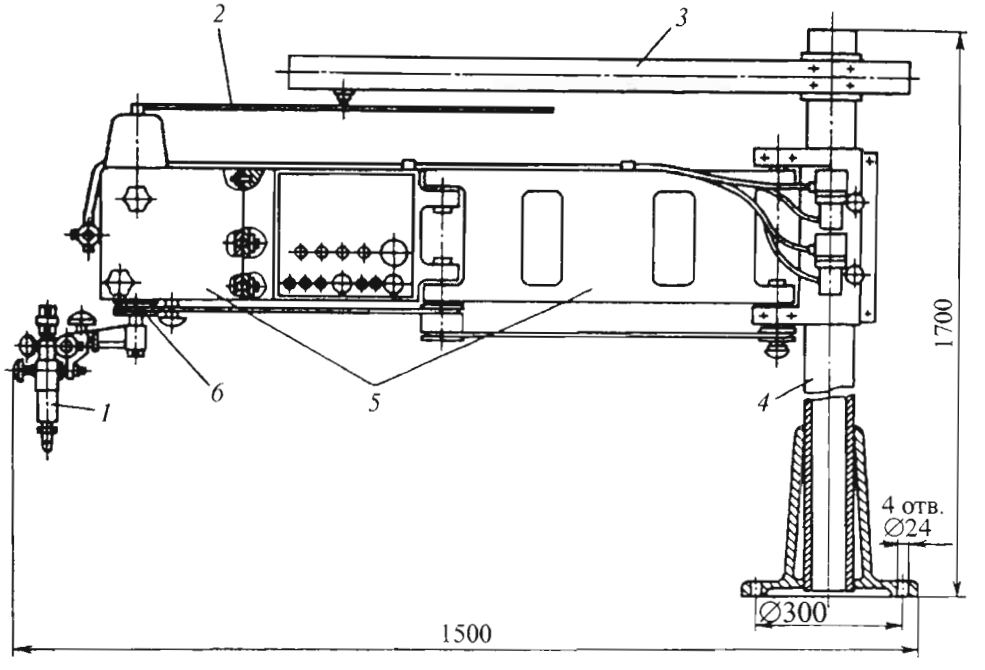


Рис. 9.28. Шарнирная машина АСШ-86:
1 – резак; *2* – копир; *3* – хобот; *4* – колонна; *5* – шарнирные рамы; *6* – привод машины

9.33. Технические характеристики шарнирных машин

Параметр	ШКМ1-1,6-1 «Огонек»	«Факел-1К»	ШПлМ1-4-1	G-70
Вид резки	Кислородная		Плазменная	Кислородная
Наибольшие размеры обрабатываемых листов, мм:				
– длина	1500 (1000)*			850
– ширина	750 (1000)			650
Наибольшая толщина разрезаемого металла, мм:				
– стали:				
одним резаком	5…300	3…200	5…100	5…300
тремя резаками	5…100	3…100	–	–
– алюминия	–		5…100	
– меди			5…50	
Число резаков	1…3		1	
Скорость перемещения резака, мм/мин:				
– наибольшая	1600	2000	4000	800
– наименьшая	50	100	70	100

Окончание табл. 9.33

Параметр	ШКМ1-1,6-1 «Огонек»	«Факел-1К»	ШПлМ1-4-1	G-70
Точность машины (предельное отклонение), мм	±0,5			
Энергопитание	Однофазная сеть переменного тока		Однофазная (трехфазная[1]) сеть переменного тока	
Напряжение, В	220		220/380	220
Частота, Гц	50			
Потребляемая мощность, кВ · А	0,1		106,1	0,3
Наибольший ток резки, А	Не применяются		315	Не применяются
ПВ, %			100	
Напряжение холостого хода источника, В			300	
Расход на резак, м³/ч:				
– кислорода	29	18	Не применяются	30
– ацетилена	0,7	0,8		0,7
– природного газа	1	1,2		1,0
– пропан-бутана	0,65	0,6		0,65
– сжатого воздуха	Не применяются		1,5…4,8	Не применяются
– охлаждающей воды			0,3	
Давление на входе в машину, МПа:				
– кислорода	1,2		Не применяются	1,2
– ацетилена	0,1	0,12		0,1
– природного газа	0,08	–		0,08
– пропан-бутана				
– сжатого воздуха	Не применяются		0,4…0,6	Не применяются
– охлаждающей воды			0,15…0,4	
Габаритные размеры, мм	1500×1500×1700			1200×800×2000
Изготовитель	ООО «Автоген-М»	НПО «Кислородмаш»	ООО «Автоген-М»	«Messer Griessheim»

[1] Питание плазменной установки.

[*] При вырезке деталей типа диск, фланец, квадрат.

9.1.4.1.4. Переносные машины

Переносные машины представляют собой самоходные тележки, перемещающиеся по направляющему рельсу или листу. Они предназначены для кислородной или плазменной резки при небольших (до 1000 т) годовых объемах переработки листового проката, а также в тех случаях, когда применение дорогостоящих стационарных машин экономически нецелесообразно.

Эти машины выполняют прямолинейную или фигурную (по кривым большого радиуса) резку листового проката с подготовкой кромок под сварку или с вертикальными кромками, вырезку полос одновременно двумя резаками (для кислородных машин), вырезку фланцев и дисков по циркулю, резку по разметке.

На рис. 9.29 показана наиболее распространенная на отечественных заводах машина «Гугарк», а в табл. 9.34 приведены технические характеристики переносных машин для кислородной и плазменной резки.

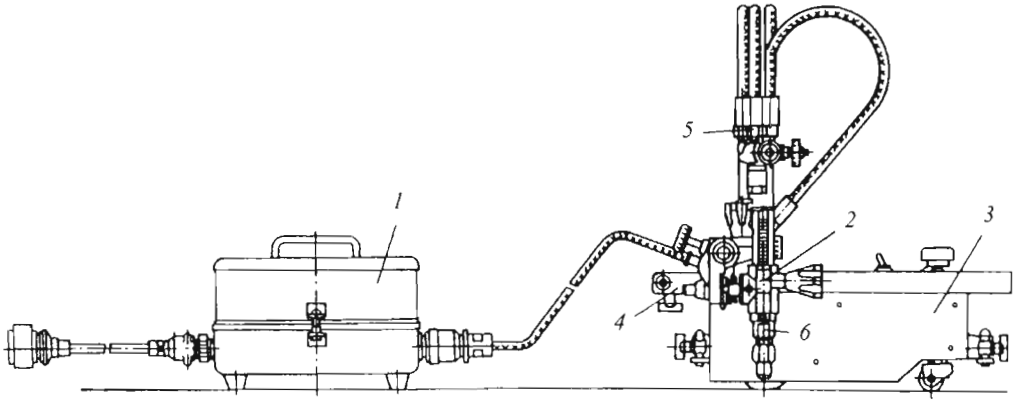


Рис. 9.29. Переносная машина «Гугарк»:
1 – блок электропитания; *2* – суппорт с резаком; *3* – тележка; *4* – штанга; *5* – ниппели для подвода газов к резаку

9.34. Технические характеристики переносных машин

Параметр	«Гугарк»	«Микрон 2-02»	«Смена-2М»	«Магама»	«Sekator CH»
Вид резки	Кислородная	Плазменная	Кислородная		
Размер вырезаемых заготовок, мм:					
– ширина полос, вырезаемых за один проход	100...330	–	100...850 (1450)	–	
– диаметр круговых заготовок	200...3000	300...3000		60...1500	
Наибольшая толщина разрезаемых металлов, мм:					
– стали	До 300	До 40	5...150	5...200	3...100
– алюминия	–		–		
– меди		20			
Число резаков	2	1	2		
Скорость перемещения резака, мм/мин:					
– наибольшая	1600	4000	1600	1000	1200
– наименьшая	50	100	50		100
Энергопитание	Переменный однофазный ток	Переменный трехфазный ток с нулевым проводом	Переменный однофазный ток		
Напряжение, В	220	380 (220)	220		
Частота, Гц	50				
Потребляемая мощность, кВ · А	0,04	63	0,05	0,03	0,05
Напряжение питания ходовой тележки, В	24				

Окончание табл. 9.34

Параметр	«Гугарк»	«Микрон 2-02»	«Смена-2М»	«Магама»	«Sekator CH»
Наибольший расход, м³/ч:					
– кислорода	32	Не используются	14	18	12
– ацетилена	1,0		1,44	1,0	
– природного газа	0,71		2,16	0,7	
– пропан-бутана	0,5		0,96	0,5	
– сжатого воздуха	Не используются	1...6	Не используются		
– охлаждающей воды		0,2...0,3			
Рабочее давление, МПа:					
– кислорода	1,2	Не используются	1,2	0,2...1,2	1,2
– ацетилена	0,01...0,1		0,01...0,1	0,015...0,12	0,01...0,1
– природного газа	0,01...0,08				
– пропан-бутана					
– сжатого воздуха	Не используются	0,01...0,3	Не используются		
– охлаждающей воды		0,2...0,5			
Габаритные размеры, мм:					
– переносной машины без штанги, циркуля	420×420×220	526×400×195	405×240×250	Нет данных	
– блока питания	260×200×160	–			
– пульта управления	Отсутствуют	350×350×400	Отсутствуют		
– источника питания		750×800×1200			
Длина секции направляющих, мм	–		2200	2000	–
Изготовитель	ООО «Автоген-М»		АП «Кристалл»	«Факел»	«Messer Griesheim»

9.1.4.1.5. Технологические комплексы и линии портальных машин

Наряду с поставкой отдельных машин для кислородной и плазменной резки изготовители предлагают раскройные технологические комплексы оборудования для термической резки с различной комплектацией, обеспечивающие выполнение вспомогательных функций и способствующие повышению производительности, механизации подготовительно-заключительных и транспортных операций при резке, улучшению условий труда и т.п.

Комплексы могут включать в свой состав машину термической резки или она может поставляться как дополнительная оснастка к ним, а также как организующий комплекс. Габаритные размеры и масса комплексов определяются их составом и комплектующими машинами термической резки. Их характеристики приведены в табл. 9.35.

ВПТИтяжмаш также разработал несколько вариантов типовых участков механизированной термической резки листового проката, рассчитанных на использование различного числа машин термической резки и на различные производственные площади.

9.35. Технические характеристики технологических комплексов для термической резки

Параметр	Комплекс		Линия тепловой резки листового проката
	механизированной резки листового проката 290Л-А	технологический раскройный	
Наибольшие размеры разрезаемых листов, мм:			
– длина	10 000	8000	
– ширина	2500	2500, 3200, 3600	2000
Толщина при резке кислородом, мм:			
– до двух резаков	100	200	100
– более двух резаков	–	100	60
– трехрезаковым блоком		80	–
Масса разрезаемого объекта, кг, не более	9450	12 000	4000
Скорость перемещения резака (наибольшая), мм/мин	6000	12 000	–
Число суппортов:			
– кислородных	4	3	4
– для скоса кромок	–	1	–
Точность воспроизведения заданного контура, мм	±0,5	±0,35	±0,5
Скорость транспортирования листов, мм/мин	16 200	Не транспортируются	15 800
Грузоподъемность блока подъемника, кг, не менее	31 000	–	30 000
Скорость уноса газов в зоне резки, м/с	2		
Рекомендуемая производительность вентилятора, $м^3/ч$	15 000	12 000…16 000	16 000
Энергопитание	Трехфазная сеть переменного тока		
Напряжение, В	380		
Частота, Гц	50		
Потребляемая мощность, кВ · А, без источников питания	До 40	3,6	До 100
Изготовитель	НПО «ВИСП»	НПО «Кислородмаш»	ЦНИИТС

Первый вариант (простейший) предусматривает две последовательно расположенные на осевой линии рабочие позиции с раскройными столами, в пределах суммарной длины которых могут перемещаться портальная машина термической резки и портальный манипулятор. Резку проводят попеременно: вначале на одной и затем на второй позиции. Свободная позиция используется для разборки с помощью манипулятора готового раскроя, уборки обрези и укладки нового листа.

Второй вариант характеризуется наличием трех рабочих мест: среднего для резки, а два крайних попеременно служат для загрузки листов и разборки нарезанного раскроя. В этом случае предусматриваются две подвижные раскройные рамы, последовательно подаваемые на позицию резки с одновременным сдвигом другой рамы (и манипулятора) на загрузочно-разгрузочную позицию.

В третьем варианте также предусматриваются три позиции: загрузочно-разгрузочная,

центральная – раскройная и вспомогательная. Под этими позициями прокладываются направляющие для рам, а раскройная позиция оборудуется механизмом их подъема.

Четвертый вариант отличается повышенной производительностью резки. Он аналогичен третьему варианту, но предусматривает две раскройные, одну загрузочно-разгрузочную и одну вспомогательную позиции.

Пятый вариант – это две идентичные параллельные ветви, каждая с тремя позициями, как в третьем варианте, однако при сохранении центральных позиций в качестве раскройных с механизмами подъема; крайние позиции по одну сторону от центральной используются как загрузочные, а крайние с другой стороны – как разгрузочные.

Для оснащения участков всех этих вариантов разработаны раскройная рама, транспортная система ее перемещения, механизм ее подъема, эстакада для установки рельсового пути машины термической резки, система местного вентиляционного отсоса, а также стеллаж для укладки вырезанных заготовок.

9.1.4.2. СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ МАШИНЫ ДЛЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ РЕЗКИ

Специализированными называются машины и установки, предназначенные для выполнения вполне определенного вида работ по термической резке: резке труб перпендикулярно к оси, фигурной резке труб, резке профильного проката, отрезке стальных прибылей и др.

Машины для резки труб. На практике встречаются следующие типы трубных соединений: труба с трубой перпендикулярно к оси и под некоторым углом, прямое и наклонное присоединение трубы к трубе, соединения со скрещивающимися осями. Простейшие типы сопряжений могут обеспечиваться трехкоординатными установками, обеспечивающими:

– поворот трубы вокруг ее оси;

– продольное перемещение режущей машины вдоль оси трубы;

– наклон резака к оси трубы в процессе резки вокруг точки, расположенной на поверхности трубы для получения нужной разделки кромки под сварку.

К таким установкам относятся простейшие установки с кулисным задающим устройством, обеспечивающим осевое перемещение резака и его наклон при повороте трубы, закрепленный в патроне, в частности станок СФРТ-1220 (рис. 9.30).

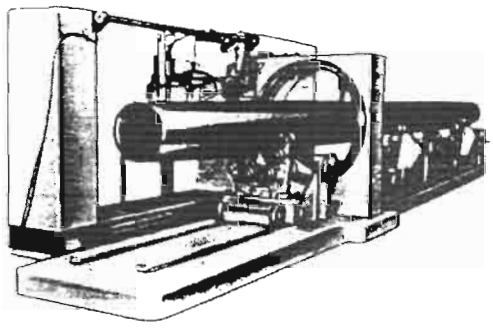


Рис. 9.30. Станок СФРТ-1220 для фасонной резки труб

Автоматизированный комплекс МАРТ предназначен для кислородной, кислородно-флюсовой, плазменной (возможны комбинированные варианты) фасонной резки труб из углеродистых и легированных сталей и цветных металлов при управлении от УЧПУ. Он включает механизмы вращения трубы патронного типа, перемещения резака, подачи трубы в патрон, средства вентиляции. Возможна произвольная угловая ориентация резака в пространстве наклоном газопламенного резака и поворотом резакового блока. Обеспечивается получение трубных заготовок для сварных соединений. Одновременно с обрезкой торца или вырезкой отверстия в трубе возможна разделка кромок реза под сварку с углом разделки постоянным или переменным по контуру.

Программа обработки формируется в УЧПУ на основании введенных с пульта оператора данных о типе соединения вырезаемых заготовок, о параметрах трубного сочленения и величине контурной скорости. Раскрой трубы осуществляется при минимальном участии оператора без использования перфолент и дополнительных вычислительных средств для подготовки управляющих программ. Автоматической системой стабилизации с емкостным датчиком обеспечивается постоянство заданной высоты резака над трубой. Реализовано автоматическое управление скоростью и позиционированием при подаче трубы в патрон. Предусмотрены защита внутренней поверхности трубы от брызг металла и удаление газопылевых выбросов из зоны резки.

Технические характеристики стационарных машин для фасонной резки труб приведены в табл. 9.36.

9.36. Технические характеристики стационарных машин для фасонной резки труб

Параметр	Станок СФРТ-1220	Автоматизированный комплекс «МАРТ»	БУГ-1М	RB 650/1200
Размеры обрабатываемых труб, мм:				
- длина	1000...12 000	1500...12 000	11 985	По требованию заказчика
– диаметр	159...1220	100...1020	57...425	80...650 (напроход) до 1200 (при зажиме изнутри)
– толщина стенок	4...50	3...20	5...20	5...140
Угол между осями стыкуемых труб, град.	50...90	–		20...90
Число независимых координат	2	3 + 1	3	5
Скорость резки, мм/мин	100...2000	12 000	100...2000	0...4000
Тип оснастки	Кислородная и плазменная	Кислородная и кислородно-флюсовая, плазменная	Кислородная	Кислородная и плазменная
Энергопитание	Трехфазная сеть переменного тока			
Напряжение питания, В	380			400
Потребляемая мощность электропривода	1,7	4,0	1,2	4,2
Габаритные размеры, мм	10 000×2450××2300	13 500×3500××2900	11 985×1850××1650	12 000×3000××2700
Масса, кг	7600	9200	5500	8500
Изготовитель	НИКИМТ	ФГУП «ВНИИавтогенмаш»	ЦНИИТС	«Mueller Opladen»

Переносные машины типа «*Орбита*» предназначены для термической резки труб в полевых условиях при строительстве магистральных трубопроводов. Они могут быть использованы также при монтаже заводских трубопроводов и других работах в условиях промышленных предприятий и строек. Машины выполняют прямые (перпендикулярно к оси трубы) и наклонные (под углом до 6° к оси трубы) резы без скоса и со скосом кромки под углом до 35° под сварку. В них предусмотрена система контурного управления – по направляющему поясу, закрепляемому на трубе быстродействующим зажимным устройством. Машина перемещается по направляющему поясу с помощью прижимных и ведущих роликов с насечкой, приводимых во вращение с необходимой скоростью посредством электрического привода. Для выполнения наклонных резов служит копир, устанавливаемый на трубе аналогично направляющему поясу. Во избежание износа направляющих поясов предусматрива-

ется также возможность перемещения машины по трубе с помощью приводной цепи.

Машины выпускаются в двух исполнениях: с копирпоясами и без них. Освоено производство машин «Орбита-БМ» для кислородной резки труб из углеродистых сталей и «Орбита-Пл» для воздушно-плазменной резки труб из сталей различного состава и цветных сплавов.

Машины «Орбита-БМ» могут работать с использованием в качестве горючего газа природного газа, пропан-бутана или ацетилена, для чего по заказу потребителя они комплектуются соответствующими резаками и соплами. Для резки со скосом кромок предусматривается комплектование таких машин двумя резаками.

Машины «Орбита-Пл» (рис. 9.31) в зависимости от заказа могут быть поставлены в комплекте: ходовая часть, блок питания, дистанционный пульт управления, набор поясов, установка УПРП-201 и ЗИП, возможна также поставка смонтированного на жесткой раме комплекта. Технические характеристики переносных машин для резки труб приведены в табл. 9.37.

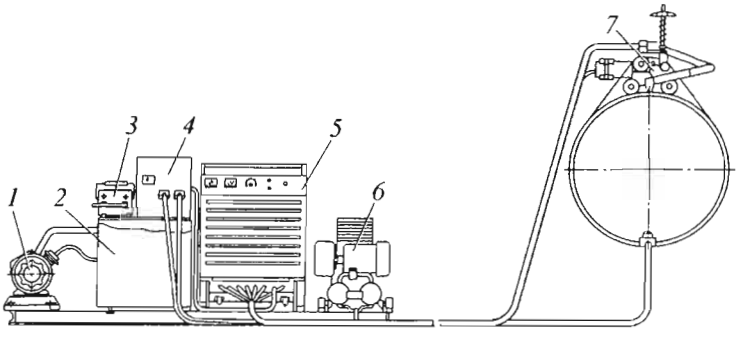


Рис. 9.31. Передвижной комплект для плазменной резки труб «Орбита-Пл»:
1 – насос системы охлаждения; *2* – блок автономного охлаждения; *3* – блок питания ходовой части; *4* – коммутационный щит; *5* – плазменная установка; *6* – компрессор; *7* – ходовая тележка

9.37. Технические характеристики переносных машин для резки труб

Параметр	«Орбита-БМ»	«Орбита-Пл»
Вид резки	Кислородная	Плазменная
Размеры разрезаемых труб, мм:		
– диаметр с копирпоясами	530; 720; 820; 1020; 1220; 1420	
– то же, без копирпоясов	194...1620	
– толщина стенок	5...75	5...50
Число резаков	1...2	1
Скорость перемещения резака, мм/мин	100...1200	
Несовпадение начала и конца реза, мм, не более	1	
Отклонение контура реза от плоскости, мм, не более, при диаметре, м:		
– до 1 м	1	
– >1 м	2	
Наибольший расход, $м^3$/ч:		
– кислорода	12	Не используются
– природного газа	0,8	
– пропан-бутана	0,4	
– ацетилена	0,55	
– сжатого воздуха	Не используется	30

Окончание табл. 9.37

Параметр	«Орбита-БМ»	«Орбита-Пл»
Рабочее давление, МПа:		
– кислорода	1,2	Не используются
– природного газа	0,01…0,04	
– пропан-бутана	0,01…0,045	
– ацетилена	0,01…0,05	
– сжатого воздуха	Не используется	0,45…0,6
Энергопитание	Однофазный переменный ток	Трехфазный переменный ток
Напряжение питания, В	220	
Частота, Гц	50	
Потребляемая мощность, кВ · А	0,11	60
Номинальный рабочий ток, А	–	220
Напряжение, подаваемое к машине от блока питания, В	24	
Габаритные размеры, мм, не более:		
– ходовой части со штангой и оснасткой	344 × 518 × 447	
– установки воздушно-плазменной резки	Отсутствует	2600 × 1180 × 1200
Масса, кг, не более:		
– машины в комплекте	105	1400
– ходовой части	20	20
Изготовитель	ФГУП «ВНИИавтогенмаш», ООО «Автоген-М»	

9.1.4.3. МАШИНЫ И АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ КОМПЛЕКСЫ ДЛЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ РЕЗКИ ПРОФИЛЬНОГО ПРОКАТА

ФГУП «ВНИИавтогенмаш» разработал установку для мерного раскроя стальных прокатных и сварных балок двутаврового и швеллерного сечений. Машина представляет собой раму, закрепленную на подшипниках на колонне таким образом, что она имеет возможность поворачиваться вокруг оси колонны посредством механизма поворота. На раме смонтированы три каретки, перемещающиеся каждая от своего привода по направляющим вместе с режущей оснасткой. Левая и правая каретки обеспечивают резку полок при вертикальном перемещении резаков. Стенка двутавра режется центральным резаком, перемещающимся горизонтально.

Для фасонного раскроя открытых профилей ФГУП «ВНИИавтогенмаш» разработал специальную плазморезательную установку (рис. 9.32). Она позволяет выполнять мерный и фасонный крой с вырезкой из профильного проката изделий произвольной конфигурации по заданной технологической программе. Такой метод эффективно заменяет традиционные методы обработки профиля, включая раскрой с использованием металлорежущего оборудования. Установка выполнена на базе модуля *А* фасонного раскроя с контурной системой *В* числового программного управления станочного типа, имеет беззазорные приводы по всем координатам и характеризуется высокой степенью автоматизации раскроя, повышенной точностью воспроизведения заданного контура при оперативном вводе и корректировке управляющей информации с пульта. Предусматривается полуавтоматическая или автоматическая транспортировка проката с точным позиционированием. Установка спроектирована по модульному принципу. Это позволяет обеспечить наиболее целесообразную структуру и компоновку установки для конкретного заказчика в соответствии с технико-коммерческим предложением.

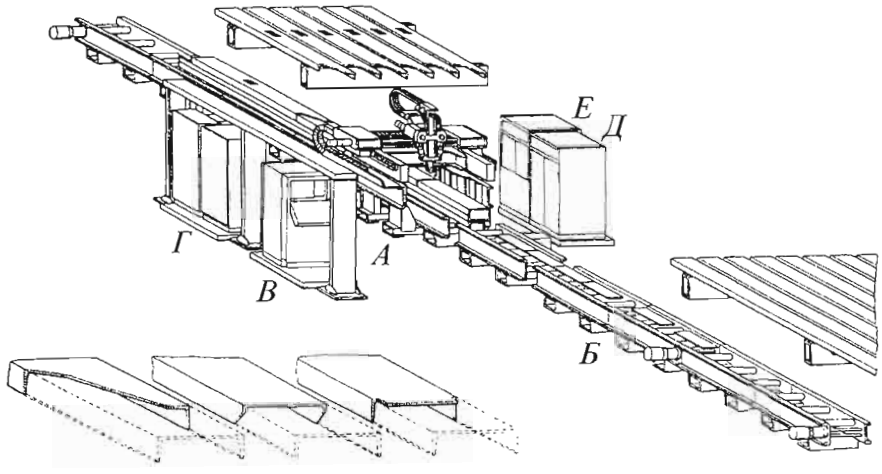


Рис. 9.32. Установка для фасонной плазменной резки профильного проката:
А – режущая машина; *Б* – рольганг для вырезанных деталей; *В* – система управления станком; *Г* – привод режущей машины; *Е* и *Д* – приводы тракторного оборудования

Для раскроя замкнутых контуров предлагается использовать линию плазменной резки прямоугольных труб. Линия состоит из универсальных загрузочных, резательных и приемно-пакетирующих устройств. Загрузочное устройство оснащено карманом.

Это позволяет поштучно подавать к резательному устройству трубы (пакетированные или непакетированные). Это устройство включает плазменную установку и планшет с приводом и кареткой с плазмотроном, перемещающие последний вокруг трубы. Система управления обеспечивает по программе необходимые технологические переходы и параметры. Приемно-пакетирующее устройство имеет роликовый конвейер и пакетировщик, который укладывает трубы в пакет для транспортировки или хранения. Линия может работать автономно или в составе комплексов. Ввиду относительно ограниченной области применения и специфики условий различных производств все устройства изготовляются по заказу.

Фирма «Messer Griessheim» разработала роботизированный комплекс «Oxytechnik» с шестиосным промышленным роботом.

Комплекс осуществляет кислородную и плазменную резку и рассчитан на все виды профилей: швеллеры, одно- и двутавровые балки, угловой прокат, а также полосы. Робот выполняет отрезку профиля, контурную обрезку концов профиля, вырезку отверстий и проемов, срезку фасок под сварку. После загрузки рабочего участка все операции: транспортировка, измерение длины деталей, нанесение надписей, маркировка и резка, а также накопление готовых деталей – происходят автоматически. Комплекс обслуживает один человек. При полосе шириной 240 мм комплекс выполняет ~80 000 резов/год при восьмичасовой односменной работе.

Технические характеристики установок для резки профильного проката приведены в табл. 9.38.

9.1.4.4. УСТАНОВКИ ДЛЯ РЕЗКИ МЕТАЛЛА БОЛЬШИХ ТОЛЩИН

В металлургии, тяжелом машиностроении и других отраслях промышленности весьма распространенной технологической операцией является отрезка прибылей у крупногабаритного литья или обработка в размер поковок большого развеса. Под большой толщиной металла при кислородной резке принято считать толщину разрезаемой стали >300 мм. При резке металла больших толщин применяются более мощное подогревающее пламя и повышенный расход режущего кислорода, что вызывает значительное увеличение габаритных размеров и массы режущего инструмента, а также выделение при резке большого количества тепла и мелкодисперсной пыли, что крайне неблагоприятно влияет на условия работы газорезчика. Кроме того, по условиям производства резка часто выполняется на горячем металле (в установках непрерывной разливки стали, при резке сталей, склонных к трещинообразованию). В этих условиях предпочтительна резка механизированным способом.

9.38. Технические характеристики установок для резки профильного проката

Параметр	Профилерез	Установка фасонной резки проката	Линия резки прямоугольных труб	Роботизированный комплекс «Oxytechnik»
Резка	Кислородная	Плазменная		
Размеры обрабатываемого проката, мм:				
– ширина	До 1300	До 200	80...250	600
– высота	До 600	До 400		300
– длина	500...12 000	12 000	800...9000	Не ограничена
Число резаков	3	1		
Скорость перемещения резака, мм/мин	50...750	До 8500	8000...20 000	До 35 400
Точность резки (установки)	±1,0			±0,5
Тип плазморежущей установки	Не используется	АПР-404		Не используется
Расход, $м^3$/ч:				
– сжатого воздуха		4...10		
– охлаждающей воды		0,24		
Давление, МПа:				
– сжатого воздуха		0,25...0,6		
– охлаждающей воды		0,15...0,3	0,15	
Энергопитание	Трехфазная сеть переменного тока			
Напряжение, В	220			
Частота, Гц	50			
Потребляемая мощность, кВ · А	1,4		140	80
Габаритные размеры, мм	2200×1200×1950	1910×2900×1300	23 800×5200×1860	Нет данных
Изготовитель	ФГУП «ВНИИавтогенмаш»	ФГУП «ВНИИавтогенмаш», ОАО «АНИТИМ»		«Messer Griessheim»

Для кислородной резки прибылей и поковок из конструкционных марок сталей толщиной 500...1200 мм и кислородно-флюсовой резки высоколегированных сталей толщиной 500...1000 мм может быть применена установка ПМР-1000 (рис. 9.33). Она содержит тяжелую самоходную тележку, перемещающуюся по рельсовому пути. В суппорте установлен мощный резак с внутрисопловым смешением горючего газа и подогревающего кислорода. Установка оснащена блоком электропитания, щитом запорных электромагнитных клапанов с вентилями регулировки расхода газов, дистанционного пульта управления.

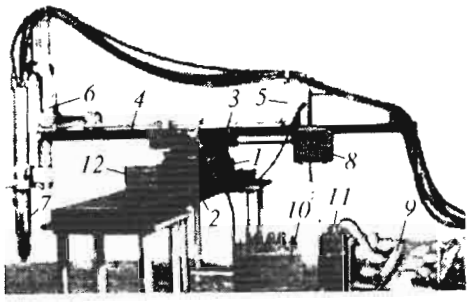


Рис. 9.33. Установка для резки сталей больших толщин:
1 – тележка; *2* – направляющий рельс; *3* – направляющая поперечного хода; *4* и *5* – привод подъема и поворота резака; *6* – суппорт; *7* – резак; *8* – противовес; *9* – газовый пульт; *10* – блок электропитания; *11* – флюсопитатель; *12* – выносной пульт управления

Для резки конструкционных сталей толщиной до 2000 мм предназначена машина УОП-2. Она включает в себя платформу, выполненную в виде сварной рамы, перемещающейся электроприводом вдоль обрабатываемой заготовки. На раме размещен механизм подъема каретки с траверсой, имеющий возможность поворачивать головку с резаком на угол ±10° в вертикальной, а также в горизонтальной плоскости. Наличие шести степеней свободы у машины обеспечивает установку резака в начальное для резки положение и последующее его перемещение со скоростью резки при неподвижно установленной заготовке.

Технические характеристики установок для резки металла больших толщин приведены в табл. 9.39.

9.39. Технические характеристики установок для резки металла больших толщин

Параметр	Установка		
	ПМР-1000	УОП-2	«Gigant»
Разрезаемая сталь	Низкоуглеродистые и высоколегированные	Низкоуглеродистые, конструкционные	
Толщина разрезаемой стали, мм	300…1200	До 2000	
Расход горючего газа, $м^3/ч$:			
– природного газа	5…20	До 50	До 170
– пропан-бутана	3…8	До 20	До 65
Расход режущего кислорода, $м^3/ч$	До 180	До 240	До 350
Расход флюса, кг/ч	20…90	Не применяется	
Скорость резки, мм/мин	40…100	15…150	25…30
Изготовитель	ФГУП «ВНИИавтогенмаш»	Новокраматорский машиностроительный завод НКМЗ	«Messer Griessheim»

9.2. ТЕХНОЛОГИЯ ГАЗОВОЙ СВАРКИ, ПАЙКИ И РЕЗКИ МЕТАЛЛОВ

9.2.1. СПОСОБЫ ГАЗОВОЙ СВАРКИ

Газовой сваркой можно сваривать почти все металлы, применяемые в технике.

Из-за простоты оборудования, возможности широкого применения скорости нагрева и охлаждения металла при сварке этот процесс находит применение в ремонтных и монтажных работах.

Левая сварка (рис. 9.34, *а*). При левом способе сварки горелку перемещают справа налево, а присадочная проволока должна быть впереди горелки. При этом пламя направляют от шва, в этом случае сварщик хорошо видит шов и может обеспечить равномерную ширину и высоту валика, т.е. хороший его внешний вид. Данный способ применяется при толщине металла до 4...5 мм.

Правая сварка (рис. 9.34, *б*). При правом способе сварки горелку перемещают слева направо, а присадочную проволоку перемещают вслед за горелкой. Пламя при этом направлено на шов, он остывает медленнее, поэтому шов получается более высокого качества. Однако внешний вид шва хуже, так как сварщик плохо видит его формирование. Этот способ эффективен при толщине металла >5...6 мм.

Сварка сквозным валиком (рис. 9.35). Этот способ, называемый также двойным валиком, применяется при вертикальной сварке стыковых соединений снизу вверх. В нижней части стыка проплавляется сквозное отверстие. Постепенно поднимая пламя вверх, расплавляют верхнюю часть отверстия и введением присадочного материала заваривают нижнюю его часть. При толщине металла >6...8 мм сварку осуществляют два сварщика одновременно с двух сторон.

Сварка ванночками (рис. 9.36, *а*). Сущность этого способа состоит в последовательном образовании ванночек расплавленного металла и вводе в них по нескольку капель присадочного металла. Каждая последующая ванночка должна перекрывать предыдущую на 1/3 ее диаметра. Этот способ иногда называют также сваркой «каплями». Применяют его при сварке металла толщиной до 3 мм.

Сварка по отбортованным кромкам (рис. 9.36, *б*). Она применяется при сварке тонкого металла толщиной до 2...3 мм. Сварку ведут без присадочного материала, горелке придают колебательное или спиралеобразное движение.

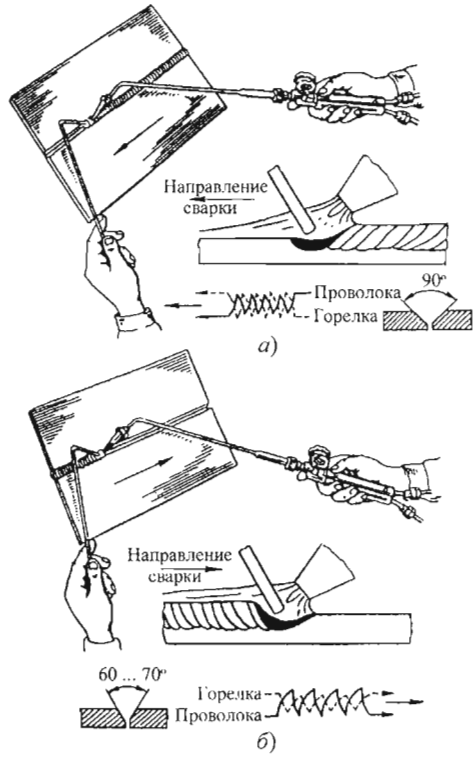


Рис. 9.34. Схемы левого (*а*) и правого (*б*) способов сварки

9.2.1.1. ТЕХНИКА И РЕЖИМЫ СВАРКИ

Сварка в нижнем положении затруднений не вызывает и не требует каких-либо специальных приемов. Сварку вертикальных швов снизу вверх удобнее выполнять левым способом (рис. 9.37, *а*). Горизонтальные швы чаще формируют правым способом (рис. 9.37, *б*), при котором газовый поток пламени направлен на шов и тем самым препятствует стеканию металла из сварочной ванны. В этом случае в отличие от обычного правого способа сварку ведут справа налево, а сварочной ванне придают некоторый наклон, облегчающий формирование шва. Потолочные швы также лучше сваривать правым способом (рис. 9.37, *в*), в этом случае конец присадочной проволоки и давление газового потока мешают стеканию жидкого металла вниз.

Режимы газовой сварки определяются в основном следующими факторами: мощностью сварочного пламени, скоростью сварки, диаметром присадочного материала, углом наклона мундштука горелки. Все эти факторы связаны с толщиной свариваемого металла.

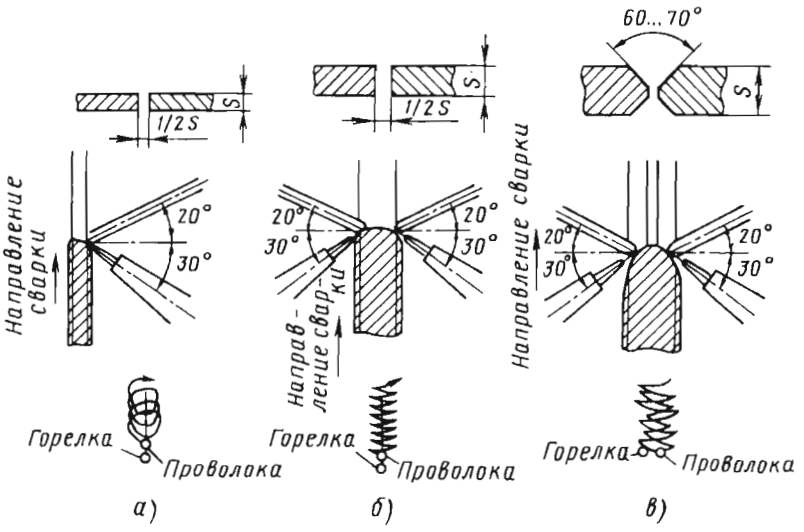


Рис. 9.35. Схемы сварки сквозным валиком при толщине металла, мм:
а – 2...6; *б* – 6...12; *в* – 12...20

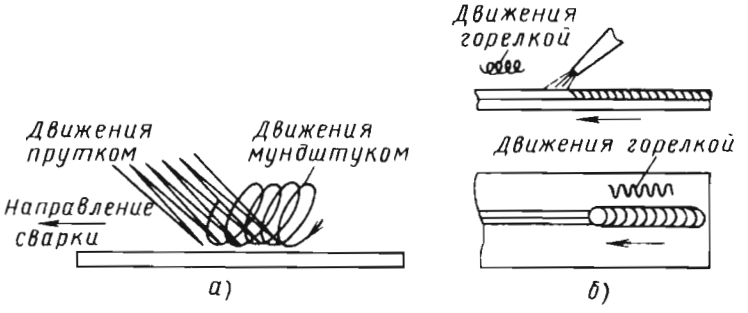


Рис. 9.36. Сварка ванночками (*а*) и по отбортованным кромкам (*б*)

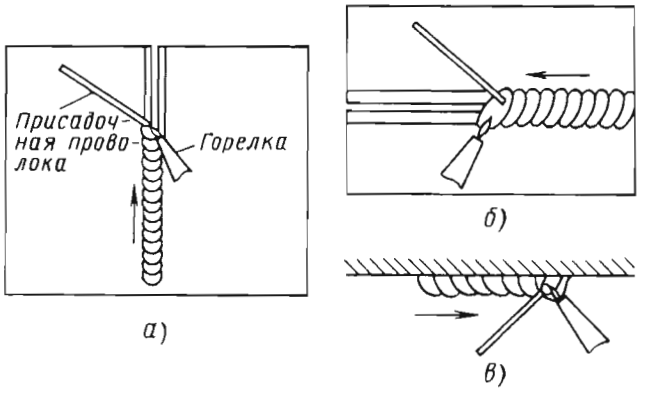


Рис. 9.37. Сварка вертикальных (*а*), горизонтальных на вертикальной плоскости (*б*) и потолочных (*в*) швов

Мощность пламени определяется расходом горючего и обычно измеряется в литрах в час. Приближенно мощность ацетиленокислородного пламени можно определить по формуле

$$V_a = ks,$$

где V_a – мощность пламени (расход ацетилена), л/ч; s – толщина свариваемого металла, мм; k – коэффициент пропорциональности, л/(ч · мм) (для низкоуглеродистой стали он равен 100…130, для высоколегированной стали и чугуна 75…100, для алюминия 100…150, для меди и ее сплавов 150…225).

При сварке правым способом значение коэффициента пропорциональности несколько возрастает.

Скорость сварки примерно может быть определена по формуле

$$v_{св} = \frac{A}{s},$$

где $v_{св}$ – скорость сварки, м/ч; A – коэффициент, зависящий от свойств свариваемого металла и частично от его толщины, м · мм/ч (для стали средних толщин 12…15, для никеля 9…11).

Диаметр присадочного материала в виде проволоки, прутков или литых стержней приближенно подбирается по следующим формулам:

для левого способа сварки

$$d = \frac{s}{2} + 1;$$

для правого способа сварки

$$d = \frac{s}{2}.$$

При толщине металла >15 мм в практике всегда применяют присадочный материал диаметром ≥6…8 мм.

Угол наклона мундштука горелки увеличивают с увеличением толщины свариваемого металла. Примерные значения его, рекомендуемые для левого способа сварки сталей, приведены на рис. 9.38. При сварке более теплопроводных материалов (медь, ее сплавы и др.) угол наклона должен быть несколько большим.

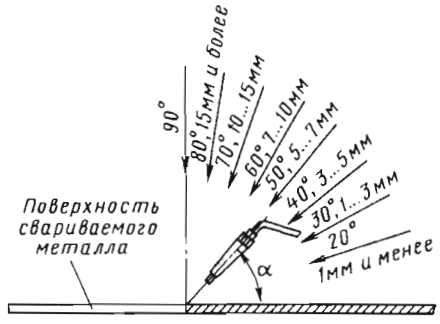


Рис. 9.38. Углы наклона мундштука горелки при сварке стали разных толщин

9.2.1.2. ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

Ацетиленокислородная сварка. В зависимости от содержания углерода в сварочном производстве различают стали: низко-, средне- и высокоуглеродистые (соответственно до 0,25; 0,25…0,6 и 0,6…1,7 % С).

Ацетиленокислородная сварка низкоуглеродистых сталей трудностей не вызывает. Сварка ведется нормальным пламенем при соотношении смеси β = 1,0…1,2. Мощность пламени V_a (расход ацетилена) устанавливается при левой сварке (100…130) s, при правой (120…150) s.

В качестве присадочного материала применяют проволоку марок Св-08, Св-08А или Св-08АА по ГОСТ 2246–70. Для ответственных конструкций следует использовать проволоку Св-08ГА, Св-10ГА, Св-12ГС и Св-10Г2.

При сварке среднеуглеродистых сталей мощность пламени уменьшается до V_a = (75…90) s. Пламя применяется слегка ацетиленистое, так как даже небольшой избыток кислорода ведет к интенсивному выгоранию углерода. При толщине металла >3 мм рекомендуется общий предварительный подогрев до температуры 250…350 °С или местный подогрев околошовной зоны до 650…700 °С.

Сварка высокоуглеродистых сталей затруднена и возможна при толщине металла ≤5…6 мм. При сварке применяются предварительный подогрев и последующая термическая обработка.

Пропан-бутанкислородная сварка. Этим способом сваривают изделия, не подлежащие сдаче Госгортехнадзору РФ. Сварку выполняют горелкой ГЗУ-2-62 или ГЗМ-2-62. Мощность пламени (расход сжиженного газа)

при сварке низкоуглеродистой стали составляет: при левой сварке $V_г = (60...70)s$, при правой сварке $V_г = (75...90)s$, где $V_г$ – расход сжиженного газа, л/ч.

Соотношение кислорода и сжиженного газа в пламени $\beta = 3,5...4$. Присадочным материалом служит проволока марок Св-08ГС, Св-12ГС и Св-08Г2С, хорошо раскисляющая ванну. Применение проволок Св-08 и Св-08А не допускается. Сварку ведут, как правило, в один слой левым способом. Присадочная проволока должна находиться пол углом 35...40° к оси шва, а пламя – под углом 45...60°. Расстояние от ядра пламени до поверхности сварочной ванны необходимо поддерживать в пределах 3...6 мм, а до плавящегося конца присадочной проволоки – в пределах 2...4 мм. Примерные режимы пропан-бутанкислородной сварки приведены в табл. 9.40.

9.2.1.3. ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

Легированные конструкционные стали в отличие от углеродистых содержат хром, никель, вольфрам, молибден, титан, ниобий и другие легирующие элементы.

В зависимости от содержания легирующих элементов эти стали подразделяются на три группы.

1. Низколегированные (суммарное содержание легирующих элементов ≤2,5 %). Наибольшее применение получили стали марок 10ХСНД, 15ХСНД и др.

2. Среднелегированные (суммарное содержание легирующих элементов 2,5...10 %). Из этих сталей наиболее широко применяются марки 20ХГСА, 25ХГС, 30ХГС, 30ХГСА и др.

3. Высоколегированные (суммарное содержание легирующих элементов >10 %). Эти стали могут быть хромистыми (12Х13, 20Х13 и др.), хромоникелевыми (12Х18Н10Т и др.), марганцовистыми Г13 и др.) и т.д.

Сварку легированных сталей выполняют, как правило, ацетиленокислородным строго нормальным пламенем.

9.2.1.4. ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ ЧУГУНА

Чугунами называются сплавы железа с углеродом при содержании 2,14...6,3 % С. Наиболее распространены чугуны с 2,5...4 % С. Кроме углерода в чугунах имеется некоторое количество марганца и кремния, а также примесь серы и фосфора. Углерод в чугунах может находиться либо в свободном состоянии – в виде графита (серые чугуны), либо в связанном – в виде карбидов железа (белые чугуны).

Применение газовой сварки чугуна ограничивается главным образом ремонтными работами. Ее применяют при сварке лопнувших чугунных деталей; заварке раковин, образовавшихся во время литья; наплавке изношенных поверхностей; устранении различных внешних дефектов и др.

Существуют два способа сварки чугуна: горячая – сварка с предварительным подогревом (общим или местным), холодная – сварка без предварительного подогрева.

В зависимости от характера производства и видов работ (ремонтная сварка, устранение литейных дефектов, наплавка сработанных поверхностей и др.) применяют различные устройства для предварительного подогрева изделий перед сваркой.

9.40. Режимы пропан-бутанкислородной сварки стыковых соединений из низкоуглеродистых сталей

Толщина свариваемого материала, мм	Предварительный зазор в стыке, мм	Угол скоса кромок, °	Диаметр сварочной проволоки, мм	Номер наконечника горелок ГЗУ-2-62, ГЗМ-2-62	Расход, л/ч		Скорость сварки, м/ч
					пропан-бутана	кислорода	
0,5...1	1...1,5	Без скоса кромок	1...1,5	1...2	30...90	105...315	10...7
1...2	1,5...2,0		1,5...2,0	2...3	60...180	210...680	7...5
2...3	2,0...3,0		2,0...2,5	3...4	120...270	420...945	5...4
3...6	3,0...4,0	60...90	2,5...4,0	4...5	180...540	630...1890	4...1,6

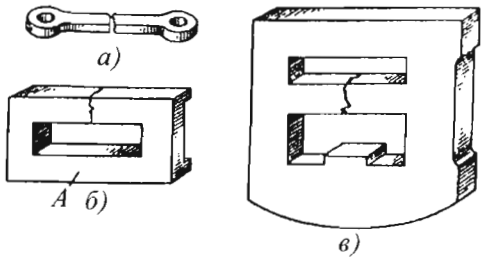


Рис. 9.39. Выбор способа подогрева при ремонтной сварке чугуна:
а – сварка без подогрева; *б* – местный подогрев в месте *А*; *в* – общий подогрев всего изделия

Горячая сварка чугуна. Местный подогрев может также проводиться сварочными горелками, паяльными лампами, древесным углем. Необходимость подогрева, а также выбор способа подогрева при ремонтной сварке чугуна зависит от характера дефекта (рис. 9.39, *в*). В качестве горючих газов при сварке могут применяться ацетилен, газы – заменители ацетилена, а также жидкие горючие (керосин).

Ацетиленокислородная сварка обеспечивает наибольшую производительность процесса. При сварке используют нормальное пламя или пламя с небольшим избытком ацетилена (β = 0,8...1,0), компенсирующим выгорающий углерод. Мощность пламени устанавливают из расчета $V_a = (120...150)s$. В качестве присадочного материала применяют чугунные прутки марки А или Б по государственному стандарту. Прутки марки А используют при сварке деталей сложного профиля с тонкими стенками и мелкозернистой структурой. Прутки марки Б применяют при сварке тяжелых отливок в основном при их местном подогреве. Сварку выполняют обычными горелками с применением порошковых флюсов (табл. 9.41).

Флюс до образования сварочной ванны насыпают вручную (ложечкой, щепоткой), а затем вводят присадочный пруток, периодически погружая его в коробочку с флюсом.

Применяются также газообразные борометиловые флюсы БМ-1 и БМ-2, представляющие собой летучие жидкости, которые специальными газофлюсопитателями (например, ФГФ-3-71) подают в ацетиленовый канал газовой горелки.

Ввиду большой жидкотекучести чугуна сварка возможна только в нижнем положении шва. При необходимости применяется формовка свариваемого участка, которая выполняется угольными или графитовыми пластинами, плитками из огнеупорных материалов, формовочными смесями. Схемы формовки некоторых деталей показаны на рис. 9.40, а формовочные смеси приведены в табл. 9.42.

Внутреннюю поверхность можно выкладывать графитовыми или угольными пластинами, соединяемыми на стыках формовочными смесями. Перед сваркой детали подогревают: небольшие до температуры 300...400 °С, а более крупные до 600...700 °С. Во избежание отбеливания шва после сварки его медленно охлаждают обычно вместе с нагревающим устройством. Мелкие детали можно охлаждать в горячем песке или под листовым асбестом.

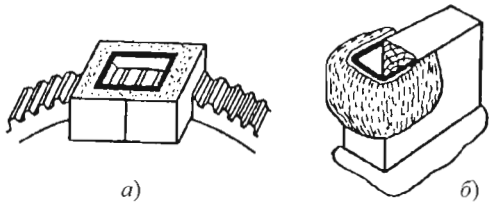


Рис. 9.40. Схема формовки участков чугунных деталей:
а – зубьев шестерен; *б* – недолива при литье

9.41. Порошковые флюсы для сварки чугуна

Номер флюса	Состав	Массовая доля компонентов, % (соответственно)
1	Плавленая бура	100
2	Прокаленная бура	
3	Техническая бура	
4	Прокаленная бура, углекислый натрий, углекислый калий	56; 22; 22
5	Техническая бура и двууглекислый натрий	По 50
6	Плавленая бура, углекислый натрий, натриевая селитра (азотно-кислый натрий)	23; 27; 50
7	Прокаленная бура, натриевая селитра, керосин (сверх 100 %)	50; 50; 4

9.42. Состав смесей для формовки чугунных изделий

Компонент	Номер смеси			
	1	2	3	4
	Массовая доля в составе, %			
Формовочная земля	30	30	–	
Белая глина	30	–	40	–
Кварцевый песок	40	50	10	85
Жидкое стекло	–	20	–	15
Графитовая мелочь	–		50	–

Холодная сварка чугуна. Сварка с расплавлением основного металла. В данном случае, как и при всех способах холодной сварки чугуна, предварительный подогрев не проводят. При быстром охлаждении швов отбеливается. Сварку ведут обычным способом с применением чугунных присадочных стержней марки А или Б и порошкообразного или газообразного флюса. Мощность и характер пламени, а также марки флюсов применяют такие же, как и при горячей сварке чугуна. Этот способ рекомендуется для устранения литейных дефектов и ремонта чугунных деталей небольших размера и массы.

При сварке можно использовать газы – заменители ацетилена, а также жидкие горючие (керосин, бензин). Режимы керосинокислородной сварки чугуна приведены в табл. 9.43.

Низкотемпературная пайко-сварка чугунным присадочным материалом. Сущность этого способа заключается в подогреве пламенем кромок, подлежащих сварке, не до расплавления, а до 820…860 °С. После введения флюса расплавляют и вводят в сварочную ванну присадочные стержни марки НЧ-1 или НЧ-2 (ГОСТ 2671–70), также покрытые флюсом. Вследствие шероховатости поверхности, получаемой от выгорания (окисления) графита и в результате диффузии, происходит соединение наплавленного металла с основным. Присадочные стержни марок НЧ-1 и НЧ-2 применяют при сварке соответственно тонко- и толстостенных отливок. Колебательные движения горелки приведены на рис. 9.41

Флюсы для пайко-сварки чугуна чугунными прутками представлены в табл. 9.44.

Низкотемпературная пайко-сварка латунными припоями. При использовании поверхностно-активных флюсов ФПСН-1 и ФПСН-2, имеющих температуру плавления 600…650 °С, температура нагрева чугунных кромок снижается до 700…750 °С. Активное флюсование обеспечивает хорошее смачивание и обслуживание кромок чугуна припоем без выжигания графита. Невысокая температура нагрева исключает возникновение отбеливания и снижает склонность к образованию трещин. Состав флюсов ФПСН-1 и ФПНС-2 приведен в табл. 9.45.

В качестве припоев используют кремнистую латунь марки ЛОК59-1-03 или припой ЛОМНА (табл. 9.46).

Кромки подготовляют механической обработкой: на станках, вырубкой пневматическим зубилом и т.п. На поверхности кромок не допускаются грязь и окалина. Следы жиров удаляют ацетоном, бензином или другими растворителями.

9.43. Режимы керосинокислородной сварки чугуна

Толщина свариваемых деталей, мм	Угол скоса кромок, °	Величина зазора, мм	Диаметр присадочных прутков, мм
3…5	60	2…2,5	4…6
5…8	70	2,5…3	6
8…12	70…90	3…4	6…8
12…26	90	4…5	8…16

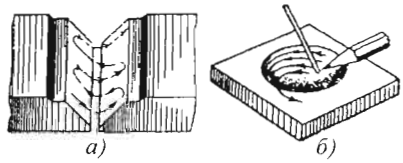


Рис. 9.41. Движение горелки при низкотемпературной пайко-сварке чугунных деталей:
а – сварка стыка; *б* – заварка дефекта

9.44. Флюсы для пайко-сварки чугуна чугунными прутками

Марка флюса	Состав флюса	Массовая доля компонента, % (соответственно)
ФСЧ-1	Плавленая бура, кальцинированная сода, натриевая селитра	23; 27; 50
ФСЧ-2	Плавленая бура, кальцинированная сода, натриевая селитра, углекислый литий	18; 25; 56,5; 0,5
МАФ-1	Плавленая бура, кальцинированная сода, натриевая селитра, оксид кобальта, фтористый натрий, фторцирконистый калий	33; 12; 27; 7; 12,5; 8,5

9.45. Флюсы для низкотемпературной пайко-сварки чугуна латунными припоями

Марка флюса	Массовая доля, %	Область применения
ФПСН-1	25 углекислого лития; 25 кальцинированной соды; 50 борной кислоты	Для латуней, не содержащих алюминия
ФПСН-2	22,5 углекислого лития; 22,5 кальцинированной соды; 45 борной кислоты; 10 солевой плавленой лигатуры (72,5 NaCl и 27,5 NaF)	Для латуней, содержащих до 1 % Al

9.46. Латунные припои для низкотемпературной пайко-сварки чугуна

Марка припоя	Массовая доля, %					
	меди	олова	кремния	марганца	никеля	алюминия
ЛОК59-1-03 (ГОСТ 16130–72)	58 (60)	0,7…1,1	0,2…0,4	–		
ЛОМНА49-05-10-4-04	48…50	0,9…1,0	–	9,5…10,5	3,5…4,5	0,2…0,6

Марка припоя	Температура плавления, °С	Твердость шва по Бринеллю	Цвет
ЛОК59-1-03 (ГОСТ 16130–72)	905	80…100	Желтый
ЛОМНА49-05-10-4-04	835	180…200	Белый

Примечание. Остальное – цинк.

Процесс пайко-сварки ведут нормальным пламенем. Флюс наносят на подготовленную поверхность основного металла после нагрева его до 300…400 °С. По окончании пайко-сварки рекомендуется проковка медным молотком массой ~0,5 кг.

При всех способах сварки и пайко-сварки чугуна возможно использование газов – заменителей ацетилена и жидких горючих.

9.2.1.5. ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

При газовой сварке цветных металлов и сплавов кроме присадочного материала применяются различные по составу флюсы. Их вводят в сварочную ванну для раскисления расплавленного металла и удаления из него образующихся при сварке оксидов и неметаллических включений. Флюсы дают на поверхности

сварочной ванны шлаковую пленку и тем самым предохраняют металл от дальнейшего окисления и попадания в него газов.

В процессе сварки применяют флюсы в виде порошков, паст или легкоиспаряющихся жидкостей. Первые и вторые подают в зону сварки вручную, т.е. наносят заранее на кромки свариваемого металла и на присадочные прутки или вносят в сварочную ванну периодическим погружением присадочного прутка в сосуд с флюсом. Флюсы в виде паров легкоиспаряющихся жидкостей, как, например, флюсы БМ-1 и БМ-2, применяемые при сварке меди, медных и никелевых сплавов, подают в пламя горелки в строго дозированном количестве при помощи специальных газофлюсопитателей, например ФГФ-3-71.

Сварка меди. По химическому составу медь выпускается следующих марок: М00, М0, М0б, М1, М1р, М2, М3, М3р, М4. В марке М00 ≥99,99 % Cu, а в марке М4 ее 99,0 %.

Основными трудностями при сварке меди являются ее высокая теплопроводность, низкая стойкость против образования трещин, повышенная склонность к образованию газовых включений.

Ацетиленокислородную сварку меди выполняют нормальным пламенем при соотношении смеси $\beta = 1{,}1\ldots1{,}2$. Мощность пламени устанавливается из расчета $V_a = (150\ldots200)s$. Нижний предел рекомендуется для меди толщиной до 10 мм, а верхний – для бóльших толщин. При толщине листов >10 мм сварку желательно проводить одновременно двумя горелками: подогревающей мощностью $V_a = (150\ldots200)s$ и сварочной мощностью $V_a = 100s$.

В качестве присадочного материала применяют специальную проволоку марки МСр-1 или обычные медные проволоки марок М0 и М1. Диаметр присадочной проволоки выбирается в зависимости от толщины свариваемых деталей (табл. 9.47).

Сварку осуществляют с применением флюсов (табл. 9.48), которые могут быть в виде порошка, пасты или в парообразном состоянии.

Поставляемая промышленностью бура содержит гигроскопическую и кристаллизационную влагу $Br_2Na_4 \cdot 10H_2O$, которая, попадая в сварочную ванну, резко увеличивает пористость металла шва, кроме того часть буры при испарении влаги вспенивается и выдувается пламенем, в результате чего оголяются и окисляются участки металла. Поэтому следует применять прокаленную буру.

9.47. Выбор диаметра присадочной проволоки для сварки меди

Толщина меди, мм	До 1,5	1,5…2,5	2,5…4	4…8	8…15	>15
Диаметр присадочной проволоки, мм	1,5	2	3	4…5	6	8

9.48. Состав флюсов для сварки меди

Номер флюса	Состав флюса	Массовая доля компонента, % (соответственно)
1	Прокаленная бура	100
2	Борная кислота	
3	Прокаленная бура, борная кислота	По 50
4	То же	75; 25
5	Прокаленная бура, борная кислота, кислый фосфорно-кислый натр	50; 35; 15
6	Прокаленная бура, кислый фосфорно-кислый натр, кварцевый песок, древесный уголь	50; 15; 15; 20
7	Прокаленная бура, борная кислота, поваренная соль	70; 10; 20
8	Прокаленная бура, поваренная соль, углекислый калий – поташ	56; 22; 22

Приготовляют прокаленную буру из обычной технической буры, нагревая ее в открытом фарфоровом или шамотовом тигле или просто на листе из коррозионно-стойкой стали, в последнем случае техническую буру насыпают ровным слоем на лист и помещают в печь, нагретую до температуры 400...450 °С. Образовавшуюся безводную буру размельчают и используют для сварки или составления различных флюсов.

Плавленую буру применяют сравнительно редко, так как она легко выдувается пламенем из зоны сварки.

Флюсы следует хранить в герметически закрывающихся сосудах. Их используют в виде порошка или паст. Флюсы-пасты приготовляют разведением порошкообразных смесей в мягкой, обычно дистиллированной, воде или же в спирте до кашицеобразной массы.

При газовой сварке меди применяют, как правило, стыковые или реже угловые соединения с внешним угловым валиком. Сваркой внахлестку и втавр получают удовлетворительные по качеству соединения.

Сварку ведут только в один слой. Листовую медь толщиной до 5 мм сваривают левым способом, а при больших толщинах – правым.

После сварки рекомендуется проковать шов. При толщине листов до 4 мм проковку выполняют в холодном состоянии, а при больших толщинах при температуре 500...600 °С. Чтобы придать сварному соединению более высокую вязкость после проковки, шов и прилегающую к нему зону основного металла нагревают до температуры 550...600 °С и быстро охлаждают в воде.

Сварка латуней. Латуни представляют собой медно-цинковые сплавы. Они подразделяются на простые латуни, т.е. сплавы меди с цинком (например, Л96, Л80, Л86 и др.), и специальные, в которые кроме цинка в небольших количествах входят алюминий, никель, железо, олово, свинец, кремний, марганец и т.д. (например, ЛдМц59-1-1, ЛК80-3, ЛМц58-2, ЛО90-1 и др.).

Сварка латуней осложняется активным поглощением газов сварочной ванной, склонностью к образованию пор и трещин, испарением цинка при его кипении.

При ацетиленокислородной сварке латуней используют окислительное пламя при соотношении смеси β = 1,3...1,4. Некоторый избыток кислорода в этом случае создает на поверхности расплавленного металла пленку оксидов, которая уменьшает испарение цинка. С этой же целью в состав некоторых присадочных материалов вводят небольшое количество кремния, который, окисляясь, создает тугоплавкую оксидную пленку, предохраняющую цинк от испарения.

Мощность пламени устанавливается из расчета $V_a = (100...120)s$. В качестве присадочного материала применяют проволоку или прутки (табл. 9.49).

Диаметр присадочного материала выбирается в зависимости от толщины свариваемого металла по табл. 9.50.

Сварку проводят с применением флюсов, приведенных в табл. 9.51.

Сварку ведут в основном левым способом в нижнем положении шва. Использование кремнистого присадочного материала, особенно в сочетании с флюсом БМ-1, позволяет сваривать латунь во всех пространственных положениях шва, чему способствует образование на поверхности сварочной ванны вязкой шлаковой пленки. Сварку выполняют на пониженной мощности пламени из расчета $V_a = (35...40)s$, а диаметр присадочного материала принимают на 1 мм меньше, чем при сварке в нижнем положении.

9.49. Марки присадочного материала при сварке латуней

Присадочный материал	Область применения
Л62	Для сварки простых латуней, например Л62, Л68 и др.
ЛК62-05	
ЛО60-1	Для изделий, работающих в морской воде
ЛОК59-1-03	Для изделий из латуней Л62 и ЛО62-01, требующих более глубокого провара (в трубках, замыкающих швах и др.)
ЛКБО62-02-004-05	Для сварки простых латуней

9.50. Выбор диаметра присадочного материала для сварки латуней

Толщина латуни, мм	1…2	2…3	4…5	6…7	8…10
Диаметр присадочного материала, мм	2	3	5	7	9

9.51. Флюсы для сварки латуней

Номер и марки флюса	Состав	Массовая доля компонента, % (соответственно)	Способ приготовления
1	Бура	100	–
2	Борная кислота, бура, фосфорно-кислый натрий	35; 50; 15	Перемешивание в мельнице или ступке
3	Бура и борная кислота	20 и 80	
БМ-1	Метилборат и метиловый спирт	75 и 25	Ректификация

При толщине металла >3 мм при сварке в нижнем положении шва следует применять двустороннюю сварку или проводить ее на подкладках. Остающиеся подкладки изготовляют из меди, а съемные из коррозионностойкой стали. При толщине металла >6 мм применяют многослойную сварку, при этом каждый последующий шов накладывают после тщательной зачистки предыдущего. После сварки рекомендуется холодная или горячая проковка шва алюминиевым молотком. Для снятия остаточных напряжений необходим низкотемпературный отжиг при температуре 270…300 °С.

Пропан-бутанкислородная сварка латуней выполняется пламенем мощностью $V_г$ = = (60…75)s. Соотношение кислорода и сжиженного газа β = 3,5…4. Техника сварки такая же, как и при сварке ацетиленом.

Керосинокислородную сварку латуней выполняют пламенем мощностью 140…250 г/ч на 1 мм толщины свариваемого металла. Соотношение кислорода к керосину в смеси 1,8 : 2 м^3/кг. Режимы керосинокислородной сварки латуней приведены в табл. 9.52.

Сварка бронз. Бронзами называются сплавы меди с любыми металлами, кроме цинка. Бронзы подразделяются на две основные группы:

1) оловянистые, в которых основным легирующим компонентом является олово (например, марки БрОФ6,5-0,4; БрОЦ4-3; БрОЦС4-4-4 и др.);

2) безоловянистые (специальные) бронзы, содержащие алюминий, кремний, бериллий, никель, хром, марганец, железо и т.д.

Из специальных бронз наибольшее применение нашли алюминиевые (БрА7, БрАЖ-3-4, БрАЖМц10-3-1,5 и др.) и кремнистые (БрКМц3-1, БрКН0,5-2 и др.). Широко распространены также бериллиевые, марганцовистые, никелевые, хромистые и другие бронзы.

9.52. Режимы керосинокислородной сварки латуней

Толщина свариваемого металла s, мм	Величина зазора b, мм	Угол скоса кромок a, °	Диаметр присадочной проволоки, мм	Номер мундштука горелки
0,5…1	1…1,5	–	2	2…3
1…5	1,5…3		3…5	4…5
6…15	3…4	60…90	7…9	6…7

Оловянистые (оловянные) бронзы. Сварку выполняют строго нормальным пламенем, так как при избытке в пламени кислорода выгорает олово, а при избытке ацетилена увеличивается пористость наплавленного металла. Мощность пламени устанавливают из расчета $V_а$ = (100...150)s, для чего выбирают соответствующий номер наконечника. В бронзовом литье чаще всего приходится заваривать раковины, поры, недоливы и трещины. Разделка кромок – под углом 60...90°. При сквозных трещинах формируют дефектное место. Бронза очень жидкотекуча, а поэтому ее сварка возможна только в нижнем положении шва.

В качестве присадочного материала применяют бронзовые тянутые прессованные или литые в металлический кокиль прутки, близкие по составу к основному металлу. Фосфор при сварке бронз является хорошим раскислителем, а поэтому в ряде случаев в качестве присадочного материала рекомендуется применять фосфористую бронзу марки БрОФ6,5-0,4. Флюсы при сварке берут те же, что и при сварке меди (см. табл. 9.48).

После сварки следует провести отжиг при температуре 600...700 °С. Для особо ответственных отливок, работающих при ударных и знакопеременных нагрузках, применяют отжиг при температуре 750 °С и закалку при 600...650 °С.

Алюминиевые бронзы. Основная трудность при сварке алюминиевых бронз вызвана окислением алюминия с образованием тугоплавкой оксидной пленки Al_2O_3, оседающей на дно сварочной ванны. При сварке этих бронз применяют нормальное пламя. Мощность пламени при сварке с предварительным подогревом определяют из расчета $V_а$ = (100...150)s, а без предварительного подогрева по формуле $V_а$ = (125...175)s. Присадочный материал – того же состава, что и основной металл; флюсы можно использовать те же, что и при сварке меди. При повышенном содержании алюминия в бронзах рекомендуются специальные флюсы (табл. 9.53), в состав которых входят хлориды и фториды щелочных металлов.

Кремнистые бронзы. Сварку выполняют нормальным пламенем. Мощность пламени та же, что и при сварке алюминиевых бронз. Присадочный материал по составу аналогичен основному металлу. Флюсы используют те же, что и при сварке меди и латуней. При сварке деталей сложной конфигурации требуется предварительный подогрев до температуры 300...350 °С.

Сварка алюминия и его сплавов. В чистом виде алюминий применяют главным образом в химической, пищевой и электротехнической промышленности. Он поставляется по ГОСТ 11069–74 особой, высокой и технической чистоты.

В промышленности и строительстве наиболее часто используют сплавы алюминия, образующие две группы:

1) литейные, из которых отливаются фасонные детали сложной конфигурации. Это сплавы типа силумина (алюминий и кремний), магналия (алюминий и магний) и др. Большинство из них упрочняется термической обработкой;

9.53. Флюсы для сварки алюминиевых бронз

Компоненты	Смесь		
	1	2	3
	Массовая доля компонента, %		
Хлористые:			
– натрий	30	45	28
– калий	45	30	50
– литий	15	10	14
Фтористые:			
– натрий	–	–	8
– калий	7	15	–
Кислый фосфат натрия	3	–	–

2) деформируемые, поддающиеся различным методам обработки давлением: штамповке, прокатке, ковке, прессовке, волочению. Деформируемые сплавы могут быть упрочняемые и неупрочняемые термической обработкой. К упрочняемым относятся сплавы типа авиаль (АВ и др.), дюралюминий (Д1, Д16 и др.) и др., к неупрочняемым – сплавы алюминия с марганцем (типа АМц), алюминия с магнием (типа АМг) и др.

Основные трудности сварки алюминия и его сплавов вызываются:

– низкой температурой плавления (~650 °С);

– высокой теплопроводностью;

– сильной окисляемостью с образованием тугоплавких оксидов (Al_2O_3, температура плавления 2050 °С);

– большой литейной усадкой;

– хрупкостью при температурах 350... 380 °С.

Ацетиленокислородную сварку алюминия и его сплавов выполняют нормальным или слегка ацетиленистым (науглероживающим) пламенем. Окислительное пламя не допускается. Мощность пламени устанавливается из расчета $V_a = 75s$.

Элементы геометрической формы кромок под сварку в зависимости от вида соединения приведены в табл. 9.54.

Кромки деталей перед сваркой должны быть очищены от загрязнений и оксидных пленок напильниками и металлическими щетками. При повышенных требованиях к качеству швов детали обезжиривают или травят. Обезжиривание осуществляют бензином, дихлорэтаном или ацетоновой смывкой, иногда используют водный раствор, содержащий 0,5...1 % едкого натра, 5 % фосфорно-кислого натрия и 3 % жидкого стекла. После обезжиривания детали промывают в горячей воде и просушивают. Травление проводят в 10%-ном растворе едкого натра с последующими промывкой в воде и нейтрализацией в 10%-ном растворе азотной кислоты. Затем детали промывают с использованием волосяных щеток и сушат при температуре 100...120 °С. Возможны и другие составы. Во избежание нового окисления детали сваривают не позже чем через 3...6 ч после травления и промывки.

При сборке деталей в зависимости от толщины металла выдерживают определенные зазоры, а также расстояния между прихватками и их габаритные размеры (табл. 9.55).

9.54. Элементы геометрической формы кромок при сварке алюминия и его сплавов

Размеры, мм			Угол скоса кромок, °
толщина металла s, мм	величина зазора b, мм	притупление c, мм	
До 1,5	До 1,0	Без скоса кромок, допускается отбортовка кромок	
1,5...3,0	0,8...2,0	Без скоса кромок	
3,1...5,0	1,5...2,5	1,5...1,8	60...65
>5,0	2,0...5,0	1,6...2,0	65...70
До 1,5	0,3...0,5	Без скоса кромок	
1,6...3,0	0,5...1,0		
3,1...5,0	0,8...1,5	1,0...1,2	50...60
>5,0	1,0...2,0	1,2...1,5	
До 1,5	0,3...0,5	Без скоса кромок	
1,6...3,0	0,5...1,0		
3,1...5,0	0,8...1,5	1,0...1,5	40...60
>5,0	1,0...2,0	1,5...2,0	

Примечания. 1. В угловом соединении при толщине металла до 5 мм включительно кромки у вертикального листа можно не скашивать.

2. В тавровом соединении при толщине металла >5 мм допускается двусторонний скос кромок.

9.55. Зависимость зазоров, расстояний между прихватками и их габаритных размеров от толщины свариваемых встык алюминиевых деталей и их сплавов

Толщина детали, мм	Зазор между деталями, мм	Расстояние между прихватками, мм	Размер прихватки, мм	
			высота	длина
До 1,5	0,5...1,0	20...30	1,0...1,5	2...4
1,5...3,0	0,8...2,0	30...50	1,5...2,5	4...6
3...5	1,8...3,0	50...80	2,5...4,0	6...8
5...10	2,5...4,0	80...120	4...6	8...12
10...25	3,5...5,0	120...200	6...12	12...26
>25	4,5...6,0	200...360	12...20	26...60

В качестве присадочного материала при сварке чистого алюминия применяют проволоку примерно того же химического состава, что и основной металл. Упрочняемые сплавы и сплавы АМц сваривают проволокой Св-АК5, содержащей 5 % Si, который повышает жидкотекучесть и уменьшает усадку шва. Для сварки сплавов АМг используют проволоки марок Св-АМг3, Св-АМг5, Св-АМг7 с несколько большим содержанием магния, чем в основном металле. Алюминиевое литье сваривают проволоками Св-АК, Св-АМц и проволокой из чистого алюминия. Сварку обычно ведут левым способом при наклоне мундштука к изделию ≤45°. После сварки осуществляют легкую проковку шва в холодном состоянии. Режимы сварки алюминия и его сплавов приведены в табл. 9.56, номера флюсов – в табл. 9.57.

Наибольшее распространение получил флюс № 6, известный под маркой АФ-4А.

Остатки флюсов могут вызвать коррозию сварных соединений, поэтому после сварки швы зачищают металлической щеткой и подвергают специальной обработке. Такая обработка состоит в том, что швы промывают 2%-ным водным раствором хромовой кислоты, нагретым до 80 °С, а затем водой и просушивают. Более простой способ обработки: остывшее изделие смачивают водой, а затем сварные швы нагревают пламенем сварочной горелки, при этом вследствие различия коэффициентов теплового расширения шлака и металла частицы шлака отделяются.

Сварка магниевых сплавов. Магниевые сплавы – это сплавы магния с алюминием, цинком и марганцем. По способу производства и химическому составу их делят на деформируемые (марки МА1…МА8) и литейные (марки МЛ1…МЛ7). Деформируемые сплавы применяют в различных конструкциях в виде штамповок, листового проката, профилей, прутков и труб, литейные используют для производства разного рода отливок.

Трудности, возникающие при сварке магниевых сплавов, в основном те же, что и при сварке алюминиевых. Кроме того, сварка магниевых сплавов затрудняется из-за их легкой воспламеняемости, так как температура плавления чистого магния близка к температуре его воспламенения.

9.56. Режимы сварки алюминия и его сплавов

Толщина детали, мм	Номер наконечника горелки	Диаметр присадочной проволоки, мм	Давление кислорода, МПа	Расход ацетилена, л/ч
До 1,5	0...1	1,5...2,5	0,15	50...100
1,5...3	1...2	2,5...3,0	0,2	100...200
3,0...5	2...3	3...4	0,20...0,25	200...400
5...10	3...5	4...6	0,25...0,3	400...700
10...15	3...6	5...8	0,3...0,35	700...1200
15...25	5...6		0,35...0,4	900...1200
>25		8...10	0,4...0,6	

9.57. Флюсы для сварки алюминиевых сплавов

Номер флюса	Состав	Массовая доля компонента, % (соответственно)
1	Хлористые калий, натрий и литий; фтористый калий, кислый серно-кислый натрий	45; 30; 15; 7; 3
2	Хлористые калий, натрий, литий; фтористый калий	45; 30; 15; 10
3	Хлористые калий и натрий; криолит	50; 15; 35
4	То же	50; 30; 20
5	Хлористые калий, натрий и кальций; фтористый натрий	45; 20; 20; 15
6	Хлористые калий, натрий и литий; фтористый натрий	50; 28; 14; 8

Ацетиленокислородную сварку магниевых сплавов выполняют строго нормальным пламенем. Ацетиленистое, а тем более окислительное пламя не допускается. Мощность пламени устанавливается из расчета $V_a = (75...100)s$.

Сварку осуществляют левым способом и только в нижнем положении шва. Кромки под сварку магниевых сплавов подготовляют так же, как и под сварку алюминиевых (см. табл. 9.54). Перед сваркой детали обезжиривают или травят в растворах щелочей.

В качестве присадочного материала используют проволоку или прутки того же химического состава, что и основной металл. Допускается применение присадок в виде полосок, нарезанных из листов (так называемой «лапши»).

Состав флюсов для сварки магниевых сплавов приведен в табл. 9.58.

Флюс разводят в керамической посуде или посуде из коррозионно-стойкой стали дистиллированной водой до сметанообразного состояния из расчета на 60 г флюса ~100 г воды. Перед сваркой флюс кисточкой наносят на кромки шва и на конец присадочного прутка. Слой флюса должен быть небольшой, так как избыток его затрудняет сварку. Во избежание возгорания магния сварочная ванна все время должна быть защищена флюсом. Разведенный флюс можно хранить ≤ 9 ч.

Детали из деформируемых магниевых сплавов толщиной >5 мм сваривают с предварительным подогревом до температуры 300...350 °С. Прочность сварных соединений составляет ~60...80 % прочности основного металла.

Сварка никеля и его сплавов. Технический никель (марок НТ) выпускается в виде листов, лент, труб и проволоки. Ацетиленокислородную сварку никеля выполняют пламенем с небольшим избытком ацетилена. Мощность пламени устанавливают из расчета $V_a = (140...200)s$. Присадочный материал применяют в виде полос, нарезанных из основного металла с таким же химическим составом. Сварку осуществляют с применением флюсов (табл. 9.59).

Никель толщиной 1,5...2 мм сваривают левым способом, а металл больших толщин – правым.

9.58. Флюсы для сварки магниевых сплавов

Марка флюса	Состав	Массовая доля компонента, % (соответственно)
ПО	Фтористые кальций, барий, магний, литий	17,4; 35,2; 26,2; 21,2
МФ-1	Фтористые кальций, барий, магний и литий; криолит	25; 30; 10; 15; 20
ВФ-156	Фтористые кальций, барий, магний и литий; криолит (чистый) и оксид магния	14,8; 33,3; 24,8; 19,5; 4,8; 2,8
13	Фтористые кальций, барий, магний, литий и кадмий; кислый фосфорно-кислый натрий	13; 26; 19; 16; 15; 11

4.59. Флюсы для сварки никеля

Номер флюса	Состав	Массовая доля компонента, % (соответственно)
1	Прокаленная бура	100
2	Прокаленная бура и борная кислота	25 и 75
3	Прокаленная бура, борная кислота, хлористый натрий, хлористый калий	30; 50; 10; 10

Сплавы никеля с хромом называют нихромами, например сплав Х20Н80. Они отличаются высокими механическими свойствами, большим электрическим сопротивлением, жаропрочностью и коррозионной стойкостью. Ацетиленокислородную сварку нихрома осуществляют пламенем с небольшим избытком ацетилена. Мощность пламени устанавливают из расчета $V_а = (50...70)s$. Состав присадочного материала тот же, что и у основного металла. Можно применять проволоку из нихрома марки ЭХН-80. Состав флюса, %: 40 буры, 50 борной кислоты, 10 хлористого натрия или фтористого калия. Сварку выполняют в один слой. После сварки желателен отжиг.

Сварка цинка. Цинк широко применяют в химическом машиностроении. Трудности сварки цинка связаны с испарением его при температуре ~906 °С. При этом образуются весьма вредные пары оксида цинка.

Ацетиленокислородную сварку цинка выполняют пламенем с небольшим избытком ацетилена. Мощность пламени устанавливают из расчета $V_а = 50s$. В качестве присадочного материала служат полосы, нарезанные из листового цинка той же толщины. Сварку ведут левым способом. При сварке применяют флюс из 50 % хлористого цинка и 50 % нашатыря. После сварки рекомендуется легкая проковка с последующим быстрым охлаждением в воде.

Сварка свинца. Свинец применяют при изготовлении кислотоустойчивой аппаратуры, баков, труб и т.п. Основные трудности сварки свинца связаны с его низкой температурой плавления (327 °С) и образованием тугоплавких оксидов с температурой плавления ~888 °С. При сварке применяют нормальное ацетиленокислородное пламя или пламя газов – заменителей ацетилена. Мощность ацетиленокислородного пламени $V_а$ устанавливают из расчета: при сварке листов $(5...10)s$; при сварке труб $(15...20)s$.

В случае применения газов – заменителей ацетилена необходимо учитывать коэффициент замены.

В качестве присадочного материала используют свинцовую проволоку или полосы, нарезанные из листового свинца.

Кромки перед сваркой тщательно очищают от пленки оксида шабером. При сварке применяют флюсы. В случае сварки небольших толщин в роли флюса используют стеарин, которым натирают кромки и поверхность присадочного материала. Для сварки больших толщин берут флюс, состоящий из равных частей стеарина и канифоли.

Сварка свинца осуществляется при любом положении шва. Основным способом при этом является сварка ванночками (каплями). При сварке вертикальных швов применяют кристаллизаторы (рис. 9.42), которые изготовляют в виде полукольца длиной 50...150 мм. По мере заполнения и затвердевания отдельных участков шва кристаллизатор перемещается вверх.

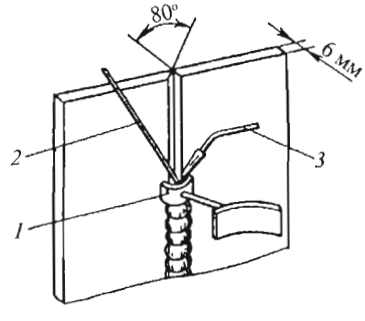


Рис. 9.42. Сварка вертикального шва с кристаллизатором:
1 – кристаллизатор; *2* – присадочный пруток; *3* – горелка

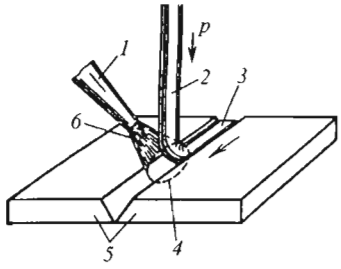


Рис. 9.43. Сварка пластмасс нагретым газом:
1 – наконечник горелки; *2* – присадочный пруток; *3* – сварной шов; *4* – зона нагрева; *5* – свариваемые пластины; *6* – нагретый газ; *p* – сварочное давление

Сварка пластмасс. Сварка пластмасс – это процесс неразъемного соединения их с помощью нагрева и давления. Сварке поддаются только так называемые термопластичные пластмассы (термопласты), которые при нагревании становятся пластичными, а после охлаждения принимают первоначальные вид и свойства. Пластмассы можно сваривать различными способами: нагретым газом, контактной теплотой от нагревательных элементов, трением, УЗ. При газопламенной обработке применяют сварку нагретым газом. В качестве газа-теплоносителя используют воздух в смеси с продуктами сгорания пропан-бутановых смесей. Сущность сварки нагретым газом (рис. 9.43) состоит в том, что кромки свариваемых пластин *5* и присадочный пруток *2* нагревают до размягчения и перехода их в вязкотекучее состояние. Затем присадочный пруток с приложением небольшого давления укладывают в шов *3*. Пластмассы в вязкотекучем состоянии приобретают липкость, в результате чего кромки деталей и материал присадочного прутка образуют неразъемное соединение.

Основные типы и конструктивные элементы швов сварных соединений из винипласта и полиэтилена установлены ГОСТ 16310–70. Сварные соединения могут быть стыковые, угловые, тавровые и внахлестку.

Последовательность укладки прутков при сварке стыковых соединений показана на рис. 9.44.

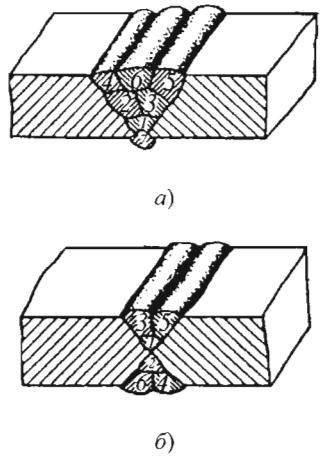


Рис. 9.44. Последовательность укладки присадочных прутков при сварке стыковых соединений пластмасс:
а и *б* – при сварке с одно- и двусторонним скосом кромок соответственно; *1* – *6* – номера швов

9.2.2. ПАЙКА МЕТАЛЛОВ

Пайкой называется процесс получения неразъемного соединения металлов и их сплавов без их расплавления путем заполнения зазора между ними припоем – промежуточным металлом или сплавом в жидком состоянии.

Различают два основных вида пайки: высоко- и низкотемпературную. Температура плавления припоев для низкотемпературной пайки < 550 °С, а для высокотемпературной >550 °С. При низкотемпературной пайке предел прочности соединения 50…70 МПа, а при высокотемпературной до 500 МПа.

Низкотемпературную пайку осуществляют обычно электрическими паяльниками, а высокотемпературную – горелками, работающими на ацетилене или его заменителях.

В основу припоев с низкой температурой плавления (мягких припоев) входят свинец, олово, сурьма, а в основу припоев с высокой температурой плавления (твердых припоев) – медь, цинк, кадмий, серебро.

Типы паяльных швов приведены на рис. 9.45.

Для высокотемпературной пайки применяют медно-цинковые припои ПМЦ-36, ПМЦ-48, ПМЦ-54 и др.

Пайка проводится с применением флюсов – активных химических веществ, предназначенных для очистки и поддержания в чистоте поверхностей паяемого металла с целью снижения поверхностного натяжения и улучшения растекания жидкого припоя. Составы некоторых флюсов для пайки приведены в табл. 9.60.

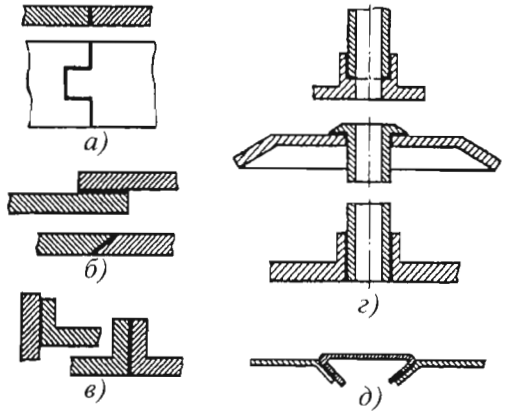


Рис. 9.45. Типы паяных соединений (швов):
а – стыковые; *б* – внахлестку; *в* – с отбортовкой; *г* – втулочные; *д* – специальные (для заплат на алюминиевых деталях)

9.60. Флюсы для пайки медью, медно-цинковыми и медно-никелевыми припоями

Номер флюса	Компоненты	Массовая доля, %	Области применения
1	Борная кислота	70	Пайка конструкционных коррозионно-стойких и жаропрочных сталей латунью и жаропрочными припоями
	Бура	21	
	Фтористый кальций	9	
2	Бура	100	Пайка углеродистых сталей, чугуна, меди, твердых сплавов медно-цинковыми припоями
3	Бура	80	Пайка низкоуглеродистых сталей и медных сплавов
	Борная кислота	20	
4	Бура	50	Пайка коррозионно-стойких сталей, твердых и жароупорных сплавов медно-цинковыми и медно-никелевыми припоями. Флюс разводят в растворе хлористого цинка
	Борная кислота	50	
5	Борная кислота	78	Пайка медными припоями углеродистых, коррозионно-стойких и жароупорных сталей, твердых и медных сплавов
	Бура	12	
	Фтористый кальций	10	
6	Бура	50	Пайка твердых сплавов медью, медно-цинковыми и медно-никелевыми припоями
	Борная кислота	10	
	Фтористый кальций	40	
7	Бура	95	Пайка чугуна медью и медно-цинковыми припоями. Флюс разводят в концентрированном растворе хлористого цинка
	Марганцово-кислый калий	5	
8	Бура	75	Пайка припоями на медной основе
	Фтористый кальций	10	
	Фтористый натрий	15	
9	Борная кислота	80	Пайка коррозионно-стойких сталей и жаропрочных сплавов латунью и другими припоями с температурой плавления 850…1100 °С
	Бура	14	
	Фтористый кальций	5,5	
	Лигатура (4 % Mg, 48 % Cu, 48 % Al)	0,5	
10	Бура	58	Пайка латуни и меди
	Борная кислота	40	
	Хлористый кальций	2	

9.2.3. ТЕРМИЧЕСКАЯ РЕЗКА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

В настоящее время термическая резка является одним из основных процессов, связанных с удалением небольших объемов металла методами химического и электрофизического воздействий с целью получения заготовок из листовых материалов, труб, профильного проката, литья, поковок и т.п. для последующего изготовления сварных металлоконструкций. В зависимости от источника энергии различают кислородную, плазменную, лазерную резку и дуговые способы резки.

Кислородная резка – один из наиболее распространенных в практике технологических процессов термической резки.

9.2.3.1. СУЩНОСТЬ ПРОЦЕССА, КЛАССИФИКАЦИЯ И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

Кислородная резка представляет собой процесс интенсивного окисления металла в определенном объеме с последующим удалением жидкого оксида струей кислорода. Процесс резки начинают с подогрева верхней кромки металла подогревающим пламенем до температуры воспламенения металла в кислороде, которая в зависимости от химического состава стали составляет 1050...1200 °С. При достижении температуры воспламенения на верхней кромке металла на нее из режущего сопла подается струя кислорода, при этом сталь начинает гореть в струе кислорода с образованием оксидов и выделением значительного количества теплоты, разогревающей сталь у верхней кромки до температуры плавления. Получившийся на верхней части кромки расплав жидких оксидов и железа перемещается по боковой кромке металла струей кислорода и нагревает нижние слои металла, которые последовательно окисляются до тех пор, пока весь металл не будет прорезан на всю глубину. Одновременно с этим начинают перемещать резак с определенной скоростью в направлении резки. На лобовой поверхности реза по всей толщине образуется непрерывный слой горящего металла. Окисление металла в каждый момент времени начинается сверху и последовательно передается нижним слоям металла.

При кислородной резке (рис. 9.46) струя кислорода перемещается в разрезе со скоростью $v_р$ и окисляет жидкий металл на глубину $h'_ж$. За счет его окисления выделяется определенное количество теплоты, которая расплавляет жидкий металл на глубину $h_ж - h'_ж$ и

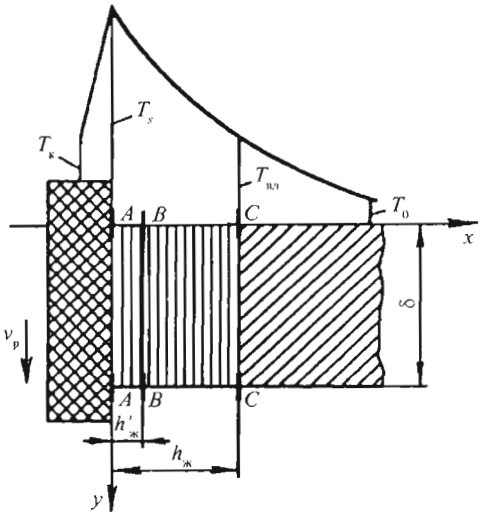


Рис. 9.46. Схема процесса кислородной резки: *AA* – граница раздела струи кислорода и окисленного металла; *BB* – граница раздела окисленного и расплавленного металлов; *CC* – граница раздела расплавленного и твердого металлов

подогревает металл впереди по фронту резки. Слои расплавленного металла окисляются путем интенсивного перемешивания струей расплава на лобовой поверхности реза.

Для протекания процесса кислородной резки надо обеспечить следующие условия:

– контакт между струей кислорода и жидким металлом;

– подогрев неокисленного металла до температуры воспламенения;

– выделение продуктами горения определенного количества теплоты, достаточного для создания на поверхности реза слоя расплавленного металла;

– вязкость жидкого расплава, необходимую для перемешивания жидкого металла струей кислорода.

Приведенные условия определяют требования к металлу, обрабатываемому кислородной резкой.

Прежде всего температура плавления оксидов $T_{пл.ок}$ должна быть ниже температуры плавления самого металла $T_{пл.мет}$:

$$T_{пл.ок} < T_{пл.мет}.$$

В противном случае струя кислорода не сможет окислить расплавленный металл.

Если температура воспламенения металла будет выше температуры плавления, то металл начнет плавиться и выдуваться струей кислорода без последующего его окисления («плавильный процесс»). Этот процесс требует значительных энергетических затрат. Таким образом, закономерно следующее условие процесса:

$$T_{\text{воспл}} < T_{\text{пл.мет}}.$$

При низкой теплоте образования оксида лобовая поверхность реза не прогревается до температуры плавления, процесс резки прерывается. По тем же самым причинам отрицательно сказывается на способности металлов подвергаться кислородной резке их высокая теплопроводность.

По типу образуемых разрезов различают разделительную кислородную резку, при которой металл струей кислорода окисляется на всю толщину (при этом одна часть металла отделяется от другой), и поверхностную, при выполнении которой удаляются слои металла с поверхности изделия.

При резке низкоуглеродистых, конструкционных, низколегированных сталей применяют обычную кислородную резку, а для обработки заготовок из высоколегированных сталей, чугуна, цветных сплавов – кислородно-флюсовую.

Имеются особые способы кислородной резки: подводная, применяемая, как правило, при ремонтных работах под водой; копьевая и электрокислородная резка.

В настоящее время кислородная резка наряду с дуговой сваркой является одним из основных технологических процессов в заготовительном производстве и находит широкое применение в металлургии, металлообрабатывающих отраслях промышленности, строительстве.

По степени механизации процесса кислородная резка подразделяется на ручную и механизированную.

Ручная кислородная резка получила распространение главным образом на тех предприятиях, где объем перерабатываемого металла невелик и применение средств механизации процессов нецелесообразно. Ее используют для вырезки заготовок по разметке из листа, профильного проката, труб, отрезки прибылей и литников в литейном производстве, вырезки заготовок под последующие ковку и штамповку, в ремонтных работах.

Применение многорезаковых машин обеспечило значительное повышение уровня механизации газорезательных работ, повышение производительности труда в заготовительном производстве и экономию материалов.

Кислородно-флюсовая резка коррозионно-стойких сталей, чугуна и цветных металлов нашла широкое применение для резки отливок, листовой стали и труб в различных отраслях народного хозяйства.

Основные параметры реза при разделительной кислородной резке показаны на рис. 9.47.

На скорость резки сильно влияет чистота кислорода (табл. 9.61). С уменьшением последней значительно снижается скорость резки. Наиболее целесообразно применять кислород чистотой ≥ 99,5 %. Кислород чистотой 95 % в данном случае неэффективен, так как приводит к малой скорости резки, загрязнению поверхности реза, образованию на ней глубоких рисок и трудноотделимого грата.

Ручная разделительная кислородная резка. При разделительной кислородной резке принято различать резку металла толщиной до 300 мм и больших толщин (≥ 800 мм). Режимы ручной кислородной резки листового проката толщиной до 300 мм приведены в табл. 9.62.

Оптимальные расстояния между мундштуком и поверхностью разрезаемого металла при ацетиленокислородной резке даны в табл. 9.63. Примерная ширина реза приведена в табл. 9.64.

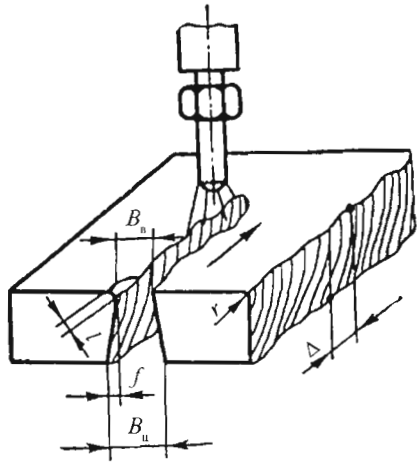


Рис. 9.47. Основные параметры реза:
$B_в$ – ширина реза вверху; $B_н$ – то же, внизу; f – неперпендикулярность реза; l – глубина бороздок (шероховатость); Δ – отставание; r – радиус оплавления верхней кромки

9.61. Зависимость скорости резки от чистоты кислорода

Чистота кислорода, об. %	Скорость резки, мм/мин	Коэффициент скорости резки, $K_ч$
99,8	119	1,19
99,5	100	1
99,2	92	0,92
99,0	90	0,9
98,5	84	0,84
98,0	74	0,74

Примечание. За 100 % принята скорость резки для кислорода чистотой 99,5 %.

9.62. Режимы ручной кислородной резки листового проката

Толщина разрезаемого металла, мм	Номер мундштука		Давление, МПа		Скорость резки при наилучшем качестве поверхности реза, мм/мин
	наружного	внутреннего	кислорода	горючего газа	
8...10	1	1	0,3	≥0,001	550...400
10...25		2	0,4		400...300
25...50		3	0,6		300...250
50...100		4	0,8		250...200
100...200	2	5	0,10		200...130
200...300		5	0,12		130...80

Примечание. Скорость резки может быть увеличена почти в 2 раза, но при этом значительно ухудшится качество поверхности реза.

9.63. Оптимальные расстояния от мундштука резака до металла

Толщина металла, мм	3...10	10...25	25...50	50...100	100...200	200...300
Расстояние, мм	2...3	3...4	3...5	4...6	5...8	7...10

9.64. Примерная ширина реза при ручной кислородной резке

Толщина металла, мм	5...25	25...50	50...100	100...200	200...300
Ширина реза, мм	3...4	4...5	5...6	6...8	8...10

Мощность подогревательного пламени при резке может быть значительно меньше, чем при сварке. Это пламя должно обеспечивать только подогрев металла в начале резки до температуры воспламенения металла и поддерживать необходимую температуру в процессе резки (табл. 9.65).

На скорость резки очень влияет чистота режущего кислорода: с ее понижением скорость резки уменьшается, а расход кислорода увеличивается.

Резку металла больших толщин (300... 800 мм) осуществляют специальными резаками при низком давлении кислорода. Эти резаки имеют увеличенные проходные сечения для режущего кислорода. При низких скоростях истечения кислорода каждая его частица имеет возможность больше по времени соприкасаться с металлом в месте реза, что снижает потери кислорода. Кроме того, при низком давлении кислорода не наблюдается его завихрений. Это обеспечивает более стабильную непрерывность резки, однако рез при этом получается заметно шире.

9.65. Мощность подогревательного пламени

Толщина металла, мм	3...25	25...50	50...100	100...200	200...300
Мощность подогревательного пламени (ацетилена), $м^3/ч$	0,3...0,55	0,55...0,75	0,75...1,0	1,0...1,2	1,2...1,3

Во избежание перегрева мундштука отраженной теплотой и предотвращения засорения каналов для горючей смеси брызгами шлака расстояние от мундштука до поверхности металла должно быть большим, чем при резке кислорода высокого давления. Режимы ручной кислородной резки металла толщиной 300... 800 мм приведены в табл. 9.66.

Машинная разделительная кислородная резка. Точность вырезаемых деталей и качество поверхности реза установлены ГОСТ 14792–80. Под точностью вырезаемых деталей понимается предельное отклонение фактических их размеров от номинальных, включая местные неровности. Этим стандартом установлено три класса точности (табл. 9.67).

Качество поверхности реза определяется двумя показателями: неперпендикулярностью реза и шероховатостью поверхности реза. Неперпендикулярность – это наибольшее отклонение от перпендикуляра прямой линии в сечении реза. Шероховатость – это наибольшая высота неровностей на поверхности реза. Наибольшие значения (классы) неперпендикулярности и шероховатости реза приведены в табл. 9.68.

9.66. Режимы ручной кислородной резки сталей больших толщин

Толщина разрезаемого металла, мм	Диаметр канала режущего кислорода в мундштуке, мм	Давление кислорода перед резаком, МПа	Расход, $м^3/ч$		Скорость резки, мм/мин	Расстояние между мундштуком и металлом, мм
			кислорода	ацетилена		
300	6	0,12...0,16	34...42	1,3...2,0	100...300	20...30
400	7	0,12...0,17	45...56	1,6...2,4	80...100	25...40
500	8	0,12...0,16	56...70	1,9...2,9	65...85	30...50
600		0,16...0,22	67...88	2,3...3,3	55...70	35...60
700	9	0,15...0,21	78...97	2,5...3,8	50...65	40...70
800		0,19...0,25	90...110	2,8...4,2	45...55	45...80

9.67. Предельные отклонения размеров вырезаемых деталей в зависимости от класса точности

Класс точности	Толщина листа, мм	Предельные отклонения при номинальных размерах детали или заготовки, мм			
		До 500	>500...1500	>1500...2500	>2500...5000
1	5...30	±1,0	±1,5	±2,0	±2,5
	5...60	±1,0	±1,5	±2,0	±2,5
	61...100	±1,5	±2,0	±2,5	±3,0
2	5...30	±2,0	±2,5	±3,0	±3,5
	31...60	±2,5	±3,0	±3,5	±4,0
	61...100	±3,0	±3,5	±4,0	±4,5
3	5...30	±3,5	±3,5	±4,0	±4,5
	31...60	±4,0	±4,0	±4,5	±5,0
	61...100	±4,5	±4,5	±5,0	±5,5

9.68. Наибольшие значения неперпендикулярности и шероховатости поверхности реза

Класс	Толщина металла, мм		
	5...15	16...30	31...50
Неперпендикулярности:			
1	0,2	0,3	0,4
2	1,0	1,2	16
3	1,2	1,6	2,0
Шероховатости:			
1	0,04	0,08	0,16
2	0,08	0,16	0,32
3	0,16	0,32	0,64

Скорость машинной кислородной резки во многом зависит от чистоты кислорода (см. табл. 9.61), а также от требуемого качества поверхности реза (табл. 9.69).

Режимы фигурной машинной кислородной резки по I классу качества поверхности реза с применением кислорода чистотой 99,5 % приведены в табл. 9.70.

9.69. Коэффициенты скорости машинной кислородной резки в зависимости от требуемого качества поверхности реза

Класс качества поверхности реза	Характеристика класса качества	Коэффициент скорости резки $K_к$
I	Чистая вырезка фигурных деталей	1
II	Чистая вырезка деталей с прямолинейными кромками	1,2
III	Резка деталей, не требующих высокого качества поверхности реза	1,4
IV	Вырезка деталей с припуском на механическую обработку	1,5
V	Заготовительная резка без оценки качества поверхности реза	2

9.70. Режимы фигурной машинной кислородной резки (I класс качества поверхности реза, чистота кислорода 99,5 %)

Толщина разрезаемой стали, мм	Скорость резки, мм/мин	Давление кислорода перед резаком, МПа	Расход, $м^3/ч$		
			режущего кислорода	подогревающего кислорода	ацетилена
3	550	0,15	0,7	0,4...0,6	0,3...0,5
5	500	0,25	1,0		
8	450	0,35	1,3		
10	400	0,4	1,5		
15	380	0,3	3,0		
20	350	0,35	3,0	0,5...0,7	0,4...0,6
30	320	0,3	5,5		
40	300	0,35	6,5		
50	250	0,4	7,0		

Окончание табл. 9.70

Толщина разрезаемой стали, мм	Скорость резки, мм/мин	Давление кислорода перед резаком, МПа	Расход, $м^3/ч$		
			режущего кислорода	подогревающего кислорода	ацетилена
60	230	0,35	9,5	0,6...1,2	0,5...1,2
80	210	0,4	11		
100	200	0,45	12		
150	160	0,7	19		
200	130	0,8	23		
250	100	0,7	25		
300	80	0,8	28		

Примечание. Давление ацетилена перед резаком 9,8...29,4 кПа.

В случае резки металла по другому классу качества поверхности реза или с использованием другой чистоты кислорода вводятся поправочные коэффициенты. В этих случаях скорость резки $v_р$ рассчитывается по формуле

$$v_р = v_1 K_к K_ч,$$

где $v_р$ – скорость резки по I классу качества (см. табл. 9.70); $K_к$ – коэффициент скорости резки в зависимости от требуемого качества поверхности реза (см. табл. 9.69); $K_ч$ – коэффициент скорости резки в зависимости от чистоты применяемого кислорода (см. табл. 9.61).

Примерная ширина реза при машинной кислородной резке представлена в табл. 9.71.

Двусторонний скос кромок проводят при одновременной работе трех резаков (рис. 9.48). Вертикальный резак образует притупление, а наклонные – скос кромок. Наиболее часто применяется схема расположения резаков, показанная на рис. 9.48, *а*.

9.71. Примерная ширина реза при машинной кислородной резке

Толщина разрезаемого металла, мм	5...25	25...50	50...100	100...200	200...300
Средняя ширина реза, мм	2,5...3	3...4	4...5	5...6,5	6,5...8

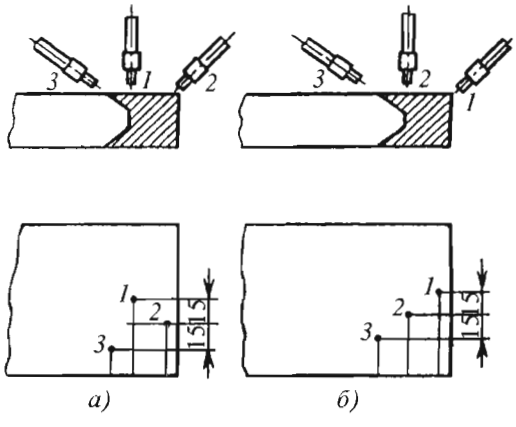


Рис. 9.48. Схемы расположения машинных резаков при двустороннем скосе кромок под сварку:
а и *б* – вертикальный резак впереди и в центре соответственно; *1 – 3* – машинные резаки

9.2.3.2. СПЕЦИАЛЬНЫЕ ВИДЫ МАШИННОЙ КИСЛОРОДНОЙ РЕЗКИ

Подготовка кромок под сварку. Односторонний скос кромок осуществляют одновременно двумя резаками (рис. 9.49, *а*). Первый резак выполняет вертикальный рез и образует притупление, а второй – наклонный рез. Наиболее часто применяют схему расположения резаков, показанную на рис. 9.49, *б*; режимы резки по этой схеме приведены в табл. 9.72.

Режимы резки тремя резаками представлены в табл. 9.73.

Резка кислородом низкого давления. Давление кислорода в этом случае устанавливают в пределах 0,05...0,2 МПа. Для резки применяют специальные резаки с режущими соплами, имеющими большие проходные сечения. Режимы резки кислородом низкого давления приведены в табл. 9.74.

Безгратовая кислородная резка. Кислородную резку без грата на нижних кромках резов осуществляют кислородом высокой чистоты (99,5...99,8 %). Металл толщиной до 12 мм режут при низком давлении кислорода. При резке металла толщиной >15 мм сопло режущего кислорода должно иметь расширение на выходе. Режимы безгратовой кислородной резки приведены в табл. 9.75.

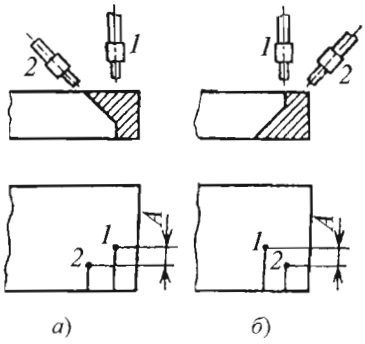


Рис. 9.49. Схемы расположения машинных резаков при одностороннем скосе кромок под сварку:
а – образование скоса сверху; *б* – то же, снизу;
1, *2* – машинные резаки;
A – расстояние между резаками

9.72. Режимы резки двумя резаками при подготовке одностороннего скоса кромок

Толщина разрезаемого металла, мм	Номер мундштука	Расстояние между режущими струями, мм	Давление, МПа		Средняя скорость резки, мм/мин
			кислорода	ацетилена	
10	1	30	0,45	0,002...0,05	485
20	2	25			395
30	3	20			330
40		15	0,55		290
60	4	10	0,6		230
80		8	0,75		190
100		6	0,10		165

9.73. Режимы резки тремя резаками при подготовке двустороннего скоса кромок

Толщина разрезаемой стали, мм	Номер мундштука	Давление режущего кислорода, МПа	Средняя скорость резки, мм/мин
20	2	0,45	370
30	3		310
40		0,55	270
60	4	0,6	215
80		0,75	190
100		1,05	155

9.74. Режимы резки кислородом низкого давления

Толщина металла, мм	Давление кислорода, МПа	Диаметр выходного отверстия сопла, мм	Расстояние резака от поверхности металла, мм	Скорость резки, мм/мин
6	0,06...0,08	1,0	5	440...480
10	0,08...0,1		7	300...350
20		1,7	8	200...230
50	0,09...0,1	2,5	9	180...200
80	0,13...0,15		10	150...170
100	0,14...0,17			130...150

9.75. Режимы безгратовой кислородной резки (чистота кислорода 99,5 %)

Толщина разрезаемой стали, мм	Размеры основных сечений каналов режущего кислорода в мундштуке, мм		Давление режущего кислорода перед резаком, МПа	Расход, $м^3/ч$		Скорость резки, мм/мин
	горлового	выходного		кислорода	ацетилена	
3	0,7	0,7	0,07	0,8...1,0	0,25...0,35	480...630
5			0,18	1,0...1,2		420...550
8	0,95	0,95	0,14	1,4...1,5		380...490
10			0,2	1,7...1,8		360...470
15	1,0	1,3	0,5	3,1...3,3	0,30...0,40	310...400
20			0,65	3,8...4,0		280...370
25			0,8	4,5...4,7		260...350
30	1,3	1,7	0,55	5,3...5,5		250...330
40			0,7	6,4...6,6		230...300
50			0,85	7,5...7,7		220...280
60	1,8	2,3	0,5	8,9...9,1	0,35...0,45	200...270
80			0,65	11,0...11,2		180...250
100			0,8	13,1...13,3		170...230

Кислородная резка стали больших толщин. Стали больших толщин (≥200...1000 мм) режутся специальными резаками. Наибольшее распространение получила резка кислородом низкого давления. С целью уменьшения нагрева мундштука отраженной теплотой расстояние от него до поверхности разрезаемого металла должно быть значительно большим, чем при обычной резке. Режимы резки сталей больших толщин приведены в табл. 9.76.

Поверхностная кислородная резка – это процесс снятия слоя металла кислородной струей с поверхности обрабатываемой детали или заготовки (рис. 9.50). Он, как и процесс разделительной резки, основан на способности углеродистых сталей, нагретых до высокой температуры, сгорать в струе кислорода. В отличие от разделительной резки при поверхностной резке угол атаки (угол наклона между резаком и поверхностью металла) значительно меньше и составляет обычно 10...30°. Струя режущего кислорода выходит из мундштука с меньшей скоростью, чем при разделительной резке, что обеспечивает сгорание лишь поверхностных слоев металла.

9.76. Режимы резки сталей больших толщин

Толщина разрезаемой стали, мм	Диаметр выходного канала сопла режущего кислорода, мм	Давление кислорода перед резаком, МПа	Расход, $м^3/ч$		Скорость резки, мм/мин	Расстояние от конца мундштука до поверхности металла, мм
			кислорода	ацетилена		
200	5	0,06...0,08	35	3	140...180	15...20
300	6	0,12...0,16	45	4	120...150	20...30
400	7	0,12...0,17	60	5	100...130	25...40
500	9	0,12...0,16	80	6	90...110	30...50
600	8	0,16...0,22	100	7	60...80	35...60
700	9	0,15...0,21	130	2	50...65	40...65
800		0,19...0,25	260	9	50...60	45...70
1000	12...14	0,2...0,25	200	11	40...50	50...75

Рис. 9.50. Схема поверхностной кислородной резки и формы выплавляемых канавок

При линейном (ручном или механизированном) перемещении резака получается обработка, подобная строжке, которая может выполняться в виде выплавки отдельных канавок или снятия слоя со всей поверхности. Такая обработка носит название поверхностной кислородной строжки (рис. 9.51, 9.52).

Режимы поверхностной кислородной резки приведены в табл. 9.77.

9.2.3.3. КИСЛОРОДНО-ФЛЮСОВАЯ РЕЗКА

Ранее было показано, что не все стали могут разрезаться обычной кислородной резкой. Повышение содержания в стали ряда легирующих элементов, прежде всего хрома, приводит к тому, что в образующейся жидкой пленке на поверхности реза содержится большое количество тугоплавких оксидов хрома (до 20 %). Температура плавления хромистых железняков с таким содержанием хрома ~2000 °С, что значительно превышает температуру плавления разрезаемой стали. Кроме того, хромистые железняки обладают высокой вязкостью расплава, что препятствует процессам обмена между кислородом режущей струи и пленкой жидкого расплава, т.е. его окислению.

Таким образом, наличие пленки тугоплавких оксидов мешает последовательному окислению металла кислородной струей, его горению, при этом прекращаются выделение теплоты и расплавление металла, т.е. останавливается резка.

Процесс кислородно-флюсовой резки заключается в том, что в зону резки вводят порошкообразный флюс, который, поступая в рез, сгорает в струе кислорода и значительно повышает температуру лобовой поверхности в резе. Кроме того, его продукты окисления сплавляются с оксидами поверхностной пленки и образуют шлаки с более низкой температурой плавления, довольно легко удаляемые из реза.

Флюсы. В качестве флюса используют железный порошок или смеси порошков железа, магния, алюминия и силикокальция.

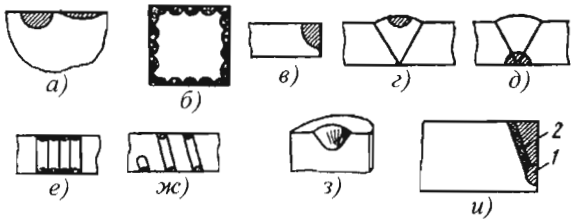


Рис. 9.51. Примеры применения поверхностной кислородной строжки:
а – д – кислородная строжка; *е, ж* – кислородная обточка; *з* – кислородное сверление; *и* – подготовка кромки под сварку; *1* – выплавка канавки; *2* – разделительная резка

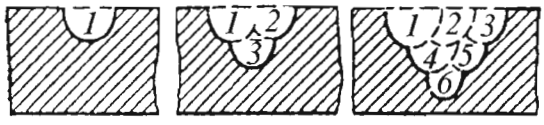


Рис. 9.52. Последовательность строжки в несколько проходов:
1 – 6 – номера проходов

9.77. Режимы поверхностной кислородной резки (чистота кислорода 98,5 %)

Номер мундштука	Давление кислорода перед резаком, МПа	Расход, м³/ч		Масса металла, удаляемого в минуту, кг	Скорость резки, мм/мин	Размеры канавок, мм	
		кислорода	ацетилена			ширина	глубина
1	0,3...0,6	18...40	0,9...1,0	1...3,0	1,5...8	15...30	2...12
2	0,3...0,8	20...55		1,2...3,5	1,5...10	18...35	2...16
3	0,35...0,1	30...75		2,6...4,5		30...50	2...20

Особенности резки бетона и других неметаллических материалов. Процесс кислородно-флюсовой резки бетона отличается тем, что при резке расплав не окисляется. Поэтому для резки подобных материалов требуется вводить в рез большое количество теплоты, выделяющейся при сгорании флюса, а также снижать вязкость расплавленного материала. В связи с этим в состав флюса кроме железного порошка марок ПЖ4М, ПЖ5М вводят до 15...25 % алюминиевого порошка той же грануляции.

Резку выполняют на низком давлении режущего кислорода с коническими сужающимися на выходе мундштуками. Дозвуковые скорости истечения струи режущего кислорода обеспечивают более полное сгорание флюса в резе и максимальную производительность резки. При кислородно-флюсовой резке бетона 15...20 % кислорода расходуется на окисление флюса, остальное – на выдувание расплава из реза.

Железобетон разрезается лучше, так как находящаяся в нем стальная арматура при резке выделяет дополнительное количество теплоты.

Резка металла и неметаллических материалов кислородным копьем. Наиболее освоенным и широко применяемым в нашей стране способом разделки скрапа, бетона, песчаника и других неметаллических материалов является прожигание отверстий кислородным копьем.

Сущность этого процесса заключается в том, что в стальную трубу, разогретую на конце пламенем ацетиленокислородной горелки или каким-либо другим источником нагрева, подается кислород. Жидкие оксиды, получающиеся при горении концевой части трубы, разогревают материал до температуры плавления, кроме того, они реагируют со многими тугоплавкими материалами, образуя жидкотекучие шлаки. Шлаки удаляются из отверстия струей кислорода в зазор между образовавшимся отверстием и поверхностью трубы.

Копье представляет собой толстостенную цельнотянутую трубу с наружным диаметром 20...35 мм либо тонкостенную стальную трубу, в которую вставлена стальная проволока диаметром 3...4 мм с заполнением 60...65 % площади внутреннего сечения трубы. Питание кислородом копья осуществляется от цеховой магистрали или рампы. Давление на входе в копье 588...1470 кПа.

При прожигании отверстия копье прижимается к обрабатываемому материалу с силой, необходимой для преодоления сопротивления застывающих шлаков. Примерная удельная сила 0,5...5 МПа.

С помощью кислородного копья можно прожигать в железобетоне отверстия диаметром 30...120 мм, глубиной до 4 м.

Однако наибольшую производительность прожигания отверстий в материалах обеспечивает процесс порошково-копьевой резки, сочетающий характерные особенности обычного кислородного копья, проникающего непосредственно в зону расплавления материала, и кислородно-флюсовой резки.

Наряду с кислородной резкой в промышленности широко применяют другие способы термической резки, при которых нагрев металла осуществляется не газовым пламенем, а электрической дугой, низкотемпературной плазмой или лучом лазера.

Кислородно- и воздушно-дуговая резка. Сущность этого способа состоит в том, что между электродом и разрезаемой заготовкой возбуждается электрическая дуга, расплавляющая металл. Металл из реза удаляется струей кислорода или воздуха. При кислородно-дуговой резке кислород поступает в рез по внутреннему каналу металлического электрода (рис. 9.53), покрытого специальным составом.

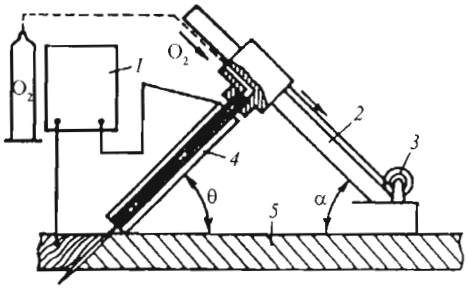


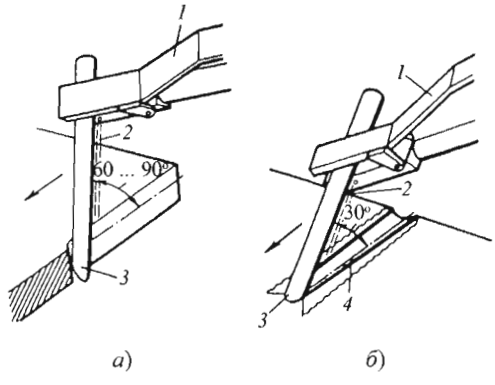
Рис. 9.53. Схема кислородно-дуговой резки:
1 – источник электропитания; *2* – направляющая; *3* – электропривод; *4* – электрод; *5* – разрезаемый металл

При резке на воздухе применяют полые угольные или графитовые электроды, обеспечивающие значительную экономию металла по сравнению с применением металлических электродов.

Воздушно-дуговую резку металлов выполняют сплошным угольным или графитовым электродом, закрепляемым в электрододержателе. В неподвижной губке электрододержателя просверлены отверстия для подачи воздуха параллельно оси электрода.

Различают два вида воздушно-дуговой резки: разделительную и поверхностную. При разделительной резке электрод углублен в полость реза (рис. 9.54, *а*) под углом к поверхности разрезаемого металла 60...90°. При поверхностной воздушно-дуговой резке дуга горит между концом электрода и поверхностью обрабатываемого металла. Электрод наклонен к поверхности под углом 30° в сторону, обратную направлению резки (см. рис. 9.54, *б*). Резку выполняют на постоянном токе обратной полярности. При этом напряжение на дуге 45...50 В, сила тока 250...500 А (для отдельных резаков до 1600 А), диаметр электрода 6...12 мм, давление воздуха 0,4...0,6 МПа, расход воздуха 20...40 м^3/ч, масса металла, выплавляемого в час, до 20 кг.

Следует отметить, что кислородно- и воздушно-дуговые способы разделительной резки не обеспечивают высокого качества поверхности реза, поэтому их применяют лишь в тех случаях, когда не требуется высокое качество поверхности реза или имеются затруднения с горючим газом.



а) *б*)

Рис. 9.54. Схема воздушно-дуговой резки:
а – разделительной; *б* – поверхностной; *1* – электрододержатель; *2* – струя воздуха; *3* – электрод; *4* – разрезаемый металл

9.2.3.4. ПЛАЗМЕННО-ДУГОВАЯ РЕЗКА МЕТАЛЛОВ

Низкотемпературная плазма представляет собой нагретый до $(1...5)10^4$ °С электропроводящий газ, состоящий из положительно и отрицательно заряженных газовых частиц. Низкотемпературную плазму для резки получают обычно в электрической дуге, создаваемой в специальном инструменте – плазмотроне, пропуская через него технические газы.

Активными теплоносителями являются двух- и трехатомные газы. Поэтому их применяют в качестве добавки к аргону. Добавка водорода к аргону в количестве 15...20 % увеличивает прорезающую способность дуги и производительность резки. Дальнейшее повышение содержания водорода в смеси приводит к резкому возрастанию напряжения на дуге. Аргоноводородные смеси применяют при резке легких металлов, таких как алюминий, магний и их сплавы. В практике плазменно-дуговой резки цветных металлов широко используют менее дорогостоящие азотоводородные смеси. Качество резов, выполненных этими смесями, несколько ниже, чем при использовании аргоноводородных смесей.

Воздушно-дуговая резка с использованием в качестве плазмообразующей среды сжатого воздуха находит широкое применение при резке конструкционных и высоколегированных сталей. Для повышения производительности резки применяют также плазмообразующие среды с более высоким содержанием кислорода, чем в воздухе, или чисто кислородную смесь. Однако в этом случае приходится защищать электрод каким-либо неактивным газом (аргоном, азотом).

Режущие плазмотроны. Несмотря на большое разнообразие конструкций режущих плазмотронов, все они содержат два основных блока: электродный и сопловой. Они электрически изолированы друг от друга и включают в себя узлы для подачи плазмообразующих газов, основного и вспомогательного тока, крепления электрода, а также системы охлаждения электрода и сопла (см. рис. 9.26). Электродный и сопловой узлы образуют дуговую камеру, в которой возбуждается дуговой разряд при подаче плазмообразующих газов.

В зависимости от способа плазменно-дуговой резки в качестве электродов применяют вольфрамовый лантанированный стержень (при использовании аргона, азота, водорода) или медный водоохлаждаемый электрод с циркониевой или гафниевой вставкой (при использовании в качестве рабочего газа окислительных сред: воздуха, обогащенного воздуха, кислорода). Цирконий и гафний при воздействии высокой температуры дугового разряда образуют на поверхности тугоплавкую оксидную пленку, в дальнейшем предохраняющую электрод от эрозии в процессе резки. Однако стойкость этих электродов ввиду воздействия крайне высоких температур низка, и время их работы не превышает, как правило, 2...4 ч.

Ориентировочные режимы воздушно-плазменной резки представлены в табл. 9.78 – 9.81.

9.78. Ориентировочные режимы воздушно-плазменной резки низкоуглеродистой стали плазменным аппаратом типа АПР-404*

Сила тока дуги, А	Скорость резки стали, м/мин, при толщине листа, мм					
	10	20	30	40	50	60
200	1,9	0,9	–			
300	3,1	1,6	0,9	0,5	–	
400	3,7	2,4	1,5	0,7	0,5	0,4

* Диаметр сопла 3,0 мм при резке стали толщиной до 30 мм; 4,0 мм при резке стали толщиной >30 мм; расход воздуха 6 $м^3$/ч.

9.79. Ориентировочные режимы воздушно-плазменной резки низкоуглеродистой стали плазменным аппаратом типа «Киев»*

Сила тока дуги, А	Скорость резки стали, м/мин, при толщине листа, мм			
	6...15	15...25	25...40	40...60
300	5,0...2,5	2,5...1,5	1,5...0,8	0,8...0,3

* Диаметр сопла 3,0 мм; расход воздуха 2,4...3,6 $м^3$/ч.

9.80. Примерные режимы воздушно-плазменной машинной резки коррозионно-стойких сталей*

Толщина разрезаемого металла, мм	Диаметр сопла, мм	Сила тока, А	Расход воздуха, $м^3/ч$	Напряжение, В	Скорость резки, м/мин
5...15	2	250...300	2,4...3,0	140...160	5,5...2,6
16...30	3			160...180	2,2...1,0
31...50				170...190	1,0...0,3

* Данные приведены для установки «Киев».

9.81. Ориентировочные режимы воздушно-плазменной резки алюминиевых сплавов*

Сила тока дуги, А	Скорость резки алюминия, м/мин, при толщине листа, мм						
	10	20	30	40	50	60	70
200	3,0	1,6	0,8	–			
300	5,3	2,9	1,8	1,3	0,8	0,6	–
400	11,1	4,0	2,5	1,6	0,9	0,7	0,6

* Данные приведены для установки АПР-404.

9.3. ГИДРОРЕЗКА. ГИДРОАБРАЗИВНАЯ РЕЗКА

В 80-х годах прошлого столетия промышленное применение получил новый способ разделительной резки – высокоскоростной струей воды. На начальной стадии развития этого процесса, при давлении режущей воды до тысячи бар, этот процесс применяли в легкой, пищевой, бумажной и строительной промышленности. При повышении давления воды до 300...400 МПа и использовании профилированных сопл, с помощью которых достигались сверхзвуковые скорости истечения, водяная струя смогла проникать в металлы, вызывая их разрушение. Однако эффективность гидрорезки металлов была недостаточна: ее скорость мало отличалась от скоростей механической обработки, а сложность и высокая стоимость оборудования не позволяли конкурировать с механической обработкой.

Революция в технологии гидрорезки совершилась после разработки способа гидроабразивной резки, при котором в водяную высокоскоростную струю добавляется абразивный порошок.

Отличие гидроабразивной резки от гидрорезки заключается в том, что материал из полости реза удаляется в основном за счет абразивного уноса потоком удаляющихся и скользящих по поверхности реза частиц твердой фазы, а также благодаря внутренним напряжениям, возникающим в разрезаемом материале при отражении высокоскоростной водяной струи, которая в данном случае является дополнительным фактором. В качестве абразива используют порошки металлов, твердых материалов, карбидов, оксидов и т.д.

Наличие абразива в высокоскоростной водяной струе позволяет резать материалы практически любой твердости, скорость резки при этом увеличивается в 10 раз, появляется возможность эффективно разрезать металлы толщиной до сотни миллиметров.

9.3.1. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ГИДРОАБРАЗИВНОЙ РЕЗКИ

В состав оборудования для гидроабразивной резки (рис. 9.55) входят: насосы сверхвысокого давления; гидроабразивное режущее устройство для подачи абразива; гибкая трубка высокого давления, соединяющая насосы высокого давления с режущим устройством; машина для гидроабразивной резки с устройством для численного управления.

Насос высокого давления имеет несколько ступеней: первая ступень понижает давление до сотни мегапаскалей, затем с помощью мультипликаторов давление повышается до 400...500 МПа. Указанное давление достаточно для резки материалов любой твердости. Производительность насоса до 20 л/мин, потребляемая мощность до 30 кВт · ч, обычная скорость водяной струи до 1000 м/с.

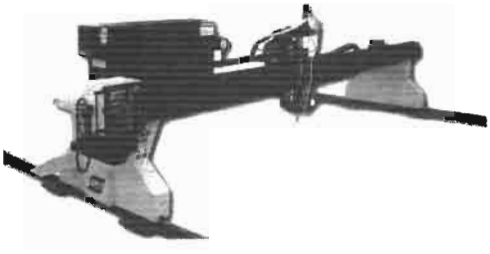


Рис. 9.55. Комплект оборудования для гидроабразивной резки

Схема гидроабразивного режущего устройства представлена на рис. 9.56. Оно состоит из канала для подачи воды с прецизионным соплом *1*, дозирующего устройства для подачи абразивного порошка *2*, смесительной камеры *3*, режущего сопла *4* (*5* – разрезаемый металл).

На рис. 9.57 показан процесс гидроабразивной резки.

Устройство для подачи абразивного порошка состоит из бункера с дозирующим устройством. Порошок подается посредством транспортирующего газа. Вода под сверхвысоким давлением поступает в устройство по гибкой дугообразной металлической трубке.

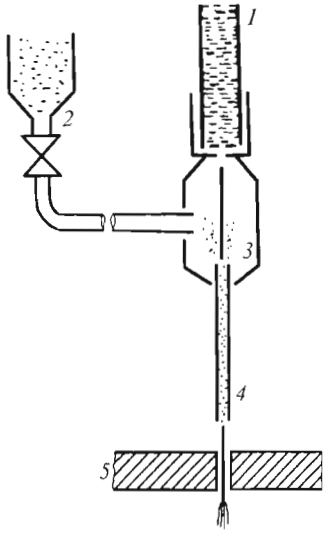


Рис. 9.56. Схема гидроабразивного режущего устройства

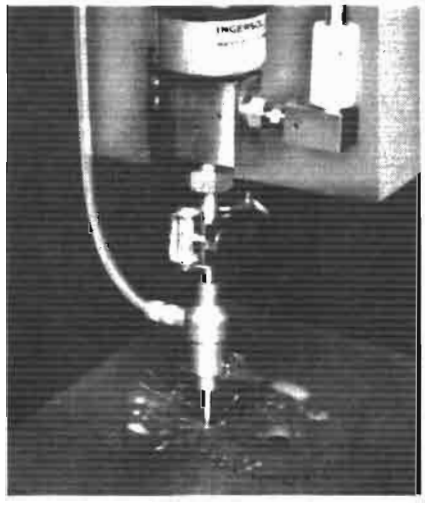


Рис. 9.57. Процесс гидроабразивной резки

Высокая скорость водяной струи достигается с помощью специальных профилированных сопл из особо прочных материалов (алмаз, сапфир, керамика, твердые сплавы). Диаметр канала сопла 0,07…0,6 мм, длина его достигает 10 мм. В камере смешения происходит подача абразива в высокоскоростную водяную струю. Выходное сопло имеет диаметр 0,6…1,5 мм.

Машины для гидроабразивной резки конструктивно мало отличаются от машин для термической резки. Обычно это машины портального типа шириной 1,5…2,5 м, длиной 3…5 м. Особенность машин заключается в том, что глубина регулирования скорости перемещения составляет 2,5…15 000 мм/мин, что намного выше, чем у машин для термической резки. Малые скорости требуются для резки материалов большой толщины, максимальные – для позиционирования резаков от одной детали к другой. Машины для гидрорезки обладают более высокой точностью. Допускаемые отклонения от заданного контура не более ±0,1 мм.

Машины для гидроабразивной резки комплектуются стандартными устройствами числового программного управления. При этом величина дискреты копируемого контура должна быть минимальной.

В целях повышения производительности машины для гидроабразивной резки могут комплектоваться несколькими режущими

устройствами. На рис. 9.58 представлено устройство для резки двумя гидроабразивными головками.

Машины комплектуются столами для укладки обрабатываемого материала и сбора отработанной воды. В комплект может входить несколько режущих устройств. Учитывая, что скорость резки гидроабразивным способом уступает скорости кислородной и плазменной резки, для повышения эффективности использования машин дополнительно предусмотрены установки для плазменной резки. При этом плазменная резка применяется для выполнения протяженных контуров, а гидроабразивная – для точной вырезки отверстий в деталях.

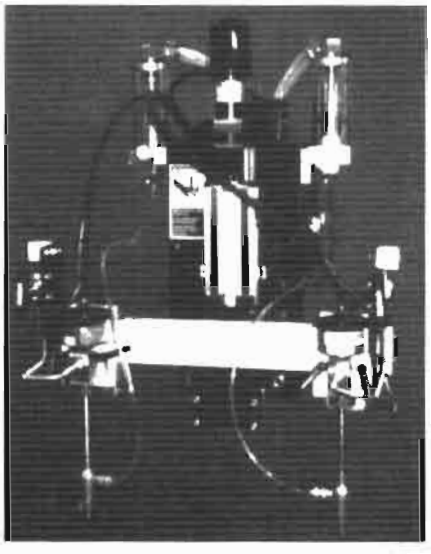


Рис. 9.58. Устройство для гидроабразивной резки двумя головками

9.3.2. ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ И ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ГИДРОАБРАЗИВНОЙ РЕЗКИ

Гидроабразивная резка используется в судо- и машиностроении, текстильной промышленности, строительстве и других отраслях промышленности.

Основные преимущества гидроабразивной резки:

– обрабатываемый материал не подвергается термическому воздействию;

– процесс резки отличается чистотой, отсутствием пыли и вредных выделений газов;

– процесс резки прецизионен, по точности и качеству поверхности реза он превосходит кислородную и плазменную резку;

– процесс является универсальным, он годится для резки как металлов, так и неметаллов;

– оборудование может быть установлено на машинах для термической резки, что дает возможность обеспечить раскрой листового металла на сложные детали при рациональном расходе материала.

9.82. Технические характеристики оборудования для гидроабразивной резки

Характеристика	ГЛ-250/5М	ГЛ-400/3М
Номинальное давление рабочей жидкости, МПа	250	400
Расход воды на выходе, л/мин	5,1	3,0
Число мультипликаторов	1	
Коэффициент мультипликации	14	24
Охлаждение	Воздушное	
Мощность электродвигателей, кВт	32	
Габаритные размеры станции, мм	1850 × 900 × 1750	
Масса, кг	1200	1100
Рабочая зона обработки, м	0,8 × 1,2; 1,5 × 2; 1,5 × 3; 1,5 × 6	
Точность контурной обработки, мм	±0,2	

9.83. Диапазоны обрабатываемых материалов по толщине

Материал	Толщина, мм
Малоуглеродистая сталь	5…30
Титан	8…80
Алюминий	12…200
Бетон	До 300
Гранит	До 150
Органопластик	0,5…15
Резина	1,5…60

9.84. Скорость гидроабразивной резки различных материалов

Материалы	Скорость, м/с
Стали	(15…30) 10^{-6}
Титан	(15…40) 10^{-6}
Медь	(25…45) 10^{-6}
Латунь, алюминий	(30…75) 10^{-6}
Свинец	(150…200) 10^{-6}
Стекло	(150…300) 10^{-6}
Фиберглас, оргстекло	(200…500) 10^{-6}
Керамика	(150…500) 10^{-6}
Резина	(300…600) 10^{-6}
Природный камень	(80…500) 10^{-6}

Технические характеристики оборудования для гидроабразивной резки приведены в табл. 9.82, вид обрабатываемого материала и диапазон по толщине – в табл. 9.83, скорости резки различных материалов представлены в табл. 9.84.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

А

Автоматы общего пользования 190 – Подвесная головка 192
– для дуговой сварки тракторного типа 193
– для наплавки тел вращения 195
– подвесные 191
– самоходные 190
– для расчета труб радиаторов 194, 195
– для стыковой сварки рулонов лент 195

Алгоритм
– инженерного программного комплекса 70
– процессов при сварке электродами с покрытиями 49

Аппаратура
– для газовой сварки ручная 523
– контактных машин пневматическая 374

Аппараты для ЭШС 205 – Схемы 207 – Технические характеристики 206
– вертикальной 208
– одноэлектродные 216
– плавящимся мундштуком 216
– рельсового типа 207
– электродами большого сечения 215

Аппарат магнитошагающий 210 – Кинематическая схема 209 – Схема работы 210 – Цикл перешагивания 209

Атомный вес веществ 40

Б

Баллоны 545 – Баллонные вентили 547 – Газоразрядные посты 547 – Редукторы 547 – 549
– для газопламенной сварки 546

В

Ванна
– химическая 39
– шлаковая 19

Выпрямители 242 – Расчетные соотношения 245 – Результаты расчета 246 – Схемы выпрямления 242 – 244
– для механизированной сварки 252, 254
– для РДС 246, 257, 259 – Технические характеристики 247 – 250, 259

Г

Газы защитные 44

Генераторы 260

Гидрорезка 608
– абразивная 608 – Области применения 610 – Оборудование 608 – 610 – Отличия 608 – Сущность 608 – Технические характеристики оборудования 610, 611

Горелка 523 – 530
– ацетиленовая 525
– для газов – заменителей ацетилена 526
– для газопорошковой наплавки 527
– для пайки, нагрева и очистки поверхности 527 – 530

Горючее для газопламенной обработки 19

Губки сварочные 395

Д

Дефекты стыковой контактной сварки 302
– макроструктуры 303
– микроструктуры 303
– размеров и формы соединения 302

Дефекты ЭШС 155 – Горячие трещины 156 – Поры 157 – Трещины повторного нагрева 156 – Холодные трещины 156 – Формирования шва 155

Деформации и напряжения сварочные 49 – Виды 49 – Искажение формы и размеров 52 – Разделки кромок 52 – Конструкции 52 – Механизмы возникновения 50
Деформации и перемещения при ЭШС 147
Допущения и упрощения в теории распространения теплоты 15
Дуга сварочная 16, 17
– сжатая 18

З

Защита металла газошлаковая 47 – Массовые доли газов в металле, наплавленном электродами с покрытиями 49 – Электродные покрытия 49
– от окисления 461

И

Изгиб и укорочение балок 57
Изотерма 14
Инверторы транзисторные 254
Источники питания
– РДС 219 – 226 – Внешние характеристики 224 – 226 – Методика оценки 222 – 224 – Номинальный режим 219 – 221 – Сварочные свойства 222 – Техника безопасности 221, 222
– ЭШС 198
– инверторные дуговой сварки 261 – 276 – Сравнительные характеристики зарубежных и отечественных 261 – 276 – Тенденции развития 261 – 276
– контактных машин 347 – 352
Источники теплоты 20
– фотонно-лучевые 19
– энергии для сварки 14 – Требования 14
Испытания машинные специализированные 72

К

Ключи транзисторные силовые 254
Комплексы и линии технологические 570, 571
Комплекты
– газопламенной обработки 540
– сварки и резки 538, 539
Коммуникации и оборудование рабочих постов 542
Контакторы 355 – 357
– асинхронные электромагнитные 355
– синхронные 355
– синхронные тиристорные 355 – 357
Конструкции сварные 96 – Классификация 96 – Проектирование и технологичность 96
– с применением ЭШС 157
Конструкция унифицированного пневмопривода 373
Контроль качества 482 – 484
– металла 482
– пайки 484
– поверхностей и покрытий 483, 484
Коэффициенты
– расчета нагрева стержней 157
– перехода элементов при дуговой сварке 39
– температуропроводности 39
КПД нагрева изделий 17

Л

Лазеры
– газовые 436, 437
– твердотельные 438 – 440

М

Машины контактные 344 – 347 – Классификация и обозначение 344 – 347 – Механическая часть 345 – Назначение 346 – Параметры 346 – Структурная схема 345 – Электрическая часть 345
– подвесные 372
– радиального типа 372
Машины рельефной сварки 384 – Назначение 384 – Технические характеристики 385

Машины стыковой сварки 394 – Конструктивная схема 394
– оплавлением 399 – 403
– сопротивлением 399
Машины термической резки листовых материалов портальные 551
– кислородной 553 – 555
– плазменной 556 – 562
– магнитокопировальные шарнирные 566 – 568
– переносные 568
– портально-консольные 564 – 566
– раскройные 563
– фотокопировальные 562
Машины термической резки 572
– профильного проката 575, 576
– труб 572, 573 – Переносные 573, 574
Машины точечной сварки 366 – Внешний контур 368, 371 – Конструкции и компоновка обмоток 370 – Пневмопривод силы сжатия 372 – Технические характеристики 369
– переменного тока прессового типа 366, 367
– специальные 382 – Конструктивные схемы 382 – Схемы компоновки 379, 380 – Технические характеристики трансформаторов 381
Машины шовной сварки 386 – 393 – Назначение 386 – 391 – Привод вращения 390 – Технические характеристики 389, 393 – Электродное устройство 386, 387, 389
Методы
– определения напряжений, деформаций и перемещений 53
– оценки склонности сталей к образованию ГТ 64
– оценки склонности сталей к образованию ХТ 68
– устранения дефектов 156, 157

Н

Нагрев при стыковой сварке 304 – Импульсное оплавление 306 – Непрерывное оплавление 304 – С предварительным подогревом 304 – Программное регулирование вторичного напряжения и скорости оплавления 305
Накопление смещений 57
Наплавка 135
Напряжения в соединениях при ЭШС 138
Номер и потенциал ионизации веществ 40

О

Оборудование для дуговой сварки плавящимся электродом 179
– под флюсом 180
– полуавтоматической и автоматической в защитных газах 180
– ручной штучными электродами 179
Оборудование для дуговой и электрошлаковой сварки 158 – Классификация автоматов 159 – Конструктивные схемы головок автоматов 162 – 166 – Технические характеристики 167
– головок 167 – 173
– установок 174 – 179
Оборудование для ЭШС 196
– кольцевых швов проволочными электродами 198, 199
– крупногабаритных деталей плавящимся мундштуком 198, 200
– продольных швов 197
Операции и приспособления сварочного производства 101
Оптимизация параметров конструкции 104

П

Пайка – Типы соединений 595 – Флюсы 595
– вольфрама 479
– жаропрочных сплавов 477
– инструментальных сталей и твердых сплавов 477
– конструкционных сталей 476
– металлов 594
– пористого вольфрама (или молибдена) с медным сплавом 479
– разнородных металлов 480 – 482

– титана 478
– тугоплавких металлов со сталью 478
– углеродистых и низколегированных сталей 476
– чугуна 477
Паяемость – Определение 455
Перемещения
– из плоскости детали 56
– угловые 56
Периоды теплонасыщения и выравнивания температур 22
Плазмотроны 451 – 453
Пламя газокислородное 18
Пневмоприводы 372, 382
Подготовка
– деталей под сварку 117
– поверхностей 460, 461
Полуавтоматы
– с инверторными выпрямителями 188, 189
– с транспортируемым механизмом подачи 188
Поля при ЭШС температурные 137
Пост автоматической сварки – Типовая схема 158
Прерыватели 362 – Функциональные возможности 362
Приводы подачи подвижного зажима 397, 398
Приспособления упорные 396
Припои 456 – Химический состав 457, 458
– латунные 585
Прихватки 420
Пробы технологические 71, 72
Проволоки для сварки в CO_2 низкоуглеродистых сталей 44
Процесс проплавления тепловой 28
Процессы
– металлургические 31
– термические 13
– термомеханические и механические 13
Процессы при ЭШС
– металлургические 148 – Изменение содержания кремния и марганца 149 – Структура швов и последующая термообработка 150
– энергетические и тепловые 136
Пушки электронно-лучевые 448 – 450

Р

Рампы разрядные перепускные 545, 546
Расчет
– взаимодействия элементов в сплавах 37
– количества раскислителя 38
– времени пребывания выше заданной температуры 26 – 28
Регуляторы контактных машин 362 – Измерители параметров 362 – Назначение 357 – Циклограммы 359 – 361 – Шкафы управления 359
Редукторы 547 – 549
Резаки
– для воздушно-дуговой резки 539, 541
– кислородные ручные универсальные 530 – 533
– вставные 535
– для поверхностной кислородной резки 536, 537
– для резки сталей больших толщин 534
Резка
– бетона и других неметаллических материалов 605, 606
– металлов и сплавов термическая 596 – Классификация 596 – Применение 597 – Сущность процесса 596
– металлов плазменно-дуговая 607, 608
Режимы
– аргонодуговой сварки высоколегированных сталей 128, 129
– воздушно-плазменной резки 607, 608
– дуговой сварки ручной 110
– под флюсом 118 – 123
Режимы и техника
– стыковой сварки оплавлением 299 – 302
– стыковой сварки сопротивлением 294 – 298
– точечной сварки 317 – 321
Роботы 102, 103

С

САПР в сварочном производстве 105
Сборка и сварка 117 – Формирующие подкладки 117
– тавровых соединений 117
– элементов со стыковыми швами 117
Сварка 12 – Классификация процессов 12, 13 – Определение 12 – Схема-модель 12
Сварка
– взрывом 491 – Области применения 492 – Оборудование 495 – Сущность 491 – Технологические возможности 494 – Технологические схемы 493 – Технология 494
– высокочастотная 515 – Определение 515 – Параметры режима 517 – Поверхностный эффект 516 – Применение 517 – Способы 517, 518 – Эффект близости 516
– в углекислом газе 130 – 132
– давлением холодная 487 – 491 – Области применения 487 – Оборудование 491 – Сущность 487 – Технологические возможности 488 – Технологические схемы 488 – 490 – Технология 490
– диффузионная 511 – Выбор режима 513 – Оборудование 515 – Параметры режима 512 – Способы 514, 515 – Сущность и области применения 511 – Технологические возможности 514 – Технические характеристики 511
– дуговая в защитных газах 124
– дуговая механизированная 114 – Качество 116 – Недостатки 116 – Под флюсом 114 – Производительность 116 – Экономичность 115
– дуговая ручная 108 – Режимы 108, 109 – Сущность 108
– клинопрессовая 500 – Параметры 501 – Сущность 500 – Технологические возможности 501 – Технологические схемы 501
– контактная 29 – 31 – Режимы 29, 30 – Области применения 29, 30
– лазерная 420 – 435 – Области применения 426 – 434 – Технико-экономические показатели 422 – Технологические показатели 422 – Формирование соединения 420 – Энергетические признаки 421
– на медной подкладке 117, 118
– магнитно-импульсная 495 – Области применения 496 – Оборудование 497 – Сущность 495 – Технологические возможности 497 – Технологические схемы 496 – Технология 497
– механизированная плавящимся электродом 132, 133
– неплавящимся электродом в инертных газах 125, 126
– плавящимся электродом в инертном газе 128
– плазменная 406 – Конструкции сопл 409 – Области применения 407 – Параметры режима 408 – Разновидности 410 – 413 – Схемы горелок 406 – Сущность 406, 407
– по отбортованным кромкам 518 – Оборудование 521 – Технологические возможности 518, 519 – Технология 519 – 521
– прокаткой 497 – Выбор параметров режима 499 – Оборудование 500 – Сущность и области применения 497 – Схемы технологические 499
– разнотолщинных деталей 331
– рельефная 335 – Группы соединений 335 – Размеры конструктивных элементов 336 – Режимы 337 – 339
– стыковая индукционная 518
– стыковая сопротивлением 289
– точечная 308 – Задача сборки 316 – Конструирование и подготовка деталей 310 – Основные схемы 308, 309 – Подготовка поверхности деталей 313 –

315 – Прихватка собранных деталей 316 – Размеры конструктивных элементов 312 – Узлы 311
– трением 503 – Оборудование 506 – Применение 502 – Режимы 505 – Сущность 502 – Схемы осциллограмм 502 – Технологические возможности 504 – Технологические схемы 503 – Технология 505
– ультразвуковая 507 – Оборудование 510 – Сущность и применение 507 – Технологические возможности 508 – Технологические схемы 510 – Технология 509
– шовная 340 – Размеры конструктивных элементов 341 – Режимы 342 – 344 – Циклограммы 340
– электрическая контактная 279, 280 – Определение 279 – Классификация 279 – Конструктивные элементы 280 – Графическое изображение 280 – Условное обозначение 280
– электронно-лучевая 414 – Дефекты в швах 417, 418 – Области применения 414 – Приемы 418 – 420 – Режимы 416 – Сущность 414 – Техника сварки 414 – Типы соединений 417
– электрошлаковая сталей 152 – Особенности 151 – Способы 134

Свариваемость материалов 62 – Показатели 62 – Понятие 61 – Сопротивляемость образованию горячих трещин 62 – 64

Сварочные клещи 378

Свойства
– материалов теплофизические 15
– механических сварных соединений 152 – 154
– сталей мартенситного класса прочностные 475
– термодинамические веществ и химических соединений 32

Скручивание балок 59

Смеси для формовки чугунных изделий 584

Смещения кромок шва 56

Снижение трудоемкости 97

Совместимость материалов с припоями 462 – 464 – Влияние на механические свойства параметров 471 – 474 – Методология исследований 465, 466

Соединения сварные 79 – 86 – Классификация 79 – 87 – Обозначения на чертежах 79 – 86
– алюминиевых сплавов 87
– другие 89 – 91
– под флюсом 85

Сопротивляемость
– «ламелярным» трещинам 74
– образованию холодных трещин 67
– хрупкому разрушению 75

Сплавы
– легкие 328 – 330
– медносеребряные 458
– медные (латуни и бронзы) 330
– обычной и повышенной жаропрочности 325

Способы выполнения швов 111 – 113
– в вертикальном положении 113
– в горизонтальном положении 113
– в нижнем положении 113
– в потолочном положении 113
– металла большой толщины 111
– различной протяженности 112
– стыковых 111
– тонколистового металла 111
– угловых 111

Способы
– защиты металла от вредного влияния воздуха 42
– пайки 455, 456

Среды
– защитные 459
– защитные газовые 43

Стали 323 – Использование 323 – 325
– алитированная 324
– коррозионно-стойкие 325
– низкоуглеродистые 323
– освинцованная 324

– оцинкованная 323
– среднеуглеродистые и низколегированные 324
– с фосфатными покрытиями 324
Станины 395
Схемы нагреваемого тела 15, 16
– бесконечной пластины 16
– плоского слоя 16
– полубесконечного тела 16
– стержня 16
Схемы
– гидроприводов 398
– централизованного газопитания 542

Т

Температура 14
Теплоемкость 14, 31
Теплопроводность 14
Термообработка материалов и паяных конструкций 474
Техника выполнения ЭШС 139
– конструкции плавящихся мундштуков 140, 141
– кольцевых швов 141, 198
Технология изготовления и автоматизация производства сварных конструкций 99, 100
Технология контактной стыковой сварки – Конструирование и подготовка деталей 292
Технология сварки
– алюминия и его сплавов 589
– бронз 588
– латуней 587
– легированных сталей 587, 588
– магниевых сплавов 591
– меди 586
– никеля и его сплавов 592
– пластмасс 594
– свинца 593
– цветных металлов и сплавов 585 – 594
– цинка 593
Типы сварных соединений и виды швов при ЭШС 136
Трансформаторы
– для ЭШС 198 – 205
– с механическим регулированием 226 – 232 – Мощность дуги 237, 238 – Технические характеристики 238 – 241
Требования к оборудованию для ЭШС 143 – Источники питания 145 – Конструкции мундштука и шарнирного ползуна 146 – Подготовка кромок и размеры швов 144 – Режимы 144
Трудоемкость – Снижение 97

У

Удаление водорода из металла шва 41
Уменьшение сварочных деформаций, напряжений и перемещений 59 – Конструирование 59 – Нагревы и охлаждения неравномерные 60 – Пластическое деформирование 60 – Термическая обработка 61 – Технология и сварка 59
Узлы сварочных полуавтоматов – Конструктивные особенности 187 – Технические характеристики 186
– горелки 182
– механизмы подачи электродной проволоки 184
Усадка
– поперечная 55
– продольная 54, 55
Установки
– ацетиленовые 543, 544
– для кислородно-флюсовой резки 536, 538
– для резки металла больших толщин 576 – 578
– кислородные 544 – Газификаторы 544
– электронно-лучевые 440 – 448
Устройства зажимные 395, 396
Учет
– ограниченности размеров тел 21
– теплоотдачи с поверхности 21

Ф

Флюсы 45 – Назначение 47 – Состав 46
– порошковые для чугуна 583 – 585

Формирование соединения
– при рельефной сварке 291 – Кристаллизация ядра 291 – Пластическая деформация рельефа 291 – Сжатие деталей 291 – Формирование ядра точки 291
– при стыковых способах сварки 286 – Оплавление 286 – 288 – Осадка 288 – Установка деталей 286
– при точечной и шовной сварке 284 – Кристаллизация 285 – Протекание сварочного тока 284 – Сжатие деталей 283

Х

Характеристики точечных машин 375, 377 – Кинематические схемы 376

Ц

Цикл термический 24 – Максимальные температуры 25

Э

Экономия
– времени 99
– металла 97
Электрододержатели 382
Электроды контактных машин 363 – Конструкции 365, 366 – Рекомендуемые размеры электродов и роликов 364 – Технические характеристики материалов 363
Энтальпия 32
Энтропия 32

СПРАВОЧНОЕ ИЗДАНИЕ

Николай Павлович Алешин,
Георгий Георгиевич Чернышов,
Эдуард Александрович Гладков и др.

СВАРКА. РЕЗКА. КОНТРОЛЬ

Справочник. В 2-х томах

Том 1

Лицензия ИД № 05672 от 22.08.01 г.

Редактор *А.П. Лебедева*
Художественный редактор *Т.Н. Погорелова*
Корректоры: *М.Я. Барская, Т.И. Масальская, Е.М. Нуждина, М.С. Рослякова*
Инженер по компьютерному макетированию *Т.А. Сынкова*

Сдано в набор 15.02.04. Подписано в печать 02.08.04. Формат 70×100/16.
Бумага офсетная. Гарнитура Times New Roman. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 50,7. Уч.-изд. л. 52,00.
Тираж 3000 экз. Заказ 10497

ОАО «Издательство «Машиностроение»,
107076, Москва, Стромынский пер., 4

Оригинал-макет подготовлен в издательско-полиграфическом центре
Тамбовского государственного технического университета,
392032, г. Тамбов, ул. Мичуринская, 112, к. 201

Отпечатано в полном соответствии с качеством
представленного оригинал-макета в ГУП ППП «Типография «Наука» РАН
121099, г. Москва, Шубинский пер., 6