

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.

Федеральная служба по экологическому,
технологическому и атомному надзору

НТЦ «Промышленная безопасность»

Н.Н. КОНОВАЛОВ

НОРМИРОВАНИЕ ДЕФЕКТОВ И ДОСТОВЕРНОСТЬ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Москва

ФГУП «НТЦ «Промышленная безопасность»

2006

На примере сварных соединений приведены рекомендации по обоснованию норм допустимости дефектов и оценке достоверности неразрушающего контроля. Рассмотрены методы неразрушающего (ультразвукового, радиационного, магнитопорошкового, капиллярного, вихретокового, визуального и измерительного) контроля сварных соединений конструкций. Особое внимание уделено технологическим приемам ультразвукового контроля как наиболее распространенного из физических методов контроля.

Рассмотрены вопросы организационного и справочно-аналитического обеспечения работ по неразрушающему контролю. Исследования проводились в НТЦ «Промышленная безопасность».

Книга предназначена для работников научно-исследовательских и проектных организаций, а также инженерно-технических работников заводов-изготовителей, ремонтных заводов, а также экспертных организаций.

СОДЕРЖАНИЕ

[ПРЕДИСЛОВИЕ](#)

[ГЛАВА 1 КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И УСЛОВИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ](#)

[ГЛАВА 2 МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ](#)

[2.1. ВИЗУАЛЬНЫЙ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОНТРОЛЬ](#)

[2.2. КАПИЛЛЯРНЫЙ КОНТРОЛЬ](#)

[2.3. МАГНИТОПороШКОВЫЙ КОНТРОЛЬ](#)

[2.4. ВИХРЕТОКОВЫЙ КОНТРОЛЬ](#)

[2.5. АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫЙ КОНТРОЛЬ](#)

[2.6. РАДИАЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ](#)

[2.7. УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ](#)

[2.8. ВЫБОР МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ](#)

[ГЛАВА 3 МЕТОДЫ ОЦЕНКИ НОРМ ДОПУСТИМОСТИ ДЕФЕКТОВ](#)

[3.1. ОБОСНОВАНИЕ ЕДИНИЦЫ ПРОДУКЦИИ](#)

[3.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАЛОЗНАЧИТЕЛЬНЫХ ДЕФЕКТОВ](#)

[3.3. ВЛИЯНИЕ ОСНОВНЫХ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ](#)

[КАЧЕСТВА НА ВЕРОЯТНОСТЬ ПОЯВЛЕНИЯ И РАЗМЕРЫ ДЕФЕКТОВ](#)

[3.4. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ДЕФЕКТОВ НА НЕСУЩУЮ СПОСОБНОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ](#)

[3.5. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ НОРМЫ ДОПУСТИМОСТИ ДЕФЕКТОВ](#)

[3.6. ВЕРОЯТНОСТНЫЕ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ НОРМ ДОПУСТИМОСТИ ДЕФЕКТОВ](#)

[3.7. МЕТОДЫ ОБОСНОВАНИЯ НОРМ ДОПУСТИМОСТИ ДЕФЕКТОВ](#)

[ГЛАВА 4 ДОСТОВЕРНОСТЬ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ](#)

[4.1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ ДОСТОВЕРНОСТИ КОНТРОЛЯ](#)

[4.2. ОЦЕНКА ДОСТОВЕРНОСТИ КОНТРОЛЯ СТЫКОВЫХ ШВОВ](#)

[Таблица 4.2](#)

[4.3. ОЦЕНКА ДОСТОВЕРНОСТИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ УГЛОВЫХ ШВОВ](#)

[ГЛАВА 5 ОРГАНИЗАЦИОННОЕ И СПРАВОЧНО-АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАБОТ ПО НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ](#)

[5.1. КОНЦЕПЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМОЙ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ И ОСНОВНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ ЕЕ РАЗВИТИЯ](#)

[5.2. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ СИСТЕМЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ](#)

[5.3. ФОРМИРОВАНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ СИСТЕМЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ](#)

[СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ](#)

ПРЕДИСЛОВИЕ

Развитие научно-технического прогресса в области производства сварных конструкций грузоподъемных кранов, кранов-манипуляторов, подъемников (вышек), экскаваторов и другого оборудования, решение задач по поддержанию их высокой эксплуатационной надежности требуют совершенствования и более широкого использования неразрушающего контроля, который является одним из важнейших способов получения информации о надежности оборудования, применяемого на опасных производственных объектах. Качество этой информации, ее достоверность и оперативность оценки в значительной мере определяют эффективность обеспечения промышленной безопасности. Организация деятельности по неразрушающему контролю осуществляется в рамках Системы экспертизы промышленной безопасности, создание которой - одно из направлений реализации Федерального закона от 21.07.97 № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов».

Особую роль неразрушающего контроля обуславливают задача обеспечения промышленной безопасности в условиях продолжающегося износа оборудования на опасных производственных объектах и отсутствия средств на его замену и реконструкцию. Возрастает роль неразрушающего контроля при изготовлении и ремонте сварных конструкций. Это связано с применением высокопрочных сталей, которые более чувствительны к наличию различных видов дефектов, и использованием новых методов расчета конструкций, позволяющих значительно снизить запасы их прочности. Актуальность применения неразрушающего контроля в целях обеспечения эксплуатационной безопасности оборудования, применяемого на опасных производственных объектах, подтверждается постановлением Правительства Российской Федерации от 28.03.01 № 241 «О мерах по обеспечению промышленной безопасности опасных производственных объектов на территории Российской Федерации».

Неразрушающий контроль сварных соединений - важнейший этап работы при изготовлении, ремонте и техническом диагностировании сварных конструкций грузоподъемных кранов, кранов-манипуляторов, подъемников (вышек), экскаваторов и другого оборудования. При этом особую роль приобретают вопросы, связанные с допустимостью в сварных соединениях различных дефектов: непроваров, подрезов, пор, шлаковых включений, раковин и т.п. При контроле необходимо использовать нормы допустимости дефектов. Нормы, как правило, являются технологическими, то есть они ориентированы на возможности технологического процесса сварки и часто излишне жесткие с

позиции обеспечения прочности [1, 2]. Вследствие этого велика вероятность необоснованных исправлений, что нецелесообразно как экономически, так и технически.

Многочисленные данные практики показывают, что места исправления дефектов часто могут служить потенциальными очагами разрушения конструкций в процессе эксплуатации. Причиной этого являются отрицательные последствия повторной сварки, а именно: остаточные напряжения растяжения, появление малопластичных структур, микротрещин с их склонностью к дальнейшему развитию и т.п. Необоснованная ремонтная сварка может причинить больший вред, чем неустраненный дефект. Таким образом, исправление сварных соединений с малозначительными дефектами целесообразно исключить в целях сохранения работоспособности сварных конструкций.

Наибольшая эффективность результатов неразрушающего контроля обеспечивается комплексным подходом к его организации, представляющим собой формирование Системы неразрушающего контроля. В связи с этим возникла необходимость разработки концепции, предусматривающей комплексный подход к вопросам обеспечения качества подготовки персонала и применяемых методических документов, организации процесса контроля, а также состояния и технического уровня используемых средств неразрушающего контроля.

ГЛАВА 1

КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И УСЛОВИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Сварные конструкции грузоподъемных и горно-транспортных машин достигают 55-80 % их массы [3]. На несущих конструкциях монтируют рабочие органы, а также все механизмы и сборочные единицы машин. Сварные конструкции машин настолько разнообразны по своему исполнению, что не представляется возможным дать их подробное описание. Конструкции изготовляют из стальных листов, стального фасонного проката, гнутых и штампованных профилей [4]. Несущие конструкции разделяют на балочные, рамные и решетчатые.

К балочным конструкциям относят главные и консольные балки мостовых кранов, стрелы и рукояти кранов-манипуляторов и карьерных экскаваторов. По типу сечения различают балки открытого и замкнутого сечения. Наибольшее распространение получили балки замкнутого сечения. Различают балки из прокатных профилей постоянного сечения (швеллер, двутавр, прямоугольное сечение, труба) и составные, которые можно изготовлять из листовых, гнутых и комбинированных элементов. Наиболее экономичными по затрате металла (при действии изгибающего момента в одной плоскости) являются балки двутаврового сечения. Балки замкнутого сечения применяют при действии изгибающих моментов в разных плоскостях или при действии крутящего момента. Для изготовления балочных конструкций значительных размеров все большее применение находят гнутые профили, при использовании которых металлоемкость конструкции значительно уменьшается.

Рамные конструкции ходовых рам самоходных кранов, поворотных платформ экскаваторов, порталов башенных кранов изготовляют, как правило, из листовых элементов, используют сортовой прокат и гнутые профили. Ходовые рамы, поворотные платформы и порталы имеют почти одинаковые габаритные размеры (длину и ширину). Как правило, в средней части ходовых рам самоходных кранов, поворотных платформ экскаваторов и порталов башенных кранов устанавливают опорно-поворотные устройства, и, следовательно, рамные конструкции должны обладать определенной жесткостью. Ходовые рамы автомобильных и пневмоколесных кранов изготовляют из отдельных балок (продольных и поперечных). У таких конструкций наиболее «опасными» при эксплуатации являются места сопряжения продольных и поперечных балок.

Стрелы самоходных и башенных кранов, башни башенных кранов, балки мостовых кранов, стойки и балки козловых кранов часто представляют собой решетчатые конструкции. При большой протяженности конструкции выполняют составными. Секции соединяют с помощью шарниров или фланцев. Решетчатые конструкции изготовляют из прокатных профилей открытого или замкнутого сечения, причем последние имеют существенное преимущество: они обладают большей несущей способностью при работе на сжатие или кручение. Наибольшее распространение при изготовлении решетчатых конструкций получили уголкового и трубчатого профили. При выполнении пояса из уголкового профиля элементы решеток изготовляют из уголкового или трубчатого профиля, при выполнении пояса из трубчатого профиля решетки изготовляют также из трубчатого профиля. Соединения решетки с поясами могут быть различными. В конструкциях из уголкового профиля наиболее распространенным является нахлесточное соединение, при котором полки раскосов приваривают к полкам поясов с внутренней стороны. В решетчатых конструкциях в последнее время пояса выполняют из уголков, решетки - из труб. Обычно при конструировании решетчатых конструкций из трубчатых элементов к поясам приваривают отрезки труб с разделкой по концам под сопряжение с поясом. Однако трудоемкость изготовления таких конструкций несколько увеличивается разделкой торца и сваркой по пространственному шву. Целесообразнее решетки выполнять из одного трубчатого профиля, изогнутого по нужной форме, и приваривать его к поясу без косынок. Для уменьшения трудоемкости пояса изготовляют из труб квадратного сечения, раскосы - из круглых труб. Применение в решетчатых конструкциях профилей замкнутых сечений, особенно для поясов, является перспективным и позволяет существенно увеличить несущую способность конструкций и экономить металл.

Сварные соединения грузоподъемных кранов, кранов-манипуляторов, подъемников (вышек), экскаваторов имеют сходные конструктивно-технологические признаки. В основном используют низкоуглеродистые и низколегированные стали (ВСтЗпс, ВСтЗсп, 09Г2, 09Г2С, 10ХСНД, 15ХСНД, 14Г2АФ и др.). Способы сварки ограничиваются ручной дуговой, в защитном газе и под флюсом. Диапазон толщин свариваемых элементов, как правило, составляет 4-50 мм. Основные толщины расчетных элементов конструкций: 4, 5, 6, 7, 8, 10, 12, 14, 16, 20, 22, 24, 30, 35, 40, 50 мм, - однако наиболее распространенный диапазон толщин элементов конструкций 6-16 мм. Наряду со стыковыми сварными соединениями широко используют нахлесточные и тавровые соединения, в том числе соединения с конструктивными неперехватами. Наиболее распространенные типы соединений: С2, С5, С7, С8, Т1, Т3, Н1 ([ГОСТ 5264-80](#), [ГОСТ 8713-79](#), [ГОСТ 14771-76](#)). Размеры катетов несущих угловых швов равны 4, 5, 6, 8, 10, 12 и 15 мм, причем катеты размером менее 6 мм применяют в основном в нахлесточных соединениях.

Условия эксплуатации машин весьма разнообразны. Грузоподъемные краны, краны-манипуляторы, экскаваторы и подъемники (вышки) работают в различных климатических районах, характеризующихся изменением температуры от -60 до +50 °С, влажности от 40 до 100% (туман, морской туман), различной скоростью ветра, воздействием атмосферных осадков и др. Под воздействием ветра и снега повышаются нагрузки на конструкции, а под влиянием отрицательных температур, повышенной влажности уменьшается несущая способность конструкций. Грузоподъемные и горно-транспортные машины предназначены для выполнения различных операций. От назначения машин во многом зависят их конструкция и условия эксплуатации. При эксплуатации на сварные соединения могут действовать различные сочетания нагрузок, изменяющихся во времени, например усилие растяжения-сжатия, крутящий и изгибающий моменты [4].

Несмотря на многообразие видов грузоподъемных и горно-транспортных машин, характер работы их конструкций имеет много общего. Это позволяет использовать единые принципы оценки прочности элементов и соединений [5].

Опыт эксплуатации грузоподъемных и горно-транспортных машин показывает, что определяющим фактором, от которого зависит их надежность, часто является выносливость конструкций [5]. Еще большее значение сопротивление усталости приобретает для машин, отработавших нормативный срок службы. По имеющимся прогнозам [6] к 2005 году доля грузоподъемных кранов с истекшим сроком службы может превысить 95 %.

ГЛАВА 2

МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

2.1. ВИЗУАЛЬНЫЙ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОНТРОЛЬ

Визуальный и измерительный контроль - самый простой и в то же время информативный метод контроля. Это единственный метод неразрушающего контроля, который может выполняться и часто выполняется без какого-либо оборудования или проводится с использованием простейших измерительных средств. Он позволяет выявлять поверхностные поры и трещины, подрезы, кратеры,

прожоги, свищи, наплывы, смещения кромок и другие дефекты. К недостаткам метода можно отнести низкую вероятность обнаружения мелких поверхностных дефектов, а также зависимость выявляемости дефектов от субъективных факторов (острота зрения, усталость, опыт работы выполняющего контроль специалиста) и условий контроля (освещенность, оптический контраст и др.). Тем не менее простота, малая трудоемкость и определенная информативность визуального и измерительного контроля делают его обязательным и предшествующим проведению неразрушающего контроля другими методами. Какими бы уникальными ни были методы и средства последующих контрольных операций, контроль изделий начинается с визуального осмотра невооруженным глазом. На оптимальном для глаз расстоянии - 250 мм различают детали размером ~0,15 мм, однако возможности глаза ограничены при осмотре удаленных, движущихся, недостаточно освещенных объектов.

Наличие грубых поверхностных дефектов может указать на характер и место возможного разрушения конструкции. Учитывая, что различные дефекты имеют определенные доминирующие причины их образования, по результатам визуального и измерительного контроля можно ориентировочно оценить качество и стабильность технологического процесса изготовления или ремонта конструкций.

По внешнему виду сварного шва можно ориентировочно судить о внутреннем качестве шва. Превышение усиления сварного шва характерно для неполного проплавления кромок. Подрез на одной стороне сварного шва и наплыв на другой указывают на возможность непровара по кромке со стороны наплава. При наличии поверхностных пор и грубой чешуйчатости шва, как правило, имеются и внутренние поры.

Первый руководящий документ по визуальному и измерительному контролю, который распространялся на оборудование, подконтрольное Госгортехнадзору России, был разработан АНТЦ «Энергомонтаж» [7]. Несмотря на всю необходимость и своевременность выхода документа, он имел ряд существенных недостатков. Документ был ориентирован в основном на объекты котлонадзора и не учитывал конструктивных особенностей грузоподъемных и горно-транспортных машин, в которых наряду со стыковыми широко применяются тавровые, угловые и нахлесточные сварные соединения. Отмеченные недостатки были учтены при разработке [РД 03-606-03](#) [8], который применяется при контроле конструкций грузоподъемных и горно-транспортных машин. При разработке [РД 03-606-03](#) были использованы положения EN 970:1997 «Неразрушающий контроль сварных швов, выполненных плавлением. Визуальный контроль» [9].

2.2. КАПИЛЛЯРНЫЙ КОНТРОЛЬ

Капиллярный контроль используют для выявления поверхностных дефектов, в том числе сквозных, для определения их протяженности, направления и характера распространения. Метод позволяет обнаруживать невидимые или слабо видимые невооруженным глазом дефекты. Выявляются дефекты, имеющие раскрытие порядка 1 мкм, а глубину более 0,02 мм.

Капиллярный контроль позволяет контролировать изделия любых размеров и форм, изготовленные из ферромагнитных и неферромагнитных металлов и сплавов, пластмасс, стекла, керамики и других конструкционных материалов, которые не растворяются и не набухают в дефектоскопических материалах.

Преимуществами капиллярного контроля по сравнению с другими методами неразрушающего контроля являются: высокие чувствительность и разрешающая способность, наглядность результатов контроля, возможность контроля больших поверхностей конструкций и деталей за один прием, простота технологических операций контроля, относительно низкая стоимость используемых дефектоскопических материалов и оборудования. Важным преимуществом метода является хорошая выявляемость трещин.

Недостатки метода следующие: возможность обнаружения только выходящих на поверхность дефектов и невозможность точного определения их глубины; сложность механизации и автоматизации процессов контроля и громоздкость стационарного оборудования; большая продолжительность контроля и снижение его достоверности при отрицательных температурах; необходимость тщательной подготовки контролируемой поверхности, ее очистки и удаления пенетранта, проявителя в процессе и после проведения контроля; вредность некоторых дефектоскопических материалов для обслуживающего персонала - необходимость использования различных защитных приспособлений и приточно-вытяжной вентиляции; ограниченный срок хранения дефектоскопических материалов, зависимость их свойств от продолжительности хранения и температуры окружающей среды. Для проведения капиллярного контроля необходимы наличие доступа к контролируемой поверхности для обработки ее дефектоскопическими материалами, достаточная интенсивность освещения или ультрафиолетового облучения и возможность выполнения температурных и временных режимов. Условием выявления дефектов является наличие полостей, свободных от загрязнений и других веществ, имеющих выход на контролируемую поверхность и глубину распространения, значительно превышающую ширину их раскрытия. Выявление дефектов, имеющих ширину раскрытия более 0,5 мм, не гарантируется. Контроль обычно выполняют при температуре от -40 до +40 °C и относительной влажности не более 90 %. Допускается применять данный метод при других условиях контроля (температуре и влажности), если позволяют технические характеристики дефектоскопических материалов, а чувствительность контроля подтверждена на образцах при соответствующих условиях. Капиллярный контроль может применяться как отдельно, так и в сочетании с другими методами контроля.

Применение метода для контроля сварных соединений, как правило, ограничивается плохим состоянием контролируемых поверхностей и возможными резкими переходами от наплавленного металла к основному. Для предотвращения появления при контроле окрашенного или светящегося слоя, который затрудняет оценку качества, необходимо проведение трудоемких работ по удалению окалина, брызг, грубой чешуйчатости и обеспечению плавного перехода от наплавленного металла к основному.

2.3. МАГНИТОПОРОШКОВЫЙ КОНТРОЛЬ

Магнитопорошковый контроль служит для выявления поверхностных и подповерхностных (залегающих на глубине до 10 мм) дефектов. Его применяют для контроля конструкций и деталей из ферромагнитных сталей обыкновенного качества, углеродистых качественных и низколегированных сталей.

При магнитопорошковом контроле выявляются трещины шириной от 1 мкм и глубиной от 0,01 мм. При контроле могут быть выявлены: волосовины, неметаллические включения, расслоения, закаты, подповерхностные флокены, поры, раковины в поковках и прокате; трещины шлифовочные, ковочные, штамповочные, надрывы, а также сварочные дефекты (трещины, непровары, шлаковые включения, поры, раковины и др.) в элементах конструкций и деталей; трещины, возникшие в элементах конструкций и деталях при эксплуатации машин.

Магнитопорошковым контролем не могут быть проконтролированы элементы конструкций и детали: из неферромагнитных сталей; на поверхности которых не обеспечена необходимая зона для намагничивания и нанесения индикаторных материалов; со структурной неоднородностью и резкими изменениями площади поперечного сечения; с несплошностями, плоскости раскрытия которых совпадают с направлением намагничивающего поля или составляет с ней угол менее 30°.

На выявляемость дефектов оказывают влияние многие факторы, связанные со свойствами объекта и принятой технологией магнитопорошкового контроля, а именно: магнитные свойства и структурные неоднородности материала, шероховатость, форма объекта контроля, его габаритные размеры, масса, наличие покрытий, их толщина и свойства, вид тока, схема намагничивания, способ контроля, а также значения таких параметров технологии контроля, как напряженность поля или сила тока. Допускается контроль по немагнитным покрытиям (хром, кадмий и др.). Наличие покрытий толщиной до ~20 мкм практически не влияет на выявляемость дефектов. При толщине покрытия более 100-150 мкм могут быть выявлены только дефекты размером более 0,15 мм.

Масштабность применения магнитопорошкового метода объясняется его высокой производительностью, наглядностью результатов контроля и высокой чувствительностью. При правильной технологии контроля элементов конструкций и деталей этим методом обнаруживаются трещины в начальной стадии их появления, когда обнаружить их без специальных средств контроля трудно или невозможно.

Применение данного метода практически не ограничивает, как правило, плохое состояние поверхностей сварных соединений: наличие брызг и чешуйчатости; имеющиеся в сварных швах резкие переходы от наплавленного металла к основному, создающие дополнительные магнитные потоки рассеяния, а следовательно, дополнительные индикации. Метод позволяет достаточно эффективно выявлять в сварных

соединениях поверхностные трещины.

2.4. ВИХРЕТОКОВЫЙ КОНТРОЛЬ

Вихретоковый контроль позволяет обнаруживать как поверхностные, так и подповерхностные (залегающие на глубине 1-4 мм) дефекты. Его применяют только для контроля объектов из электропроводящих материалов. Контроль вихревыми токами можно выполнять без непосредственного механического контакта преобразователей с объектом, что позволяет вести контроль при взаимном перемещении преобразователя и объекта с большой скоростью.

Объектами вихретокового контроля являются основной металл и (при снятом усилении шва) сварные соединения конструкций, а также детали. Вихретоковым контролем могут быть выявлены: ковочные, штамповочные, шлифовочные трещины, надрывы в элементах конструкций и деталях; волосовины, неметаллические включения, поры в поковках и прокате; трещины, возникшие в элементах конструкций и деталях при эксплуатации машин.

Вихретоковым методом не могут быть проконтролированы элементы конструкций и детали: с резкими изменениями магнитных или электрических свойств; с дефектами, плоскости раскрытия которых параллельны контролируемой поверхности или составляют с ней угол менее 10°; сварные швы без снятого усиления.

При вихретоковом контроле не обнаруживаются дефекты в элементах конструкций и деталях: с поверхностями, на которые нанесены электропроводящие защитные покрытия, если дефект не выходит на поверхность покрытия; с дефектами, заполненными электропроводящими частицами; с поверхностями, покрытыми коррозией.

Выявляемость дефекта при прочих равных условиях зависит от его типа. Наилучшим образом выявляются дефекты типа усталостных трещин, ориентированные перпендикулярно контролируемой поверхности. Ширина раскрытия усталостных трещин в определенных пределах не влияет на их выявляемость (20-30 мкм), однако выявляемость очень плотных трещин резко уменьшается. Такое явление, например, характерно для закалочных трещин. Риски и надрезы по сравнению с усталостными трещинами, как правило, выявляются хуже. Заполнение полости дефекта грязью, нагаром, неэлектропроводящими окислами и т.п. не приводит к снижению их выявляемости.

Вихретоковый контроль наиболее эффективен при контроле немагнитных материалов. Возможность контроля ферромагнитных материалов и деталей из них определяется однородностью магнитных свойств, наличием локальных магнитных полюсов. Наличие локального изменения магнитных свойств материала детали может вызвать ложное срабатывание вихретокового дефектоскопа. Наличие на контролируемой поверхности зон структурной неоднородности, приводящих к изменению электропроводности, вызывает расстройку дефектоскопа. Увеличение электропроводности снижает чувствительность, уменьшение электропроводности вызывает эффект, аналогичный влиянию дефекта. Наличие на контролируемой поверхности значительных остаточных макронапряжений, возникающих в результате поверхностного упрочнения детали или под действием сжимающих остаточных напряжений, приводит к сжатию полостей трещин и других дефектов и к снижению их выявляемости. Чистота контролируемой поверхности оказывает значительное влияние на чувствительность контроля и износостойкость преобразователя. Максимальная чувствительность вихретокового вида контроля может быть достигнута при контроле деталей с шероховатостью поверхности не более Rz 20. Возможность и целесообразность контроля деталей с грубой поверхностью должна определяться в каждом конкретном случае специалистами по вихретоковому контролю.

2.5. АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫЙ КОНТРОЛЬ

Акустико-эмиссионный контроль позволяет выявлять поверхностные и внутренние дефекты. Метод имеет достаточно сложную технологию, требует дорогого оборудования и очень высокой квалификации персонала.

Характерными особенностями, определяющими возможности, параметры и область применения акустико-эмиссионного метода, являются следующие: обеспечивается обнаружение и регистрация только развивающихся дефектов, что позволяет классифицировать дефекты не по размерам, а по степени их опасности; в производственных условиях метод позволяет выявить приращение трещины на десятки доли миллиметра; предельная чувствительность акустико-эмиссионной аппаратуры по расчетным оценкам составляет порядка 10^{-6} мм, что соответствует выявлению скачка трещины протяженностью 1 мкм на величину 1 мкм, что указывает на весьма высокую чувствительность к растущим дефектам; свойство интегральности метода обеспечивает контроль всего объекта с использованием одного или нескольких преобразователей, неподвижно установленных на поверхности объекта контроля; положение и ориентация дефектов не влияют на их выявляемость; метод имеет меньше ограничений, связанных со свойствами и структурой конструкционных материалов, чем другие методы неразрушающего контроля; особенностью метода, ограничивающей его применение, является в некоторых случаях трудность выделения акустико-эмиссионных сигналов из помех. Это связано с тем, что акустико-эмиссионные сигналы являются шумоподобными, поскольку акустическая эмиссия является случайным импульсным процессом. Вследствие этого, когда сигналы малы по амплитуде, выделение полезного сигнала из помех представляет собой сложную задачу. При развитии дефекта, когда его размеры приближаются к критическому значению, амплитуда сигналов и темп их генерации резко увеличиваются, что приводит к значительному возрастанию вероятности обнаружения такого источника акустической эмиссии.

Акустико-эмиссионный контроль проводится только при создании в контролируемой конструкции напряженного состояния, инициирующего в материале объекта работу источников акустической эмиссии. Для этого конструкция подвергается нагружению.

2.6. РАДИАЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ

Радиационный контроль служит для выявления как внутренних дефектов, так и недоступных для визуального контроля поверхностных дефектов. Чувствительность контроля зависит от плотности материала и толщины просвечиваемого объекта, характера дефекта, его формы и ориентации, режима и условий просвечивания, метода регистрации результатов контроля. Радиационный контроль проводится в целях выявления в сварных соединениях: внутренних дефектов в виде трещин, непроваров, раковин, пор и шлаковых (окисных и других) включений; недоступных для визуального контроля поверхностных дефектов в виде прожогов, подрезов, превышения проплава и т.п.

Радиационный контроль не позволяет выявлять: поры и включения диаметром поперечного сечения или непровары и трещины высотой менее удвоенной чувствительности контроля; непровары и трещины с раскрытием менее 0,1 мм; непровары и трещины, плоскость раскрытия которых не совпадает направлением просвечивания или (при радиоскопическом контроле) с направлением строк телевизионного раstra; любые дефекты, если их изображение на снимках совпадает с изображением посторонних деталей, острых углов или резких перепадов толщин свариваемых элементов.

Наиболее целесообразен радиационный контроль для выявления объемных дефектов (пор, раковин и др.), им плохо выявляются плоскостные дефекты (непровары, трещины), плоскость раскрытия которых непараллельна направлению излучения. Самым распространенным методом радиационной дефектоскопии является радиография вследствие ее высокой чувствительности и простоты операций контроля. Важным преимуществом радиографического контроля является возможность определения типа (объемный или плоскостной) и вида (пора, шлаковое включение, непровар или трещина) выявленного дефекта. Однако, как показали результаты вскрытия, сварные швы грузоподъемных и горно-транспортных машин не содержат широко распространенных и значительных по величине объемных дефектов. Кроме того, конструкции грузоподъемных и горно-транспортных машин имеют сложную форму, не обеспечивающую просвечивание по основной схеме (рис. 2.1, а). Приходится использовать различные схемы, не гарантирующие хорошую выявляемость плоскостных дефектов (рис. 2.1, б, в, г). По данным [10] вероятность выявления объемных дефектов в стыковых соединениях составляет около 90-92 %, а вероятность выявления плоскостных дефектов не превышает 30 %.

При проведении радиационного контроля необходимо обеспечить радиационную безопасность персонала.

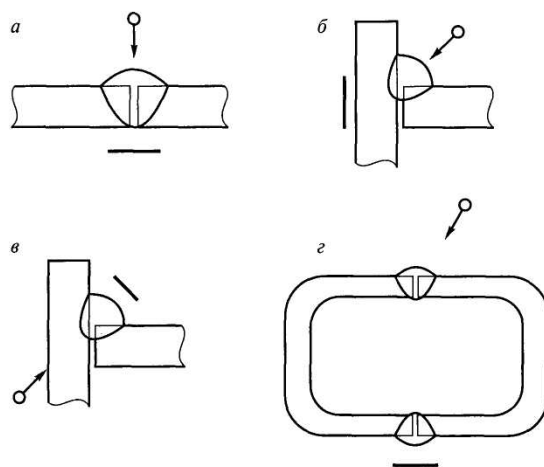


Рис. 2.1. Схемы просвечивания

2.7. УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ

2.7.1. Преимущества, недостатки и области применения

Ультразвуковой контроль согласно отчету института доктора Ферстера [11] наиболее распространенный физический метод неразрушающего контроля. По сравнению с другими методами ультразвуковой контроль имеет следующие преимущества: высокую чувствительность и производительность, возможность контроля при одностороннем доступе, относительно низкую стоимость оборудования, безопасность. Недостатками ультразвукового контроля являются: сложная расшифровка дефектов, ограниченное применение для металлов с крупным зерном, сложность контроля изделий толщиной от 4 до 10 мм (при толщине до 4 мм ультразвуковой контроль практически не применяется), необходимость разработки специальных методик (технологических инструкций, технологических карт) при дефектоскопии изделий различных типов.

Ультразвуковой контроль сварных конструкций проводят в целях выявления: трещин, непроваров, пор и шлаковых включений в сварных швах; трещин и расслоений в околошовных зонах и основном металле. Контролируются листовые и трубчатые элементы конструкций толщиной 4-60 мм. При этом могут быть проконтролированы: сварные соединения (стыковые соединения, выполненные с остающейся подкладкой (кольцом) или без нее; угловые и тавровые соединения, выполненные с полным проплавлением свариваемых кромок; тавровые соединения без разделки кромок и с К-образной разделкой кромок, выполненные с конструктивным непроваром; нахлесточные сварные соединения); клепаные соединения (исключая тела заклепок); болтовые соединения; элементы, выполненные из листового проката. Допускается проведение ультразвукового контроля указанных выше соединений, один из соединяемых элементов которых получен прокаткой, а другой является литой, штампованной или ковальной деталью. В этом случае ультразвуковой контроль соединения проводят со стороны элемента, полученного прокаткой. Ультразвуком не могут быть проконтролированы: соединения, в которых оба соединяемых элемента литые, штампованные или кованые; угловые наклонные (отклонения от перпендикулярности превышают 10°) сварные соединения трубчатых элементов друг с другом и с другими элементами (прокатом, литыми, штампованными или кованными деталями).

Контроль выполняется эхо-методом наклонными и прямыми совмещенными преобразователями контактным способом. Преобразователи перемещают по поверхности конструкций вручную.

Ультразвуковой метод применяют в основном для выявления внутренних дефектов, но может быть использован и для выявления поверхностных дефектов. Важнейшим преимуществом ультразвукового контроля (в отличие от радиографии) является высокая вероятность выявления наиболее опасных плоскостных дефектов (рис. 2.2, 2.3). Экспериментальным путем установлено, что производительность ультразвукового контроля в среднем в 3-10 раз выше радиографического. Кроме того, себестоимость ультразвукового контроля в 4-8 раз ниже [10].

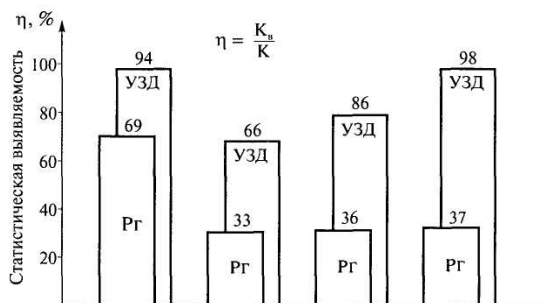


Рис. 2.2. Статистическая выявляемость плоскостных дефектов в сварных соединениях ультразвуковой дефектоскопией (УЗД) и радиографией (Рг) [12-15]
(K - общее количество дефектов; K_n - количество выявленных дефектов)

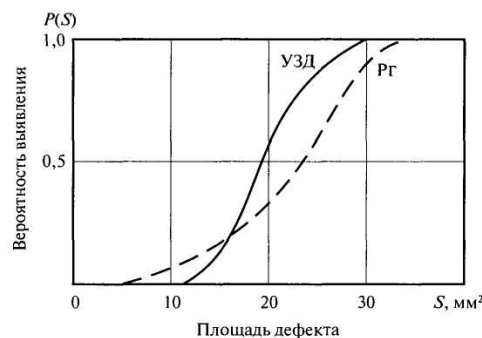


Рис. 2.3. Вероятность выявления плоскостных дефектов разной площади в сварных соединениях ультразвуковой дефектоскопией (УЗД) и радиографией (Рг) [12]

При ультразвуковом контроле сварных соединений толщиной 40 мм и более установить тип дефекта с достаточно высокой вероятностью ($\approx 0,95$) можно, определив коэффициент формы дефекта. При контроле сварных соединений меньшей толщины с большой точностью (за исключением ряда случаев) установить тип дефекта не представляется возможным. Поэтому радиографический контроль может быть рекомендован в ряде случаев в качестве дополнительного метода к ультразвуковому контролю. Так как ультразвуковой контроль не требует двухстороннего доступа к сварным швам, что особенно важно при контроле конструкций во время эксплуатации машин, возможен контроль практически всех встречающихся сварных соединений (более 95 % общей протяженности швов).

2.7.2. Методические особенности выявления дефектов в сварных соединениях при ультразвуковом контроле

Ультразвуковой контроль является наиболее востребованным физическим методом неразрушающего контроля сварных соединений конструкций. Однако необходимо учесть, что его применение связано со сложной расшифровкой результатов контроля, а методики контроля различных типов соединений существенно различаются. Кроме того, сварные соединения грузоподъемных кранов, подъемников (вышек) имеют особенности, осложняющие их ультразвуковой контроль: незначительные толщины и наличие конструктивных непроваров, то есть использование соединений типа Т1 и Т3 ([ГОСТ 5264-80](#), [ГОСТ 8713-79](#), [ГОСТ 14771-76](#)).

Возможности и особенности ультразвукового контроля сварных соединений оценивались как на образцах, вырезанных из натурных конструкций, так и на образцах, сваренных с соблюдением штатной технологии или появлении дефектов в которых специально провоцировалось. Часть образцов независимо от результатов дефектоскопии подлежала вскрытию.

По результатам вскрытия установлено, что наиболее характерными плоскостными внутренними дефектами в сварных соединениях являются непровары. Глубина непровара в стыковых соединениях в значительной мере определяется типом соединения и толщиной свариваемых элементов ([рис. 2.4, а, б](#)). В угловых швах технологические непровары встречаются значительно реже и имеют, как правило, меньшую глубину. Обычно непровары располагаются в корне шва по поверхностям свариваемых кромок ([рис. 2.4, в, г](#)). Непровары между валиками наплавленного металла встречаются редко ([рис. 2.4, д](#)).

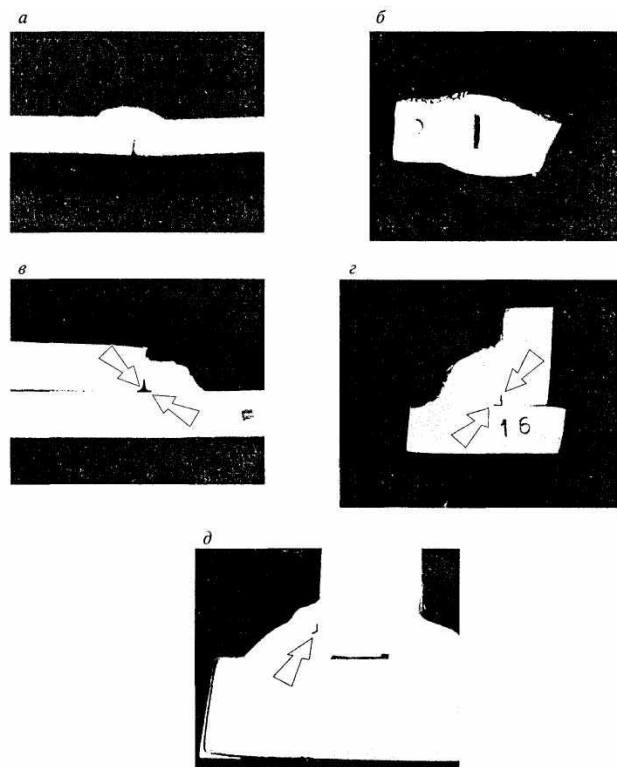


Рис. 2.4. Непровары

Внутренние трещины, как правило, располагаются в корне швов и начинаются от конструктивных непроваров в тавровых ([рис. 2.5, а](#)) и от зазоров в нахлесточных соединениях ([рис. 2.5, б](#)).

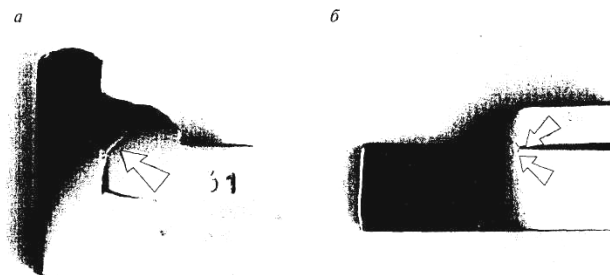


Рис. 2.5. Трещины

Внутренние поры обычно имеют диаметр 0,1 - 2,2 мм (рис. 2.6, *a*) и хаотично распределяются по объему наплавленного металла. В односторонних стыковых соединениях, сваренных без разделки кромок, обнаружены «червячные поры». «Червячные поры» диаметром 0,5-3,1 мм располагались вертикально в средней части наплавленного металла и имели длину до 9 мм. Шлаковые включения в стыковых соединениях или являются продолжением непроваров - непровары зашлаковываются (рис. 2.6, *б*), или располагаются в средней части наплавленного металла (рис. 2.7). Длина шлаковых включений до 4 мм. В угловых швах шлаковые включения, как правило, располагаются в корне шва (рис. 2.6, *в*, *г*).

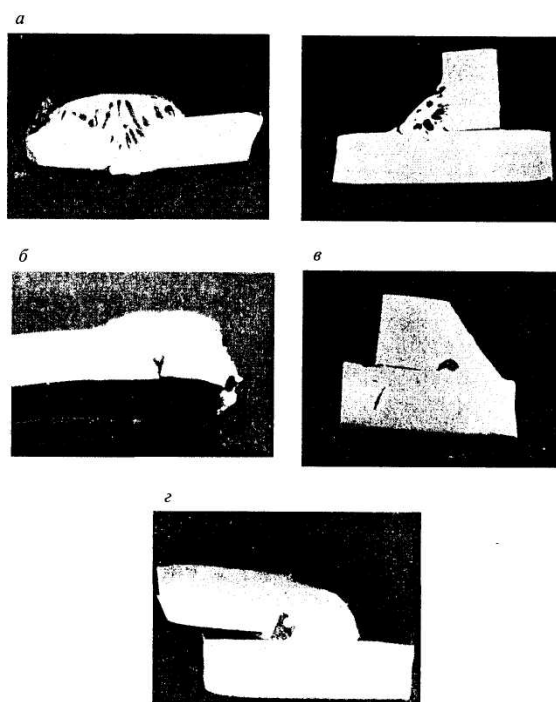


Рис. 2.6. Поры (*a*) и шлаковые включения в стыковых (*б*), тавровых (*в*) и нахлесточных (*г*) соединениях

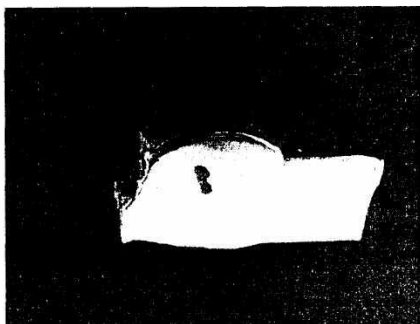


Рис. 2.7. Шлаковое включение, расположенное в средней части шва

В некоторых случаях ширина раскрытия конструктивного непровара в тавровом соединении или зазора в нахлесточном соединении в их начальной части из-за действия усадочных сил увеличивается, и может появиться поверхность, ориентированная перпендикулярно ультразвуковому лучу (рис. 2.8).

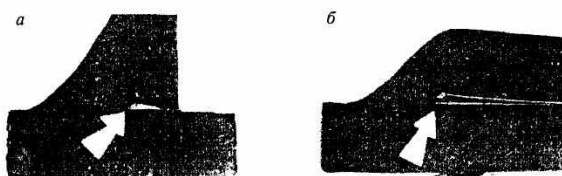


Рис. 2.8. Соединения с увеличенным конструктивным непроваром (а) и зазором (б)

Предварительно сварные соединения контролировались эхо-методом по совмещенной схеме, использовались преобразователи с углами ввода и рабочими частотами, приведенными в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Углы ввода и рабочие частоты преобразователей

Тип соединения	Толщина, мм	Частота, МГц	Угол ввода, град
Стыковое	6, 7, 8, 10	5,0	70
Тавровое одностороннее	6, 7, 8, 10, 12	5,0	65 и 50
	16	2,5	65 и 50
Тавровое двухстороннее	12	5,0	70 и 65
	16	2,5	65
Нахлесточное	6, 7, 8, 10	5,0	65 и 50

При контроле сварных соединений характерно систематическое появление эхо-сигналов от внутренних и наружных поверхностей швов. Для исключения возможных ошибок при оценке результатов контроля предлагается изготавливать контрольные образцы, представляющие собой фрагменты контролируемых соединений. В наплавленном металле образцов вблизи поверхностей швов сверлят боковые цилиндрические отверстия диаметром 2-2,5 мм [16]. В процессе контроля рекомендуется сравнивать координаты и положение на экране дефектоскопа эхо-сигналов от дефектов с аналогичными характеристиками эхо-сигналов от боковых цилиндрических отверстий. Изготовление таких образцов достаточно трудоемко и при контроле сварных соединений толщиной до 16 мм нецелесообразно: диаметры отверстий соизмеримы с толщиной сварных соединений и эхо-сигналы от отверстий сложно идентифицировать. При контроле применялся способ настройки длительности развертки дефектоскопа по стандартным образцам предприятия (СОП) в форме пластин, имеющим плоские угловые отражатели (зарубки). Передний фронт строб-импульса дефектоскопа совмещался с передним фронтом максимума эхо-сигнала от «нижнего» отражателя, задний фронт строб-импульса - с задним фронтом максимума эхо-сигнала от «верхнего» отражателя. Сканирование выполнялось по всей длине швов путем последовательного перемещения преобразователя по поверхности сваренных элементов (рис. 2.9). Величина продольного шага сканирования не превышала 3 мм. Перемещение (X) преобразователя в поперечном направлении определяли по СОП.

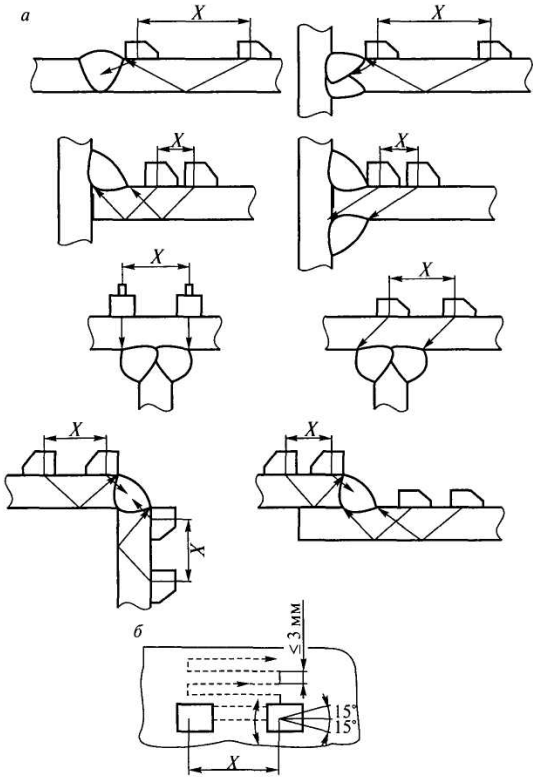


Рис. 2.9. Сканирование: а - поперечное перемещение преобразователя; б - схема сканирования

При контроле фиксировались эхо-сигналы от предполагаемых дефектов с амплитудами $A > A_1$, где A_1 на 8-10 дБ меньше амплитуды, соответствующей эквивалентной площади $S_{\text{экв}} = 2 \text{ мм}^2$.

Двухсторонние стыковые соединения дополнительно контролировались зеркально-теньевым методом (рис. 2.10). Фиксировались ультразвуковые сигналы с амплитудами $A > A_2$, где A_2 на 28 дБ меньше амплитуды, соответствующей ультразвуковому сигналу, прошедшему от генератора к приемнику на пластине, толщина которой равна толщине свариваемых листов.

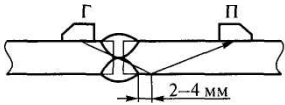


Рис. 2.10. Схема контроля зеркально-теньевым методом (Г - генератор, П - приемник)

Контроль стыковых соединений. Наиболее вероятными выявляемыми дефектами являются непровары в корне швов. В односторонних соединениях корневой непровар выявляется прямым лучом и максимум эхо-сигнала от него располагается на переднем фронте строб-

импульса (рис. 2.11, а). При толщинах сваренных элементов до 6 мм из-за деформации (подтягивания) соединения эхо-сигнал от непровара может быть смещен влево (рис. 2.11, б). В двухсторонних соединениях непровар в корне шва может быть выявлен как прямым, так и однократно отраженным лучом (рис. 2.11, в). При этом максимум эхо-сигнала от непровара располагается примерно на равных расстояниях от зондирующего импульса и переднего фронта строб-импульса при контроле прямым лучом или примерно на середине строб-импульса при контроле однократно отраженным лучом. В двухсторонних соединениях непровары в корне шва выявляются значительно хуже, чем в односторонних.

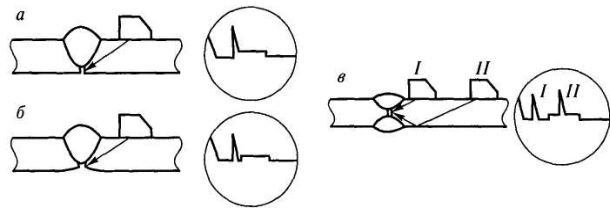


Рис. 2.11. Выявление непроваров в корне швов односторонних (а, б) и двухсторонних (в) стыковых соединений

Внутренние трещины, как правило, располагаются в средней зоне валика наплавленного металла, что позволяет идентифицировать характер обнаруженного дефекта путем измерения его координат. Кроме того, необходимо для оценки типа обнаруженного дефекта как трещиноподобного оценивать изменение амплитуды эхо-сигнала от выявленного дефекта вращательным сканированием.

Признаком обнаружения поверхностной трещины в наплавленном металле сварного соединения является значительное изменение амплитуды эхо-сигнала на экране дефектоскопа на «прощупывание» в месте отражения ультразвукового луча (рис. 2.12).

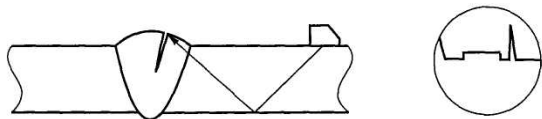


Рис. 2.12. Выявление поверхностной трещины в наплавленном металле (на примере стыкового соединения)

Поры и шлаковые включения характеризуются наличием на экране дефектоскопа импульсов, быстро исчезающих и появляющихся вновь при незначительных смещениях преобразователя. Скоплений пор или шлаковых включений, дающих на экране один эхо-сигнал или группу близко расположенных эхо-сигналов [17], или рыхлот, характеризующихся появлением широкого эхо-сигнала неопределенной формы [17, 18], не обнаружено.

Контроль угловых и тавровых соединений. Контроль угловых и тавровых сварных соединений, выполненных с разделкой кромок, со стороны привариваемого элемента аналогичен контролю стыковых соединений. В односторонних соединениях непровар в корне шва выявляется прямым лучом наклонным преобразователем и максимум эхо-сигнала от него располагается на переднем фронте строб-импульса (рис. 2.13, а).

В двухсторонних соединениях непровар может быть выявлен как прямым, так и однократно отраженным лучом (рис. 2.13, б). В двухсторонних соединениях непровар в корне шва более уверенно выявляется прямым раздельно-совмещенным преобразователем со стороны основного элемента (рис. 2.13, б). В угловых соединениях, у которых элементы свариваются торцевыми поверхностями, непровар выявляется со стороны меньшего катета (рис. 2.13, в).

Тавровые соединения, выполненные без разделки кромок с конструктивными непроварами, целесообразно контролировать со стороны привариваемого элемента: односторонние соединения - однократно отраженным лучом, двухсторонние - прямым лучом. При контроле односторонних соединений максимум эхо-сигнала от технологического непровара располагается на заднем фронте строб-импульса, а при контроле двухсторонних соединений - на переднем фронте строб-импульса (рис. 2.14, а).

Внутренние трещины, как правило, начинаются от зазора между основным и привариваемым элементом. Максимумы эхо-сигналов от трещин могут быть несколько смещены влево или вправо относительно заднего (при контроле односторонних соединений) или переднего (при контроле двухсторонних соединений) фронта строб-импульса (рис. 2.14, б). Так как шлаковые включения обычно располагаются в корневой части шва, расположение максимумов эхо-сигналов от них на экране дефектоскопа аналогично расположению максимумов эхо-сигналов от трещин в корне шва (рис. 2.14, в).

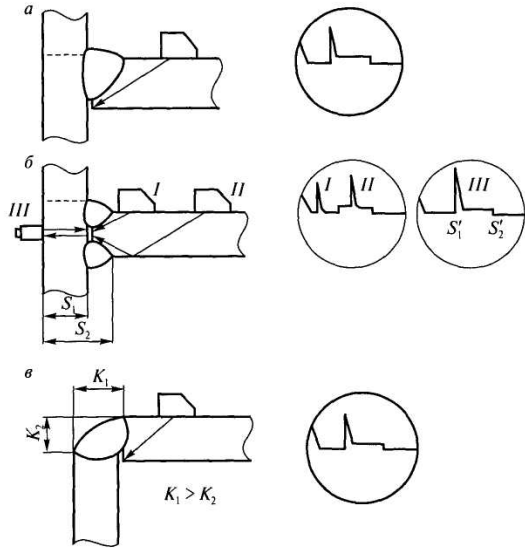


Рис. 2.13. Выявление непроваров в корне швов угловых и тавровых соединений, выполненных с разделкой кромок

Выявление дефектов, расположенных в корне шва, осложняется наличием конструктивных непроваров [19]. Контроль односторонних соединений преобразователями с углами ввода 65°, 70° невозможен из-за появления на рабочем участке экрана дефектоскопа мощного ложного эхо-сигнала от нижнего угла привариваемого элемента. Избежать сигнала-помехи можно, если использовать преобразователь с углом ввода 50°. При этом катет шва не позволяет приблизить преобразователь на расстояние, необходимое для появления эхо-сигнала от

нижнего угла.

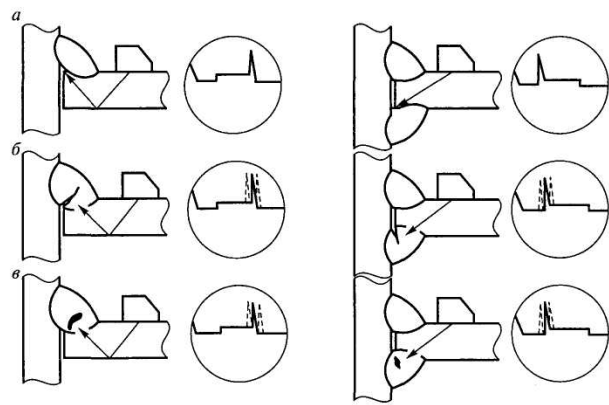


Рис. 2.14. Выявление дефектов в корне швов тавровых соединений, выполненных без разделки кромок

Контроль нахлесточных соединений. Соединения рекомендуется контролировать по схемам, приведенным на рис. 2.15.

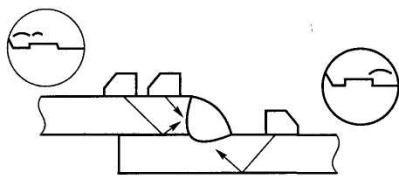


Рис.2.15. Схемы контроля нахлесточных соединений (П - зоны эхо-сигналов от дефектов)

Особенностью контроля является наличие эхо-сигналов от поверхности шва при контроле со стороны верхнего элемента. При перемещении преобразователя от шва относительно положения, при котором проводилось озвучивание корня шва, на строб-импульсе появляется эхо-сигнал, соответствующий отражению от поверхности шва (рис. 2.16). Сигнал-помеха практически не «прошупывается».

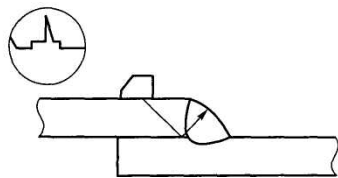


Рис. 2.16. Эхо-сигнал от поверхности шва нахлесточного соединения

Наиболее вероятными выявляемыми дефектами являются непровары в корне швов. Они могут быть выявлены только прямым лучом со стороны верхнего элемента. Максимумы эхо-сигналов от непроваров располагаются на переднем фронте строб-импульса (рис. 2.17, а).

Внутренние трещины, как правило, начинаются от зазора между свариваемыми элементами и могут выявляться как прямым лучом со стороны верхнего элемента, так и однократно отраженным лучом со стороны нижнего элемента (рис. 2.17, б). Максимум эхо-сигнала от трещины, выявленной прямым лучом, располагается на переднем фронте строб-импульса или, что бывает чаще, несколько смещается по экрану влево. Максимум эхо-сигнала от трещины, выявленной однократно отраженным лучом, располагается на заднем фронте строб-импульса или, что бывает чаще, несколько смещается по экрану вправо. Шлаковые включения обычно располагаются в корневой части швов (рис. 2.17, в). При контроле прямым лучом максимумы эхо-сигналов располагаются на переднем фронте строб-импульса или могут быть несколько смещены влево или вправо относительно переднего фронта. При контроле однократно отраженным лучом максимумы эхо-сигналов располагаются на заднем фронте строб-импульса или могут быть несколько смещены влево и вправо относительно заднего фронта. При этом для ликвидации помех, вызванных отражением от поверхностей швов поверхностной волны, целесообразно использовать преобразователи с углом ввода 50°.

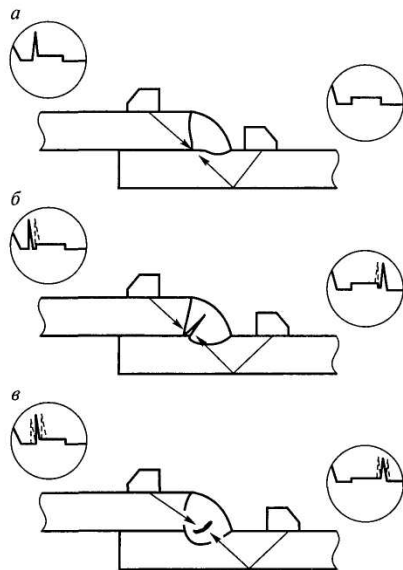


Рис. 2.17. Выявление дефектов в корне швов нахлесточных соединений

Длительность и положение строб-импульса могут быть изменены для срабатывания автоматического сигнализатора при выявлении всех возможных в контролируемом сварном соединении дефектов.

Корреляционные зависимости «амплитуда ультразвукового сигнала - глубина дефекта». Существует достаточно хорошая корреляционная связь между амплитудами эхо-сигналов и глубиной непроваров (рис. 2.18), расположенных в нижней части швов (см. [рис. 2.4, а](#)).

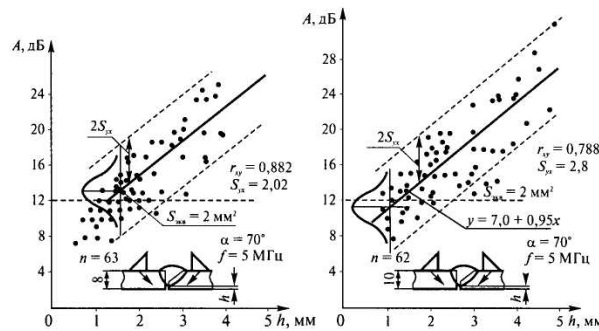


Рис. 2.18. Корреляционные зависимости «амплитуда эхо-сигнала - глубина дефекта» при контроле односторонних стыковых соединений

Непровары, расположенные в средней части швов (см. [рис. 2.4, б](#)), эхо-методом выявляются значительно хуже (рис. 2.19, а, б). Амплитуды эхо-сигналов от непроваров уменьшаются, а сигналы-помехи от верхних и нижних усиления швов затрудняют расшифровку.

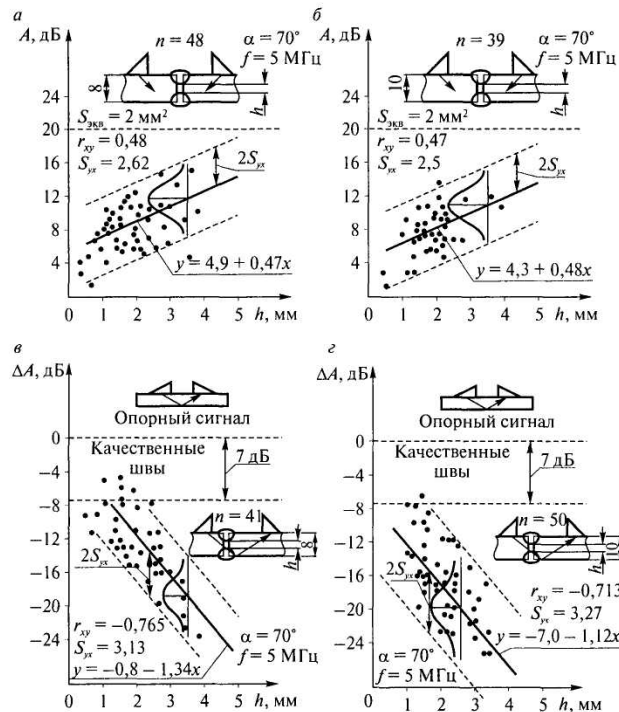


Рис. 2.19. Корреляционные зависимости «амплитуда эхо-сигнала - глубина дефекта» (а, б) и «относительная величина амплитуды - глубина дефекта» (в, г) при контроле двухсторонних стыковых соединений

При зеркально-теновом методе контроля корреляционная связь между величиной амплитуды, соответствующей ультразвуковому лучу, прошедшему сечение шва, и глубиной непровара значительно теснее (рис. 2.19, в, г), чем корреляционная связь между величиной амплитуды эхо-сигнала от непровара и глубиной непровара при эхо-методе. Однако техника проведения ультразвукового контроля зеркально-теновым методом значительно сложнее. Требуется специальные приспособления, обеспечивающие фиксацию преобразователей относительно друг друга. Сложнее обеспечивается акустический контакт преобразователей с поверхностью сканирования, и контроль практически невозможен при смещении свариваемых кромок.

При ультразвуковом контроле угловых швов эхо-сигнал формируется только одной частью непровара: непроваром по поверхности кромки верхнего элемента в нахлесточных и непроваром по поверхности привариваемого элемента в тавровых соединениях. Однако, как показали результаты вскрытия, имеется достаточно тесная корреляционная связь между величинами непроваров, расположенных на разных поверхностях свариваемых кромок (рис. 2.20). Если имеется непровар на одной поверхности, то, как правило, есть непровар и на другой поверхности, причем их величины близки.

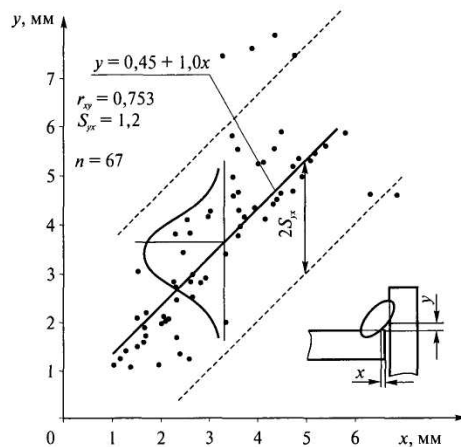


Рис. 2.20. Корреляционная связь между глубинами неспаров в тавровых соединениях

Так как в отличие от стыковых в угловых швах неспаров встречаются значительно реже, для анализа топографии неспаров и определения корреляционной зависимости между величиной неспарова и амплитудой эхо-сигнала кроме образцов, вырезанных из натурных конструкций или сваренных по штатной технологии, использовались образцы, в которых появление неспаров провоцировалось. Завышалась скорость сварки и применялось специальное манипулирование сварочной горелкой. Корреляционная связь между величинами неспаров в корне шва и амплитудами эхо-сигналов в угловых швах, например в тавровых соединениях, слабая (рис. 2.21). Неспаровы между валиками в многослойных швах (см. рис. 2.4, д) выявлять не удастся.

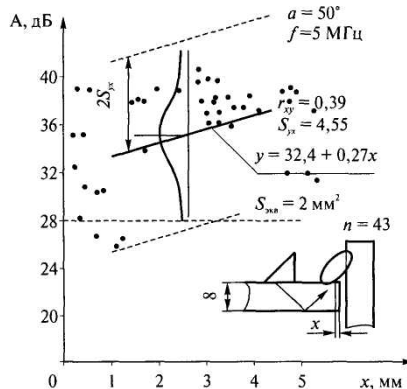


Рис. 2.21. Корреляционная связь «амплитуда эхо-сигнала - глубина дефекта» при контроле односторонних тавровых соединений

2.8. ВЫБОР МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

При выборе методов неразрушающего контроля конкретных элементов конструкций необходимо учитывать следующие основные факторы: характер (вид) возможных дефектов и их расположение; возможности методов контроля; виды деятельности, при которых применяется неразрушающий контроль (изготовление, ремонт, техническое диагностирование); формы и размеры контролируемых элементов конструкций; материалы, из которых изготовлены контролируемые элементы; состояние и шероховатость контролируемых поверхностей конструкций.

Рекомендуемые виды (методы) неразрушающего контроля при изготовлении, ремонте и техническом диагностировании сварных конструкций приведены в табл. 2.2.

В зависимости от происхождения дефекты различаются расположением, размерами, формой и средой, заполняющей их полости. Подрезы, наплывы, кратеры, прожоги и свищи являются поверхностными дефектами; неспаровы, шлаковые включения и расслоения - внутренними дефектами. Трещины, поры и раковины могут располагаться как на поверхности, так и внутри объекта контроля. Трещины, неспаровы и подрезы являются плоскостными дефектами. Они имеют протяженную форму с различными раскрытием и глубиной. В полости дефектов могут быть окислы, смазка, нагар и другие загрязнения. Для трещин, неспаров и подрезков характерны острые окончания, а для трещин также - резкие очертания. Поры, раковины и часто шлаковые включения - это объемные дефекты, имеющие округлую форму.

Таблица 2.2

Рекомендуемые виды (методы) неразрушающего контроля сварных конструкций

Вид деятельности	Объект контроля	Контролируемый материал	Рекомендуемый метод контроля
Изготовление, ремонт	Основной металл	Низкоуглеродистые и низколегированные стали	ВИК, УК
		Высокопрочные низколегированные стали	ВИК, УК, МК, КК
	Сварные швы	Низкоуглеродистые и низколегированные стали	ВИК, УК, РК
		Высокопрочные низколегированные стали	ВИК, УК, РК, МК, КК
Техническое диагностирование	Основной металл	Все стали	ВИК, МК, УК, АЭ, ВК, КК
	Сварные швы	Все стали	ВИК, МК, УК, АЭ

Примечание. Методы неразрушающего контроля: ВИК - визуальный и измерительный, УК - ультразвуковой, РК - радиационный, МК - магнитопорошковый, КК - капиллярный, АЭ - акустико-эмиссионный, ВК - вихретоковый.

При изготовлении и ремонте сварных конструкций из низкоуглеродистых и низколегированных сталей наиболее вероятно появление дефектов в сварных швах: трещин, неспаров, подрезков, пор, раковин, шлаковых включений, наплывов, кратеров, прожогов и свищей. В последнее время в краностроении находят применение высокопрочные низколегированные стали, например, 14Х2ГМ, 14Х2ГМР, 14ХГНМ, 12ГН2МФАЮ. Сварка конструкций из этих сталей сопряжена с резким увеличением вероятности возникновения трещин в

сварных швах и околошовных зонах.

Неразрушающий контроль сварных конструкций при техническом диагностировании машин должен быть направлен на выявление трещин в сварных швах и основном металле, возникших в процессе их эксплуатации.

Визуальный и измерительный контроль позволяет выявлять наиболее часто встречающиеся поверхностные дефекты (за исключением дефектов, имеющих размеры до $\sim 0,15$ мм), и он является обязательным независимо от видов деятельности, при которых применяется неразрушающий контроль.

Радиационным контролем хорошо выявляются объемные сварочные дефекты, и его целесообразно использовать при контроле сварных швов в процессе изготовления или ремонта конструкций машин.

Ультразвуковой контроль - наиболее универсальный из физических методов неразрушающего контроля. Хорошая выявляемость при ультразвуковом контроле несплошностей и трещин, в том числе трещин, возникающих в процессе эксплуатации машин, позволяет широко использовать этот метод контроля как при контроле качества изготовления и ремонта конструкций, так и при оценке их технического состояния в процессе эксплуатации машин.

Магнитопорошковый контроль, как правило, применяется для выявления поверхностных дефектов, не обнаруживаемых при визуальном контроле. Этот метод наиболее эффективен при выявлении поверхностных трещин. Магнитопорошковый контроль может быть использован как при контроле основного металла, так и при контроле сварных швов, причем при контроле сварных швов, как правило, не требуется их дополнительная обработка (обеспечение плавных переходов от наплавленного металла к основному, снятие усиления шва и пр.). Таким образом, магнитопорошковый контроль целесообразно применять при контроле сварных швов и околошовных зон в процессе изготовления или ремонта конструкций из высокопрочных низколегированных сталей, а также при оценке технического состояния конструкций в процессе эксплуатации машин.

Для некоторых элементов конструкций магнитопорошковый контроль не может быть использован, так как при контроле необходима определенная зона для намагничивания и нанесения индикаторных материалов. В этом случае его целесообразно заменить капиллярным или вихретоковым контролем. Однако в этом случае при капиллярном контроле сварных швов требуются по крайней мере обеспечение плавных переходов от наплавленного металла к основному и удаление грубой чешуйчатости сварных швов, а при вихретоковом контроле - снятие усиления швов.

Характерная особенность акустико-эмиссионного метода - возможность обнаружения и регистрации развивающихся дефектов, позволяющая классифицировать дефекты не по размерам, а по степени их опасности, позволяет эффективно его использовать при оценке технического состояния конструкций в процессе эксплуатации машин. Однако следует отметить, что более широкое применение акустико-эмиссионного контроля ограничивается его достаточно сложной технологией, дороговизной оборудования и очень высокими требованиями к квалификации персонала.

ГЛАВА 3

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ НОРМ ДОПУСТИМОСТИ ДЕФЕКТОВ

3.1. ОБОСНОВАНИЕ ЕДИНИЦЫ ПРОДУКЦИИ

Для исследования дефектности сварных соединений необходимо использовать понятие единицы продукции. При контроле протяженных сварных швов за единицу продукции принимают наименьший участок шва, который можно контролировать, исправлять и испытывать [1]. Рекомендуется принимать длину единичного участка (ΔL) 100 или 300 мм или рассчитывать по формуле [1, 20]:

$$\Delta L = 10\delta,$$

где δ - толщина свариваемого элемента.

Рассмотрим основные критерии выбора единицы продукции применительно к сварным соединениям конструкций машин.

Возможность контроля. Наименьшая длина участка сварного шва, который можно проконтролировать отдельно от другого участка, определяется возможностями ультразвукового контроля. При контроле сварных соединений толщиной 6-16 мм используют преобразователи с рабочей частотой 2,5 и 5 МГц. При этом ультразвуковой пучок в зависимости от толщины свариваемых элементов и от размеров и конфигурации пьезоэлемента одновременно «охватывает» участок шва протяженностью примерно от 7 до 22 мм. Следовательно, исходя из возможностей применяемых методов неразрушающего контроля протяженность единичного участка должна быть не менее 22 мм.

Возможность исправления. При использовании методов неразрушающего контроля характер внутренней дефектности существенно меняется. Резко уменьшается количество протяженных дефектов, то есть дефектов, имеющих протяженность, превышающую 10-20 мм. Причем с последующим совершенствованием технологии и повышением культуры производства следует ожидать дальнейшего уменьшения количества протяженных дефектов. Как показывает практика исправления дефектных швов, протяженность вскрываемого и перерабатываемого участка при устранении единичного дефекта не превышает 36-40 мм.

Возможность испытания. Сварные соединения конструкций представляют собой группу сварных элементов, степень нагруженности которых определяется прежде всего их расположением в конструкции. Поданным динамического тензометрирования конструкций нагруженность сварного соединения может существенно меняться по его длине [4]. Таким образом, принимая во внимание нагруженность сварного соединения, протяженность единичного участка должна быть минимальной.

Исходя из вышеизложенного протяженность единичного участка целесообразно выбрать равной 40 мм.

3.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАЛОЗНАЧИТЕЛЬНЫХ ДЕФЕКТОВ

Нецелесообразно производить углубленные исследования дефектов, которые редко встречаются или не оказывают существенного влияния на усталостную прочность сварных соединений, то есть являются малозначительными [2, 21]. Факторы распространенности и влияния на усталостную прочность являются основными факторами, определяющими опасность дефектов. Следует отметить, что эти факторы связаны между собой. Наличие в сварном соединении достаточно большого количества дефектов, в отдельности не опасных, может привести к резкому снижению прочности соединения. Кроме распространенности и влияния на несущую способность следует учитывать возможность предотвращения дефектов. Дефект, который трудно предотвратить, является более опасным.

Распространенность дефектов. Проведенные автором исследования позволили получить значения долей дефектности q (отношение количества элементов n_d , содержащих данный вид дефекта, к общему количеству проконтролированных элементов n) по наиболее встречающимся дефектам для ряда заводов, изготавливающих сварные конструкции. Данные получены для благоприятных производственных условий (условия изготовления конструкций, поступающих на испытания; условия, позволившие достигнуть качественного изготовления сварных соединений на отдельных конструкциях). Следует отметить, что при неблагоприятных производственных условиях (применение некачественных сварочных материалов, ускорение работ в связи с угрозой невыполнения плановых заданий и т.д.) значения долей дефектности могут быть значительно больше. Однако при нормировании дефектности необходимо ориентироваться на оптимальные возможности сварочного производства.

Анализ долей дефектности позволяет сделать вывод, что прожоги, кратеры, свищи, шлаковые включения и цепочки пор в сварных соединениях грузоподъемных машин встречаются редко. Достигнутые значения долей дефектности q_d по этим видам дефектов не превышают 0,1 %. Более часто встречаются наплывы ($q_d \leq 0,96$ %) и единичные поры и раковины ($q_d \leq 0,45$ %). Наиболее распространенными сварочными дефектами являются несплошности в стыковых соединениях ($q_d \leq 2,6$ %) и подрезы ($q_d \leq 4,8$ %). Технологические несплошности в угловых швах встречаются значительно реже ($q_d \leq 0,3$ %). Кроме того, при контроле соединений, сваренных с соблюдением технологического процесса, не отмечалось элементов, в которых близкое расположение пор и шлаковых включений могло привести к снижению несущей способности соединений.

Влияние дефектов на усталостную прочность. Шлаковые включения, в том числе и имеющие максимально возможные в сварных соединениях конструкций грузоподъемных кранов, подъемников (вышек) и другого оборудования размеры, и поры, как правило, не оказывают существенного влияния на усталостную прочность соединений [5, 22, 23]. Наплывы также практически не снижают характеристик выносливости сварных соединений [24]. Подрезы и непровары являются плоскостными дефектами, и их влияние очень значительно [22, 25-27].

Таким образом, принимая во внимание распространенность и влияние дефектов на усталостную прочность сварных соединений, можно сделать вывод, что наиболее опасными сварочными дефектами являются непровары в стыковых соединениях и подрезы. Аналогичный результат в отношении подрезов получен и при исследовании сварных соединений несущих систем сельскохозяйственных машин [28].

Кроме того, оптимальное проектирование и высокий уровень подготовки сварочного производства не гарантируют отсутствия непроваров и подрезов. Причиной появления данных дефектов могут быть нарушения режимов сварки, которые полностью исключить невозможно. Следовательно, углубленный анализ влияния основных конструктивно-технологических факторов качества на вероятность появления и размеры таких дефектов, как технологические непровары в угловых швах, поры, шлаковые включения, прожоги, кратеры, свищи и наплывы, при обосновании норм допустимости дефектов нецелесообразен.

3.3. ВЛИЯНИЕ ОСНОВНЫХ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ КАЧЕСТВА НА ВЕРОЯТНОСТЬ ПОЯВЛЕНИЯ И РАЗМЕРЫ ДЕФЕКТОВ

Стабильный технологический процесс нецелесообразно изменять в зависимости от эксплуатационных требований, предъявляемых к различным изделиям. В связи с этим большинство норм допустимых дефектов, используемых в различных отраслях, являются технологическими, то есть нормы ориентированы прежде всего на возможности сварочного производства.

Для обоснования технологических требований к нормам допустимости дефектов требуется определение достигнутого уровня качества сварных конструкций (или уровня качества, который может быть достигнут). Такую «картину качества» можно представить в виде диаграмм (или таблиц) частот появления дефектов и гистограмм их распределения по размерам [26, 27].

Как показали результаты исследований, вероятность появления подрезов в значительной мере зависит от типа соединения и толщины свариваемых элементов и практически не зависит от положения свариваемых элементов в процессе сварки, а также от формы разделки кромок свариваемых элементов. Так как технологическими процессами предусматривается и сварочной оснасткой обеспечивается сварка стыковых соединений, как правило, в нижнем положении, при исследовании непроваров в стыковых соединениях фактор «положение свариваемых элементов в процессе сварки» не рассматривался. В результате исследований установлено, что на вероятность появления непроваров существенное влияние оказывают тип соединения и толщина свариваемых элементов. Основным фактором, влияющим на частоту появления подрезов, является толщина свариваемых элементов. С увеличением толщины свариваемых элементов вероятность появления подрезов резко увеличивается. Это связано с тем, что с увеличением толщины свариваемых элементов сварка проводится на режимах с большим сварочным током, что увеличивает вероятность появления подрезов. Частота появления непроваров при увеличении толщины свариваемых элементов также увеличивается, но на возможность обеспечения полного проплавления свариваемых элементов наряду с режимом сварки также оказывают влияние другие факторы: подготовка кромок свариваемых элементов, наличие подкладной пластины, одностороннее или двухстороннее сварное соединение.

Усталостная прочность сварных соединений, имеющих дефекты типа подрезов и непроваров, определяется в основном глубиной дефектов [22, 26]. Полученные гистограммы (рис. 3.1) позволяют сделать вывод, что распределение глубин подрезов хорошо описывается экспоненциальным законом. Характер распределения глубин непроваров, расположенных в корне шва (рис. 3.2), определяется типом применяемого сварного соединения. При односторонней сварке без разделки кромок распределение глубин непроваров может быть описано нормальным законом, при односторонней сварке с разделкой кромок - логарифмически нормальным и при двухсторонней сварке без разделки кромок - распределением Вейбулла.

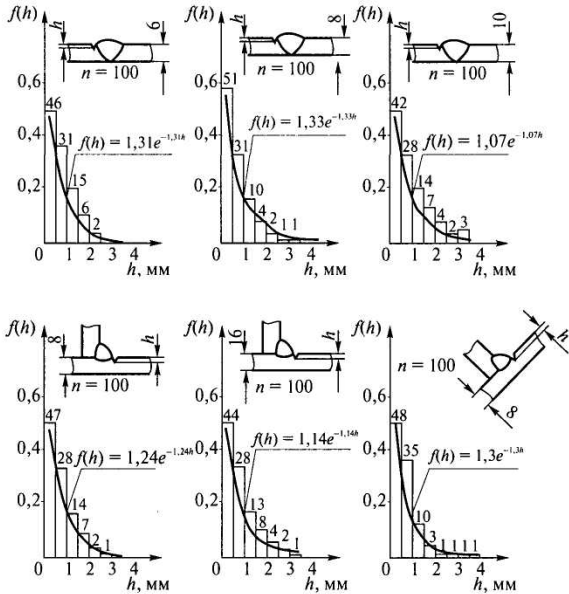


Рис. 3.1. Распределение глубин подрезов

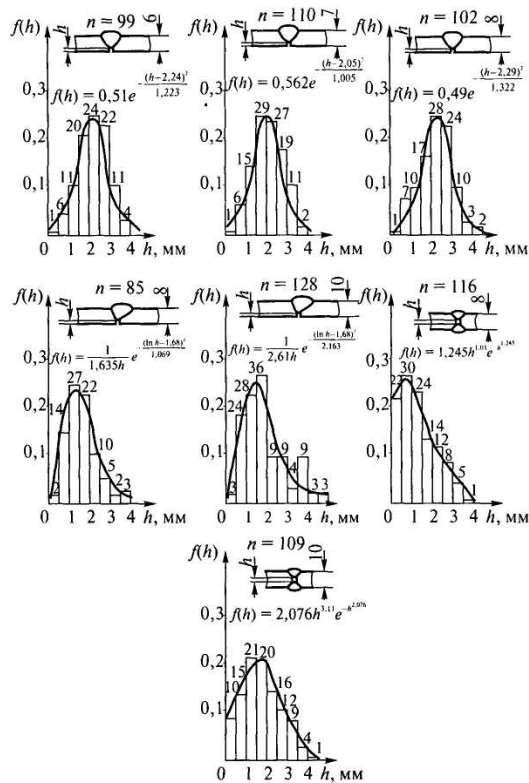


Рис. 3.2. Распределение глубин непроваров в стыковых сварных соединениях

Из анализа полученных данных можно сделать вывод, что с увеличением толщины свариваемых элементов наряду с увеличением долей дефектности по подрезам и непроварам увеличивается вероятность появления подрезов и непроваров, имеющих большую глубину. Это, как и в отношении вероятности появления дефектов, связано с тем, что с увеличением толщины свариваемых элементов сварка проводится на режимах с большим сварочным током, что увеличивает вероятность появления подрезов, имеющих большую глубину, и при больших толщинах сложнее обеспечить полный провар свариваемых элементов, вследствие чего увеличивается вероятность появления более глубоких непроваров. На глубину непроваров также оказывают влияние другие факторы: снятие кромки, наличие подкладной пластины, одностороннее или двухстороннее сварное соединение.

3.4. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ДЕФЕКТОВ НА НЕСУЩУЮ СПОСОБНОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Влияние дефектов на усталостную прочность сварных соединений многократно исследовалось [22, 23, 26, 27, 29, 30]. В настоящее время при оценке влияния дефектов на несущую способность сварных соединений нашли применение: метод прямого эксперимента; метод, использующий аппарат механики разрушения; метод концентрации напряжений. Каждый из методов имеет свои достоинства, недостатки и пределы применимости. Метод прямого эксперимента предусматривает прямое испытание сварных соединений с дефектами. Это основной метод накопления экспериментальных данных о влиянии дефектов на несущую способность сварных соединений. Исследования опасности дефектов основаны на прямых испытаниях сварных соединений с естественными или искусственными дефектами сварки. Преимуществом данного метода является возможность оценки опасности практически всех возможных видов дефектов. Экспериментальная оценка сводится, как правило, к определению предела выносливости сварного соединения в зависимости от типа, размеров и взаимного расположения в нем дефектов. Этот метод вследствие неповторимости однотипных дефектов по геометрической форме и расположению их в сварном шве не позволяет получить обобщенную оценку работоспособности сварных соединений с дефектами. Кроме того, для оценки влияния конкретного дефекта на усталостную прочность сварного соединения требуется выполнить большой объем работ, в том числе долговременных испытаний [24, 31-33]. Вследствие этого применение метода прямого эксперимента достаточно ограничено.

Достижения механики разрушения в части оценки роста трещин позволяют для плоскостных (трещиноподобных) дефектов, к которым относятся подрезы и непровары, применить аппарат механики разрушения [34-40]. Объясняется это следующим: уровень напряжений в машиностроительных конструкциях, работающих при переменных нагрузках, существенно ниже предела текучести металла; многолетний опыт изучения изломов усталостного многоциклового разрушения показал, что основным характерным признаком этих изломов является практически полное отсутствие пластической деформации в поперечном сечении излома, что, в свою очередь, свидетельствует о протекании процесса разрушения в условиях плоской деформации; сварочные дефекты типа непроваров и подрезов являются предельно острыми концентраторами, и инкубационный период зарождения усталостной трещины от них составляет менее нескольких процентов от общей долговечности образца с концентратором, причем острота окончания непровара практически не зависит от зазора между свариваемыми элементами. Таким образом, напряженное состояние, например, у концов плоскостных (трещиноподобных) дефектов может быть описано характеристикой, используемой в механике разрушения, а именно коэффициентом интенсивности напряжений K . Формулы механики разрушения для вычисления коэффициента интенсивности напряжений составляются в предположении упругой деформации в сварных соединениях. Оценка влияния дефекта сводится, как правило, к определению предела выносливости сварного соединения, содержащего данный плоскостной (трещиноподобный) дефект.

Элементы конструкций машин в течение нормативного срока эксплуатации могут испытывать более 10^6 циклов нагружения [4, 22]. Для данных элементов не допускается возможность подрастания трещины от дефекта, так как начавшая расти трещина может увеличиться до недопустимо опасных размеров [26]. Зависимость предела выносливости соединения $\sigma_{гд}$ от величины трещиноподобного дефекта может быть определена по формуле [34]:

$$\sigma_{гд} = \Delta K_{tho} (1 - R)^{\gamma} h^{1/2} C,$$

где ΔK_{tho} - размах порогового коэффициента интенсивности напряжений при отнулевом цикле нагружения;

R - характеристика цикла;

γ - численный коэффициент, полученный из экспериментальных данных, $\gamma = 0,75$;

h - глубина дефекта (для консервативной оценки принимается $h = \text{const}$);

C - численный коэффициент, значение которого зависит от формы и расположения дефекта по отношению к силовому потоку. Разброс значений предела выносливости целесообразно определять, принимая во внимание разброс значения коэффициента интенсивности напряжений, то есть $S(\sigma_{гд}) = f[S(\Delta K_{tho})]$.

Значения численного коэффициента C для наиболее распространенных сварных соединений и дефектов известны [41]. Учитывая, что величину и характер распределения остаточных напряжений в сварных конструкциях прогнозировать сложно, зависимости $\sigma_{гд} = f(h)$ целесообразно рассчитывать с учетом максимально возможных (предельных) растягивающих напряжений: $\sigma_{ост} = \sigma_T$.

Влияние остаточных напряжений учитывается изменением характеристики цикла [41]:

$$R = (\sigma_T - \Delta\sigma) / \sigma_T,$$

где σ_T - предел текучести;

$\Delta\sigma$ - размах действующих напряжений.

Для получения консервативной оценки влияния дефектов на предел выносливости соединений (рис. 3.3) расчеты проведены для стали 10ХСНД. Из широко применяемых при изготовлении конструкций машин низколегированных сталей данная сталь имеет максимальную величину предела текучести $\sigma_T = 390$ МПа. Известно пороговое значение коэффициента интенсивности напряжений для околошовной зоны сварных соединений из стали 10ХСНД, выполненных полуавтоматической сваркой в среде углекислого газа:

$$(\Delta K_{tho})_{cp} = 9,2 \text{ МПа м}^{1/2}, S(\Delta K_{tho}) = 1,04 \text{ МПа м}^{1/2} [42].$$

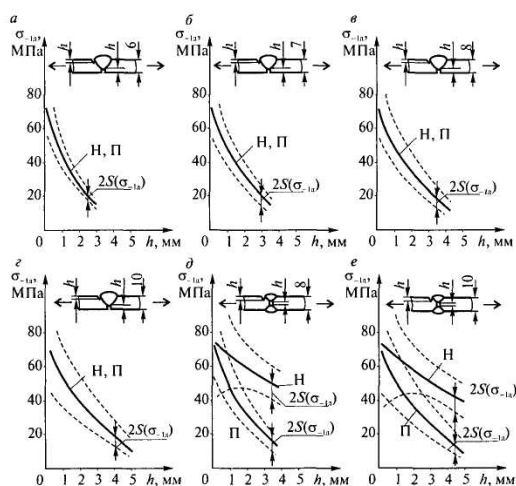


Рис. 3.3. Влияние дефектов на предел выносливости односторонних (а, б, в, з) и двухсторонних (д, е) стыковых соединений (П - подрезы, Н - непровары)

Более обобщенные результаты по оценке влияния дефектов на работоспособность сварных соединений по сравнению с методом прямого эксперимента, так же как метод, использующий аппарат механики разрушения, дает подход, основанный на изучении концентрации напряжений в зоне расположения дефектов. Этот метод применим для оценки влияния на несущую способность сварных соединений объемных дефектов - пор и округлых шлаковых включений [43]. В общем случае концентрация напряжений характеризуется теоретическим коэффициентом концентрации α_σ , равным отношению максимального напряжения в зоне концентрации напряжений к номинальному напряжению при упругой деформации в предположении, что материал отвечает условиям сплошной однородной среды. Метод концентрации напряжений основывается на положении, что разрушение происходит от концентраторов, у которых коэффициент концентрации напряжений в упругой зоне максимален. При таком подходе все дефекты в сварном шве рассматриваются как концентраторы напряжений и при оценке их опасности должны быть сопоставлены теоретические коэффициенты концентрации напряжений от дефектов и формы сварного шва. Установлено [43], что концентрация напряжений, вызванная формой шва, может оказывать на работоспособность сварных соединений более сильное влияние, чем концентрация от расположенных внутри дефектов - несплошностей. На этом основании предложено [43] оценку допустимости дефектов в сварных швах производить сопоставлением теоретических коэффициентов концентрации напряжений от формы сварного соединения (шва) α_σ и от внутренних дефектов α_d . Если по результатам неразрушающего контроля величина коэффициента концентрации напряжений выявленного дефекта $\alpha_d < \alpha_\sigma$, то работоспособность конструкции будет определяться формой шва (соединения). В этом случае выявленный дефект не является опасным для конструкции. В работах [43, 44] приведены значения α_d для единичных дефектов простой конфигурации и для отдельных сочетаний и взаимного расположения дефектов.

Известен ряд зависимостей для определения теоретического коэффициента концентрации напряжений α_σ , например, формулы, предложенные Г. Нейбером [45], Г.П. Турмовым [46], Г.А. Николаевым [47], В.А. Кархиным [48], Д.И. Навроцким [49], Н.Н. Афанасьевым [50] и Ю.А. Шиманским [51]. В работе [4] выбор конкретных формул для определения α_σ производили на основании сравнения значений теоретических коэффициентов концентрации напряжений, полученных расчетным путем, с экспериментальными значениями, полученными поляризационно-оптическим методом на моделях. Сравнение теоретических значений α_σ , определяемых расчетом по формулам различных авторов, с экспериментальными показало, что для стыковых соединений наименьшее отклонение (15%) расчетного значения α_σ по сравнению с экспериментальным получено по формуле (3.1), предложенной Ю.А. Шиманским:

$$\alpha_\sigma = 1 + (g / \rho)^{1/2} \sin \omega, \quad (3.1)$$

где g - высота выступа;

ρ - радиус концентратора;

ω - угол наклона торцевой кромки.

Для угловых швов нахлесточных и тавровых соединений наименьшее отклонение (9 %) получено по формуле (3.2), предложенной Н.Н. Афанасьевым:

$$\alpha_\sigma = 1,6 - 0,2a + 1 / [7a^{1/2}(1 + 1/\mu + 0,4a^{1/3})], \quad (3.2)$$

$$a = \rho / \delta;$$

$$\mu = g / \delta,$$

где 2δ - толщина элемента.

Таким образом, для количественной оценки теоретических коэффициентов концентрации напряжений в сварных конструкциях целесообразно использовать формулы (3.1) и (3.2).

Для единичной сферической поры теоретическое решение [43] дает значение $\alpha_d = 2,0$, что подтверждено экспериментально на оптических моделях. Удлиненная газовая полость в виде сфероида с соотношением осей 1:3, расположенная поперек силового потока, вызывает повышенную ($\alpha_d = 2,5$) концентрацию напряжений по сравнению со сферической порой [43, 44]. В случае, когда сферическая пора выходит на поверхность сварного шва, концентрация напряжений также повышается ($\alpha_d = 2,5$) [43, 44]. Анализ экспериментальных эпюр распределения напряжений показал, что концентрация напряжений локализуется вблизи поры на участке, равном радиусу поры [44]. Поэтому можно принять, что взаимное влияние двух пор начинает проявляться при расстоянии между порами, меньшем или равном радиусу поры. Так концентрация напряжений от цепочки пор при расстоянии между порами, равном одной трети радиуса поры, увеличивается до $\alpha_d = 2,1 - 2,3$. При этом минимально допустимое расстояние между порами следует назначать в долях от диаметра меньшей, а не большей поры, как часто принято в существующих нормативных документах. Значительного влияния глубины залегания цепочки пор на концентрацию напряжений автором работы [44] не обнаружено. Вместе с тем уменьшение расстояния до свободной поверхности приводит к возрастанию максимальной концентрации напряжений на контуре поры в близлежащей к свободной поверхности точке. Концентрация напряжений составляет: $\alpha_d = 2,1$ - при глубине залегания цепочки пор, равной диаметру поры; $\alpha_d = 2,7$ - при глубине залегания цепочки пор, равной радиусу поры. Учитывая, что поры, как правило, не имеют правильной сферической формы, могут располагаться произвольно по сечению шва и возможно расположение пор в непосредственной близости друг от друга, целесообразно принять коэффициент концентрации напряжений, вызванных пористостью α_d , равным максимальным значениям: $\alpha_d = 2,5$ (для единичных пор), $\alpha_d = 2,7$ (для цепочки пор).

3.5. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ НОРМЫ ДОПУСТИМОСТИ ДЕФЕКТОВ

Проведение контроля возможно при наличии документации, содержащей нормы допустимости дефектов. В общем случае назначение норм - гарантировать необходимые прочностные свойства сварных соединений и оказывать дисциплинирующее воздействие на технологию сварки. Различают технологические и эксплуатационные нормы допустимости дефектов [2, 26, 52]. Технологические нормы ориентированы на возможности технологического процесса и практически всегда превышают требования по прочности. Эксплуатационные нормы являются расчетными, то есть они связаны с ожидаемой опасностью дефектов при эксплуатации конструкций и базируются на теоретических знаниях и экспериментальных данных о влиянии дефектов на несущую способность сварных соединений. В англоязычной литературе используются аналогичные по смыслу понятия: для технологических норм - «good workmanship», для эксплуатационных - «fitness for purpose».

Большинство существующих норм дефектности, в том числе на конструкции дорожно-строительных, подъемно-строительных, горно-транспортных, сельскохозяйственных и других машин, являются технологическими. Это связано с тем, что оценить влияние дефектов на работоспособность сварных соединений сложно, так как оно зависит от большого количества различных конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов, из которых основными являются: тип и размеры сварного соединения; вид, конфигурация и расположение дефекта; характер и величина действующих нагрузок, уровень остаточных (сварочных) напряжений.

Эксплуатационные нормы могут быть разработаны на основе достаточно сложных и трудоемких экспериментов и расчетов. При расчетах в ряде случаев размер безопасного дефекта может оказаться неестественно большим и он не может быть указан как нормативно-допустимый. Если эксплуатационные требования допускают более крупные дефекты, чем технологические, то нормы следует устанавливать, учитывая технологические требования, иначе это может привести к снижению культуры производства и более высокой вероятности появления брака в ответственных соединениях. В других случаях, которые встречаются достаточно редко, безопасные размеры дефектов могут оказаться настолько малы, что рассчитывать на обычное качество изготовления сварных конструкций нецелесообразно. В этом случае необходимо предусмотреть организационно-технические мероприятия по повышению качества технологического процесса, введение, как правило, 100 %-ного контроля и исправление дефектных участков с обязательным последующим контролем. Обоснование норм допустимости дефектов только исходя из технологических требований, когда опасность дефектов не оценивается и интуитивно применяются излишне большие «запасы прочности», как правило, приводит к излишнему ужесточению норм. Следовательно, при обосновании необходимо комплексно использовать как технологические, так и эксплуатационные требования.

3.6. ВЕРОЯТНОСТНЫЕ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ НОРМ ДОПУСТИМОСТИ ДЕФЕКТОВ

При оценке норм допустимости дефектов целесообразно использовать вероятностные модели, которые позволяют количественно рассчитать вероятность появления дефектов (технологическая модель) и вероятность их влияния на прочность сварных соединений (эксплуатационная модель) [1, 2]. Соответственно рассматриваются две вероятностные характеристики дефектов:

$\varphi(x) = \varphi$ - вероятность появления (из общего числа дефектных участков) участков с дефектами, имеющими размеры X , больше некоторого нормативного уровня x_n (рис. 3.4, а);

$\psi(x) = \psi$ - вероятность потери прочности Y соединения ниже некоторого нормативного уровня $Y = y_n$ из-за наличия дефектов размером x (рис. 3.4, б).

Условия расчета норм по каждой модели:

$$\varphi = \text{Вер}(X > x_n) < \varphi_n - \text{технологическая модель};$$

$$\psi = \text{Вер}(Y < y_n) < \psi_n - \text{эксплуатационная модель},$$

где φ_n, ψ_n - нормативные значения φ и ψ .

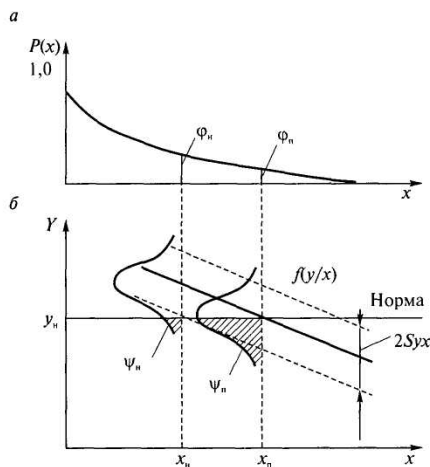


Рис 3.4. Вероятностные модели определения нормативного x_n и порогового x_n размеров дефекта:
 а - вероятность появления дефектов; б - регрессия влияния дефектов на прочность Y соединения

Влияние дефектов размером X на прочность Y выражается регрессией $Y=f(X)$, а также условным распределением $f(y/x)$. Пересечение линии регрессии и нормативного уровня прочности сварного соединения y_n соответствует так называемому пороговому размеру x_n дефекта. Для $X=x_n$ вероятность влияния дефекта на прочность $\psi_n = 0,5$.

Для оценки норм допустимости дефектов рекомендуется использовать понятия их запаса по размеру η_x и по вероятности $\eta_{вер}$

$$\eta_x = x_n / x_n;$$

$$\eta_{вер} = \phi_n \psi_n / \phi_n \psi_n = 0,5 \phi_n / \phi_n \psi_n.$$

В случае, когда $\eta_x > 5 - 10$ и $\eta_{вер} > 10 - 50$, нормы условно считают технологическими, в противном случае нормы эксплуатационные. Однако предложенная оценка норм только характеризует опасность влияния дефектов нормативных размеров относительно пороговых. Предлагается при разработке норм допустимости дефектов в сварных соединениях на основе вероятностных моделей оценивать показатели, которые напрямую связаны с интересами потребителя (вероятность потери работоспособности) и производителя (доля брака) [27, 52].

Вероятность потери работоспособности из-за наличия дефектов определяется по формуле

$$\Pi = \phi_n \psi_n q.$$

В соответствии с требованиями, предъявляемыми к деталям (элементам конструкций) автомобильного, железнодорожного и морского транспорта, сельскохозяйственных, горных, дорожностроительных и подъемно-транспортных машин, величина Π не должна быть более $10^{-5} - 10^{-4}$ [53, 54].

Ожидаемая доля брака B может быть рассчитана по формуле

$$B = \phi_n q.$$

Исследования, проведенные в МГТУ им. Н.Э. Баумана, показали, что оптимальные доли брака при изготовлении сварных конструкций (при отсутствии причин, вызывающих повышенный уровень дефектности) составляют $(2-7) \cdot 10^{-2}$ [1].

Эти данные получены при контроле сварных элементов длиной 300 мм. Учитывая, что в условиях стабильного производства преобладают единичные дефекты и вероятность забраковки элемента из-за наличия двух и более дефектов, как показали исследования, не превышает 10^{-5} , можно предположить, что при длине элементов 40 мм доля брака уменьшается в 7,5 раза ($\Delta L_{300} / \Delta L_{40} = 300 / 40 = 7,5$). Следовательно, при использовании единичных участков протяженностью 40 мм приемлемый уровень брака, который может быть взят за нормативное значение доли брака B , составляет $3 \cdot 10^{-3} - 10^{-2}$.

3.7. МЕТОДЫ ОБОСНОВАНИЯ НОРМ ДОПУСТИМОСТИ ДЕФЕКТОВ

Обобщенная схема обоснования норм допустимости дефектов представлена на рис. 3.5. Для формирования технологических требований к нормам допустимости дефектов по результатам неразрушающего контроля и выборочного вскрытия как эталонного метода определяется «картина качества», которая отражает достигнутый уровень качества сварных конструкций (или уровня, который может быть достигнут). «Картина качества» представляется в виде диаграмм (или таблиц) распределения дефектов по видам и законов (гистограмм) их распределения по размерам. При этом на частоту появления и размеры неспоров в стыковых соединениях и подрезов как значительных дефектов (часто встречаются, оказывают существенное влияние на несущую способность соединений, и их появление трудно предотвратить) необходимо оценить влияние таких факторов, как тип сварного соединения и толщина свариваемых элементов.

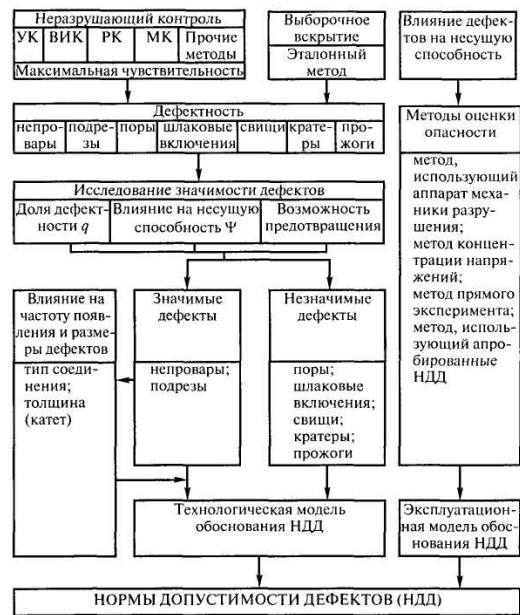


Рис. 3.5. Обобщенная схема обоснования норм допустимости дефектов

Для формирования эксплуатационных требований к нормам допустимости дефектов необходимо оценить влияние дефектов на работоспособность сварных соединений. Для оценки опасности непроваров и подрезов как плоскостных (трещиноподобных) дефектов целесообразно применить метод, использующий аппарат механики разрушения (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Выбор метода обоснования норм допустимости дефектов в зависимости от типов и видов дефектов

Типы дефектов	Виды дефектов	Метод обоснования норм допустимости дефектов
1	2	3
Плоскостные	Непровары, подрезы	Метод, использующий аппарат механики разрушения; метод прямого эксперимента; метод тензометрирования; метод использования апробированных норм
Объемные	Поры	Метод концентрации напряжений; метод прямого эксперимента; метод тензометрирования; метод использования апробированных норм
Сложной формы	Шлаковые включения, свищи, кратеры, прожоги, наплывы	Метод прямого эксперимента; метод тензометрирования; метод использования апробированных норм

Применение метода концентрации напряжений корректно для оценки опасности таких объемных дефектов, как поры. Шлаковые включения, хотя и являются объемными дефектами, могут иметь острые края. Таким образом, по наибольшему количеству встречающихся дефектов, имеющих сложную форму: шлаковых включений, свищей, кратеров, прожогов и наплывов, - необходимо использование метода прямого эксперимента, преимуществом которого является возможность оценки опасности практически всех возможных видов дефектов. Однако для оценки влияния конкретного дефекта на усталостную прочность сварного соединения методом прямого эксперимента требуется выполнение большого объема дорогостоящих испытаний.

Наиболее достоверную информацию о влиянии дефектов на работоспособность можно получить на основе анализа отказов в эксплуатации или ускоренных испытаний конструкций. Однако получить эту информацию сложно. В первом случае необходимо проводить контроль большого количества сварных конструкций и создать систему сбора и обработки информации об их отказах. Во втором случае для определения корреляционной зависимости «несущая способность - дефектность» потребовалось бы проведение большого количества дорогостоящих испытаний конструкций. Разработан метод обоснования норм допустимости дефектов на основе данных тензометрирования конструкций. При этом эксплуатационная модель не использует корреляционную зависимость «прочность - дефектность», а базируется на информации о дефектности элемента, проработавшего при определенных нагрузках заданное время без разрушения. Данный метод может быть использован для различных дефектов.

Учитывая, что технологические нормы обеспечивают достаточно высокую работоспособность сварных соединений, они могут быть использованы при консервативной оценке эксплуатационных требований к нормам допустимости дефектов. При этом целесообразно снять требования к устранению дефектов, которые не оказывают существенного влияния на работоспособность сварных соединений. Выбор норм допустимости дефектов должен исходить из требования, чтобы они не отличались по возможности для одних и тех же типов сварных соединений в различных типах машин. В конструкциях одного типа машин могут быть как более, так и менее нагруженные швы по сравнению со швами сварных соединений другого типа машин. При разработке рекомендуемых норм допустимости дефектов целесообразно провести анализ апробированных норм допустимости дефектов, и так как запасы прочности сварных конструкций достаточно велики, за основу взять наиболее «мягкие» [52]. Данный метод можно назвать «методом использования апробированных норм», он может быть использован для обоснования допустимости различных дефектов. При этом целесообразно введение категорий сварных соединений, позволяющих учесть характер действующих на сварное соединение нагрузок в процессе эксплуатации машины.

Схема обоснования норм допустимости дефектов (непроваров и подрезов) на основе применения аппарата механики разрушения представлена на рис. 3.6. Для формирования технологических требований к нормам допустимости дефектов на частоту появления и размеры непроваров в стыковых соединениях и подрезов как значительных дефектов необходимо оценить влияние основных конструктивно-технологических факторов.

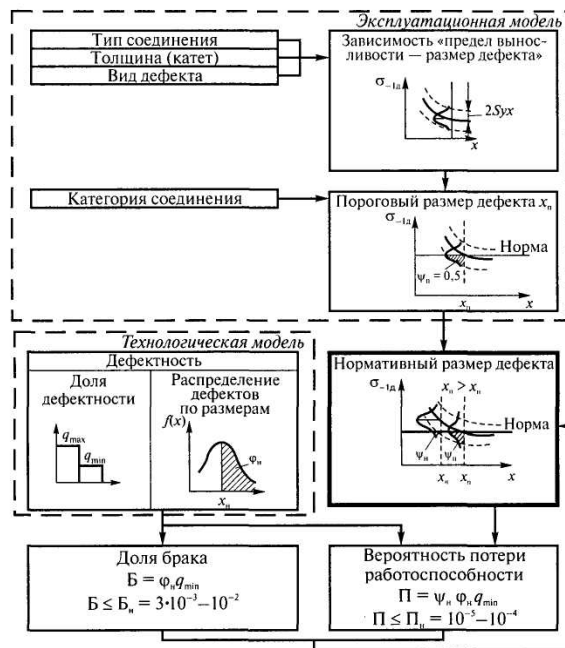


Рис. 3.6. Схема обоснования норм допустимости дефектов на основе применения аппарата механики разрушения

Показателем нагруженности изделий, испытывающих случайный режим нагружения и работающих в области многоциклового усталости, рекомендуется использовать величину эквивалентного (приведенного) напряжения $\sigma_{\text{ЭКВ}}$, дающего на принятой базе такую же повреждаемость, что и реальный спектр нагружения. В случае если $\sigma_{-1Д}$ и $\sigma_{\text{ЭКВ}}$ представляют собой амплитуды симметричных циклов, дающих одинаковую повреждаемость на базе $2 \cdot 10^6$, величина $\sigma_{-1Д}$ на зависимостях $\sigma_{-1Д} = f(h)$ (см. рис. 3.3) может быть заменена на величину $\sigma_{\text{ЭКВ}}$. Для повышения экономичности сварочного производства целесообразно введение категорий сварных соединений в зависимости от показателя нагруженности $\sigma_{\text{ЭКВ}}$ [28]. Предложены следующие категории: 1-я - $\sigma_{\text{ЭКВ}} > 60$ МПа; 2-я - $60 \text{ МПа} \geq \sigma_{\text{ЭКВ}} > 40$ МПа; 3-я - $40 \text{ МПа} \geq \sigma_{\text{ЭКВ}} > 20$ МПа; 4-я - $\sigma_{\text{ЭКВ}} \leq 20$ МПа (рис. 3.7). На примере стыковых соединений (табл. 3.2) видно, что принятые нормативные уровни нагруженности реализуют удобные для выбора нормативных значений глубин h_n непроваров и подрезов пороговые значения h_n . Для соединений 1-й категории наличие дефектов даже малых величин - 0,5-1,0 мм приводит к недопустимому снижению их несущей способности. Таким образом, дефекты в данных соединениях недопустимы.

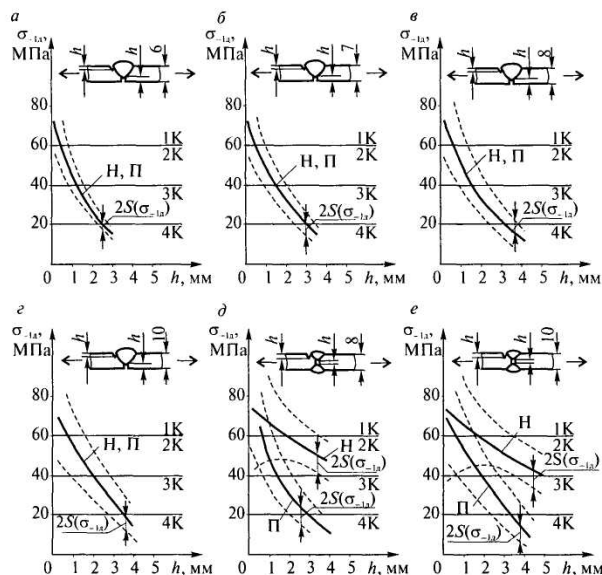


Рис. 3.7. Категории качества односторонних (а, б, в, г) и двухсторонних (д, е) стыковых соединений (П - подрезы, Н - непровары, К - категории)

В соединениях 2, 3 и 4-й категории в зависимости от типа соединения и толщины свариваемых элементов реализуются различные пороговые значения h_n глубин дефектов. Нормативные величины (табл. 3.2) выбраны таким образом, чтобы при достигнутом уровне дефектности вероятность потери работоспособности Π и ожидаемая доля брака B не превышали $10^{-5} - 10^{-4}$ и $3 \cdot 10^{-3} - 10^{-2}$ соответственно.

Таблица 3.2

Оценка норм допустимости непроваров и подрезов в стыковых соединениях

[illegible]

		кромок С7	10	0,7	0,5	0,57	0,45	1,4	0,84	0,4·10 ⁻³	0,1·10 ⁻³	0,2·10 ⁻³
3-я	Стыковое одностороннее без разделки кромок С2	с	6	1,3	1,0	0,20	0,02	1,3	17,5	0,2·10 ⁻³	0,8·10 ⁻⁶	0,4·10 ⁻⁴
	Стыковое остающейся подкладной пластиной С5		7	1,4	1,0	0,22	0,02	1,4	9,1	0,2·10 ⁻³	0,9·10 ⁻⁶	0,4·10 ⁻⁴
			8	1,6	1,0	0,22	0,02	1,6	6,8	0,3·10 ⁻³	1,3·10 ⁻⁶	0,7·10 ⁻⁴
	Стыковое одностороннее с разделкой кромок С8		8	1,6	1,0	0,22	0,02	1,6	6,8	0,3·10 ⁻³	1,3·10 ⁻⁶	0,7·10 ⁻⁴
			10	2,0	1,0	0,31	0,02	2,0	7,3	0,4·10 ⁻³	2,5·10 ⁻⁶	0,1·10 ⁻³
	Стыковое двухстороннее без разделки кромок С7		8	1,6	1,0	0,22	0,02	1,6	6,8	0,3·10 ⁻³	1,3·10 ⁻⁶	0,7·10 ⁻⁴
			10	2,0	1,0	0,31	0,02	2,0	7,3	0,4·10 ⁻³	2,5·10 ⁻³	0,1·10 ⁻³
4-я	Стыковое одностороннее без разделки кромок С2	с	6	2,3	1,0	0,20	0,01	2,3	245	0,2·10 ⁻³	0,4·10 ⁻⁶	0,4·10 ⁻⁴
	Стыковое остающейся подкладной пластиной С5		7	2,9	1,0	0,22	0,01	2,9	220	0,2·10 ⁻³	0,4·10 ⁻⁶	0,4·10 ⁻⁴
			8	3,1	1,0	0,22	0,01	3,1	211	0,3·10 ⁻³	0,7·10 ⁻⁶	0,7·10 ⁻⁴
	Стыковое одностороннее с разделкой кромок С8		8	3,1	1,0	0,22	0,01	3,1	211	0,3·10 ⁻³	0,7·10 ⁻⁵	0,7·10 ⁻⁴
			10	3,4	1,0	0,31	0,01	3,4	156	0,4·10 ⁻³	0,1·10 ⁻⁵	0,1·10 ⁻⁴
	Стыковое двухстороннее без разделки кромок С7		8	3,1	1,0	0,22	0,01	3,1	211	0,3·10 ⁻³	0,7·10 ⁻⁵	0,7·10 ⁻⁴
			10	3,4	1,0	0,31	0,01	3,4	211	0,4·10 ⁻³	0,1·10 ⁻⁵	0,1·10 ⁻⁴

Непровары, расположенные в корне двухсторонних соединений, не оказывают влияния на их усталостную прочность при $\sigma_{\text{экр}} \leq 40$ МПа и, следовательно, для соединений 3-й и 4-й категории могут быть ненормированы (см. [рис. 3.7](#)). При проектировании металлических конструкций необходимо принимать во внимание, что сварные соединения с остающимися подкладными пластинами имеют $\sigma_{1д} = 50$ МПа и не рекомендуются в качестве соединений 1-й и 2-й категории.

Схема обоснования норм допустимости дефектов на основе данных тензометрирования конструкций представлена на рис. 3.8. При формировании технологических требований к нормам допустимых дефектов необходимо учитывать, что результаты тензометрирования могут быть использованы для обоснования допустимости различных видов дефектов, в том числе как плоскостных, так и объемных.

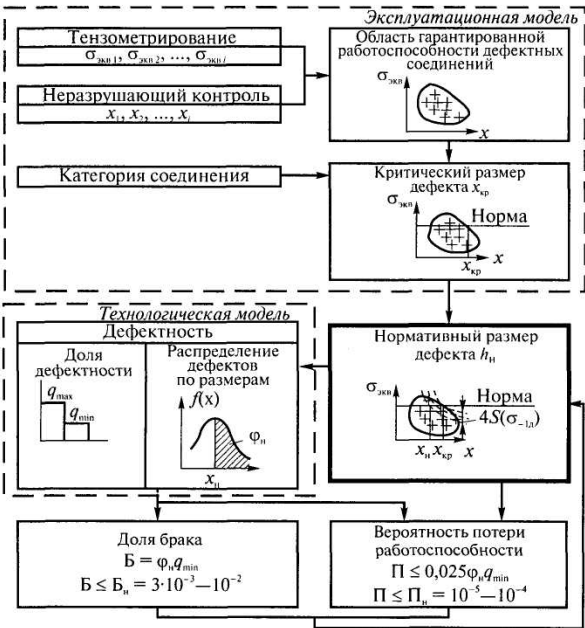


Рис. 3.8. Схема обоснования норм допустимости дефектов на основе тензометрирования конструкций

При формировании эксплуатационных требований к нормам допустимости дефектов необходимо оценить влияние дефектов на работоспособность сварных соединений. Этапы построения эксплуатационной модели:

- По результатам тензометрирования конструкций для исследуемых сварных элементов определяют значения показателя нагруженности ($\sigma_{\text{экр}1}, \sigma_{\text{экр}2}, \dots, \sigma_{\text{экр}i}$).
- По результатам измерений для поверхностных дефектов или вскрытия с последующими измерениями для внутренних дефектов определяют характерные размеры дефектов ($x_1, x_2, \dots, x_i$, где i - порядковый номер элемента).
- Наносят точки с координатами ($\sigma_{\text{экр}}, x_i$) на график. Таким образом, получают области «гарантированной работоспособности» дефектных сварных соединений.
- Пересечение нормативного уровня нагруженности, соответствующего определенной категории сварного соединения, с правой границей «поля работоспособности» определяет критическое значение глубины дефекта $x_{\text{кр}}$. При $x < x_{\text{кр}}$ можно предположить, что сварное соединение «выдержит» нормативное значение $\sigma_{\text{экр}}$ без разрушения.
- Для получения консервативной оценки h_n откладывают от крайне правых точек зону, определяемую разбросом $\pm 2S(\sigma_{1д})$.

Сопоставление результатов нормирования непроваров в ответственном стыковом шве стрелы машины ЛП-33 на основе использования аппарата механики разрушения и на основе результатов тензометрирования и ускоренных испытаний конструкций (рис. 3.9) показало, что при использовании результатов тензометрирования нормативный размер (глубина) h_n дефекта без ущерба для надежности может быть увеличен более чем в 2 раза (с 0,5 до 1,2 мм).

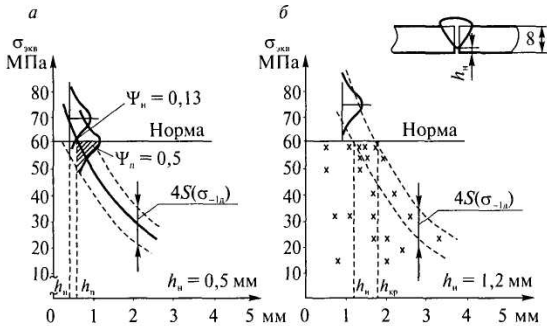


Рис. 3.9. Эксплуатационные модели обоснования допустимости непроваров в стыковом шве стрелы машины ЛП-33 на основе механики разрушения (а) и тензометрирования (б)

Данный метод имеет и недостаток: нормы допустимости дефектов разрабатываются применительно к непротяженным швам (участком швов), имеющим конкретное расположение в металлической конструкции, которое обуславливает определенный уровень остаточных напряжений и напряжений от действующих нагрузок.

Схема обоснования норм допустимости дефектов (типа пор) на основе оценки концентрации напряжений представлена на рис. 3.10.

Тип шва	Диаметр (длина) поры $d_n = x_n$, мм	Вероятность			Доля брака Б
		χ	φ_n	П	
Стыковой	$d_n = 1,0$	0,93	0,47	$9,3 \cdot 10^{-5}$	$4,6 \cdot 10^{-5}$
	$d_n = 1,5$		0,29		$2,9 \cdot 10^{-5}$
	$d_n = 2,0$		0,13		$1,3 \cdot 10^{-5}$
	$d_n = 2,5$		0,03		$3,0 \cdot 10^{-6}$
	Недопустимы цепочки пор	1,0	-	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$2,5 \cdot 10^{-5}$
Угловой	$d_n = 1,0$	0,18	0,47	$1,3 \cdot 10^{-5}$	$3,3 \cdot 10^{-5}$
	$d_n = 1,5$		0,29		$2,1 \cdot 10^{-5}$
	$d_n = 2,0$		0,13		$9,2 \cdot 10^{-6}$
	$d_n = 2,5$		0,03		$2,1 \cdot 10^{-6}$
	Недопустимы цепочки пор	0,36	-	$1,8 \cdot 10^{-5}$	$6,5 \cdot 10^{-6}$

Вероятность потери сварным соединением работоспособности П и ожидаемой доли брака Б для вышеприведенных норм допустимости пор соответствует принятым нормативным значениям: $П < 10^{-5} - 10^{-4}$ и $Б \leq 3 \cdot 10^{-3} - 10^{-2}$. Следует отметить, что угловые деформации и смещения кромок, в том числе и допустимые по [ГОСТ 5264-60](#), [ГОСТ 8713-79](#) и [ГОСТ 14771-76](#), приводят к резкому увеличению концентрации напряжений, вызываемой формой шва, и, следовательно, к уменьшению опасности дефектов.

Для разработки базовых справочных данных по уровням качества сварных соединений рекомендуется использовать EN 25817 (ИСО 5817). Данные нормы устанавливают три уровня качества, обозначенные как D - низкий, C - средний и B - высокий. Следует отметить, что применяемые в EN 25817 (ИСО 5817) показатели существенно отличаются от показателей, используемых в отечественных нормативных технических документах. Вместо катета в угловых швах нормируется высота рабочего сечения (высота наибольшего равнобедренного треугольника, который можно вписать в сечение сварного шва), а изготавливаемые в России специальные шаблоны для измерения сварных швов позволяют измерять катеты швов. В EN 25817 (ИСО 5817) введены понятия «коротких» (один дефект или более общей длиной не более 25 мм на каждые 100 мм длины сварного шва или максимум 25 % длины при его длине менее 100 мм) и «длинных» (один дефект или более общей длиной более 25 мм на каждые 100 мм длины сварного шва или минимум 25 % длины при его длине менее 100 мм) дефектов. Данные показатели не зависят от видов дефектов (включения, поры, непровары, подрезы и т.д.) и практически не связаны с опасностью дефектов, так как опасность наиболее значимых плоскостных дефектов (непроваров, подрезов) определяется прежде всего их глубиной, а не длиной. В EN 25817 (ИСО 5817) применяется практически нереализуемый параметр оценки допустимости пористости - относительная суммарная площадь пор в сечении сварного шва в процентах. Рассчитать этот параметр чрезвычайно сложно. Регламентируется глубина проплавления в угловых швах, которую невозможно оценить методами неразрушающего контроля. Имеет место ошибочная интерпретация вида дефекта. В сварном соединении, приведенном на рис. 3.12, наряду со смещением кромок, как это указано в EN 25817 (ИСО 5817), имеется более опасный дефект - непровар по кромке свариваемого элемента [наличие непровара в EN 25817 (ИСО 5817) не отмечается].

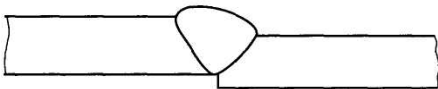


Рис. 3.12. Сварное соединение со смещением кромок и непроваром по кромке свариваемого элемента

Для обоснования норм допустимости дефектов сварных соединений грузоподъемных кранов целесообразно рассмотреть нормативные технические документы, которые долгое время использовались (и в ряде случаев используются в настоящее время) при регламентировании требований к качеству сварных конструкций грузоподъемных кранов (табл. 3.4). Следует отметить, что эти нормы существенно различаются.

Таблица 3.4

Основные нормативные технические документы, регламентирующие требования к качеству сварных конструкций грузоподъемных кранов		
Индекс	Наименование	Типы грузоподъемных кранов, на которые распространяется документ
РД 22-207-88	Машины грузоподъемные. Общие требования и нормы на изготовление	Башенные строительные, стреловые самоходные, переносные стрелового типа
ОСТ 36-62-81	Оборудование грузоподъемное. Общие технические условия	Монтажные всех типов
ОСТ 24.090.63-87	Оборудование подъемно-транспортное. Требования к изготовлению сварных металлоконструкций	Мостовые, порталные, козловые, подвесные и опорные, однобалочные и двухбалочные, консольные грузоподъемностью до 100 т включительно, железнодорожные

[ОСТ 36-62-81](#) и ОСТ 24.090.63-87 применялись 19 и 11 лет соответственно, а РД 22-207-88 действует и в настоящее время. [ОСТ 36-62-81](#) и ОСТ 24.090.63-87 заменены на [РД 36-62-00](#) и РД 24.090.97-98 соответственно. Однако требования к качеству сварных конструкций не изменились, за исключением того, что общая длина допустимых местных наплывов на участке шва 1000 мм уменьшилась со 100 мм (ОСТ 24.090.63-87) до 10 мм (РД 24.090.97-98). Приведенные в них нормы допустимости дефектов являются технологическими, и так как они обеспечивают безопасную эксплуатацию сварных конструкций, то могут быть взяты за основу при совершенствовании норм. При этом могут быть сняты требования к качеству соединений, которые не связаны с влиянием дефектов на несущую способность конструкций. Так как в конструкциях одного типа кранов могут быть как более, так и менее нагруженные швы по сравнению со швами сварных соединений другого типа кранов, то могут быть разработаны единые нормы для сварных конструкций грузоподъемных кранов. При разработке рекомендуемых норм допустимости дефектов должен быть проведен анализ апробированных норм и за основу взяты наиболее «мягкие». Этот подход наиболее целесообразен при обосновании требований к качеству ремонтной сварки, так как при ремонтной сварке существенно выполнение только эксплуатационных требований, а технологическим фактором можно пренебречь (объемы сварочных работ невелики - сварке подлежат только отдельные швы). Причем в этом случае эксплуатационные требования могут быть определены с большим консерватизмом, чем при изготовлении конструкций. Дефекты могут быть нормированы на основе применения зависимостей «размер дефекта - толщина свариваемых элементов» (рис. 3.13). На рис 3.14 в качестве примера приведены предельно допустимые размеры поверхностных пор и раковин.



Рис. 3.13. Пример обоснования норм допустимости дефектов на основе применения различных апробированных норм, где № 1, № 2 и № 3 - варианты норм допустимости дефектов

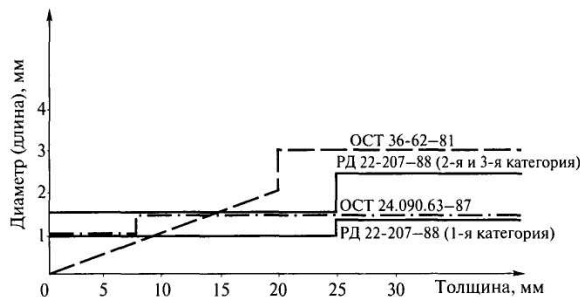


Рис. 3.14. Предельно допустимые размеры поверхностных пор и раковин

При обосновании норм допустимости дефектов на основе применения апробированных норм может быть использован более консервативный подход. За основу могут быть взяты одни из апробированных норм для сварных конструкций одного типа машин и сняты требования к качеству соединений, которые не связаны с влиянием дефектов на несущую способность конструкций.

ГЛАВА 4

ДОСТОВЕРНОСТЬ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

4.1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ ДОСТОВЕРНОСТИ КОНТРОЛЯ

Важнейшим показателем, определяющим эффективность контроля, является его достоверность. Под достоверностью контроля D понимают вероятность принятия безошибочных решений при оценке качества изделия [1, 2]. Для определения показателей достоверности необходимо оценить значения возможных ошибок контроля. Ошибка 1-го рода: риск поставщика α (перебраковка). Ошибка 2-го рода: риск потребителя β (недобраковка). Достоверность контроля может быть рассчитана по формулам:

$$D_{\alpha} = 1 - \alpha;$$

$$D_{\beta} = 1 - \beta;$$

$$D_{\Sigma} = 1 - (\alpha + \beta).$$

Показатель достоверности D_{α} учитывает перебраковку, D_{β} - недобраковку. Наиболее широко применяется показатель D_{Σ} [1, 2, 55, 56], который учитывает как перебраковку, так и недобраковку и, следовательно, защищает интересы как поставщика, так и потребителя. При использовании показателя D_{Σ} принимают, что ошибки, связанные с недобраковкой и перебраковкой, равноценны (критерий идеального наблюдателя) [57-59]. На практике же недобраковка, как правило, опаснее перебраковки. Учитывая, что каждой ошибке при оценке качества продукции (табл. 4.1) можно поставить некоторую плату (или риск), и принимая для безошибочных решений эту плату равной нулю, средний риск можно вычислить по формуле [58-60]:

$$R_{cp} = r_{\alpha} \alpha + r_{\beta} \beta,$$

где r_{α} и r_{β} - плата за перебраковку и недобраковку соответственно.

При проведении контроля следует отдать предпочтение такому браковочному уровню, при котором средний риск будет минимален. Это соответствует критерию минимума среднего риска, который является более общим по отношению к критерию идеального наблюдателя. Если недобраковка опаснее перебраковки в V раз в стоимостном выражении, оптимум будет соответствовать минимальному значению $\alpha + V\beta$ (критерий Байеса) [58, 60, 61]. Для использования критериев минимума среднего риска и Байеса необходимо установить стоимость ошибок, что достаточно сложно, а иногда для недобраковки и невозможно. Поэтому в некоторых случаях выдвигают задачу, чтобы β не превосходила некоторого значения β_0 . Это критерий Неймана-Пирсона [58, 61]. Однако этот подход не учитывает возможность перебраковки.

Возможны два вида оценок достоверности - по количественному и альтернативному признакам.

Оценка достоверности по количественному признаку связана с моделированием условной границы раздела продукции на годную и негодную и нахождения ошибок 1-го и 2-го рода. Для такой оценки достоверности необходимо знать вид распределения дефектов и оперативную характеристику контроля $L(x)$ или ее разновидность - функцию выявляемости дефектов $W(x) = 1 - L(x)$ [2].

Функцией выявляемости дефектов $W_i(x)$ называют кривую, показывающую степень (вероятность) выявления данным методом дефектов заданных размеров x_i (рис 4.1). Величина размаха кривой $\pm \Delta x$ зависит от реальной чувствительности контроля и от размера дефекта. Для более крупных дефектов функция выявляемости $W_2(x)$ более крутая, а размах Δx меньше, чем для дефектов меньшего размера.

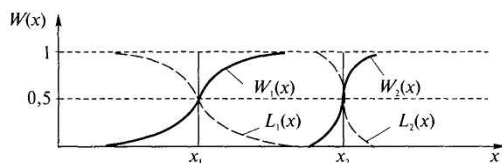


Рис. 4.1. Характер кривых выявляемо $W_i(x)$ для дефектов заданного размера x_i

В идеальном случае кривая $W_i(x)$ может быть найдена как интегральная функция $F_b(x) = F(x/y)$ кривой ошибок, являющейся плотностью $f_b(x)$ нормального распределения (рис. 4.2, а) [2]. При этом кривые ошибок $f_b(x)$ и $f_b(y)$ соответствуют плотностям условных распределений $f(x/y)$ и $f(y/x)$, которые могут быть найдены по уравнению регрессии, отражающей корреляционную связь между сигналами y от дефектов и их реальными размерами x (рис. 4.2, б). Характеристики $W(x)$ и $L(x)$ отражают только возможности конкретного метода контроля по выявлению дефектов, но не учитывают распределения реальных дефектов $f_p(x)$ в изделиях. Как показано в [главе 3](#), на распределение дефектов по размерам значительное влияние оказывают тип соединения и толщина свариваемых элементов.

Композиция кривых $W(x)$ и $f_p(x)$ дает распределение обнаруживаемых дефектов с плотностью $f_0(x)$ (рис. 4.3) [2]:

$$f_0(x) = f_p(x) W(x).$$

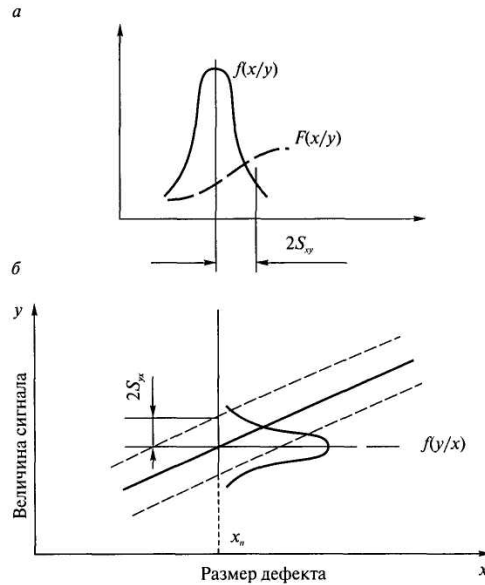


Рис. 4.2. Определение функции выявляемости $W_i(x)$ как интегральной функции $F_b(x)$ кривой ошибок $f_b(x) = f(x/y)$

Рекомендуется графический расчет оценки достоверности контроля. Нормативная величина дефекта делит поле дефектности на четыре области: не обнаруженные (1 и 2) дефекты - допустимые (1) или недопустимые (2) и обнаруженные (3 и 4) - недопустимые (3) или допустимые (4). Вероятность P_r (область 1) наличия годных элементов характеризует общую их засоренность малозначительными дефектами. Вероятность P_n (область 3) отражает наличие негодных элементов и особенности контроля - по степени усечения области 3 функцией выявляемости. Области ошибок 2 и 4 соответствуют вероятностям P_β и P_α и аналогичны рискам потребителя β и поставщика α .

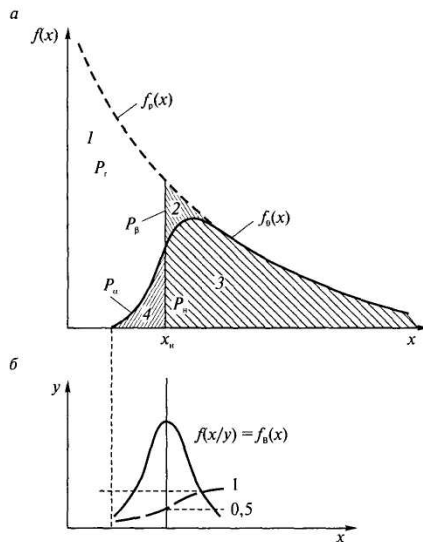


Рис. 4.3. Схема формирования распределения обнаруженных дефектов

Ошибки контроля могут быть найдены по формулам:

$$P_\alpha = \int_0^\infty f_0(x) dx - \int_{x_n}^\infty f_0(x) dx;$$

$$P_\beta = \int_{x_n}^\infty f_p(x) dx - \int_{x_n}^\infty f_0(x) dx.$$

При расчетах необходимо учитывать, что ошибки контроля P_α и P_β , найденные с использованием $f_p(x)$ $f_0(x)$, учитывают только элементы, содержащие дефекты.

Наряду с рассмотренной точечной $x = x_n$ оценкой достоверности может быть использована интервальная $x_0 < x_n \leq x_m$ оценка (рис. 4.4) [2]. Заштрихованные площади правее x_m и левее x_0 соответствуют интервальным ошибкам контроля P'_β и P'_α . Таким образом, ошибки контроля могут быть существенно снижены ($\beta' < \beta$ и $\alpha' < \alpha$). Однако интервальная оценка достоверности контроля сварных соединений конструкций машин невозможна, так как в этом случае необходимо использование интервальной формы назначения норм допустимых дефектов. При интервальном назначении норм допустимых дефектов вводится категория условно годных элементов (например, элементы содержат дефекты, но элементы можно усилить без устранения дефектов, чтобы их работоспособность соответствовала предъявляемым требованиям). В настоящее время интервальная форма назначения норм нашла применение только при обосновании допустимой дефектности стыков арматуры [62].

Следует отметить, что оценка достоверности по количественному признаку затруднительна из-за необходимости знания априорных характеристик генеральных совокупностей рассматриваемых величин, а также сложности и возможной значительной погрешности выполнения графических расчетов.

Оценка достоверности по альтернативному признаку нашла более широкое применение [1, 2, 55, 56]. При этом производится сравнение исследуемого метода контроля с образцовым, в качестве которого рекомендуется вскрытие швов. Используется матрица достоверности (см. табл. 4.1), предложенная в работах [1, 2].

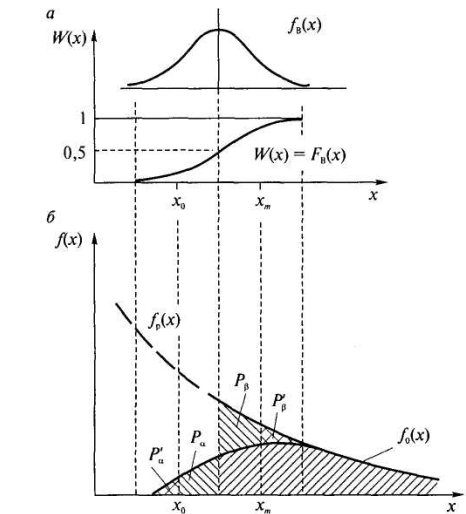


Рис. 4.4. Модель интервальной оценки достоверности по количественному признаку: а - кривые выявляемости $f_b(x)$ и $F_b(x)$; б - распределения $f_p(x)$ и $f_0(x)$

Таблица 4.1

Число проконтролированных элементов $n_\Sigma = n_\Gamma + n_n + n_\alpha + n_\beta$		Образцовый метод (вскрытие)	
		Годные	Негодные
Пробный метод	Годные	Дважды годные n_Γ	Недобраковка n_β
	Негодные	Перебраковка n_α	Дважды негодные n_n

Возможны четыре варианта сочетаний принятия решений: n_Γ , n_n , n_α и n_β . Несовпадающим сочетаниям n_α и n_β соответствует риск поставщика α (перебраковка) и риск потребителя β (недобраковка). Достоверность может быть рассчитана по формулам:

$$D_\alpha = (n_\Sigma - n_\alpha)/n_\Sigma = 1 - n_\alpha/n_\Sigma;$$

$$D_\beta = (n_\Sigma - n_\beta)/n_\Sigma = 1 - n_\beta/n_\Sigma;$$

$$D_\Sigma = (n_\Sigma - n_\alpha - n_\beta)/n_\Sigma = 1 - (n_\alpha + n_\beta)/n_\Sigma.$$

Так как недобраковка опаснее перебраковки, можно сделать вывод, что показатель D_Σ достаточно хорошо защищает интересы поставщика и не в полной мере потребителя. Учитывая это, предлагается совместно с показателем D_Σ использовать показатель D_β , который учитывает только недобраковку.

Рассмотрим корреляционные поля регрессий «амплитуда ультразвукового сигнала А - глубина непровара h » (рис 4.5), полученные по результатам ультразвукового контроля и вскрытия соединений, сваренных с соблюдением штатной технологии.

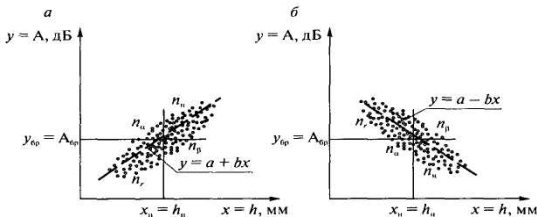


Рис 4.5. Графическая модель точечной оценки достоверности ультразвукового контроля эхо-методом (а) и зеркально-теньевым методом (б) по альтернативному признаку (распределения экспериментальных точек): n_Γ , n_n - дважды годные и дважды негодные элементы сварных соединений соответственно; n_α , n_β - перебраковка и недобраковка соответственно

Границы, соответствующие нормативно-допустимому дефекту h_n и принятому браковочному уровню амплитуды ультразвукового сигнала $A_{бр}$, делят корреляционное поле на четыре области, отвечающие по смыслу четырем клеткам матрицы достоверности: n_Γ , n_n , n_α ,

n_{β} .

На рис. 4.6 распределения экспериментальных точек заменены теоретическими распределения вероятностей P_{Γ} , P_{Π} , P_{β} и P_{α} .

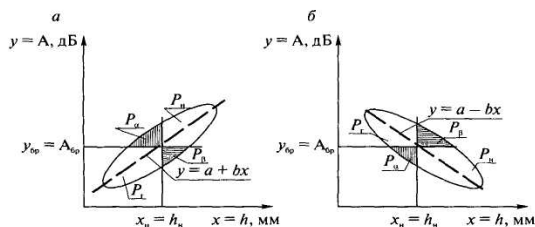


Рис 4.6. Графическая модель точечной оценки достоверности ультразвукового контроля эхо-методом (а) и зеркально-теньевым методом (б) по альтернативному признаку (теоретические распределения):

P_{Γ} , P_{Π} - области правильной оценки годных и негодных элементов сварных соединений соответственно;

P_{α} , P_{β} - области перебраковки и недобраковки соответственно

В этом случае значения вероятностей P_{Γ} , P_{Π} , P_{β} и P_{α} можно определить по следующим формулам:

при эхо-методе

$$P_{\alpha} = \int_{y_{6p}}^{\infty} \int_0^{x_n} P(x, y) dx dy;$$

$$P_{\beta} = \int_0^{y_{6p}} \int_{x_n}^{\infty} P(x, y) dx dy;$$

$$P_{\Pi} = \int_{y_{6p}}^{\infty} \int_{x_n}^{\infty} P(x, y) dx dy;$$

$$P_{\Gamma} = \int_0^{y_{6p}} \int_0^{x_n} P(x, y) dx dy;$$

при зеркально-теньевом методе

$$P_{\alpha} = \int_0^{y_{6p}} \int_0^{x_n} P(x, y) dx dy;$$

$$P_{\beta} = \int_{y_{6p}}^{\infty} \int_{x_n}^{\infty} P(x, y) dx dy;$$

$$P_{\Pi} = \int_0^{y_{6p}} \int_{x_n}^{\infty} P(x, y) dx dy;$$

$$P_{\Gamma} = \int_{y_{6p}}^{\infty} \int_0^{x_n} P(x, y) dx dy;$$

Однако использование теоретических распределений значительно усложняет оценку достоверности, так как при этом возникает необходимость определения законов распределения исследуемых величин [63]. Поэтому, как правило, при расчетах D_{Σ} и D_{β} используют эмпирические корреляционные поля регрессий «амплитуда ультразвукового сигнала А - глубина непровара h». При этом необходимо иметь в виду, что корреляционные поля не содержат «точек», соответствующих элементам, в которых дефекты были пропущены при ультразвуковом контроле (в зависимости от размера дефекта дополняют группы n_{Γ} и n_{β}).

Принимая ряд значений гипотетически за A_{6p} , на основе корреляционных полей «амплитуда ультразвукового сигнала А - глубина дефекта h» можно получить зависимость показателей достоверности D_{Σ} и D_{β} от браковочного уровня A_{6p} [56]. При $h_n < h_{cp}$ (рис. 4.7, а, б, в) максимальная достоверность обеспечивается при минимальном браковочном уровне $A_{6p} = A_{6p1}$ и с увеличением браковочного уровня $A_{6p1} < A_{6p2} < A_{6p3}$ достоверность D_{Σ} снижается ($n_{\alpha11} + n_{\beta11} < n_{\beta12} < n_{\beta13}$). Если $h_n \approx h_{cp}$ (рис. 4.7, з, д, е), то зависимость D_{Σ} от A_{6p} имеет максимум при $A_{6p} \approx A_{6p2}$ ($n_{\alpha22} + n_{\beta22} < n_{\alpha21}$ и $n_{\alpha22} + n_{\beta22} < n_{\beta23}$). В случае $h_n > h_{cp}$ (рис. 4.7, ж, з, и) зависимость D_{Σ} от A_{6p} возрастающая ($n_{\alpha33} + n_{\beta33} < n_{\alpha32} < n_{\alpha31}$).

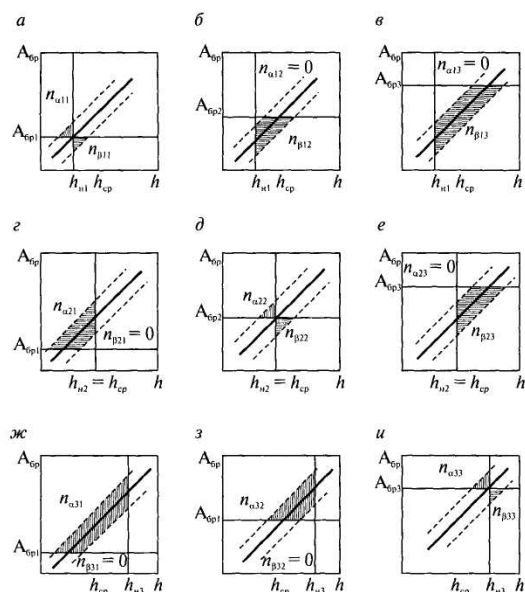


Рис. 4.7. Влияние на ошибки контроля n_a , n_p величин нормативного размера h_n дефекта и браковочного уровня $A_{бp}$ (эхо-метод)

Следовательно, характер влияния $A_{бp}$ на показатель D_Σ определяется нормативно-допустимыми размерами h_n дефекта (рис. 4.8, а). Так как с увеличением $A_{бp}$ вероятность недобраковки возрастает (см. рис. 4.7), зависимости «показатель достоверности D_β - браковочный уровень $A_{бp}$ » «падающие» (рис 4.8, б), причем для более крупных дефектов вероятность недобраковки меньше. Анализируя влияние на ошибки контроля величины браковочного уровня $A_{бp}$, можно сделать вывод, что если нормативный размер дефекта достаточно мал, то вероятность перебраковки тоже мала и значения показателей D_Σ и D_β близки. Таким образом, могут быть выбраны браковочные уровни, обеспечивающие практически максимальные значения как показателя D_Σ , так и показателя D_β . При этом отпадает необходимость в такой сложной процедуре, как установление стоимости ошибок.

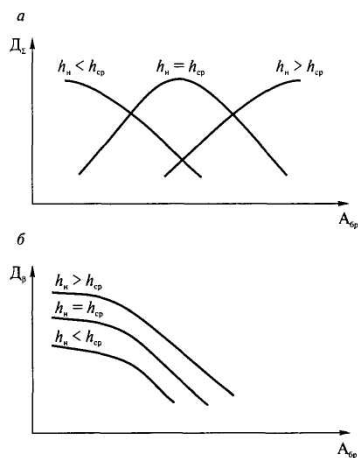


Рис 4.8. Качественная картина зависимости показателей достоверности D_Σ (а) и D_β (б) от величины браковочного уровня $A_{бp}$ для различных нормативных размеров h_n дефектов

Следует отметить, что с повышением качества сварки (уменьшением количества дефектных элементов) вероятность недобраковки и перебраковки уменьшается и значение показателей D_Σ и D_β возрастает.

4.2. ОЦЕНКА ДОСТОВЕРНОСТИ КОНТРОЛЯ СТЫКОВЫХ ШВОВ

При выборе браковочных уровней амплитуд ультразвуковых сигналов и оценке достоверности дефектоскопии стыковых швов исследовали соединения, сваренные с соблюдением штатной технологии (использовали распределения экспериментальных точек). Схема выбора браковочного уровня при ультразвуковом контроле стыковых швов приведена на рис 4.9. На основе анализа полученных по результатам ультразвукового контроля и вскрытия корреляционных полей «амплитуда ультразвукового сигнала A - глубина h непровара» (см. главу 2) для принятых нормативно-допустимых размеров h_n дефектов были определены зависимости «достоверность ультразвукового контроля D_Σ (D_β) - браковочный уровень $A_{бp}$ » (рис. 4.10 - 4.12).

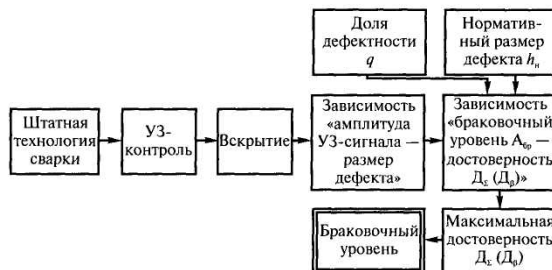


Рис 4.9. Схема выбора браковочного уровня при ультразвуковом контроле стыковых швов

Принятые браковочные уровни $A_{бр}$ (табл. 4.2) обеспечивают практически максимальные значения как показателя D_z , так и показателя D_b . При этом даже для крупных дефектов снижения значений показателей по отношению к максимальным значениям не превышают 5 %.

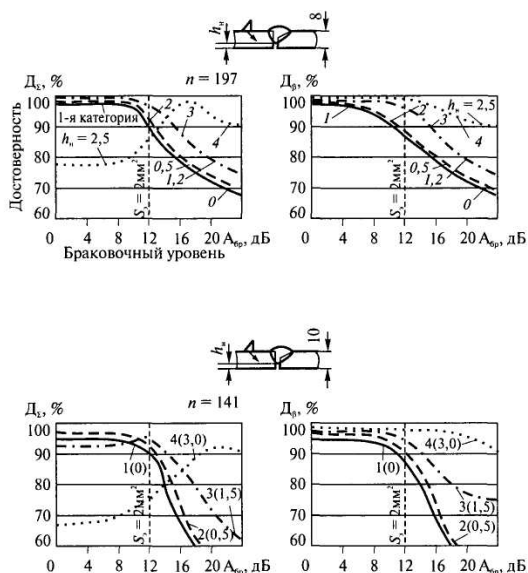


Рис 4.10. Влияние браковочного уровня $A_{бр}$ на показатели достоверности D_z и D_b ультразвукового контроля эхо-методом односторонних стыковых соединений

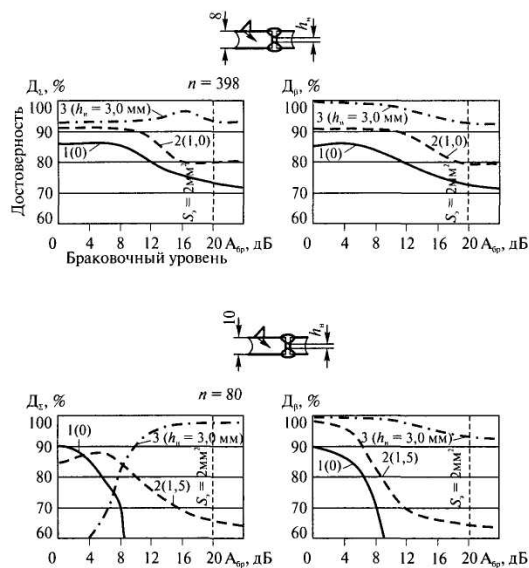


Рис 4.11. Влияние браковочного уровня $A_{бр}$ на показатели достоверности D_z и D_b ультразвукового контроля эхо-методом двухсторонних стыковых соединений

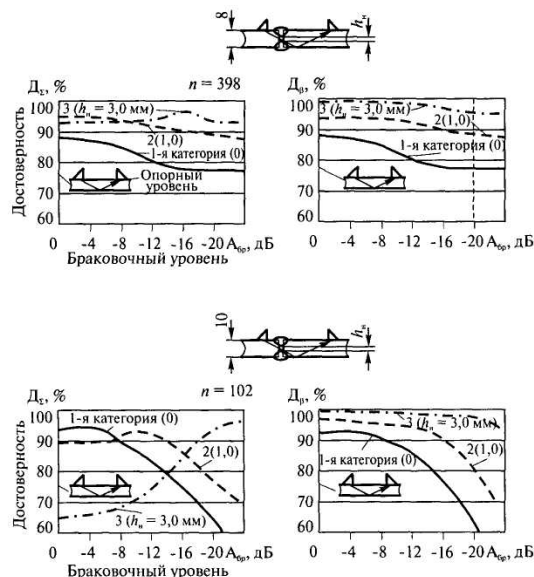


Рис 4.12. Влияние браковочного уровня $A_{бр}$ на показатели достоверности D_{Σ} и D_{ρ} ультразвукового контроля зеркально-теньевым методом двухсторонних стыковых соединений

Таблица 4.2

Разность между браковочными ($A_{бр}$) и опорными (A_0) уровнями амплитуд ультразвуковых сигналов при дефектоскопии стыковых соединений

Типы соединений (ГОСТ 5264-80 , ГОСТ 8713-79 , ГОСТ 14771-76)		C2	C5		C8		C7	
Толщины, мм		6	7	8	8	10	8	10
Категории	1-я	-4	-	-	-4	-4	-18*/-2	-2*0/-2
	2-я	-4	-	-	-4	-4	-18*/-2	-14*/-12
	3-я	-4	-4	-4	-4	-2	-6*/-16	-4*/-24
	4-я	4	4	4	4	10	-	-

Примечание. Опорный уровень A_0 при эхо-методе соответствует $S_{жв} = 2 \text{ мм}^2$, а при зеркально-теньевом методе - амплитуде ультразвукового сигнала, прошедшего от генератора к приемнику на пластине, толщина которой равна толщине свариваемых листов.

* Числитель - контроль эхо-методом, знаменатель - контроль зеркально-теньевым методом.

Сопоставление результатов ультразвукового контроля двухсторонних стыковых соединений зеркально-теньевым и эхо-методом и их вскрытия позволяет сделать вывод, что мелкие дефекты (соединения 1-й и 2-й категории) с большой достоверностью выявляются зеркально-теньевым методом. Однако технология его проведения более сложная. Достоверность контроля сварных соединений, в которых допустимы достаточно крупные дефекты (соединения 3-й категории), практически одинаковая при использовании обоих методов. Рекомендуемые значения браковочных уровней амплитуд ультразвуковых сигналов (см. табл. 4.2) при контроле исследуемых соединений позволяют обеспечить достаточно высокие значения как показателя D_{Σ} , так и показателя D_{ρ} . Значения этих показателей лежат в диапазоне 86-99 %.

4.3. ОЦЕНКА ДОСТОВЕРНОСТИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ УГЛОВЫХ ШВОВ

В угловых швах, так же как и в стыковых, наиболее распространенными внутренними дефектами являются непровары. Однако доля дефектности по ним существенно меньше. Выбор браковочных уровней амплитуд ультразвуковых сигналов целесообразно проводить в два этапа (рис. 4.13). Проведена оценка достоверности контроля тавровых соединений. На первом этапе ультразвуковому контролю и вскрытию подлежали сварные соединения, в которых специальной манипуляцией сварочной горелкой обеспечивалось повышенное содержание непроваров (из 344 элементов 174 содержали дефекты). Исследования показали, что при браковочном уровне амплитуды эхо-сигнала, меньшем уровня амплитуды, соответствующего $S_{жв} = 2 \text{ мм}^2$, на 6 дБ, обеспечивается выявление всех дефектов. При контроле соединений, сваренных с соблюдением штатной технологии (второй этап), 148 из 721 элемента имели амплитуды эхо-сигналов из корня шва, превышающие этот браковочный уровень. Из них 31 элемент, как показало вскрытие, содержал непровары. На основе полученных данных о распределении амплитуд эхо-сигналов, соответствующих качественным (рис. 4.14, а) и дефектным (рис. 4.14, б) сварным швам, была проведена оценка влияния браковочного уровня ρ на показатели достоверности D_{Σ} и D_{ρ} (рис. 4.14, в).

Максимальное значение показателя достоверности $D_{\Sigma} \approx 98 \%$ обеспечивается при браковочном уровне, превышающем амплитуду эхо-сигнала, соответствующую $S_{жв} = 2 \text{ мм}^2$, на 5-7 дБ (рис. 4.14, в). При этом $D_{\rho} \approx 99 \%$.

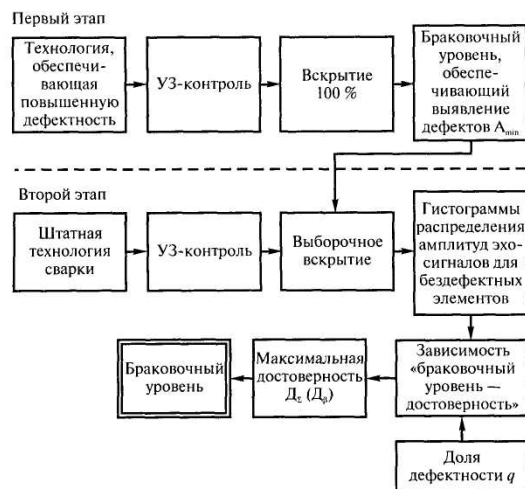


Рис. 4.13. Схема выбора браковочного уровня при ультразвуковом контроле угловых сварных швов

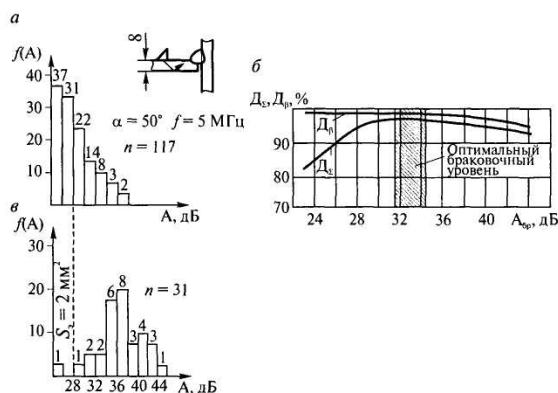


Рис. 4.14. Гистограммы распределения амплитуд эхо-сигналов для качественных (а) и дефектных (б) швов и влияние браковочного уровня $A_{бр}$ на показатели достоверности D_s и D_r ультразвукового контроля тавровых соединений (в)

ГЛАВА 5

ОРГАНИЗАЦИОННОЕ И СПРАВОЧНО-АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАБОТ ПО НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ

5.1. КОНЦЕПЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМОЙ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ И ОСНОВНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ ЕЕ РАЗВИТИЯ

Использование самых совершенных методов неразрушающего контроля еще не является гарантией качества (бездефектности) проверенных изделий, если контроль осуществляет неквалифицированный специалист, используются ненадлежащие методические документы и средства контроля и отсутствует независимый контроль за структурными подразделениями организаций, осуществляющими работы по неразрушающему контролю. Важная роль в повышении эффективности неразрушающего контроля технических устройств и сооружений, применяемых на опасных производственных объектах, принадлежит организационному и справочно-аналитическому обеспечению работ, потребовавшему создания Системы неразрушающего контроля Госгортехнадзора России. Для обеспечения достоверного неразрушающего контроля должны быть реализованы возможности применяемых технических средств и методических документов, введены современные требования к аттестации персонала и управлению деятельностью структурных подразделений, осуществляющих неразрушающий контроль.

На основе анализа состояния вопроса по организации неразрушающего контроля в стране и за рубежом разработана и Госгортехнадзором России утверждена в 1999 году Концепция управления Системой неразрушающего контроля и основные направления ее развития [64]. Цель Концепции - определение основных задач, структуры и организационной схемы управления, а также основных направлений развития единой системы обеспечения эффективности и достоверности неразрушающего контроля.

Актуальность совершенствования неразрушающего контроля определялась следующими обстоятельствами:

- отсутствием единой системы организации и управления деятельностью подразделений, осуществляющих неразрушающий контроль;
- образованием многочисленных независимых производственных структур, которые, не имея систем контроля качества, занимаются разработкой и производством средств неразрушающего контроля;
- необоснованным применением средств неразрушающего контроля на ряде опасных производственных объектов;
- развитием межгосударственных интеграционных процессов, требующих формирования единых требований и критериев оценки персонала и лабораторий неразрушающего контроля;
- необходимостью адаптации существующей методической документации по неразрушающему контролю к условиям применения ее на опасных производственных объектах;
- отсутствием единого подхода к выбору (назначению) видов, методов и средств контроля, а также к определению общих требований к методической документации по неразрушающему контролю;
- отсутствием системного анализа и механизмов принятия решений о целесообразности и возможности использования средств неразрушающего контроля, морально устаревших и не полностью учитывающих новейшие технические, методические и организационные достижения в области неразрушающего контроля;
- наличием большого количества методических документов по неразрушающему контролю, разработанных для контроля многочисленных объектов надзора, идентичных по технической и организационно-методической сущности, но имеющих разные индексы и области применения, которые целесообразно сделать едиными.

В соответствии с Концепцией введена аттестация лабораторий, персонала, методических документов и средств неразрушающего

контроля.
При разработке Концепции использованы опыт применения Правил аттестации специалистов неразрушающего контроля [65], документов по аттестации лабораторий, осуществляющих неразрушающий контроль объектов котлонадзора и подъемных сооружений [66], результаты работы организаций, выполняющих работы по аттестации специалистов и лабораторий неразрушающего контроля, а также учтены требования международных норм [67-69].

Реализация Концепции требовала решения следующих задач: создание организационных структур по проведению аттестации; разработка и утверждение нормативных документов по проведению аттестации; проведение организационных мероприятий по внедрению процедуры аттестации. Встала задача развития составляющих подсистем Системы неразрушающего контроля: аттестации персонала; аттестации лабораторий; аттестации методической документации; аттестации технических средств (по всем видам и методам неразрушающего контроля). Важнейшим направлением развития Системы неразрушающего контроля является разработка единых требований по каждому из элементов Системы.

5.2. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ СИСТЕМЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

В [70] дано определение Системы неразрушающего контроля как совокупности участников, которые в рамках регламентирующих норм, правил, методик, условий, критериев и процедур осуществляют деятельность в области неразрушающего контроля - одного из видов экспертизы промышленной безопасности, связанной с применением средств неразрушающего контроля.

Система неразрушающего контроля охватывает деятельность по изготовлению, строительству, монтажу, ремонту, консервации, реконструкции, эксплуатации и экспертизе объектов с применением различных методов неразрушающего контроля: радиационного, акустического (ультразвукового), акустико-эмиссионного, магнитного, вихретокового, электрического, оптического, визуально-измерительного, вибродиагностического, теплового и проникающими веществами.

Целью Системы является повышение уровня эксплуатационной безопасности технических устройств, зданий и сооружений, применяемых и эксплуатируемых на опасных производственных объектах, достигаемое за счет повышения достоверности, воспроизводимости, сопоставимости результатов неразрушающего контроля и принятия своевременных и адекватных решений по обеспечению промышленной безопасности.

Основные задачи Системы неразрушающего контроля:
совершенствование организационно-методического и научно-технического обеспечения деятельности в области неразрушающего контроля;

повышение квалификации персонала, компетентности лабораторий, технического уровня методических документов и средств неразрушающего контроля;

гармонизация правил и процедур Системы с требованиями и критериями международных и европейских стандартов по неразрушающему контролю;

аттестация персонала, лабораторий, методических документов и средств неразрушающего контроля;

формирование банка данных аттестованного персонала, лабораторий, методических документов, средств неразрушающего контроля и информационное обеспечение Системы.

Принципиальная схема организации деятельности по неразрушающему контролю в рамках Системы экспертизы промышленной безопасности представлена на рис. 5.1.

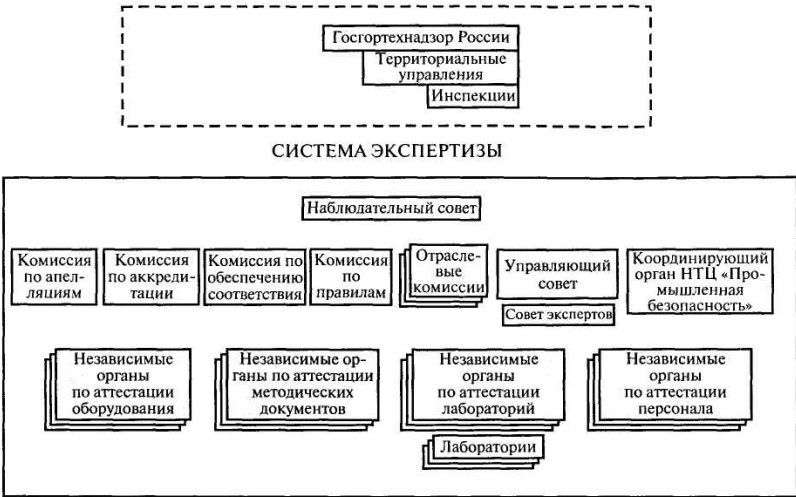


Рис. 5.1. Принципиальная схема Системы экспертизы промышленной безопасности

Участниками Системы неразрушающего контроля являются: Наблюдательный совет Системы экспертизы промышленной безопасности, Управляющий совет по неразрушающему контролю, Совет экспертов по неразрушающему контролю, Комиссия по аккредитации Системы экспертизы промышленной безопасности, Комиссия по апелляциям Системы экспертизы промышленной безопасности, Комиссия по обеспечению соответствия Системы экспертизы промышленной безопасности, Комиссия по правилам Системы экспертизы промышленной безопасности, отраслевые комиссии Системы экспертизы промышленной безопасности; Координирующий орган Системы экспертизы промышленной безопасности, Независимые органы по аттестации персонала, Независимые органы по аттестации лабораторий, Независимые органы по аттестации средств неразрушающего контроля, Независимые органы по аттестации методических документов по неразрушающему контролю и аттестованные лаборатории неразрушающего контроля.

Наблюдательный совет осуществляет организацию и контроль деятельности Системы неразрушающего контроля в рамках Системы экспертизы промышленной безопасности. Управляющий совет определяет основные направления деятельности в области неразрушающего контроля, принимает решения по реализации единой технической политики в Системе неразрушающего контроля и участвует в процессе аккредитации Независимых органов. Совет экспертов на основе экспертной деятельности разрабатывает предложения по совершенствованию работ в области неразрушающего контроля, методологии и путей практического развития Системы неразрушающего контроля. Комиссия по аккредитации совместно с Управляющим советом по результатам рассмотрения соответствующих отраслевых комиссий принимает решения об аккредитации Независимых органов. Комиссия по апелляциям занимается рассмотрением жалоб относительно решений о возможности аккредитации, жалоб заказчиков к деятельности лабораторий неразрушающего контроля и др.

Комиссия по обеспечению соответствия планирует и проводит мероприятия, подтверждающие, что деятельность участников Системы неразрушающего контроля в области аккредитации отвечает требованиям регламентирующих ее документов. Комиссия по правилам совместно с ведущими организациями в области неразрушающего контроля разрабатывает правила и процедуры Системы неразрушающего контроля (по проведению аккредитации, по аттестации экспертов и др.). Отраслевые комиссии решают базовые,

профессиональные задачи в областях, соответствующих их компетенции, в том числе о возможности аккредитации. Координирующий орган координирует деятельность участников Системы; ведет документацию по аккредитации Независимых органов, оформляет свидетельства об аккредитации и приложения к ним; оформляет и издает нормативные документы, действующие в системе аккредитации; организует и проводит совместно с отраслевыми комиссиями проверки Независимых органов и их периодический контроль; проводит аттестацию и периодический контроль лабораторий; выдает свидетельства об аттестации и ведет перечень аттестованных лабораторий; осуществляет аттестацию экспертов и ведение реестров в Системе неразрушающего контроля. Независимые органы в соответствии с областью аккредитации: проводят аттестацию персонала, лабораторий, методических документов и средств неразрушающего контроля; выдают аттестационные документы установленной формы; ведут перечни аттестованного персонала, лабораторий, методических документов и средств неразрушающего контроля. Аттестованные лаборатории проводят неразрушающий контроль в соответствии с требованиями действующих документов по неразрушающему контролю.

Нормативную и методическую базу Системы неразрушающего контроля составляют: законодательство Российской Федерации в области промышленной безопасности; документы Системы экспертизы промышленной безопасности; документы, устанавливающие правила аттестации и требования к организациям, осуществляющим аттестацию лабораторий, персонала, методических документов и средств неразрушающего контроля; международные и государственные стандарты по неразрушающему контролю; документы, регламентирующие требования к изготовлению, строительству, монтажу, ремонту (реконструкции) и другим видам деятельности на зданиях, сооружениях и технических устройствах, подлежащих неразрушающему контролю; методические документы по неразрушающему контролю; реестр аккредитованных Независимых органов и реестры аттестованного персонала, лабораторий, методических документов и средств неразрушающего контроля; справочная и другая информация по неразрушающему контролю.

5.3. ФОРМИРОВАНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ СИСТЕМЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Работа по реализации Концепции управления Системой неразрушающего контроля и основных направлений ее развития проводилась по следующим основным направлениям:

- разработка нормативных документов;
- формирование необходимых организационных структур;
- информационно-аналитическое обеспечение выполняемых работ.

ФГУП «НТЦ «Промышленная безопасность» разработаны и Наблюдательным советом приняты три документа, которые являются общими для Системы: Положение о Системе неразрушающего контроля, Положение об Управляющем совете по неразрушающему контролю, Положение о Совете экспертов по неразрушающему контролю. По каждому направлению аттестации разработаны два типа документов: положение о Независимом органе по аттестации в соответствующей области и правила аттестации, в которых определены требования к аттестуемому элементу Системы неразрушающего контроля и порядок аттестации. За период с 2000 по 2002 год была разработана нормативно-методическая база по аттестации лабораторий и персонала в области неразрушающего контроля: Правила аттестации и основные требования к лабораториям неразрушающего контроля (ПБ 03-372-00), Положение о Независимом органе по аттестации лабораторий неразрушающего контроля, Правила аттестации персонала в области неразрушающего контроля (ПБ 03-440-02), Положение о Независимом органе по аттестации персонала в области неразрушающего контроля (ведущие организации-разработчики - ФГУП «НТЦ «Промышленная безопасность» и НУЦ «Сварка и контроль»). Ведущими организациями - разработчиками документов в области аттестации методических документов и средств неразрушающего контроля являлись ГНЦ НПО ЦНИИТМАШ и МНПО «Спектр». Документы по аттестации средств и методических документов по неразрушающему контролю - Правила аттестации средств неразрушающего контроля, Положение о Независимом органе по аттестации средств неразрушающего контроля, Правила аттестации методических документов по неразрушающему контролю, Положение о Независимом органе по аттестации методических документов по неразрушающему контролю приняты решением Наблюдательного совета в 2004 году.

Сформированы составы и приступили к работе Управляющий совет и Совет экспертов. Управляющий совет и Совет экспертов осуществляют свою деятельность в соответствии с положениями, принятыми решением Наблюдательного совета Системы экспертизы промышленной безопасности, причем Совет экспертов в своей работе дополнительно руководствуется планами работ секций по видам (методам) неразрушающего контроля.

Независимые органы аккредитуются в Системе экспертизы промышленной безопасности на право выполнения работ по аттестации персонала в соответствующих областях, определяемых видами контролируемых технических устройств и сооружений (отраслями надзора), видами (методами) неразрушающего контроля и уровнями квалификации. Более 50 % Независимых органов выполняют работы не менее чем в 5 отраслях надзора по 6 видам (методам) неразрушающего контроля. На 01.01.04 г. в соответствии с ПБ 03-440-02 аттестовано около 10 000 специалистов неразрушающего контроля. Распределение аттестованных специалистов неразрушающего контроля по объектам контроля (отраслям надзора) приведено на рис. 5.2. Наиболее часто специалисты неразрушающего контроля аттестуются по ультразвуковому, радиационному, проникающими веществами, магнитному и визуально-измерительному контролю (рис. 5.3).

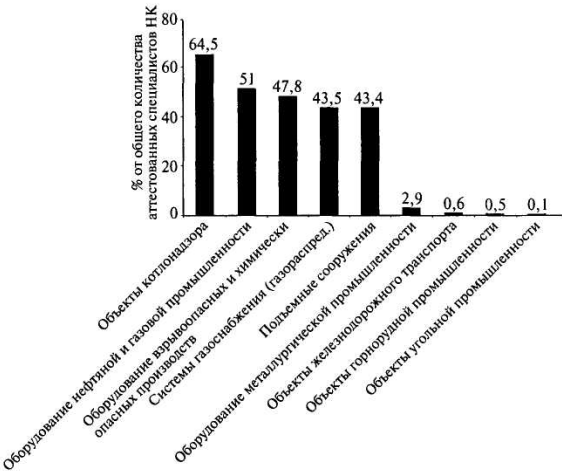


Рис. 5.2. Распределение аттестованных специалистов неразрушающего контроля (НК) по объектам контроля (отраслям надзора)

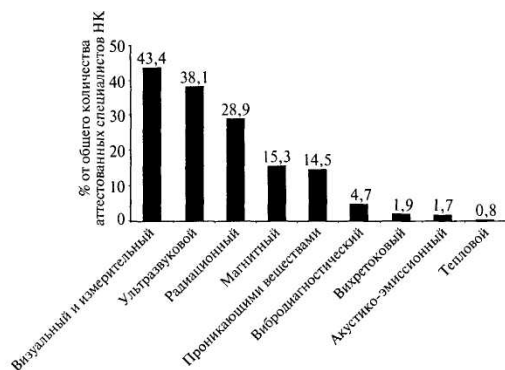


Рис. 5.3. Распределение аттестованных специалистов неразрушающего контроля (НК) по видам (методам) контроля

Введение в действие [ПБ 03-440-02](#) позволило с учетом последней версии европейских норм EN 473:2000 регламентировать: компетентность и аттестацию персонала по трем уровням квалификации (I, II и III); требования к общей и специальной подготовке кандидатов на аттестацию (по образованию, минимальному стажу работы), содержанию и процедурам экзаменов, которые отражали бы единые требования, порядок организации деятельности по подготовке и аттестации; единые подходы, процедуры, условия всех этапов прохождения экзаменов, в том числе организационные вопросы; составы экзаменационных комиссий; единые требования к специальным экзаменационным вопросам и экзаменационным образцам; систему комплексной оценки по результатам всех предусмотренных экзаменов; форму квалификационного удостоверения.

Независимые органы аккредитуются на право выполнения работ по аттестации лабораторий в соответствующих областях аккредитации, определяемых видами контролируемых технических устройств и сооружений (отраслями надзора) и видами (методами) неразрушающего контроля. Более 50 % Независимых органов по аттестации лабораторий выполняют работы не менее чем в пяти отраслях надзора по семи видам (методам) контроля. На 01.01.04 г. аттестовано 2294 лаборатории неразрушающего контроля. Распределения аттестованных лабораторий по объектам контроля (отраслям надзора) и видам (методам) неразрушающего контроля приведены на рис. 5.4, 5.5.

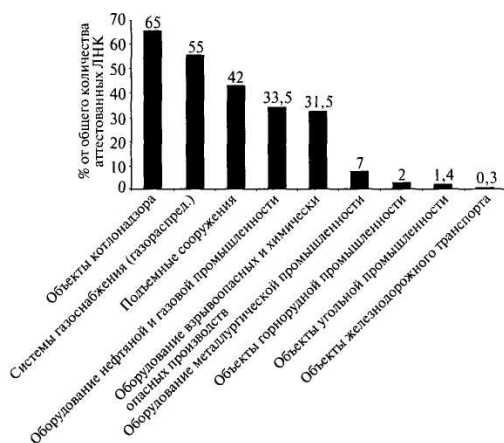


Рис. 5.4. Распределение аттестованных лабораторий неразрушающего контроля (ЛНК) по объектам контроля (отраслям надзора)

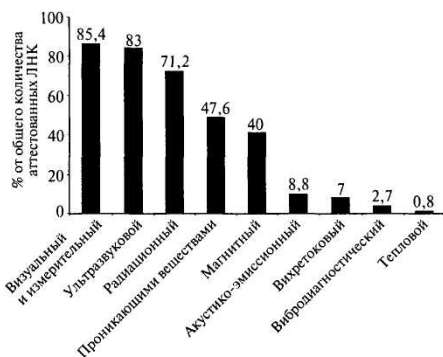


Рис. 5.5. Распределение аттестованных лабораторий (ЛНК) по видам (методам) неразрушающего контроля

Работы по аттестации лабораторий стали еще более актуальными после введения Федерального закона от 08.08.01 [№ 128-ФЗ](#) «О лицензировании отдельных видов деятельности», которым значительно уменьшен перечень лицензируемых видов деятельности, в том числе отменено лицензирование работ по проведению неразрушающего контроля при изготовлении, строительстве, ремонте (реконструкции), монтаже и эксплуатации технических устройств и сооружений на опасных производственных объектах.

Аттестация лабораторий позволила унифицировать:
во-первых, организационные формы лабораторий, их структуру, подчиненность, взаимоотношения с другими подразделениями и сторонними организациями, обеспечение принципов независимости при неразрушающем контроле как структурных подразделений, так и персонала в области неразрушающего контроля;

во-вторых, документированные процедуры, которыми руководствуются лаборатории, включая:
организационно-методические документы и документированные процедуры обеспечения качества при неразрушающем контроле;
методические документы по неразрушающему контролю и технологические документы на объекты контроля, позволяющие осуществлять неразрушающий контроль и производить оценку качества технических устройств и сооружений видами (методами),

включенными в область аттестации лабораторий; документацию по персоналу в области неразрушающего контроля - должностные инструкции и документы, подтверждающие квалификацию и аттестацию по типам технических устройств и сооружений видами (методами) неразрушающего контроля, включенными в область аттестации лабораторий, аттестацию на знание правил безопасности; ведение документооборота и архива лабораторий, наличие процедур проведения работ по неразрушающему контролю, включая оформление результатов контроля, выдачу заключений и их хранение, обеспечение конфиденциальности и охраны прав собственности; в-третьих, оснащенность техническими средствами контроля и их состояние - организацию учета, технического обслуживания, ремонта и метрологической аттестации (поверки), достаточность для организации контроля технических устройств и оборудования видами (методами) неразрушающего контроля, включенными в область аттестации лабораторий.

Аттестация лабораторий позволяет комплексно оценить функционирование всех элементов аттестации в Системе неразрушающего контроля, так как при аттестации лабораторий проверяются правомерность и обоснованность применения, достаточность технических средств и методических документов и соответствие аттестации персонала в области неразрушающего контроля существующим требованиям.

В Системе неразрушающего контроля ведутся реестры аккредитованных Независимых органов и аттестованных лабораторий и персонала в области неразрушающего контроля. Текущая информация о функционировании Системы неразрушающего контроля, а также информация о разрабатываемых нормативных документах, о формировании необходимых организационных структур размещается на web-сайте: www.safety.ru.

Дальнейшим развитием Системы неразрушающего контроля стала разработка в соответствии с постановлением Правительства Российской Федерации от 28.03.01 № 241 «О мерах по обеспечению промышленной безопасности опасных производственных объектов на территории Российской Федерации» Положения о порядке продления срока безопасной эксплуатации технических устройств, оборудования и сооружений на опасных производственных объектах ([РД 03-484-02](#)), утвержденного постановлением Госгортехнадзора России от 09.07.02 № 43, зарегистрированным Минюстом России 05.08.02 г., регистрационный № 3665. Им установлено, что неразрушающий контроль - важнейший этап работы по продлению сроков безопасной эксплуатации.

В 2003 году территориальными органами Госгортехнадзора России утверждено и зарегистрировано 100 102 заключения экспертизы промышленной безопасности технических устройств и сооружений на опасных производственных объектах, из которых около 100 000 связаны с продлением срока их эксплуатации. Таким образом, продление сроков безопасной эксплуатации технических устройств и сооружений стало государственной задачей, решение которой невозможно без применения неразрушающего контроля. Без использования современных технологий неразрушающего контроля невозможна эффективная организация технического перевооружения промышленности.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волченко В.Н. Оценка и контроль качества сварных соединений с применением статистических методов. М.: Изд-во стандартов, 1974. 159 с.
2. Волченко В.Н. Вероятность и достоверность оценки качества металлопродукции. М.: Металлургия, 1979. 88 с.
3. Александров М.П. Подъемно-транспортные машины. М: Высш. шк., 1972. 504 с.
4. Ряхин В.А., Мошкарёв Г.Н. Долговечность и устойчивость сварных конструкций строительных и дорожных машин. М.: Машиностроение, 1984. 232 с.
5. Проектирование сварных конструкций в машиностроении / Под ред. С.А. Куркина. М.: Машиностроение, 1975. 370 с.
6. Доклад «О состоянии промышленной безопасности опасных производственных объектов, рационального использования и охраны недр Российской Федерации в 2002 году»/ Под ред. В.М. Кульчева. М.: Государственное унитарное предприятие «Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России», 2003. 112 с.
7. Инструкция по визуальному и измерительному контролю ([РД 34.10.130-96](#)). Введена впервые. Введ. 01.07.96 г. М.: АНТЦ «Энергомонтаж», 1996. 113 с.
8. Инструкция по визуальному и измерительному контролю ([РД 03-606-03](#)) / Колл. авт. М.: Государственное унитарное предприятие «Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России», 2003. Сер. 03. Вып. 39. 104 с.
9. EN 970:1997. Неразрушающий контроль сварных швов, выполненных плавлением. Визуальный контроль// Измерения. Контроль. Качество. Неразрушающий контроль: Сб. М.: ИПК Изд-во стандартов, 2002. С. 668-674.
10. Черноусов В.А. Разработка и внедрение системы обеспечения качества соединений трубопроводов на монтаже, выполненных ручной дуговой сваркой: Дисс. ... канд. техн. наук: 08.00.20. М., 1980. 132 с.
11. Report on the actual situation of INSTITUTE DR. FORSTER. Information for customer and friends of INSTITUTE DR. FORSTER, N 12/Dec, 1993.
12. Волченко В.Н., Лупачев В.Г. Сравнение выявляемости дефектов при ультразвуковом и радиографическом контроле сварных соединений толщиной 30-40 мм // Комплексная дефектоскопия сварных и паяных соединений: Сб. статей. М.: МДНТП, 1975. С. 73-77.
13. Выявляемость естественных дефектов сварных швов методами просвечивания и ультразвуком //И.М. Яблоник, В.А. Щукин, Ф.Я. Заславский, Н.В. Рыльская // Комплексная дефектоскопия сварных и паяных соединений: Сб. статей. М.: МДНТП, 1975. С. 68-72.
14. Щербинский В.Г. Некоторые вопросы достоверности обнаружения и измерения дефектов сварных швов // Комплексная дефектоскопия сварных и паяных соединений: Сб. статей. М.: МДНТП, 1975. С. 142-149.
15. Сыркин М.М. Повышение достоверности автоматизированного ультразвукового контроля // Дефектоскопия. 2003. № 2. С. 11-23.
16. Неразрушающий контроль качества сварных соединений. Ультразвуковая дефектоскопия (РТМ 23.4.407-79). Барнаул: АНИТИМ, 1979. 58 с.
17. Основные положения по ультразвуковой дефектоскопии сварных соединений котлоагрегатов и трубопроводов тепловых электростанций (ОП № 501 ЦД-75). М.: СПО Союзтехэнерго, 1978. 127 с.
18. ОСТ 108.004.108-80. Соединения сварные и наплавки оборудования атомных электростанций. Методы ультразвукового контроля. М.: ЦНИИТМАШ, 1980. 160 с.
19. Коновалов Н.Н. Особенности выявления дефектов при ультразвуковом контроле сварных конструкций подъемных сооружений // В мире неразрушающего контроля. 2002. № 3 (17). С. 12-14.
20. Волченко В.Н., Демидов Б.Ф. Производственная методика статистического регулирования качества сварных соединений // Сварочное производство. 1989. № 11. С. 27-29.
21. [ГОСТ 15467-79](#). Управление качеством сварки. Основные понятия. Термины и определения. Взамен ГОСТов: 15467-70, 16431-70, 17102-71, 17341-71. М.: Изд-во стандартов, 1979. 26 с.
22. Прочность сварных соединений при переменных нагрузках / Под ред. В.И. Труфякова. Киев: Наук, думка, 1990. 256 с.
23. Макаров И.И. Критерии оценки технологических дефектов в сварных конструкциях // Сварочное производство. 1975. № 12. С. 9-12.
24. Невмержицкий В.Н., Коновалов Н.Н., Терехова В.Г., Балахнов А.В. Усталостная прочность угловых сварных швов металлоконструкций //Технология, оборудование и машины для лесосечных работ: Сб. научных трудов/ЦНИИМЭ. Химки, 1990. С. 125-128.
25. Wagner H. Wirtschaftliche Gesichtspunkte in der Scheißtechnik. Schweissen+Schneiden, 1973.
26. Винокуров В.А. Эксплуатационные и технологические требования к сварным соединениям в отношении сплошности // Сварочное производство. 1987. № 6. С. 27-30.
27. Волченко В.Н., Коновалов Н.Н. Вероятностные расчеты норм дефектности сварных соединений при многоцикловом нагружении //Сварочное производство. 1991. № 8. С. 27-30.
28. Лукьянов В.Ф., Харченко В.Я., Валяев И.Г., Волченко В.Н. Анализ качества сварных соединений несущих систем в сельхозмашиностроении//Сварочное производство. 1988. № 9. С. 14-15.

29. Макаров И.И., Емельянова Т.М. Влияние технологических дефектов на долговечность и надежность сварных соединений // Надежность сварных соединений и конструкций: Сб. статей. М.: Машиностроение, 1967. С. 47-63.
30. Работоспособность и неразрушающий контроль сварных соединений с дефектами / М.В. Шахматов, В.В. Ерофеев, В.В. Коваленко. Челябинск: ЦНТИ, 2000. 227 с.
31. Bosworth T.J. The application of fracture mechanics to weld quality control. Paper ASME, 1970, MET-2.
32. Николаев Г.Л., Макаров И.И. Влияние качества сварки на механические свойства стыковых швов // Вопросы прочности и технологии сварки: Труды МВТУ. № 37. М.: Машгиз, 1955. С. 12-32.
33. Кудрявцев И.В., Наумченко Н.Е. Усталость сварных конструкций. М.: Машиностроение, 1976. 271 с.
34. Радченко Л.Ю. Работоспособность элементов сварных металлоконструкций при переменных нагрузках: Дисс. ... канд. техн. наук: 05.04.05. М., 1983. 215 с.
35. Rolfe S.T., Barsom J.M., Fracture and fatigue control in structures application of fracture mechanics. Englewood cliffs. New Jersey: Prentice - Hal, Inc., 1977. 565 p.
36. Advances in Fracture Research. 5th Intern. Conf. on Fracture. Cannes. 1981, 805 p.
37. Buck O. Crack tip closure and environmental crack propagation. Engin. Frac. Mech. 1975. Vol. 7. P. 167-171.
38. Fracture 1977.4. Inter. Conf. on Fracture. 1977. Waterloo, Canada. Vol. 1. 834 p.
39. Махутов Н.А. Сопротивление элементов конструкций хрупкому разрушению. М.: Машиностроение, 1973. 200 с.
40. Лукьянов В.Ф., Харченко В.Я., Скребцов А.М. и др. // Сварочное производство. 1983. № 6. С. 9-11.
41. Конструкции сварные из углеродистых и легированных сталей. Правила установления требований по сплошности металла сварных швов. М.: МВТУ, 1987. 48 с.
42. Волченко В.Н., Лукьяненко В.Ф. Вероятностная оценка норм допустимости дефектов при разных условиях их нагружения // Математические методы в сварке. Киев: ИЭС им Е.О. Патона, 1986. С. 32-38.
43. Макаров И.И. Работоспособность сварных соединений с технологическими отклонениями: Дисс.... докт. техн. наук: 05.04.05. М., 1977. 384 с.
44. Луцук О.А. Механические свойства тавровых соединений конструкционных сталей с технологическими отклонениями: Дисс. ...канд. техн. наук: 05.04.05. М., 1978. 180 с.
45. Neuber H. Theory of stress concentration for strains of prismatical bodies with arbitrary nonlinear stress - strain law. J. of Appl. Mech., 1961. Vol. 28. № 4. P. 544-550.
46. Турмов Г.П. Определение коэффициента концентрации напряжений в сварных соединениях // Автоматическая сварка. 1976. № 10. С. 14-16.
47. Сварка в машиностроении: Справочник. Т.3 / Под ред. В.А. Винокурова. М.: Машиностроение, 1979. 302 с.
48. Кархин В.А., Копельман Л.А. Концентрация напряжений в стыковых соединениях // Сварочное производство. 1976. № 2. С. 6-7.
49. Навроцкий Д.И. Расчет сварных соединений с учетом концентрации напряжений. Л.: Машиностроение, 1968. 171 с.
50. Афанасьев Н.Н. Статистическая теория усталостной прочности. Киев.: Изд-во АН УССР, 1953. 128 с.
51. Шиманский Ю.А. Проектирование прерывистых связей судового корпуса. Л.: Судпромгиз, 1949. 160 с.
52. Коновалов Н.Н. Методы оценки норм допустимости дефектов в сварных соединениях грузоподъемных машин // Безопасность труда в промышленности. 2003. № 12. С. 27-32.
53. Несущая способность и расчет деталей машин на прочность: Руководство и справочное пособие / Под ред. С.В. Серенсена. М.: Машиностроение, 1975. 488 с.
54. Брауде В.И. Вероятностные методы расчета грузоподъемных машин. Л.: Машиностроение, 1978. 231 с.
55. Волченко В.Н., Коновалов Н.Н. Вероятностная оценка достоверности ультразвукового контроля сварных соединений // Сварочное производство. 1991. № 11. С. 30-32.
56. Коновалов Н.Н. Оценка показателей достоверности ультразвукового контроля сварных соединений // Дефектоскопия. 2003. № 9. С. 4-8.
57. Щербинский В.Г., Самедов Я. Ю. Априорная оценка сравнительной достоверности методов ультразвукового контроля сварных соединений // Дефектоскопия. 1987. № 7. С. 61-68.
58. Ермолов И.Н., Останин Ю.Я. Методы и средства неразрушающего контроля качества. М.: Высш. шк., 1988. 368 с.
59. Розина М.В., Яблоник Л.М., Васильев В.Д. Неразрушающий контроль в судостроении: Справочник дефектоскописта. Л.: Судостроение, 1983. 152 с.
60. Райхман А.З. Определение оптимальных параметров неразрушающего контроля // Дефектоскопия. 1975. № 4. С. 7-16.
61. Райхман А.З. Ультразвуковая дефектоскопия сварных соединений энергетических установок (научные основы оптимизации технологического контроля и прикладные исследования): Автореферат дисс. ... докт. техн. наук: 05.02.11. М., 1978. 31 с.
62. Волченко В.Н., Вошанов А.К., Комов Е.М. Вероятностная интервальная оценка достоверности ультразвукового контроля и норм дефектности сварных стыков стержней // Сварочное производство. 1987. №5. С. 22-24.
63. Волченко В.Н., Бугай Н.В., Лебедев А.А., Шарко А.В. Оценка достоверности неразрушающего контроля механических свойств стали // Дефектоскопия. 1989. № 12. С. 74-79.
64. Концепция управления Системой неразрушающего контроля и основные направления ее развития // Система неразрушающего контроля. Аттестация лабораторий: Сб. документов / Колл. авт. М.: Государственное унитарное предприятие «Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России», 2000. Сер. 28. Вып. 1. С. 5-16.
65. [Правила аттестации специалистов неразрушающего контроля](#). М.: НПО ОБТ, 1992. 28 с.
66. Коновалов Н.Н., Вадковский Н.Н., Шевченко В.П. Сборник методических материалов по аттестации лабораторий неразрушающего контроля и диагностики. М.: НПО ОБТ, 1998. 80 с.
67. EN 45004. Общие требования к функционированию инспекционных органов разного типа. М.: ВНИИС, 1995. 28 с.
68. EN 45013. Общие требования к органам по сертификации, проводящим аттестацию персонала // Европейские стандарты, регламентирующие деятельность испытательных лабораторий, органов по сертификации и заявителя при заявлении о соответствии продукции. М.: «ИНСАР Лтд», 1993. С. 51-58.
69. EN 473:2000. Квалификация и сертификация персонала в области неразрушающего контроля // Измерения. Контроль. Качество. Неразрушающий контроль: Сб. М.: ИПК Изд-во стандартов, 2002. С. 543-555.
70. Положение о Системе неразрушающего контроля // Система неразрушающего контроля. Аттестация лабораторий: Сб. документов / Колл. авт. 2-е изд., испр. и доп. М.: Государственное унитарное предприятие «Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России», 2002. Сер. 28. Вып. 1. С. 16-27.