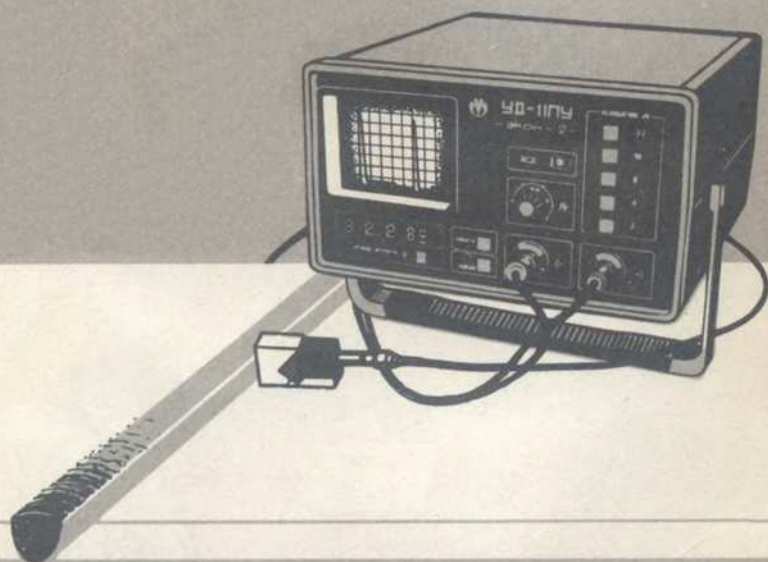


Н.П. Алешин

В.Г. Щербинский

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА сварочных работ



ПРОФЕССИОНАЛЬНО-
ТЕХНИЧЕСКОЕ
ОБРАЗОВАНИЕ



Н. П. Алешин,
В. Г. Щербинский

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА сварочных работ

Издание второе,
переработанное и дополненное

Одобрено Ученым советом
Государственного Комитета СССР
по профессионально-техническому
образованию в качестве
учебного пособия для средних
профессионально-технических училищ



МОСКВА
«ВЫСШАЯ ШКОЛА»
1986



ББК 34.641
А 49
УДК 621.791

Рецензент:

канд. техн. наук В. А. Бобров (НИИхиммаш)

Алешин Н. П., Щербинский В. Г.

А49 Контроль качества сварочных работ: Учеб. пособие для сред. ПТУ. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Высш. шк., 1986. — 207 с., ил. — (Профтехобразование).

25 к.

Изложены широко применяемые в промышленности разрушающие и неразрушающие методы обнаружения и идентификации дефектов (внутренних и поверхностных); приведены сведения об оборудовании и аппаратуре, организации технического контроля на производстве; описаны дефекты сварных швов и соединений. Второе издание (1-е — в 1981 г.) дополнено сведениями о новом оборудовании и современной технологии контроля качества сварочных работ.

А $\frac{2704050000-050}{052(01)-86}$ 63-86

ББК 34.641
6П4.3

© Издательство «Высшая школа», 1981
© Издательство «Высшая школа», 1986, с изменениями

ВВЕДЕНИЕ

Современные технологические процессы изготовления продукции машиностроения в большинстве случаев сопровождаются использованием различных способов сварки. Совершенствование их или применение новых способов соединений только частично решает проблему повышения качества изготавливаемых конструкций, так как даже при хорошо отработанной технологии сварки возможны различного рода дефекты, приводящие к снижению надежности и долговечности изделий. В связи с этим важное значение для повышения качества изготавливаемых конструкций приобретают методы неразрушающего контроля.

В ряде отраслей промышленности неразрушающий контроль сварных соединений выделен в самостоятельный технологический процесс, так как в большинстве случаев трудоемкость контроля соизмерима с трудоемкостью процесса сварки. Затраты на контроль при изготовлении ряда конструкций превосходят затраты на их сварку, а стоимость контрольных операций может достигать 25 — 35% общей стоимости конструкции. Это объясняется прежде всего тем, что уровень механизации и автоматизации сварочных работ достаточно высок (~35 — 40%), в то время как доля автоматизированного неразрушающего контроля незначительна (1—2%). Поэтому в настоящее время особое внимание обращают на ускоренное внедрение автоматизированных методов контроля качества сварных соединений.

Разработана и осуществляется специальная программа по внедрению в сварочное производство современных средств и методов неразрушающего контроля (акустической эмиссии, голографии, томографии и др.). Дальнейшее развитие получают и традиционные методы неразрушающего контроля. К таким методам относят радиационную, ультразвуковую, магнитную и капиллярную дефектоскопию, а также испытания изделий на герметичность.

Следует отметить, что среди перечисленных методов контроля нет такого, который гарантировал бы выявление всех дефектов сварки. Каждый из этих методов обладает своими преимуществами и недостатками. Например, при использовании

радиационных методов контроля достаточно уверенно обнаруживают объемные дефекты небольшого размера (0,1 мм и более) и значительно хуже — несплавления, трещины и стянутые непровары (~35—40%). Ультразвуковой метод, наоборот, более чувствителен к плоскостным дефектам и малоэффективен при контроле конструкций с дефектами в виде пор размером 1 мм и менее. Для выявления поверхностных дефектов применяют или капиллярный, или магнитные методы контроля.

Практика показывает, что правильная организация процессов контроля, а также умелое применение того или иного метода или сочетания методов при контроле позволяют с большой надежностью оценить качество сварных соединений.

Растущие требования к качеству выпускаемой продукции выдвинули задачу подготовки специалистов, владеющих необходимой совокупностью знаний по технологии сварки, аппаратуре контроля и организации контрольных служб.

В соответствии с Основными направлениями реформы общеобразовательной и профессиональной школы и постановлением ЦК КПСС и Совета Министров СССР «О дальнейшем развитии системы профессионально-технического образования и повышении ее роли в подготовке квалифицированных рабочих кадров» (1984 г.) выдвинута задача — обеспечить дальнейшее развитие и совершенствование системы профессионально-технического образования как основной формы планомерной подготовки квалифицированных рабочих кадров, повышать ее роль в осуществлении перехода к всеобщему профессиональному обучению молодежи.

В профессионально-технических училищах каждый будущий молодой рабочий должен воспитываться как активный строитель коммунизма, рачительный хозяин с присущими рабочему классу революционной идеологией, моралью, интересами, коллективистской психологией, высокой культурой труда, поведения, быта.

Данная книга должна помочь учащимся средних профтехучилищ овладеть необходимыми техническими знаниями, освоить приемы выполнения контрольных операций, ознакомиться с устройством и работой аппаратуры контроля. Особое внимание в книге отведено радиационным и ультразвуковым методам контроля, объем применения которых в промышленности по сравнению с другими методами наиболее значителен. Введение, гл. 1, 2, 3, 4, 6, 9, 10, 11 написаны Н. П. Аleshиним, гл. 5, 7, 8 — В. Г. Щербинским.

1. СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ПРОЦЕССЫ, ПРОИСХОДЯЩИЕ ПРИ СВАРКЕ

1.1. СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

К сварочным материалам относят сварочную проволоку, присадочные прутки, порошковую проволоку, плавящиеся покрытые электроды, неплавящиеся электроды, различные флюсы, защитные (активные и инертные) газы.

Сварочная проволока. При механизированных способах сварки плавлением сварочную проволоку чаще всего используют в виде непрерывного плавящегося электрода, намотанного на специальные кассеты; при ручной дуговой сварке — в виде прутка определенной длины (300—500 мм), т. е. плавящихся штучных электродов. При ручной сварке плавлением неплавящимися электродами (вольфрамовым, угольным) в зону сварки подают автономно дополнительный прутки или стержень длиной до 1000 мм, который называют присадочным прутком.

В настоящее время широко применяют порошковую сварочную проволоку, состоящую из металлической оболочки, заполненной порошкообразными веществами (легирующими, раскисляющими и др.). Для электрошлаковой сварки и наплавки наряду с проволочными применяют пластинчатые электроды и металлические ленты.

В качестве металлических присадочных материалов в основном применяют сварочную проволоку (стальную или из цветных металлов и сплавов). ГОСТ 2246—70 распространяется на сварочную проволоку из низкоуглеродистой, легированной и высоколегированной сталей и регламентирует ее химический состав и размеры, так как механические свойства металла шва зависят от доли основного металла в нем, марки флюса, режима сварки и других факторов. Стальная сварочная проволока выпускается следующих диаметров: 0,3; 0,5; 0,8; 1,0; 1,2; 1,4; 1,6; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 8,0; 10,0; 12,0 мм. Проволоки диаметром 1,6—8 мм применяют для сварки и изготовления электродов, остальные — только для сварки или наплавки. В обозначении марки проволоки указывают ее назначение «Св» (сварочная) и примерное содержание элементов по общеприня-

той символике: Б — ниобий, В — вольфрам, Г — марганец, Д — медь, М — молибден, Н — никель, С — кремний, Т — титан, Ф — ванадий, Х — хром, Ц — цирконий, Ю — алюминий. Средний процент содержания углерода указывают без буквенного обозначения цифрой в сотых долях процента после символа «Св». При содержании других элементов менее 2% цифру не ставят. Например, обозначение марки Св-08Г2С расшифровывается так: Св — сварочная, 08 — содержание углерода 0,08%, марганца до 2%, кремния до 1%. Более точное содержание элементов указано в стандарте.

Порошковая проволока, сохраняя технологические преимущества сварочной проволоки, создает при сварке газовую и шлаковую защиту металла сварочной ванны от окисления, насыщает металл шва легирующими элементами и очищает его от вредных примесей. Порошковая проволока — универсальный сварочный материал, пригодный для сварки сталей практически любой степени легирования, наплавки слоев с особыми свойствами. Наиболее широко порошковую проволоку применяют для сварки (низкоуглеродистых и низколегированных сталей) и наплавки, что обусловлено возможностью изменения в широких пределах химического состава и массы наполнителя (порошкообразной шихты).

Неплавящиеся электроды. Угольные, графитовые, вольфрамовые, циркониевые, гафниевого электроды предназначены для поддержания устойчивого горения дуги. Эти электроды должны обладать высокой стойкостью к воздействию высоких температур, т. е. выгорать в этих условиях минимально. Уменьшить разогрев электродов можно за счет увеличения их сечения. По этой причине угольные и графитовые электроды обычно имеют большие диаметры (6—20 мм). Вольфрамовые электроды разогреваются незначительно даже при сравнительно малых диаметрах (1—6 мм), что обусловлено небольшим электрическим сопротивлением вольфрама. Однако их необходимо защищать при сварке инертными газами от окисления. Циркониевые и гафниевого электроды используют в плазмотронах при тепловой резке металлов.

Плавящиеся покрытые электроды. Для ручной дуговой сварки применяют электроды, представляющие собой стержни длиной до 450 мм, изготовленные из сварочной проволоки (ГОСТ 2246—70), на поверхность которых нанесено покрытие различной толщины. При этом концы электродов должны быть зачищены как контактные: один на длине 20—30 мм для зажатия его в электрододержателе, другой для возбуждения дуги в начале сварки.

Покрывание, предназначенное для повышения устойчивости

горения дуги, образования комбинированной газошлаковой защиты, легирования и рафинирования металла, содержит различные материалы:

1. Газообразующие — органические (крахмал, пищевая мука, декстрин), реже неорганические вещества, обычно карбониты (мрамор, магнезит и др.).

2. Легирующие и элементы-раскислители (кремний, марганец, титан и др.), используемые в виде сплавов этих элементов с железом, так называемых ферросплавов. Алюминий вводят в виде пудры.

3. Ионизирующие, или стабилизирующие, содержащие элементы с низким потенциалом ионизации, а также различные соединения, в состав которых входят калий, натрий, кальций, мел, полевой шпат, гранит и др.

4. Шлакообразующие, составляющие основу покрытия, — обычно это руды (марганцовая, титановая), минералы (полевой шпат, кремнезем, мрамор и др.).

5. Связующие — водные растворы силикатов натрия и калия, называемые натриевым, калиевым и натриево-калиевым жидким стеклом.

6. Формовочные добавки — вещества (каолин, декстрин, слюда и др.), придающие обмазочной массе лучшие пластические свойства.

Для повышения производительности сварки, увеличения количества дополнительного металла, вводимого в шов, в покрытии может содержаться железный порошок до 60% массы покрытия. Многие материалы, входящие в состав покрытия, одновременно выполняют несколько функций, обеспечивая и газовую, и шлаковую защиту.

Покрытия электродов должны обеспечивать стабильное горение дуги; получение металла шва с необходимыми физико-механическими составами, равномерное плавление электродного стержня и покрытия; хорошее формирование шва и возможно минимальное образование внутренних дефектов; легкую отделяемость шлака с поверхности шва после остывания; необходимые санитарно-гигиенические условия труда при изготовлении электродов и сварке.

Покрытые металлические электроды, предназначенные для ручной дуговой сварки стали и наплавки (ГОСТ 9466—75), классифицируют по различным признакам. В зависимости от назначения различают электроды для сварки углеродистых и низколегированных конструкционных сталей с $\sigma_n \leq 600$ МПа — У (условное обозначение); для сварки легированных конструкционных сталей с $\sigma_n > 600$ МПа — Л; для сварки теплоустойчивых сталей — Т; для сварки высоколегированных

сталей с особыми свойствами — В; для наплавки поверхностных слоев с особыми свойствами — Н.

По толщине покрытия в зависимости от отношения полного диаметра электрода (D) к диаметру стержня (d) различают электроды с тонким покрытием ($D/d \leq 1,2$) — М (условное обозначение); со средним покрытием ($1,2 < D/d \leq 1,45$) — С; с толстым покрытием ($1,45 < D/d \leq 1,8$) — Д; с особо толстым покрытием ($D/d > 1,8$) — Г.

В зависимости от требований к качеству электродов в части точности изготовления, состояния поверхности покрытия, содержания серы и фосфора в наплавленном металле электроды подразделяют на три группы (1, 2, 3).

По видам покрытий на электроды с кислым покрытием — А (условное обозначение); с основным покрытием — Б; с целлюлозным покрытием — Ц; с рутиловым покрытием — Р; с покрытием смешанного вида — соответствующее двойное условное обозначение; с прочими видами покрытий — П. Если покрытие содержит железный порошок более 20%, к условному обозначению вида покрытия добавляют букву Ж.

По допустимым пространственным положениям сварки или наплавки различают электроды для всех положений — 1 (условное обозначение), для всех положений, кроме вертикального сверху вниз, — 2; для нижнего, горизонтального на вертикальной плоскости и вертикального снизу вверх — 3; для нижнего и нижнего в лодочку — 4.

По роду и полярности применяемого тока, а также по номинальному напряжению холостого хода, источника переменного тока частотой тока 50 Гц электроды подразделяют на десять видов (0...9).

Сварочные флюсы. Это специально приготовленные измельченные материалы сложного состава с размерами отдельных зерен 0,25—4 мм (в зависимости от марки флюса). По способу изготовления флюсы разделяют на неплавленные (керамические) и плавленные.

Керамические флюсы получают спеканием отдельных компонентов и последующим дроблением до частиц определенного размера. Кроме того, эти флюсы могут представлять собой механическую смесь отдельных компонентов. Легирование металла такими флюсами достигается введением в них необходимых ферросплавов. Флюсы при изготовлении не подвергаются расплавлению, поэтому количество и сочетание ферросплавов и других легирующих элементов может быть различным, что позволяет легко получить требуемый состав металла шва. В этом заключается основное достоинство этих флюсов. Однако при использовании таких флюсов химический

состав металла шва сильно зависит от режима сварки, что может привести к неоднородности состава металла шва даже по длине. Кроме того, эти флюсы легко разрушаются вследствие малой механической прочности его частиц, что делает его разнородным по размерам. Эти флюсы используют в основном при сварке высоколегированных специальных сталей и наплавке ответственных изделий.

Плавленные флюсы представляют собой сплавы окислов и солей металлов. Предварительно измельченные и взвешенные в определенном соотношении компоненты смешивают и расплавляют в печи при температуре около 1400°C . Жидкий флюс заливают либо в металлические формы и после остывания подвергают дроблению (сухой способ грануляции), либо выливают тонкой струей в бак с водой, где он быстро застывает и растрескивается на мелкие крупинки (мокрый способ грануляции).

Принципиальное отличие плавленого флюса от керамического состоит в том, что плавленый флюс не содержит легирующих элементов в чистом виде. Легирование шва плавлеными флюсами происходит восстановлением элементов из окислов, находящихся во флюсе.

По химическому составу различают окислительные и безокислительные флюсы. В состав окислительного флюса обязательно входят окислы марганца и кремния примерно в равных весовых отношениях, составляющих 75—85% всей массы флюса. Чем больше содержится во флюсе окислов марганца и кремния, тем сильнее флюс может легировать металлы кремнием и марганцем, но и одновременно тем сильнее окисляется металл шва. Чем сложнее легирована сталь, тем меньше во флюсе должно быть MnO и SiO_2 , в противном случае недопустимо возрастает окисление легирующих элементов в стали. Поэтому окислительные флюсы в основном применяют при сварке углеродистых и низколегированных сталей, наиболее широко — флюсы марок АН-348-А; ОСЦ-45, АН-8, АН-26.

Безокислительные флюсы практически не содержат оксидов кремния или марганца или содержат их в небольшом количестве. В них входят фториды кальция и прочные оксиды металлов (алюминия и магния). Такие флюсы (АН-30, АН-70, АНФ-8 и др.) используют преимущественно при сварке высоколегированных сталей.

Безкислородные флюсы целиком состоят из фторидных и хлоридных солей металлов, а также из других компонентов, не содержащих кислород. Среди безкислородных флюсов наиболее известны: флюс АНФ-5, используемый при сварке коррозионностойких сталей, АН-А1 — алюминия, АН-Т1 — титана.

Защитные газы. Их делят на две группы: химически инертные и активные. Газы первой группы с нагретым и расплавленным металлом не взаимодействуют и практически в нем не растворяются. При использовании этих газов дуговую сварку можно выполнять плавящимся или неплавящимся электродом. Газы второй группы защищают зону сварки от воздуха, но сами либо растворяются в жидком металле, либо вступают с ним в химическое взаимодействие. К химическим инертным газам относят аргон и гелий. Аргон выпускают трех сортов: высший, первый и второй. Высший, содержащий 99,99% аргона, применяют для сварки неплавящимся электродом химически активных металлов (титана, циркония и ниобия); аргон первого сорта (99,98%) — для сварки неплавящимся электродом сплавов алюминия, магния и других активных металлов, аргон второго сорта (99,95%) — для сварки неплавящимся электродом коррозионноустойчивых сталей.

Гелий высокой чистоты (99,98%) применяют в качестве защитного газа при сварке цветных металлов и сплавов, а также титана и нержавеющей сталей. Гелий в 10 раз легче аргона, что усложняет защиту сварочной ванны и приводит к повышенному расходу его. Стоимость гелия в несколько раз больше стоимости аргона, поэтому его применяют ограниченно. Однако при использовании гелия достигается большее выделение теплоты, чем при аргоновой защите, что обеспечивает более глубокое проплавление металла.

К активным защитным газам относят углекислый газ, азот, водород, пары воды и т. п. Наиболее широко применяют углекислый газ при сварке плавящимся или неплавящимся (угольным или графитовым) электродом.

1.2. МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В СВАРОЧНОЙ ВАННЕ

Металлургические процессы при сварке — это процессы взаимодействия жидкого металла с газами и сварочными шлаками, а также остывающего металла с жидким и кристаллизующимся шлаком. Эти процессы протекают в период плавления электрода, перехода капли жидкого металла через дуговой промежуток и в самой сварочной ванне. В отличие от металлургических процессов, протекающих в обычных сталеплавильных печах, процесс плавки металла при сварке имеет следующие особенности:

1. Малый объем сварочной ванны и быструю скорость ее охлаждения. Это приводит к тому, что не все начавшиеся химические реакции протекают до конца. Кроме того, создаются

условия, препятствующие полному очищению металла шва от различных окислов, неметаллических включений и газов, которые из-за быстрого затвердевания металла шва не успевают выйти на поверхность сварочной ванны. Форма и объем сварочной ванны зависят от способа и основных режимов сварки, толщины и вида разделки основного материала сварки. Вследствие этого объем сварочной ванны может составлять от миллиметров до сотен кубических сантиметров.

2. Активное взаимодействие расплавленного металла с окружающей газовой средой и шлаками, нагретыми до высокой температуры. Это способствует дополнительному насыщению металла шва газами и шлаковыми включениями.

3. Высокая температура сварочной дуги и металла сварочной ванны обуславливает диссоциацию газов и, как следствие, делает их более активными. В результате может происходить окисление и раскисление металла шва, легирование его соответствующими элементами, а также растворение и выделение в шве таких газов, как азот, водород и т. д.

При движении сварочной дуги вдоль кромок свариваемого изделия в передней части сварочной ванны происходит плавление основного и, если используют, дополнительного (присадочного) металла, а в хвостовой ее части — кристаллизация расплавленного металла, образование сварного шва в результате потерь теплоты на излучение и теплоотвод в изделие.

Первичная кристаллизация на границе 1 сплавления начинается от частично оплавленных зерен 2 основного металла, растущих в виде дендритов перпендикулярно границе сплавления в направлении, противоположном теплоотводу (рис. 1.1). В процессе кристаллизации кроме центров в виде растущих кристаллитов могут появляться и новые центры кристаллизации, как самопроизвольно возникающие из жидкости, так и в виде отдельных тугоплавких частиц, обломков зерен и т. п. Рост кристаллитов происходит в результате присоединения к их поверхности отдельных частиц из окружающего расплава.

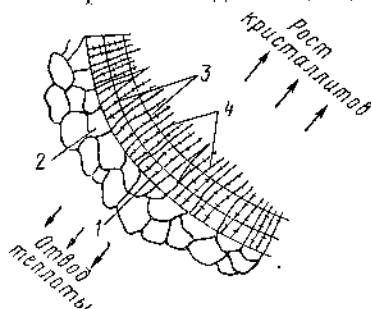


Рис. 1.1. Схема роста кристаллитов:

1 — граница сплавления, 2 — зерна основного металла, 3 — кристаллизационные слои, 4 — растущие кристаллиты

Каждый кристаллит, растущий от отдельного зерна на границе сплавления, представляет собой группу совместно растущих элементарных столбчатых кристаллов, сросшихся одним концом с общим основанием, т. е. с оплавленным зерном основного металла. При многослойной сварке, когда кристаллизация начинается от частично оплавленных зерен предыдущего шва, возможно прорастание кристаллитов из слоя в слой — образуется транскристаллитная структура.

В различные этапы кристаллизации металла сварочной ванны химический состав его не одинаков. Первые порции металла менее загрязнены примесями, чем последние. В результате образуется зональная, наблюдаемая во всем объеме шва, и внутрикристаллическая (дендритная) неоднородность химического состава металла. Неоднородность химического состава в различных участках одного кристаллита имеет преимущественное развитие в сварном шве. Развитие ликвации в сварном шве зависит от химического состава металла, формы сварочной ванны, скорости кристаллизации и способа сварки.

Первичная кристаллизация металла сварочной ванны имеет прерывистый характер, вызванный выделением перед фронтом раздела фаз скрытой теплоты кристаллизации. Это приводит к характерному слоистому строению шва и появлению ликвации в виде слоистой неоднородности, которая в наибольшей степени проявляется вблизи границы сплавления. Толщина кристаллизационных слоев (от десятых долей миллиметра до нескольких миллиметров) зависит от объема сварочной ванны и условий теплоотвода.

Теплота, выделяемая при сварке, распространяется в тело основного металла. Этот процесс характеризуется термическим циклом. В каждой точке околошовной зоны температура вначале нарастает, достигая максимума на границе сплавления, а затем снижается до минимума при значительном удалении от границы. Таким образом, различные участки основного металла характеризуются различными температурами, скоростями нагрева и охлаждения, т. е. подвергаются своеобразной термической обработке. Поэтому структура (рис. 1.2) и свойства основного металла в различных участках околошовной зоны различны. Зону основного металла, в которой под воздействием термического цикла при сварке произошли фазовые и структурные изменения, называют зоной термического влияния. Характер этих превращений и протяженность зоны термического влияния зависят от состава и теплофизических свойств свариваемого металла, способа и режима сварки, типа сварного соединения.

На участке неполного расплавления первичная структура

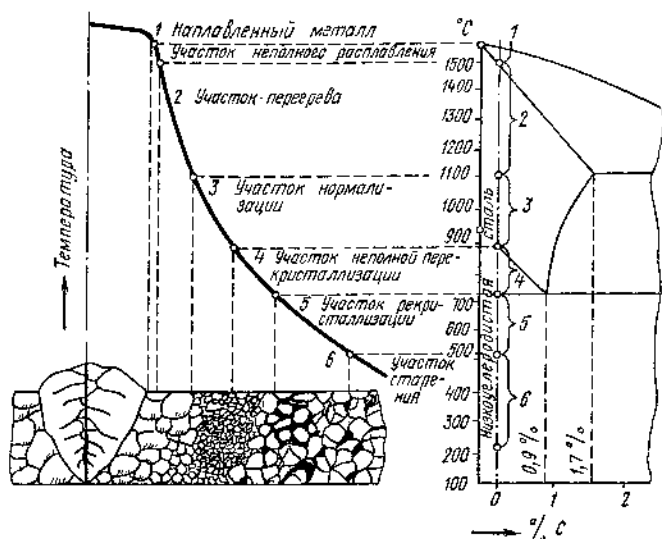


Рис. 1.2. Структура металла в зоне термического влияния при сварке низкоуглеродистой стали

участка характеризуется наличием химической неоднородности. Этот участок, по существу, является местом сварки. Его протяженность зависит от состава и свойства металла, способа сварки и обычно не превышает 0,5 мм, но свойства металла на этом участке могут оказывать решающее влияние на свойства всего сварного соединения.

На участке перегрева часто образуется видманштеттова крупнозернистая структура, причем размеры зерна тем больше, чем выше температура металла. Эта структура обуславливает наименьшую пластичность и ударную вязкость металла. Для уменьшения участка перегрева повышают скорость сварки или сварку производят за несколько проходов. Ширина такой зоны иногда достигает 3–4 мм и более.

Участок нормализации характеризуется мелкозернистой структурой. В зависимости от размеров швов ширина участка нормализации колеблется от 0,2 до 5 мм.

На участке неполной перекристаллизации не все зерна основного металла претерпевают перекристаллизацию, например зерна феррита сохраняют свое первоначальное строение. Ширина этой зоны составляет 0,1–5 мм.

Металл, нагреваемый в интервале температур 500–750 °C (участок рекристаллизации), по структуре незначительно отличается от исходного. Однако если до сварки ме-

талл подвергался пластической деформации, то при нагреве в нем происходит сращивание раздробленных зерен основного металла — рекристаллизация. При незначительной выдержке при этих температурах может произойти значительный рост зерен. Механические свойства металла этого участка могут несколько снизиться вследствие разупрочнения. Ширина этого участка составляет 0,1—1,5 мм.

При нагреве металла в интервале температур 100—500 °С (участок старения) его структура в процессе сварки не отличается от структуры исходного металла. Однако в некоторых сталях, содержащих повышенное количество кислорода и азота (обычно кипящих), нагрев до 150—350 °С сопровождается резким снижением ударной вязкости и сопротивляемости разрушению.

Многослойная сварка ввиду многократного воздействия термического цикла сварки на основной металл в околошовной зоне изменяет его строение и структуру в зоне термического влияния. При сварке длинными участками после каждого последующего прохода предыдущий шов подвергается своеобразному отпуску. При сварке короткими участками шов и околошовная зона длительное время находятся в нагретом состоянии. Помимо изменения структур это увеличивает и протяженность зоны термического влияния. Последующие слои термически воздействуют на ранее наплавленные, имеющие структуру литого металла, и создают в них зону термического влияния, строение и структура которой значительно отличаются от зоны термического влияния в основном металле, подвергнутому прокатке. Эта зона на участке перегрева обычно не имеет крупного зерна и характеризуется мелкозернистыми структурами с повышенными пластическими свойствами.

Структура металла швов при электрошлаковой сварке может характеризоваться наличием трех зон (рис. 1.3, а): зона 1 крупных столбчатых кристаллитов, которые растут в направлении, обратном отводу теплоты; зона 2 тонких столбчатых кристаллитов с меньшей величиной зерна и несколько большим их отклонением в сторону теплового центра; зона 3 рав-

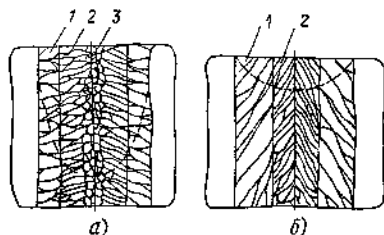


Рис. 1.3. Строение металла шва при электрошлаковой сварке:

а — с глубоким проваром, б — с неглубоким проваром

ноосных кристаллитов, располагающихся посередине шва. В зависимости от способа электрошлаковой сварки, химического состава металла шва и режима сварки может быть получено различное строение швов (рис. 1.3, б). Повышение содержания в шве углерода и марганца увеличивает, а уменьшение интенсивности теплоотвода уменьшает ширину зоны 1. Термический цикл околошовной зоны при электрошлаковой сварке характеризуется длительным нагревом и выдержкой при температурах перегрева и медленным охлаждением. Поэтому в ней могут образовываться крупнозернистые малопластичные структуры, которые по мере удаления от линии сплавления сменяются нормализованной мелкозернистой структурой. На участке перегрева может наблюдаться уменьшение ударной вязкости, что устраняется последующей термообработкой.

Ширина и конечная структура различных участков зоны термического влияния определяется термическим циклом, способом и режимом сварки, составом и толщиной основного металла. В свою очередь, определяющим фактором термического цикла сварки является максимальная температура. Общая протяженность зоны термического влияния может достигать 25—30 мм.

1.3. СВАРИВАЕМОСТЬ СТАЛЕЙ

Обеспечение равнопрочности шва с основным металлом при дуговых способах сварки низкоуглеродистых и низколегированных термостойких сталей обычно не вызывает затруднений. Определенные трудности возникают при сварке термостойких сталей, так как механические свойства металла околошовной зоны зависят от конкретных условий сварки и вида термообработки стали перед сваркой. При сварке низкоуглеродистых горячекатаных сталей с толщиной металла до 15 мм на обычных режимах, обеспечивающих небольшие скорости охлаждения, структуры металла шва и околошовной зоны примерно такие, как у термостойких сталей. Повышение скоростей охлаждения при сварке на форсированных режимах соединений больших толщин (более 20 мм), однопроходных угловых швов, в условиях отрицательных температур и т. п. может привести к появлению в металле шва и околошовной зоне закалочных структур на участках перегрева и рекристаллизации. Если сталь перед сваркой прошла термостойкость — закалку, то в зоне термического влияния шва на участках рекристаллизации и старения будет наблюдаться отпуск металла, т. е. снижение его прочностных свойств. Уровень изменения этих свойств зависит от величины погонной энергии, типа сварных соединений и условий сварки.

При сварке низколегированных сталей изменение свойств металла шва и околошовной зоны проявляется более значительно. В низколегированной горячекатаной стали могут появиться закалочные структуры на участках перегрева и нормализации. Уровень изменения механических свойств такой стали больше, чем у низкоуглеродистой горячекатаной стали.

Термообработка (наиболее часто — закалка) низколегированных сталей усложняет технологию их сварки. Для получения равнопрочного сварного соединения необходимо применять соответствующие технические приемы (сварку короткими участками негермоупрочненных и длинными — термоупрочненных и др.). Протяженность участков зоны термического влияния, где произошло заметное изменение свойств основного металла под действием термического цикла (разупрочнение или закалка), зависит от способа и режима сварки, состава и толщины, конструкции сварного соединения. Повышение погонной энергии сварки сопровождается расширением разупрочненной зоны и снижением твердости металла в ней. Это вызвано увеличением объема металла, подвергавшегося высокотемпературному нагреву, и замедлением темпа охлаждения. Околошовная зона, где наиболее резко выражены явления перегрева или закалки, — вероятное место образования холодных трещин при сварке низколегированных сталей.

В процессе изготовления конструкций из низкоуглеродистых и низколегированных сталей на заготовительных операциях и при сварке в зонах, удаленных от высокотемпературной области, возникает пластическая деформация. Эти зоны, попадая при наложении последующих швов под нагрев до температуры около 300°C , становятся участками деформационного старения, приводящего к снижению пластических и повышению прочностных свойств металла и к возможному возникновению трещин. Высокий отпуск при $600 - 650^{\circ}\text{C}$ в этих случаях служит эффективным средством восстановления свойств металла. Высокий отпуск применяют и для снятия сварочных напряжений.

Сварные соединения из низкоуглеродистых сталей обладают удовлетворительной стойкостью против образования кристаллизационных трещин. Это обусловлено низким содержанием в них углерода. Однако для низкоуглеродистых сталей, содержащих углерод (свыше $0,20\%$), возможно образование кристаллизационных трещин при сварке угловых швов и первого корневого шва в многослойных швах, особенно с повышенным зазором, что связано в основном с неблагоприятной формой провара.

Стали с содержанием углерода $0,25 - 0,35\%$ можно сваривать только при положительных температурах. Для изделий

с большой толщиной и жесткой конструкцией целесообразно осуществлять предварительный подогрев до 100–130 °С.

Сварку ограниченно свариваемых углеродистых сталей (0,35–0,45 %С) осуществляют с предварительным или сопутствующим подогревом при 100–150 °С, после сварки целесообразен высокий отпуск при 600–650 °С. При сварке изделий сложной конфигурации и большой жесткости необходим общий подогрев перед сваркой до 300–450 °С. После сварки таких изделий обязателен высокий отпуск.

Стали, содержащие углерод более 0,45 %, как правило, свариваются трудно. В этом случае выполняют общий подогрев изделия до 350–500 °С и поддерживают эту температуру в процессе сварки, после сварки сталь термически обрабатывают по режиму для данной марки. Необходимо отметить, что во всех случаях подогрев изделия направлен прежде всего на снижение скорости охлаждения и уменьшение вероятности образования закалочных структур.

Температуру предварительного подогрева (T_n) выбирают из условия $T_n = 350 \sqrt{C_2} - 0,25$, где $C_2 = C_x(1 + 0,005S)$ – полный эквивалент углерода; C_x – химический эквивалент углерода; S – толщина стали, мм.

1.4. СВАРОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ И ДЕФОРМАЦИИ

Механизм образования напряжений и деформаций. В процессе изготовления сварных конструкций в них возникают сварочные напряжения и деформации. Сварочные напряжения, превышающие предел текучести металла, вызывают его пластическую деформацию. Это приводит к изменению размеров и формы изделия, т. е. к его короблению. Если сварочные напряжения превышают предел прочности, то происходит нарушение сплошности сварного шва или соединения, т. е. образуются трещины.

Причинами возникновения сварочных напряжений и деформаций являются неравномерный нагрев основного металла, усадка расплавленного металла и структурные превращения в металле шва в процессе его охлаждения.

При нагреве металла происходит расширение его объема. Если нагревать свободно лежащую пластину, то она увеличит свои линейные размеры на определенную величину. После остывания эта пластина примет свои первоначальные размеры и в ней не будет ни внутренних напряжений, ни остаточных деформаций. При местном нагреве этой же пластины, но жестко закрепленной с обоих концов (рис. 1.4.), в ней возникнут сжимающие внутренние напряжения, которые при 600 °С превысят

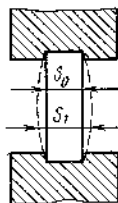


Рис. 1.4. Схема деформации бруса, жестко закрепленного в неподвижных стенках, при местном нагреве

предел текучести нагретого участка, в нем произойдет пластическая деформация сжатия и пластина станет несколько толще (S_1). Аналогичные процессы протекают при сварке конструкций особенно больших толщин, где неравномерность нагрева проявляется в большей мере.

Другой причиной возникновения напряжений и деформаций является усадка расплавленного металла шва в процессе его остывания и кристаллизации. Явление усадки объясняется тем, что при затвердевании металл становится более плотным, в результате чего объем его уменьшается. Но, поскольку основной металл, остающийся в неизменном объеме, оказывает сопротивление этой усадке, в сварном соединении возникают внутренние напряжения.

Сварные изделия в результате образования упругопластических деформаций в сварных соединениях испытывают общие деформации. Последние разделяют на продольные и поперечные деформации, деформации изгиба, скручивания и потери устойчивости. При симметричной укладке швов происходит продольная и поперечная их усадка, приводящая к сокращению элементов по длине или по ширине (рис. 1.5, а). При несимметричной укладке возникает изгиб (коробление) в продольном и поперечном направлениях (рис. 1.5, б).

Деформации скручивания образуются вследствие несимметричного расположения швов в поперечных сечениях элементов. Деформации потери устойчивости вызываются сжимающими напряжениями, которые образуются в процессе нагревания и остывания изделий (например, сжатая с двух концов пластина).

Следует отметить: чем меньше объем наплавленного металла, тем меньше величина внутренних напряжений и деформаций. Причем деформация конструкции происходит в сторону большего объема расплавленного металла.

При нагревании в металле происходят структурные превращения, сопровождающиеся изменением объемов металла и образованием внутренних (собственных) напряжений. Изменение объемов металла происходит вследствие образования новых структур, имеющих другие размеры зерен и их взаимное

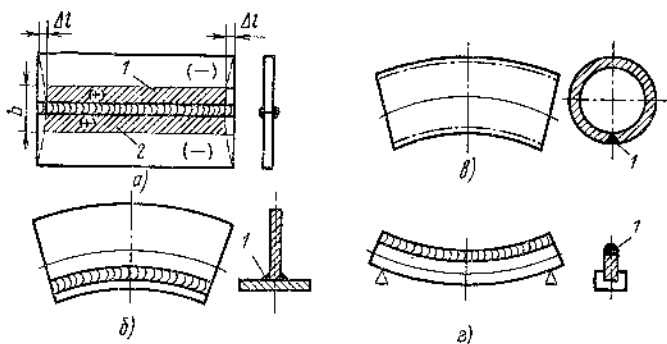


Рис. 1.5. Деформации сварных изделий от продольной усадки наплавленного металла:

а — при симметричном расположении шва, *б*, *в* — при несимметричном расположении шва, *г* — при наплавке валика на кромку полосы: 1 — сварочный шов, 2 — зона нагрева, Δl — величина деформации от продольной усадки, *b* — ширина зоны нагрева

расположение, отличное от исходной структуры. Такое явление чаще всего наблюдается при сварке легированных сталей. Внутренние (собственные) напряжения в зависимости от объема тела, в пределах которого они уравновешены, подразделяют на напряжения первого, второго и третьего рода. Собственные напряжения первого рода уравниваются в относительно больших объемах (макрообъемах), соизмеримых с размерами изделия или его частей, и обладают определенной ориентацией в зависимости от формы изделия. Собственные напряжения второго рода уравниваются в пределах микрообъемов тела, т. е. в пределах одного или нескольких зерен металла. Собственные напряжения третьего рода уравниваются в пределах кристаллической решетки. Напряжения второго и третьего рода не имеют определенной направленности.

В свою очередь, собственные напряжения могут быть одноосными (или линейными), двухосными (или плоскостными) и трехосными (или объемными). В зависимости от времени существования они могут быть временными, существующими в период выполнения технологической операции или протекания физического процесса, и остаточными, устойчиво сохраняющимися в течение длительного процесса.

Способы уменьшения сварочных напряжений. Для уменьшения сварочных напряжений используют три основных способа: уменьшают объем наплавленного металла за счет использования оптимальной формы разделки кромок и применения более концентрированных источников нагрева; создают в зонах пластических деформаций от нагрева дополнительные деформации

противоположного знака; компенсируют возникающие деформации и перемещения симметричным расположением шва, свободной усадкой. Практически эти способы можно реализовать следующим образом.

Подогрев при сварке изменяет поля температур, а в ряде случаев и свойства металла, воздействуя на термический цикл. При этом изменяются напряжения, создаваемые структурными превращениями. Подогрев уменьшает предел текучести, модуль упругости и перепад температур. Это способствует уменьшению максимальных остаточных напряжений.

Проковку применяют как в процессе сварки по остывающему металлу, так и после полного его остывания. Проковкой осаживают металлы по толщине, создавая пластические деформации удлинения в плоскости, перпендикулярной направлению удара. Этим достигается уменьшение растягивающих или сжимающих остаточных напряжений. Проковка рекомендуется при многослойной сварке металла большой толщины, причем, чтобы избежать образования трещин и надрывов, первый и последний слои многослойного шва не проковывают. Швы на металле, склонном к закалке, проковывать не следует.

Эффективным средством снижения остаточных напряжений является прокатка как шва, так и околошовной зоны.

При импульсной обработке металла взрывом создаются напряжения в его поверхностном слое, что обуславливает перераспределение остаточных напряжений.

Часто используют также статическое или вибрационное нагружение. Причем нагружение производят таким образом, чтобы в зоне сварки создавались растягивающие напряжения. Если нагружение выполняют после сварки, необходимо, чтобы вновь созданные напряжения от нагрузки складывались с остаточными растягивающими напряжениями и вызывали пластические деформации. После снятия нагрузки напряжения снижаются. В качестве нагружения применяют растяжение или изгиб.

Если создать с двух сторон сварного соединения зоны нагрева (рис. 1.6, а), то металл, расширяясь, вызовет растяжение конструкций вдоль шва и сжатие ее поперек шва (рис. 1.6, б). Такая схема напряжений благоприятна для протекания пластических деформаций в направлении вдоль шва, что как раз необходимо для снятия остаточных растягивающих напряжений. Если перемещать зоны нагрева вдоль шва и охлаждать металл позади источника теплоты, процесс снижения остаточных напряжений можно сделать непрерывным.

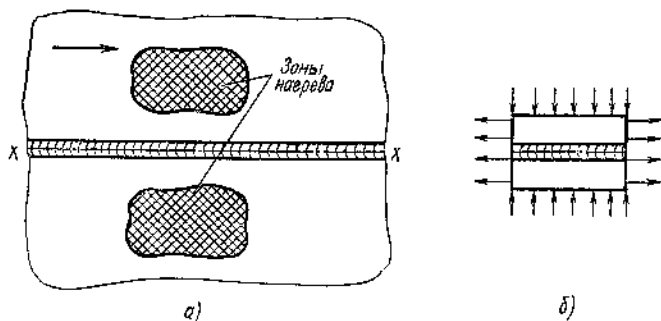


Рис. 1.6. Схема процесса снижения остаточных напряжений местным нагревом

Отпуск после сварки применяют для выравнивания структуры шва и снижения остаточных напряжений; целесообразен в том случае, если к прочности и точности размеров сварной конструкции предъявляются повышенные требования, а также если необходимо повысить сопротивляемость ее хрупким разрушениям. Различают общий отпуск — равномерно нагревают изделие целиком; местный — нагревают лишь часть конструкции в зоне сварного шва; поэтапный — источник нагрева движется вдоль конструкции, например трубы или оболочки, и последовательно нагревает ее участки; поэлементный — термической обработке подвергают узлы сварной конструкции, а затем сваривают их между собой. Основное достоинство отпуска как способа снижения остаточных напряжений в том, что он не вызывает пластических деформаций, которые бы уменьшали пластичность металла. Отпуск включает нагрев, выравнивание температуры по длине и сечению изделия, выдержку при температуре отпуска и охлаждение. Выдержка протекает около трех часов, после чего производят естественное охлаждение.

Способы уменьшения деформаций. Меры по уменьшению деформаций от сварки предусматриваются на всех этапах проектирования и изготовления большинства сварных конструкций. На стадии разработки проекта принимают такие конструктивные решения:

1. Назначают минимальные объемы наплавленного металла; сечения угловых швов выбирают по расчету на прочность или в соответствии с рекомендациями о минимальных катетах. Например, при толщине металла более 12 мм применяют вместо V-образной разделки кромок X- и К-образные. С этой же целью заменяют прерывистые соединения на сплошные швы

меньшего сечения; широко используют гнутые и штампованные профили, назначают минимально допустимые размеры на разделку кромок и зазоры. Избегают вставку латок, не применяют усиливающих накладок и косынок, не создают ограниченных замкнутых контуров, не допускают концентрации и пересечений сварных швов.

2. Используют способы сварки с минимальным тепловложением, например вместо однопроходной сварки — многопроходную.

3. Балочные конструкции проектируют с таким поперечным сечением и расположением швов, чтобы моменты сил, создаваемые усадкой, были уравновешены (рис. 1.7). Этот способ заключается в выборе последовательности выполнения швов, при которой уменьшение деформаций, возникших при наложении предыдущих швов, обеспечивается наваркой последующих швов.

4. Стремятся к таким последовательностям сборочно-сварочных операций, при которых площади поперечных сечений во время выполнения тех или иных швов были по возможности максимальными. Например, последовательное наращивание элементов в сложных конструкциях дает большее искажение размеров, чем предварительная сборка всей конструкции на прихватках с последующей сваркой.

5. В некоторых случаях обеспечивают свободное сокращение элементов от усадки, чтобы не вызывать искажений конструкции в целом. Например, стыковое соединение листов выполняют до закрепления их к другим частям конструкции, обеспечивая свободную поперечную усадку швов.

6. В конструкциях с тонкостенными элементами швы располагают либо на жестких элементах (рис. 1.8), либо вблизи них.

7. Для получения сварных конструкций заданных размеров предусматривают припуски на усадку швов.

При разработке технологии и осуществлении сварки используют следующие мероприятия:

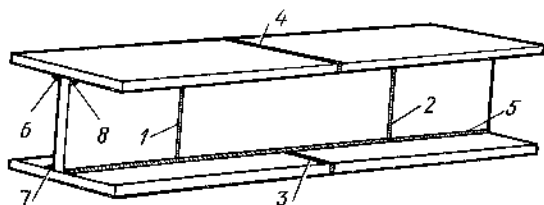


Рис. 1.7. Уравновешивание деформаций в двутавровой балке:

1—8 — порядковые номера швов

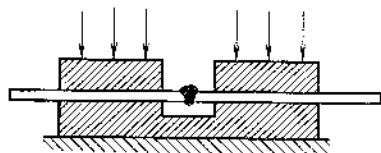


Рис. 1.8. Жесткое закрепление листов

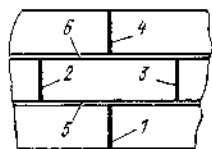


Рис. 1.9. Последовательность сборочно-сварочных операций

1–6 – порядковые номера наложения швов

1. Применяют рациональную последовательность сборочно-сварочных операций. Например, конструкции расчлняют на отдельные узлы, которые могут быть по отдельности легко выправлены, а затем сварены между собой с минимальными отклонениями (рис. 1.9).

2. Используют соответствующую оснастку и приспособления для сборки и закрепления свариваемых элементов (например, прижатие тонких листов при сварке стыковых соединений, закрепление ребер и диафрагм при выполнении угловых швов и т. д.). Они особенно эффективны для исключения временных перемещений, которые значительны по размеру, но не сопровождаются большими усадочными силами.

3. Создают искусственные деформации, чаще всего обратным выгибом, величина которого устанавливается расчетным или опытным путем (рис. 1.10). Раскатывают края обечайек перед сваркой кольцевых швов с целью компенсации последующих перемещений.

4. Создают в зоне сварки с помощью специальных приспособлений напряжения растяжения (обычно изгибом), чтобы уменьшить усадочную силу. Такой прием используют при сварке балок (рис. 1.11).

5. Назначают сборочные размеры заготовок с учетом последующей усадки, например устанавливают перемешный по длине зазор при электрошлаковой сварке (рис. 1.12, а), компенси-

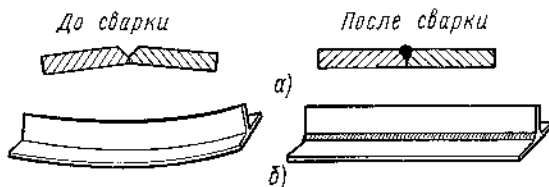


Рис. 1.10. Обратные деформации и положение элементов изделия после сварки:

а – стыкового соединения, б – тавровой балки

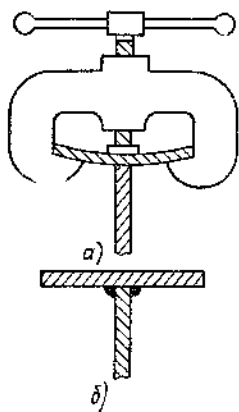


Рис. 1.11. Положение полки:

a — перед сваркой, *б* — после сварки

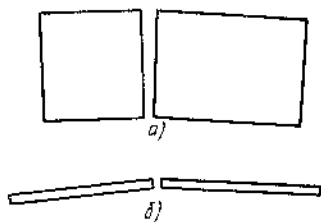


Рис. 1.12. Создание перемещений:

a — переменным зазором, *б* — компенсацией угла

руют угловые деформации при сварке стыковых соединений (рис. 1.12, б).

Для правки конструкций после сварки используют различные механические и термические способы. При механической правке с помощью молотов, домкратов, винтовых прессов или других устройств создается ударная или статическая нагрузка, которая обычно прилагается со стороны наибольшего выпгиба изделия. Изделия из тонколистового материала можно править прокаткой. Прокатка создает пластическую деформацию металла по толщине и приводит в основном к удлинению металла в продольном и частично в поперечном направлениях. Устранение деформаций прокаткой осуществляется на соединениях из сталей, титановых и алюминиевых сплавов толщиной до 8—12 мм, а иногда и на соединениях больших толщин. Не рекомендуется применять прокатку для малопластичных материалов.

Термическая правка заключается в местном нагреве небольших участков металла деформированной конструкции. Нагрев, как правило, производят сварочными горелками большой мощности до 600—800 °С. При охлаждении нагретые участки сжимаются и выправляют изделие. Исправление деформации сварной тавровой балки (рис. 1.13, а) производят нагревом выпуклой части вертикальной стенки. Ширина полос *l* нагрева 20—30 мм. Полосы нагрева сходятся под углом 30°. При правке сварных швеллеров (рис. 1.13, б) помимо треугольных участков нагрева, располагаемых на обеих полках, вы-

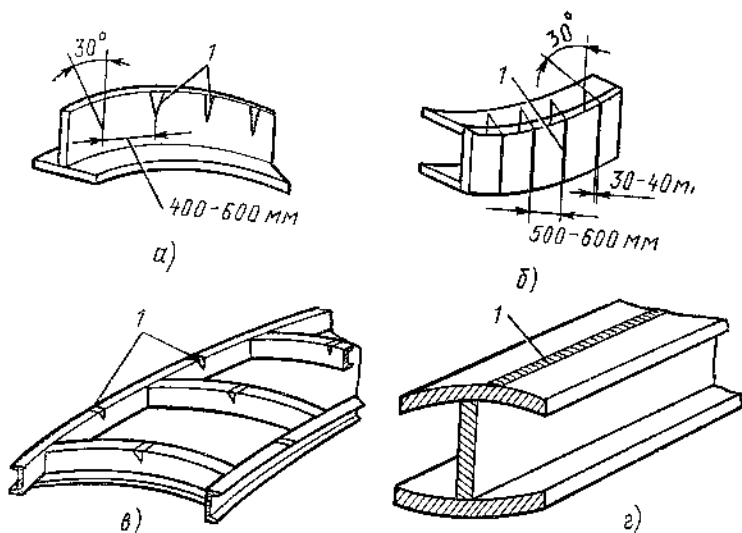


Рис. 1.13. Расположение участков нагрева при термической правке: а — тавровой балки, б — балки швеллерного сечения, в — рамы из швеллеров, г — двутавровой балки

поднято несколько полос нагрева на его стенке. Схема правки сварной рамы из швеллеров показана на рис. 1.13, в, и двутавровой балки — на рис. 1.13, г.

В ряде случаев применяют термомеханическую правку, которая заключается в сочетании местного нагрева с приложением статической нагрузки в направлении, обратном прогибу конструкции.

Термическая правка общим нагревом конструкции без использования приспособлений невозможна, так как в этом случае одновременно происходит снижение растягивающих и сжимающих напряжений и эффект правки деформаций отсутствует. В настоящее время такую правку широко применяют в промышленности.

Контрольные вопросы

1. Каково назначение присадочных металлов?
2. Укажите область применения керамических и плавящихся флюсов.
3. Изложите особенности металлургических процессов при сварке.
4. Объясните изменение структуры шва при многослойной сварке.
5. Какие факторы определяют свариваемость сталей?
6. Каковы причины возникновения напряжений и деформаций при сварке?
7. Расскажите о способах уменьшения и устранения сварочных напряжений и деформаций.

2. ДЕФЕКТЫ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

2.1. ТИПЫ И ВИДЫ ДЕФЕКТОВ

В сварочном производстве принято выделять следующие типы дефектов:

1. Дефекты подготовки и сборки изделий под сварку.
2. Дефекты формы шва.
3. Наружные и внутренние дефекты.

Дефекты подготовки и сборки. Характерными видами дефектов при сварке плавлением являются неправильный угол скоса кромок в швах с V-, X- и U-образной разделкой; слишком большое или малое притупление по длине стыкуемых кромок; непостоянство зазора между кромками по длине стыкуемых элементов; несовпадение стыкуемых плоскостей, слишком большой зазор между кромками свариваемых деталей, расхождение и загрязнение кромок.

Указанные дефекты могут возникнуть из-за неисправности станочного оборудования, на котором обрабатывали заготовки; недоброкачества исходных материалов; ошибок в чертежах; низкой квалификации слесарей и сборщиков.

Дефекты формы шва. Форма и размеры сварных швов обычно задаются техническими условиями, указываются на чертежах и регламентируются стандартами. Конструктивными элементами стыковых швов (рис. 2.1) являются их ширина e , высота усиления q и подварки q_1 ; угловых швов тавровых (рис. 2.2) и нахлесточных соединений без скоса кромок — катет K и толщина a . Размеры швов зависят от толщины S свариваемого металла и условий эксплуатации конструкций.

При выполнении сварных соединений любыми методами сварки плавлением швы могут иметь неравномерную ширину и высоту, бугры, седловины, неравномерную высоту катетов в угловых швах (рис. 2.3).

Неравномерная ширина швов образуется при неправильных движениях электрода, зависящих от зрительно-двигательной координации (ЗДК) сварщика, а также в результате возникших отклонений от заданного зазора кромок при сборке. При автоматической сварке причиной образования этого дефекта является нарушение скорости подачи проволоки, скорости сварки и т. д.

Неравномерность усиления по длине шва, местные бугры и седловины получаются при ручной сварке из-за недостаточной квалификации сварщика и в первую очередь объясняются особенностью ЗДК сварщика; непра-

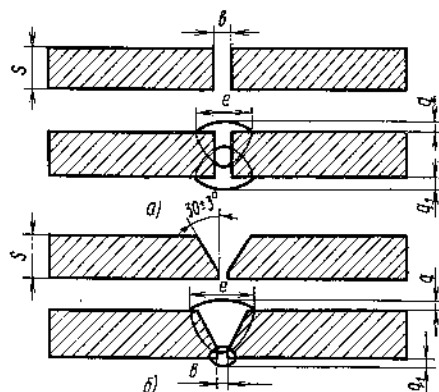


Рис. 2.1. Основные конструктивные элементы стыковых швов:

a — без подготовки кромок малых толщин, b — с V-образной разделкой

вильными приемами заварки прихваток; неудовлетворительным качеством электродов.

При автоматической сварке эти дефекты встречаются редко и являются следствием неполадок в механизме автомата, регулирующем скорость сварки.

Перечисленные дефекты формы шва снижают прочность соединения и косвенно указывают на возможность образования внутренних дефектов.

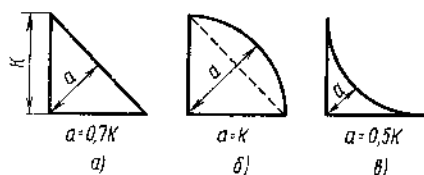


Рис. 2.2. Основные конструктивные элементы наплавочных швов:

a — нормальный, b — выпуклый, $в$ — вогнутый

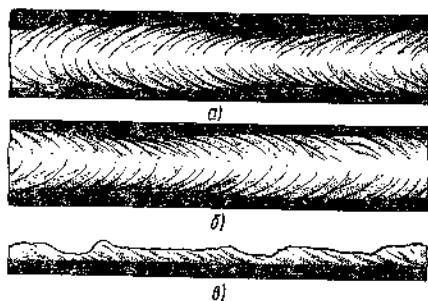


Рис. 2.3. Дефекты формы швов:

a — неравномерная ширина шва при ручной сварке, b — то же, при автоматической сварке, $в$ — неравномерное усиление — бугры и седловины

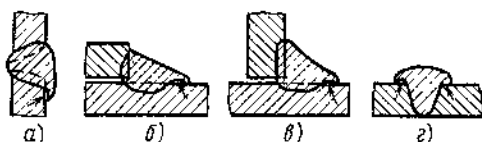


Рис. 2.4. Наплывы в швах:

а — горизонтальном, *б* — нахлесточного соединения, *в* — таврового соединения, *г* — стыкового соединения или при наплавке валиков

Наружные дефекты. К ним относят наплывы, подрезы, незаделанные кратеры, прожоги.

Наплывы образуются в результате стекания расплавленного металла электрода на нерасплавленный основной металл или ранее выполненный валик без сплавления с ним (рис. 2.4). Наплывы могут быть местными, в виде отдельных зон, а также значительными по длине. Наплывы возникают из-за чрезмерной силы тока при длинной дуге и большой скорости сварки; неудобного пространственного положения шва (вертикальное, потолочное); увеличенного наклона плоскости, на которую накладывают сварной шов; неправильного ведения электрода или неправильного смещения электродной проволоки при сварке кольцевых швов под флюсом; выполнения вертикальных швов снизу вверх и недостаточного опыта сварщика.

Подрезы представляют собой углубления (канавки) в основном металле, идущие по краям шва (рис. 2.5). Глубина подреза может колебаться от десятых долей до нескольких миллиметров. Причинами появления этого дефекта являются значительной силы ток и повышенное напряжение дуги; неудобное пространственное положение при сварке; небрежность сварщика.

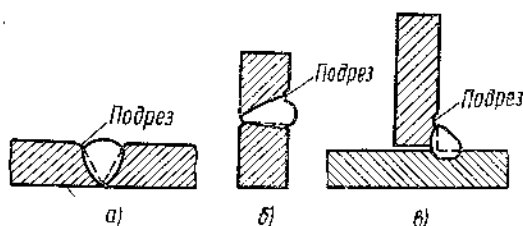


Рис. 2.5. Подрезы:

а — в стыковом шве, *б* — в горизонтальном шве, расположенном на вертикальной плоскости, *в* — в угловом шве таврового соединения

Подрезы в шве уменьшают рабочую толщину металла, вызывают местную концентрацию напряжений от рабочих нагрузок и могут быть причиной разрушения швов в процессе эксплуатации. Подрезы в стыковых и угловых швах, расположенных поперек действующих на них усилий, приводят к резкому снижению вибрационной прочности; даже достаточно крупные подрезы, расположенные вдоль действующего усилия, отражаются на прочности в значительно меньшей степени, чем подрезы, расположенные поперек.

Кратер — углубление, образующееся в конце шва при внезапном прекращении сварки. Особенно часто возникают кратеры при выполнении коротких швов. Размеры кратера зависят от величины сварочного тока. При ручной сварке диаметр кратера колеблется от 3 до 20 мм. При автоматической сварке он имеет удлиненную форму в виде канавки. Незаделанные кратеры оказывают неблагоприятное воздействие на прочность сварного соединения, так как являются концентраторами напряжений. При вибрационной нагрузке снижение прочности соединения из малоуглеродистой стали достигает 25%, а из низколегированных — 50% при наличии в шве кратера.

Прожоги — дефекты в виде сквозного отверстия в сварном шве, образующиеся в результате вытекания сварочной ванны; при сварке металла небольшой толщины и первого слоя в многослойных швах, а также при сварке снизу вверх вертикальных швов (рис. 2.6). Причинами прожогов являются чрезмерно высокая погонная энергия дуги, неравномерная скорость сварки, остановка источника питания, увеличенный зазор между кромками свариваемых элементов. Во всех случаях отверстие, возникающее при прожогах хотя и заделывается, однако шов в этом месте получается неудовлетворительный по внешнему виду и качеству.

Поджоги возникают в результате возбуждения дуги («чирканья электродом») на краю кромки. Этот дефект является источником концентрации напряжений, его обязательно удаляют механическим способом.

Внутренние дефекты. К ним относят поры, шлаковые включения, непровары, несплавления и трещины.

Поры (рис. 2.7) в виде полости округлой формы, заполненной газом, образуются вследствие загрязненности кромок свариваемого металла, использования влажного флюса или отсыревших электродов, недостаточной защиты шва при сварке в среде углекислого газа, увеличенной скорости сварки и завышенной длины дуги. При сварке в среде углекислого газа, а в некоторых случаях и под флюсом на больших токах образуются сквозные поры — так называемые свищи.

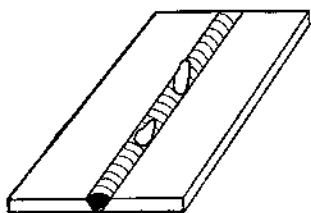


Рис. 2.6. Прожоги

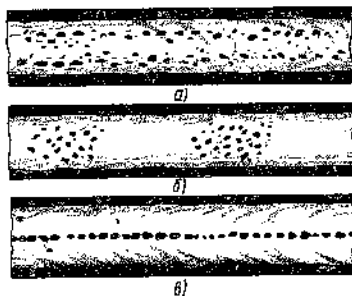


Рис. 2.7. Характер пористости в наплавленном металле шва:

а — равномерная пористость, б — скопление пор, в — цепочки пор

Размеры внутренних пор колеблются от 0,1 до 2—3 мм в диаметре, а иногда и более. Поры, выходящие на поверхность шва, могут иметь и большие размеры. Свищи при сварке под флюсом и в углекислом газе на больших токах могут иметь диаметр до 6—8 мм. Так называемые «червеобразные» поры имеют длину до нескольких сантиметров.

Равномерная пористость (рис. 2.7, а) обычно возникает при постоянно действующих факторах: загрязненности основного металла по свариваемым поверхностям (ржавчина, масло и т. п.), непостоянной толщине покрытия электродов и т. д. Скопление пор (рис. 2.7, б) образуется при местных загрязнениях или при отклонениях от установленного режима сварки, а также при нарушении сплошности обмазки электрода, при сварке в начале шва, при обрыве дуги или при случайных изменениях ее длины.

Цепочки пор (рис. 2.7, в) образуются в условиях, когда газообразные продукты проникают в металл по оси шва на всем его протяжении (при сварке по ржавчине, при подсосе воздуха через зазор между кромками, при подварке корня шва некачественными электродами). Одиночные поры возникают за счет действия случайных факторов (колебания напряжения в сети и т. д.). Наиболее вероятно возникновение пор при сварке алюминиевых и титановых сплавов, в меньшей степени при сварке сталей.

Шлаковые включения в металл сварного шва — это небольшие объемы, заполненные неметаллическими веществами (шлаками, окислами). Вероятность образования шлаковых включений в значительной мере определяется маркой сварочного электрода. При сварке электродами с тонкой обмазкой вероятность образования шлаковых включений очень велика.

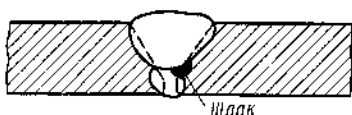


Рис. 2.8. Шлаковые включения по подрезу кромки в многослойном шве

При сварке качественными электродами, дающими много шлака, расплавленный металл дольше находится в жидком состоянии и неметаллические включения успевают всплыть на его поверхность, в результате чего шов засоряется шлаковыми включениями незначительно.

Шлаковые включения можно разделить на макро- и микроскопические. Макроскопические включения имеют сферическую и продолговатую форму в виде вытянутых «хвостов». Эти включения образуются в шве из-за плохой очистки свариваемых кромок от окалины и других загрязнений и чаще всего из-за внутренних подрезов и плохой зачистки от шлака поверхности первых слоев многослойных швов перед заваркой последующих (рис. 2.8).

Микроскопические шлаковые включения возникают в результате образования в процессе плавления некоторых химических соединений, остающихся в шве при кристаллизации.

Окисные пленки могут возникать при всех видах сварки. Причины их образования такие же, как и шлаковых включений: загрязненность поверхностей свариваемых элементов; плохая зачистка от шлака поверхности слоев шва при многослойной сварке; низкое качество электродного покрытия или флюса; низкая квалификация сварщика и т. д.

Непровары — это дефект в виде местного несплавления в сварном соединении вследствие неполного расплавления кромок или поверхностей ранее выполненных валиков. Непровары (рис. 2.9, а) в виде несплавления основного металла с наплавленным представляют собой тонкую прослойку оксидов, а в некоторых случаях грубую шлаковую прослойку между основным и наплавленным металлом. Причинами образования таких непроваров являются плохая зачистка кромок свариваемых деталей от окалины, ржавчины, краски, шлака, масла

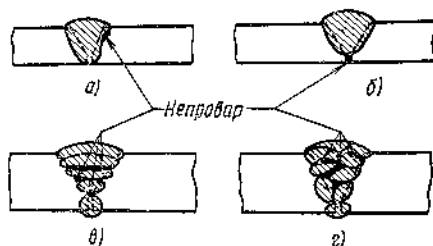


Рис. 2.9. Непровары:

а — по кромке с основным металлом, б — в корне шва, в — между отдельными слоями, г — между валиками

и других загрязнений; блуждание или отклонение дуги под влиянием магнитных полей, особенно при сварке на постоянном токе; электроды из легкоплавкого материала — при выполнении шва такими электродами жидкий металл натекает на неоплавленные свариваемые кромки; чрезмерная скорость сварки, при которой свариваемые кромки не успевают расплавиться; значительное смещение электрода в сторону одной из свариваемых кромок, при этом расплавленный металл натекает на вторую не расплавленную кромку, прикрывая непровар; неудовлетворительное качество основного металла, сварочной проволоки, электродов, флюсов и т. д.; неудовлетворительная работа сварочного оборудования — колебания силы сварочного тока и напряжения дуги в процессе сварки; низкая квалификация сварщика.

Причинами образования непроваров в корне шва (рис. 2.9, б) кроме указанных выше могут быть недостаточный угол скоса кромок; большая величина их пригупления; недостаточный зазор между кромками свариваемых деталей; большое сечение электрода или присадочной проволоки, укладываемой в разделку шва, что значительно затрудняет расплавление основного металла. Непровары между отдельными слоями (рис. 2.9, в, г) возникают по следующим причинам: не полностью удален шлак, образовавшийся при наложении предыдущего валика, что возможно из-за трудности его удаления или небрежности сварщика; недостаточная тепловая мощность (малый ток, излишне длинная или короткая дуга).

Трещины — частичное местное разрушение сварного соединения в виде разрыва (рис. 2.10). Образованию трещин способствуют следующие факторы: сварка легированных сталей в жестко закрепленных конструкциях; высокая скорость охлаждения при сварке углеродистых сталей, склонных к закалке на воздухе; применение высокоуглеродистой электродной проволоки при автоматической сварке конструкционной легированной стали; использование повышенных плотностей сварочного тока при наложении первого слоя многослойного шва толсто-

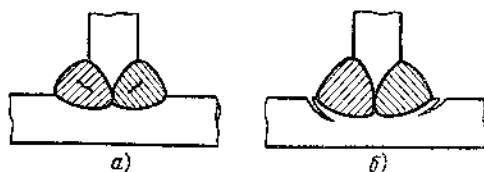


Рис. 2.10. Трещины в сварных швах и соединениях:

а — в наплавленном металле, б — в зонах сплавления и термического влияния

стенных сосудов и изделий; недостаточный зазор между кромками деталей при электрошлаковой сварке; слишком глубокие и узкие швы при автоматической сварке под флюсом; выполнение сварочных работ при низкой температуре; чрезмерное нагромождение швов для «усиления» конструкции (применение накладок и т. п.), в результате чего возрастают сварочные напряжения, способствующие образованию трещин в сварном соединении; наличие в сварных соединениях других дефектов, являющихся концентраторами напряжений, под действием которых в области этих дефектов начинают развиваться трещины.

Трещины относят к числу наиболее опасных дефектов и по всем действующим нормативно-техническим документам являются недопустимыми.

Слипания представляют собой несплошности малого раскрытия на свариваемых поверхностях или кромках металла. Слипания — очень опасные дефекты, плохо выявляются современными средствами дефектоскопии. Наиболее вероятно возникновение таких дефектов при аргодуговой сварке алюминий-магниевого сплава, а также при контактной сварке и сварке давлением. При сварке давлением возникают дефекты, которые по своему характеру отличаются от перечисленных выше. Однако такие дефекты, как шлаковые включения, подрезы, наплывы и кратеры, обычно отсутствуют.

Типичными дефектами стыковой, точечной и шовной контактной сварки являются пережог металла, непровары, несплавления, пористость, радиальные и продольные трещины. Эти дефекты образуются при нарушении технологии сварки (большим или малым током, неправильно выбранным давлением, скорости осадки и продолжительности выдержки под током и т. д.). Все эти дефекты значительно снижают работоспособность соединений. Выявлять дефекты сварки давлением обычно значительно сложнее, чем дефекты сварки плавлением.

2.2. ВЛИЯНИЕ ДЕФЕКТОВ СВАРКИ НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ КОНСТРУКЦИЙ

При контроле качества сварных соединений и оценке годности их к эксплуатации необходимо знать влияние наружных и внутренних дефектов на прочностные характеристики конструкции. Опасность дефектов наряду с влиянием их собственных характеристик (типы, виды, размеры, формы и т. п.) зависит от множества конструктивных и эксплуатационных факторов. Изучение этого вопроса представляет большие трудности как с практической, так и с теоретической стороны. В большинстве

случаев степень влияния того или иного вида дефекта на работоспособность конструкций устанавливают испытанием образцов с дефектами.

При сдаче конструкции в эксплуатацию прежде всего оценивают допустимость наружных дефектов. Значения допустимости наружных дефектов, как правило, указаны в технических условиях на изготовление конструкции и зависят от условий ее эксплуатации.

Установлено, что усиление шва не снижает статической прочности, однако сильно влияет на вибрационную прочность. Чем больше усиление шва и, следовательно, меньше угол перехода от основного металла к наплавленному, тем сильнее оно снижает предел выносливости. Таким образом, наличие чрезмерного усиления шва может свести к нулю все преимущества, полученные от оптимизации технологического процесса по улучшению качества сварных соединений, работающих при вибрационных, динамических и повторно-статических нагрузках.

Опасным наружным дефектом является подрез. Он не допускается в конструкциях, работающих на выносливость. Небольшой протяженности подрезы, ослабляющие сечение шва не более чем на 5% в конструкциях, работающих под действием статических нагрузок, можно считать допустимыми.

Наплывы, резко изменяя очертания швов, образуют концентраторы напряжений и тем самым снижают выносливость конструкций. Наплывы, имеющие большую протяженность, следует считать недопустимыми дефектами, так как они, кроме того что вызывают концентрацию напряжений, нередко сопровождаются непроварами. Небольшие местные наплывы, вызванные случайными отклонениями сварочных режимов от нормальных, можно считать допустимыми дефектами.

Кратеры, как и прожоги, во всех случаях являются недопустимыми дефектами и подлежат исправлению.

Для окончательной оценки качества сварного соединения контролер должен знать допустимость внутренних дефектов, которую устанавливают на основе испытаний. Результаты многочисленных исследований показывают, что для пластичных материалов при статической нагрузке (рис. 2.11, кривые 1, 2, 4) влияние величины непровара на уменьшение их прочности прямо пропорционально относительной глубине непровара или его площади. Для малопластичных и высокопрочных материалов при статической (рис. 2.11, кривые 3, 5), а также при динамической или вибрационной нагрузке (рис. 2.12) пропорциональность между потерей работоспособности и величиной дефекта нарушается.

Установлено, что поры и шлаковые включения при их отно-

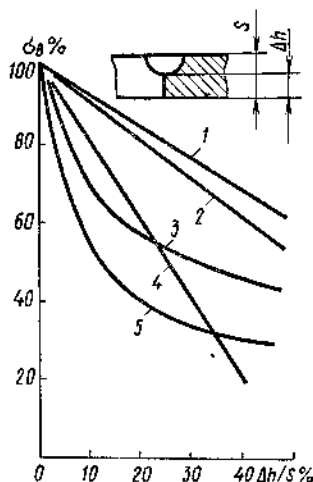


Рис. 2.11. Влияние относительной глубины $\Delta h/S$ несплавления корня шва на статическую прочность стыковых соединений (без усиления):

1 — сталь Ст3, 2 — сталь 12Х18Н9Т;
3 — сталь 25ХГФА, 4 — сплав Д16Т,
5 — сталь 30ХГСА

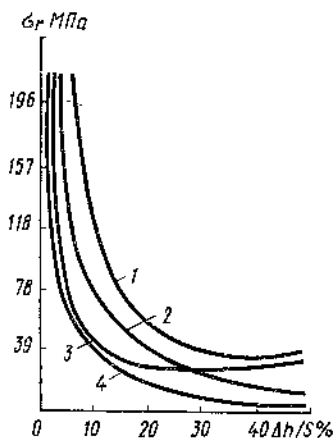


Рис. 2.12. Влияние относительной величины $\Delta h/S$ дефектов на усталостную прочность стыковых сварных соединений из низкоуглеродистой стали (без усиления):

1 — подрезы, 2 — поры, 3 — несплавление корня шва, 4 — шлаки

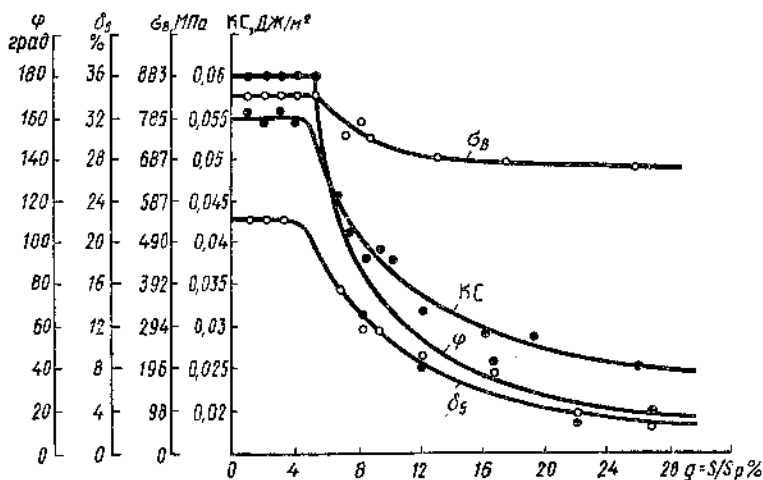


Рис. 2.13. Влияние относительной площади дефектов (пор) на механические свойства стыковых соединений из легированной стали ($\sigma_b = 850$ МПа после закалки и отпуска)

сительной суммарной площади в сечении шва до 5—10% практически мало влияют на статическую прочность соединения (рис. 2.13). Если швы имеют значительное усиление, то поры и шлаковые включения суммарной площадью (размером) 10—15% от сечения шва мало влияют на статическую прочность. Для ряда конструкций (закладные детали, стыки арматуры) в зависимости от места расположения таких дефектов их допустимая величина может составлять 10—25% от сечения шва.

Такие дефекты, как трещины, окисные пленки, несплавления, являются недопустимыми.

2.3. СПОСОБЫ ИСПРАВЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ

При обнаружении недопустимых наружных или внутренних дефектов их обязательно удаляют. Удаление наружных дефектов следует производить вышлифовкой с обеспечением плавных переходов в местах выборок. Места выборок можно не заваривать в случае, если сохранилась минимально допустимая толщина стенки детали в месте максимальной глубины выборки. Удаление дефектов с обратной стороны шва производят по всей длине заподлицо с основным металлом. Если в процессе механической обработки (вышлифовки) не удалось полностью исправить наружные дефекты, то их, как недопустимые внутренние дефекты, необходимо полностью удалить.

Удаление заглубленных наружных и внутренних дефектов (дефектных участков) в соединениях из алюминия, титана и их сплавов следует производить только механическим способом — вышлифовкой абразивным инструментом или резанием, а также вырубкой с последующей зашлифовкой. В ряде случаев в конструкциях из стали допускается удалять дефектные участки воздушно-дуговой или плазменно-дуговой строжкой с последующей обработкой поверхности выборки абразивными инструментами. При этом поверхности изделий из углеродистых и кремнемарганцовистых сталей должны быть зачищены (зашлифованы) до полного удаления следов резки.

Исправление дефектов с заваркой выборок в сварных соединениях, подлежащих обязательной термической обработке и выполненных из легированных и хромистых сталей, следует производить после высокого (450—650 °С) отпуска сварного соединения (промежуточного, окончательного или предварительного), за исключением отдельных случаев, оговоренных технологическими инструкциями.

При удалении дефектных мест целесообразно соблюдать определенные условия. Длина удаляемого участка должна быть

равна длине дефектного места плюс 10—20 мм с каждой стороны, а ширина разделки выборки должна быть такой, чтобы ширина шва после заварки не превышала двойной ширины до заварки. Форма и размеры подготовленных под заварку выборок должны обеспечивать возможность надежного провара в любом месте. Поверхность каждой выборки должна иметь плавные очертания без резких выступов, острых углублений и заусенцев. При заварке дефектного участка должно быть обеспечено перекрытие прилегающих участков основного металла.

После заварки участок необходимо зачистить до полного удаления раковин и рыхлости в кратере, выполнить на нем плавные переходы к основному металлу.

В сварных швах со сквозными трещинами перед заваркой требуется засверлить их концы, чтобы предотвратить распространение трещин. Дефектный участок в этом случае проваривают на полную глубину.

Заварку дефектного участка производят одним из способов сварки плавлением (ручной дуговой, дуговой в среде инертных газов и т. д.).

Исправленные швы сварных соединений должны быть повторно проконтролированы в соответствии с требованиями, предъявляемыми к качеству изделия. Если при этом вновь будут обнаружены дефекты, то производят их повторное исправление с соблюдением необходимых требований. Число исправлений одного и того же дефектного участка зависит от категории ответственности конструкции и, как правило, не превышает трех.

Контрольные вопросы

1. Какие основные факторы влияют на образование наружных дефектов?
2. Назовите причины появления внутренних дефектов и расскажите об их влиянии на работоспособность сварных конструкций.
3. Перечислите существующие способы исправления дефектов.

3. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ И ТЕКУЩИЙ КОНТРОЛЬ

3.1. КОНТРОЛЬ ИСХОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Для обеспечения высокого качества сварных соединений необходим контроль исходных материалов (основного металла, электродов, сварочной проволоки, флюсов, защитных газов и т. д.). Качество исходных материалов устанавливают на основании сертификатных данных, для чего определяют их со-

ответствие требованиям данного технологического процесса сварки изделий. При наличии внешних дефектов, а также при отсутствии сертификатов исходные материалы допускают к использованию только после проведения химического анализа, механических испытаний и испытаний на свариваемость.

Основной металл в виде литых заготовок проверяют на наличие пор, усадочных раковин и трещин. Особое внимание обращают на зоны, подлежащие сварке. Эти места должны быть тщательно очищены от грязи, масла, краски, ржавчины и других загрязнений. Прокат проверяют на наличие расслоений, окалины, равномерности толщины листа и т. д.

Электроды проверяют на равномерность толщины покрытия, на наличие в нем трещин и других механических повреждений. Выполняют пробную сварку, чтобы установить характер плавления электродного стержня и покрытия, легкость отделения шлака и качество формирования сварного шва (жидкотекучесть расплавленного металла, разбрызгивание). Электроды должны удовлетворять требованиям действующих ГОСТов.

Сварочную проволоку проверяют на чистоту поверхностей, отсутствие покрытий, нежелательных для данного технологического процесса сварки, расслоений и закатов. Выполняют пробную сварку, применяя соответствующие флюсы или защитный газ, для установления качества материалов по показателям, упомянутым выше для электродов.

При проверке флюсов определяют величину и равномерность размера их частиц, отсутствие в них грязи и инородных включений. Проверяют также влажность и стабилизирующие свойства флюсов.

Защитные газы проверяют на отсутствие вредных примесей и влаги.

Свариваемость — свойство металла (или сочетания металлов) образовывать при установленной технологии сварки соединение, отвечающее требованиям, обусловленным конструкцией и условиями эксплуатации изделия. Проверка исходных материалов на свариваемость должна предшествовать принятию решения об использовании тех или иных материалов в сварной конструкции. В соответствии с указанным свариваемость контролируют в двух случаях: при выборе материалов и разработке технологии сварки, т. е. при подготовке производства на стадии проекта; при запуске материалов в производственный цикл, т. е. при технологической подготовке производства. Вторая проверка связана с возможными отклонениями плавок основного металла, проволоки, а также партий электродов и флюсов от сертификатных значений.

3.2. КОНТРОЛЬ ОБОРУДОВАНИЯ И ОСНАСТКИ

Качество сварных соединений в большой степени зависит от исправной работы сварочного оборудования. Цель и назначение данного вида контроля — обеспечить поддержание сварочного оборудования в рабочем состоянии в соответствии с паспортными данными на каждую машину или аппарат. Машины и аппараты для дуговой сварки должны обеспечивать устойчивое горение дуги, требуемую точность и правильность регулировки режима сварки. Эти параметры подлежат тщательной проверке каждый раз перед пуском оборудования и в процессе производства. При газовой сварке первостепенное значение имеет проверка источников питания газами. Например, контроль работы ацетиленовых газогенераторов направлен на обеспечение подачи чистого и сухого газа при нормальной температуре и постоянном давлении. Для этого проверяют газовые магистрали, водяные затворы и регуляторы давления. Необходимо постоянно проверять плотность присоединения горелок к вентилям и шлангам. Не допускается избыточная подача кислорода или горючего газа. При контроле работы редукторов необходимо обращать внимание на постоянство рабочего давления, чувствительность их к регулировке, пропускную способность и стойкость против замерзания. Контрольно-измерительные приборы проверяют сравнением их показаний с показаниями образцовых приборов и средств измерения.

В значительной мере качество сварного соединения зависит от качества используемой специальной оснастки и приспособлений. Сборочные приспособления должны обеспечивать требуемую прочность и жесткость, точное, быстрое и надежное закрепление элементов сварной конструкции; необходимую степень точности всех размеров свариваемой детали, узла, изделия; установку свариваемого объекта в положение, удобное для сварки, и др.

Эти требования должны быть отражены в технических условиях на проектирование и изготовление приспособлений. Вновь изготовленные приспособления до ввода в эксплуатацию проверяют на соответствие техническим условиям. Необходимо обращать внимание на правильность действия упоров, зажимов и т. д. Окончательное заключение о пригодности приспособления следует давать после изготовления и проверки размеров первого сварного изделия (или узла), детали.

В процессе производства состояние приспособлений контролируют систематически и в сроки, установленные в зависимости от характера производства и выпускаемой продукции. При необходимости их подвергают ремонту или замене.

3.3. КОНТРОЛЬ ТЕХНОЛОГИИ

Большое значение для обеспечения качества выпускаемой продукции имеет контроль в процессе производства. Внимательное и непрерывное наблюдение за состоянием оборудования, аппаратуры, приспособлений, приборов и инструментов, а также за ходом выполнения сварочных операций каждым сварщиком позволяет своевременно обнаружить дефекты сварки и принять меры по устранению причин их образования.

Контроль технологии изготовления сварных изделий включает проверку подготовленных к сварке заготовок, исправности сварочных приспособлений, сборки изделий под сварку, состояния сварочных материалов (см. 3.1), сварочного оборудования (см. 3.2) и соблюдения установленных режимов сварки. У подготовленных к сварке заготовок проверяют форму, размеры и геометрию разделки кромок, а также отсутствие на их поверхностях загрязнений, ржавчины и влаги.

У сварочных приспособлений контролируют исправность зажимных устройств, пригодность установочных поверхностей, а также флюсовых, медных или угольных подкладок и теплоотводящих элементов.

В собранных узлах проверяют основные габаритные размеры, зазоры в стыках и величину смещения свариваемых кромок, качество прихваток и наличие выводных планок.

Режимы сварки контролируют в первую очередь по току, напряжению и скорости сварки в установленных пределах. Контроль ведут визуально по приборам и по внешнему виду сварного шва. При изготовлении ответственных конструкций и при серийном производстве ведут непрерывную запись параметров режима с помощью самопишущих приборов.

В ряде случаев, например при контактной стыковой сварке трубопроводов большого диаметра, по значениям режимов сварки (напряжению, давлению, времени выдержки и т. п.) делают заключение о качестве соединения в целом.

Операционный контроль за ходом технологического процесса осуществляют технологи, мастера и другие инженерно-технические работники, ответственные за работу данного участка, цеха, предприятия. При операционном контроле необходимо обращать внимание на строгое соблюдение последовательности и режимов изготовления сварных изделий в целом, так как качественное выполнение сварных соединений отдельных элементов или детали конструкции еще не гарантирует высокого качества изделия в целом.

3.4. КОНТРОЛЬ КВАЛИФИКАЦИИ СВАРЩИКОВ

Тщательный планомерный контроль подготовки изделий под сварку и процесса сварки не будет эффективным без проверки уровня подготовленности сварщиков. Для ряда производств (например, сварка стыков труб на монтаже) более 70% брака возникает по вине сварщиков. Поэтому на всех этапах технологического процесса изготовления конструкций необходимо знать их квалификацию. Для этого следует проверять медико-физиологические и квалификационные показатели. Прежде всего необходимо учитывать квалификацию сварщиков перед допуском их к выполнению определенных сварочных работ. Кроме того, в процессе производства сварщики должны периодически проходить повторные испытания.

Для проверки квалификации сварщиков администрация предприятия организует квалификационную комиссию, иногда с участием инспектора Госгортехнадзора. Испытания проводят по теории и практике сварочных работ с включением сварки образцов соответствующего изделия. При этом образцы сваривают в тех же условиях и пространственных положениях, что и реальное изделие. После внешнего осмотра сваренные образцы проверяют всеми методами неразрушающего контроля, а также подвергают механическим испытаниям. Количество образцов для испытаний регламентируется «Правилами аттестации сварщиков».

3.5. ВНЕШНИЙ ОСМОТР

Внешним осмотром проверяют качество подготовки и сборки заготовок под сварку, качество выполнения швов в процессе сварки и качество готовых сварных соединений. Обычно внешним осмотром контролируют все сварные изделия независимо от применения других видов контроля. Внешний осмотр во многих случаях достаточно информативен и является наиболее дешевым и оперативным методом контроля.

Контроль заготовки и сборки. Внешнему осмотру подвергают свариваемые материалы для выявления (определения отсутствия) вмятин, заусенцев, окалины, ржавчины и т. п. Проверяют качество подготовки кромок под сварку и сборку заготовок. К основным контролируемым размерам собранных под сварку деталей (изделий) относят зазор между кромками и притупление кромок — для стыковых соединений без разделки кромок; зазор между кромками, притупление кромок и угол их разделки — для соединений с разделкой кромок; ширину нахлестки и зазор между листами — для нахлесточных соедине-

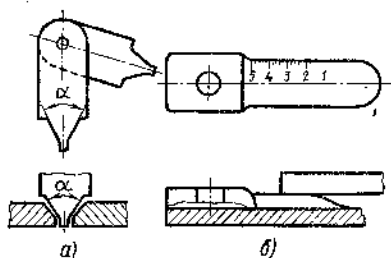


Рис. 3.1. Шаблоны для проверки сборки сварных соединений:

а — стыковых, *б* — нахлесточных

ний; зазор между листом и кромкой, угол между свариваемыми элементами, а также притупление и угол скоса кромок — для тавровых соединений; зазор между свариваемыми элементами и угол между ними — для угловых соединений. Для измерения и проверки указанных выше параметров применяют специальные шаблоны или универсальный инструмент (рис. 3.1). Детали, узлы или изделия, собранные под сварку с отклонением от технических условий или установленного технологического процесса, бракуют. Средства, порядок и методика контроля предусматриваются технологическим процессом производства.

Наблюдение за процессом сварки. На этом этапе сварщик помимо контроля режимов сварки (тока, напряжения, скорости сварки и т. п.) и стабильности горения дуги следит за правильностью выполнения валиков в многослойных швах. Особенно важным на этом этапе является тщательный осмотр первого слоя при любом количестве слоев. Качество сварки первого слоя оценивают при необходимости с помощью лупы, а для оценки качества конструкций ответственного назначения иногда применяют также капиллярную или магнитную дефектоскопию.

Осмотр готовых изделий. Внешним осмотром невооруженным глазом или с помощью лупы выявляют прежде всего дефекты швов в виде трещин, подрезов, пор, свищей, прожогов, наплывов, непроваров в нижней части швов. Многие из этих дефектов, как правило, недопустимы и подлежат исправлению. При осмотре выявляют также дефекты формы швов, распределение чешуек и общий характер распределения металла в усилении шва.

Внешний вид поверхности шва характерен для каждого способа сварки, а также для пространственного положения, в котором выполнялась сварка. Равномерность чешуек характеризует работу сварщика, его умение поддерживать постоянную длину дуги и равномерную скорость сварки. Неравномерность чешуек, разная ширина и высота шва указывают на колебание

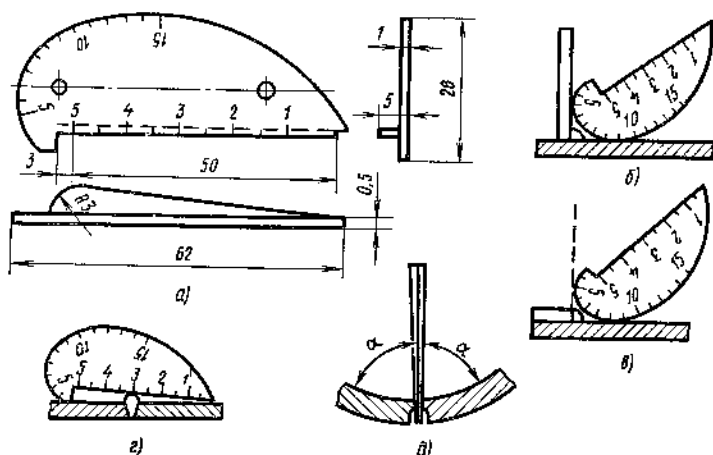


Рис. 3.2. Универсальный шаблон:

а — общий вид, *б, в* — измерение высоты углового шва, *г* — измерение высоты стыкового шва, *д* — измерение зазора

мощности дуги, частые обрывы и неустойчивость горения дуги в процессе сварки. В таком шве возможны непровары, поры, шлаки и другие дефекты. При сварке в вертикальном и потолочном положениях сварные швы имеют резко выраженную неравномерность чешуек, бугры, седловины и наплывы. При сварке в защитных газах в вакууме внешняя поверхность швов гладкая, блестящая, без чешуек и имеет вид полоски расплавленного металла. В сварных швах, выполняемых из титана и других активных материалов, контролируют цвет и величину зоны цветов побежалости.

Сварные швы часто сравнивают по внешнему виду со специальными эталонами. Геометрические параметры швов измеряют с помощью шаблонов или измерительных инструментов (рис. 3.2). Тщательный внешний осмотр — обычно весьма простая операция, тем не менее может служить высокоэффективным средством предупреждения и обнаружения дефектов. Только после проведения внешнего осмотра и исправления недопустимых дефектов сварные соединения подвергают контролю другими физическими методами для выявления внутренних дефектов.

Контрольные вопросы

1. На что обращают внимание при контроле исходных материалов?

2. Какие параметры контролируют в процессе сварки?
3. Расскажите о квалификационных испытаниях сварщиков при аттестации.
4. Какова цель внешнего осмотра?

4. РАДИАЦИОННАЯ ДЕФЕКТОСКОПИЯ

4.1. ИОНИЗИРУЮЩИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ

Рентгеновское и гамма-излучения, как и световые, ультрафиолетовые и радиоволны, имеют электромагнитную природу. Но радиоволны, световые колебания, рентгеновское и гамма-излучения отличаются длинами волн. В частности, длина волны видимого света $(4 \div 7) \cdot 10^{-7}$ м; рентгеновского излучения $6 \cdot 10^{-13} \div 10^{-9}$ м; гамма-излучения $10^{-13} \div 4 \cdot 10^{-12}$ м.

Особые свойства рентгеновского и гамма-излучений связаны с тем, что они обладают гораздо большей энергией, чем, например, видимый свет, по-разному поглощаются разными средами. Благодаря этим свойствам рентгеновское и гамма-излучение используют для дефектоскопии изделий. Кроме того, они не подвергаются воздействию электрических и магнитных полей, действуют на фотопластину, вызывают люминесценцию некоторых химических соединений, ионизируют газы, нагревают облучаемое вещество, воздействуют на живые организмы.

Рентгеновское излучение. Это излучение состоит из тормозного и характеристического излучения. Образование его происходит в результате торможения на аноде рентгеновской трубки свободных электронов, обладающих большой скоростью (внеядерный процесс).

Рентгеновская трубка представляет собой стеклянный баллон, из которого удален воздух (рис. 4.1). В сосуд впаяны два электрода — анод 1 и катод 3. Катод, изготовленный из вольфрамовой проволоки в виде спирали, нагревается источником тока до высоких температур и испускает электроны 2. Анод трубки, используемый для получения тормозного излучения,

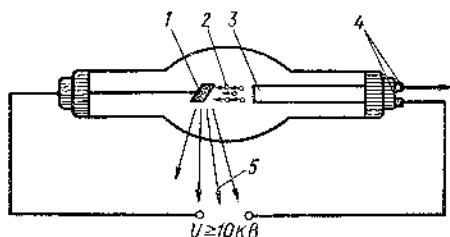


Рис. 4.1. Схема рентгеновской трубки:

1 — анод, 2 — электроны, 3 — катод, 4 — контакты нити накала катода, 5 — рентгеновское излучение

изготавливают в виде пластины из вольфрама и молибдена. Чтобы электроны приобрели необходимую кинетическую энергию, к аноду и катоду трубки прикладывают высокое напряжение (более 10 кВ).

Электроны, попадающие на анод с определенной скоростью, сообщаемой им электрическим полем высокого напряжения, тормозятся в нем и в конце концов теряют свою скорость, а следовательно, и кинетическую энергию. При этом кинетическая энергия электронов частично превращается в лучистую энергию, которая выделяется в виде фотонов тормозного излучения, используемого при дефектоскопии изделий, а большая часть ее ($\sim 97\%$) переходит в тепловую.

Минимальная длина волны образующегося рентгеновского излучения соответствует максимальной энергии кванта. Энергия кванта тем больше, чем больше скорость электронов, которая определяется напряжением на трубке: $eU = h\nu = h(c/\lambda_{\min})$, где e — заряд электрона, равный $1,6 \cdot 10^{-19}$ (Кл); U — напряжение на трубке, кВ; h — постоянная Планка, равная $6,625 \cdot 10^{-34}$ Дж/с; ν — частота Гц; c — скорость света, равная $3 \cdot 10^{10}$ км/с; λ — длина волны, см. Подставляя числовые значения в приведенную формулу, получим (см) $\lambda_{\min} = 12,4/U$.

Характеристическое излучение возникает при изменении энергетического состояния атомов. Если один из электронов внутренней оболочки (K , L , M) атома выбит электроном или квантом ($h\nu$) тормозного рентгеновского излучения, то атом переходит в возбужденное состояние. Освободившееся место в оболочке заполняется электронами с более удаленных от ядра оболочек и обладающих большей энергией (рис. 4.2). При этом атом переходит в нормальное состояние и испускает квант характеристического излучения с энергией, равной разности энергий на соответствующих уровнях: $h\nu = E_2 - E_1$, где E_1 — уровень, с которого отрывается электрон при возбуждении; E_2 — уровень, с которого электрон переходит на освободившееся место. Это излучение используется при рентгеноструктур-



Рис. 4.2. Схема возникновения фотоэлектрона и характеристического излучения при поглощении фотона рентгеновского излучения

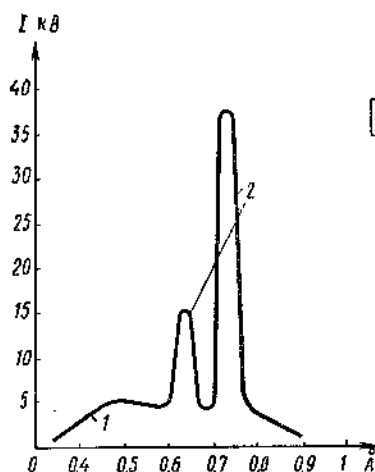


Рис. 4.3. Сплошной (1) и линейчатый (2) спектры рентгеновского излучения для молибденового анода при $U = 35$ кВ

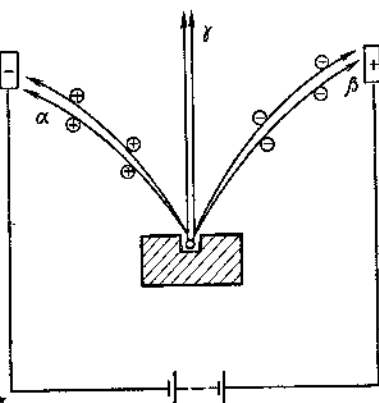


Рис. 4.4. Отклонение излучений в электрическом поле

ном анализе. Пример спектра тормозного и характеристического излучения показан на рис. 4.3.

Гамма-излучение. Это излучение образуется в результате распада ядер радиоактивных элементов (изотопов). Процесс распада объясняется следующим образом. Внутривдерные силы притяжения между протонами и нейтронами, входящими в состав ядра радиоактивных элементов, не обеспечивают достаточной устойчивости ядра. В результате наблюдается самопроизвольная перестройка менее устойчивых ядер в более устойчивые. Этот процесс, называемый естественным радиоактивным распадом, сопровождается испусканием положительно заряженных альфа-частиц (α), отрицательно заряженных бета-частиц (β) и электромагнитного гамма-излучения (γ). В результате вылета α - и β -частиц и γ -излучения образуется новое ядро, которое может оказаться в возбужденном состоянии. Возбужденное ядро, переходя в нормальное, невозбужденное состояние, испускает избыток энергии в виде гамма-излучения. Спектр гамма-излучения не является сплошным, а включает излучение одной или нескольких дискретных энергий.

Если поместить источник излучения указанных видов в сильное электрическое или магнитное поле, то можно наблюдать картину, показанную на рис. 4.4. Поток α -частиц отклоняется в сторону отрицательного электрода, а поток β -ча-

стиц — в сторону положительного. Поток γ -излучения не реагирует ни на электрические, ни на магнитные поля.

Альфа-, бета-частицы и γ -излучение различаются также по способности проникать через различные вещества; α -частицы имеют наименьшую проникающую способность и полностью теряют свою энергию при прохождении через воздух на расстоянии 75—80 мм от источника; β -частицы полностью поглощаются 6-миллиметровым листом из алюминиевого сплава или воздушной средой на расстоянии 7—7,5 м от источника; γ -излучение может проникать через стальные изделия толщиной 500 мм.

На практике чаще всего используют искусственные изотопы, ядерные реакции у которых вызывают бомбардировкой их ядра частицами с определенной кинетической энергией. Наиболее широко распространены реакции под действием нейтронов и дейтронов. Благодаря отсутствию заряда нейтрон легко проникает в атомное ядро и поэтому может быть наиболее эффективно использован для осуществления ядерных реакций. При бомбардировке нейтронами ядро атома захватывает нейтрон, заряд ядра при этом не изменяется, но масса его увеличивается на единицу, в результате чего ядро окажется в неустойчивом (возбужденном) состоянии, что и приведет к самопроизвольному его распаду. Источниками нейтронов являются ядерные реакторы, нейтронные генераторы, а также естественные радиоактивные источники излучения.

Активность изотопа определяется числом атомов радиоактивного вещества, распадающихся в единицу времени. Закон радиоактивного распада имеет вид экспоненциальной зависимости: $N = N_0 e^{-\omega t}$, где N — число радиоактивных ядер к моменту времени t ; N_0 — число ядер в начальный момент времени $t = 0$; e — основание натурального логарифма, равное 2,718; ω — постоянная распада.

Время $T_{1/2}$, в течение которого число радиоактивных атомов уменьшается вдвое, называется периодом полураспада. За это время число оставшихся ядер станет равным $N = N_0/2$. Тогда $N_0/2 = N_0 e^{-\omega T_{1/2}}$ или $1/2 = e^{-\omega T_{1/2}}$. Откуда $T_{1/2} = 0,693/\omega$. Период полураспада не зависит от количества, формы и геометрических размеров источника излучения и у различных радиоактивных элементов, применяемых в дефектоскопии, колеблется от нескольких дней до десятков лет (табл. 4.1).

О взаимодействии с веществом. Распространяясь от источника, ионизирующее излучение (α -, β -, γ - и рентгеновское) встречает на своем пути атомы вещества и взаимодействует главным образом с атомными ядрами и электронами атомных оболочек. Результатом такого взаимодействия является ослаб-

4.1. Изотопы, применяемые в радиационной дефектоскопии

Наименование	Период - полураспада	Диапазон толщин контролируемых ста- льных изделий, мм
Тулий-170	129 дн	≤ 15
Селен-75	120,4 дн	< 25
Иридий-192	74,4 дн	6—70
Цезий-137	33 года	25—120

ление излучения в слое вещества до определенной величины. Ослабление происходит под действием трех основных процессов (рис. 4.5): фотоэлектрического поглощения (фотоэффекта), комптоновского рассеяния и образования пар электрон — позитрон.

Рентгеновское или гамма-излучение, проходя через вещество как электромагнитное колебание, взаимодействует с полями атомов веществ. При этом если электрон атома вещества получает большую энергию, чем энергия связи его в атоме, то он вылетает из него. Вылетевший электрон называют фотоэлектроном (рис. 4.5, а). Его энергия (E_e) будет равна энергии взаимодействующего с ним излучения $h\nu$, уменьшенной на энергию связи E_i электрона в атоме, т. е. $E_e = h\nu - E_i$. При потере атомами фотоэлектронов освободившиеся места в электронных оболочках в дальнейшем заполняются электронами с внешних оболочек. Переход электрона на более близкую

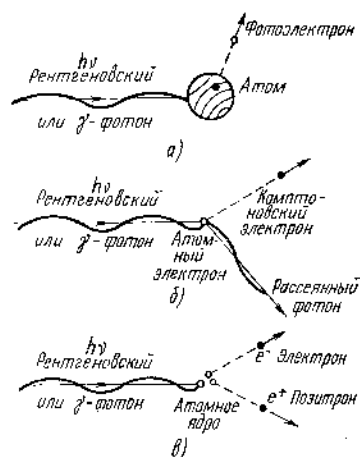


Рис. 4.5. Схема взаимодействия фотонов рентгеновского и γ -излучений с веществом

к ядру оболочку сопровождается испусканием кванта характеристического излучения. Следует отметить, что не все фотоны потока рентгеновского или γ -излучения поглощаются веществом. Некоторая часть их не взаимодействует с атомами вещества. Фотоэлектрическое поглощение уменьшается с повышением энергии излучения и резко возрастает с увеличением атомного (порядкового) номера вещества.

При взаимодействии рентгеновских и γ -фотонов с веществом наряду с фотоэлектрическим поглощением происходит их рассеяние, названное комптоновским. Комптон-

эффект можно рассматривать как упругое соударение первичного фотона со свободным электроном, при котором в отличие от фотоэффекта фотон передает электрону не всю энергию, а только ее часть. Комптоновский электрон, получив некоторое количество энергии, начинает двигаться под углом к направлению движения рентгеновского или γ -фотона (рис. 4.5, б). В результате эффекта Комптона появляется рассеянный фотон с большей длиной волны и меньшей энергией, который продолжает двигаться, отклоняясь от своего первоначального направления на угол φ . Энергия излучения (E) после рассеяния под углом φ будет равна $E = hv/(1 + 0,024 \cdot \cos \varphi)$, где hv — энергия падающего фотона.

Из рассмотрения комптоновского рассеяния следует, что ослабление интенсивности первичного излучения происходит в результате взаимодействия с электронами атомов среды рентгеновского или γ -фотона и рассеяния их в различных направлениях в основном за пределы первичного пучка излучения. С повышением энергии излучения коэффициент комптоновского рассеяния уменьшается гораздо в меньшей степени, чем коэффициент фотоэлектрического поглощения.

При взаимодействии с веществом фотонов рентгеновского или γ -излучения достаточно высокой энергии (не менее 1,02 МэВ) происходит процесс образования пар (рис. 4.5, в), т. е. фотоны поглощаются ядерным полем атомов вещества, образуя пару частиц — позитрон (e^+) и электрон (e^-).

Энергия рентгеновского излучения от большинства аппаратов, применяемых для промышленной дефектоскопии, за исключением бетатронов, микротронов и ускорителей, лежит ниже энергии излучения, необходимой для образования пар, поэтому этот вид поглощения при просвечивании рентгеновским излучением не имеет места. Гамма-излучение от большинства радиоактивных источников, используемых для просвечивания, не превосходит 2–2,5 МэВ, и поэтому поглощение гамма-излучения за счет образования пар электрон — позитрон не существенно. Только для Co^{60} этот эффект проявляется некоторым (малозаметным) образом.

Таким образом, вследствие описанных выше эффектов интенсивность и мощность экспозиционной дозы первичного излучения (I_0) по мере прохождения его через вещество непрерывно уменьшается. Чем толще слой вещества, тем большее ослабление будет испытывать проходящее через него излучение, так как на его пути возрастает число атомов и электронов вещества, с которыми оно взаимодействует.

Установлено, что изменение мощности экспозиционной дозы излучения по толщине вещества подчиняется экспонен-

циальному закону $I_S = I_0 e^{-\mu S}$, где I_S — мощность экспозиционной дозы излучения на детекторе; S — толщина просвечиваемого материала; μ — линейный коэффициент ослабления, определяемый родом материала и энергией излучения; e — основание натурального логарифма. Мощностью экспозиционной дозы излучения называется отношение потока энергии частиц или фотонов (квантов) ионизирующего излучения за некоторый промежуток времени к этому времени. Линейный коэффициент ослабления представляет собой сумму линейных коэффициентов ослабления, определяемых фотоэффектом (μ_{ϕ}), комптоновским рассеянием (μ_k) и процессом образования пар (μ_{π}) $\mu = \mu_{\phi} + \mu_k + \mu_{\pi}$.

4.2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАДИАЦИОННОЙ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ

Выявление внутренних дефектов при просвечивании основано на способности рентгеновского и гамма-излучений неодинаково проникать через различные материалы и поглощаться в них в зависимости от толщины, рода материалов и энергии излучения. Для выявления дефектов в сварных швах с одной стороны изделия устанавливают источник излучения (рентгеновскую трубку или изотоп), с другой — детектор, регистрирующий информацию о дефекте (рис. 4.6). В качестве детектора могут быть применены рентгеновская пленка, электронно-оптический преобразователь, ксерорадиографическая пластина, фотобумага и т. д. Излучение от источника 1, пройдя через сварное соединение 2, имеющее внутренний дефект 3, в дефектном и бездефектном месте будет поглощаться по-разному и приходить на детектор 4 с разной интенсивностью. Интенсивность излучения при прохождении через дефектные места, заполненные воздухом, газом или неметаллическими включениями, ослабляется меньше, чем в сплошном металле. Разность интенсивностей

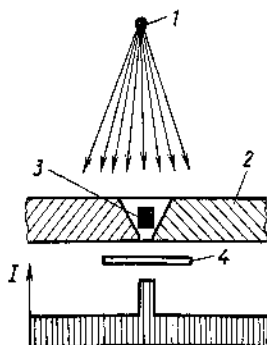


Рис. 4.6. Схема просвечивания сварного соединения:

1 — источник, 2 — контролируемое соединение, 3 — дефектное место, 4 — детектор; I — график интенсивности излучения, прошедшего через контролируемое соединение

будет зарегистрирована детектором, например в дефектном месте, где интенсивность I прошедшего излучения наибольшая (см. рис. 4.6), пленка чернеет сильнее. Применение рентгеновских пленок лежит в основе радиографического метода дефектоскопии, который занимает наибольший объем из всех известных методов радиационного контроля. Не всегда и ни при любых условиях на пленке могут быть обнаружены все возможные дефекты, находящиеся внутри просвечиваемого объекта. Существует определенный минимально выявляемый дефект, который характеризует предельную чувствительность метода.

В радиографии используют два вида чувствительности. Абсолютная — определяется размером минимально выявляемого дефекта или элемента эталона чувствительности в направлении просвечивания. Приблизительно значение (мм) абсолютной чувствительности можно определить из соотношения $\Delta S \approx [0,005(2 + S)]/\mu$, где μ — коэффициент линейного ослабления (выбирается по таблицам). Относительная — характеризуется отношением минимально выявляемого дефекта в направлении просвечивания ΔS к толщине S контролируемого соединения и выражается в процентах: $K = (\Delta S/S) \cdot 100$.

В соответствии с ГОСТ 7512—82 величина абсолютной чувствительности контроля может быть вдвое меньше величины минимального дефекта, который требуется выявить в результате контроля.

Чувствительность радиографического метода контроля зависит от следующих основных факторов: энергии первичного излучения, рассеянного излучения, плотности и толщины просвечиваемого материала, формы и места расположения дефекта, величины фокусного расстояния и фокусного пятна рентгеновской трубки, типа рентгеновской пленки.

Ввиду сложности процессов ослабления энергии рентгеновского и γ -излучений при прохождении их через контролируемый металл и многообразия факторов, от которых зависит чувствительность метода, учесть одновременное воздействие этих факторов не представляется возможным. Целесообразно рассмотреть эти факторы в отдельности, оценивая влияние каждого из них на чувствительность метода к выявлению дефектов.

Энергия излучения. Из формулы для расчета абсолютной чувствительности видно, что чем больше коэффициент линейного ослабления (μ), тем меньше размер дефекта, который удастся обнаружить. В свою очередь, коэффициент μ зависит от энергии излучения источника. Получение рентгеновского излучения той или иной энергии достигается регулированием напряжения на рентгеновской трубке, энергия гамма-излучения

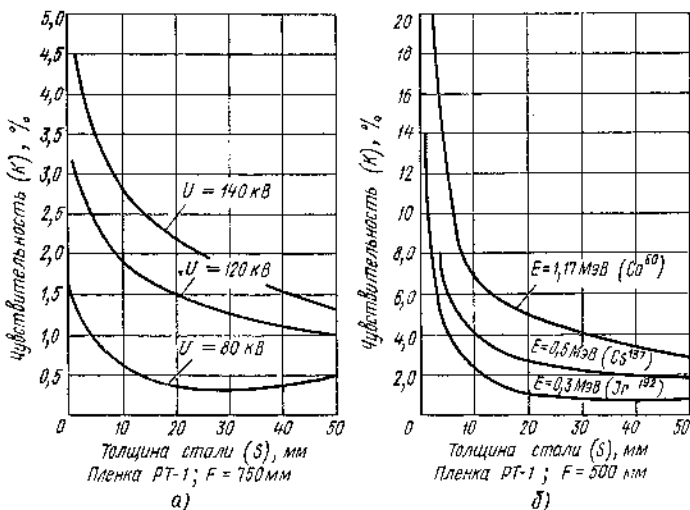


Рис. 4.7. Зависимость чувствительности радиографического контроля от энергии излучения:

а — рентгеновского аппарата РУП-150-10, б — изотопов

обусловлена выбором соответствующего радиоактивного изотопа. Влияние энергии рентгеновского и гамма-излучений на чувствительность контроля показано на рис. 4.7. Как видно из графиков, чувствительность контроля стали одинаковой толщины тем выше, чем меньше энергия излучения.

Рассеянное излучение в зависимости от энергии первичного излучения изменяет качество снимка, снижает контрастность и четкость изображения, а следовательно, и чувствительность самого метода. При отсутствии рассеяния дефект на пленке будет изображаться с четкими границами (рис. 4.8, а). Однако практически всегда имеет место рассеивание излучения, нарушающее четкость изображения. Вследствие этого явления дефекты малого размера становятся трудно различимыми (размыты границы изображения) и часто могут быть не выявлены совсем.

Рассеивание излучения всегда сильнее в толстостенных материалах (рис. 4.8, б), чем в тонкостенных (рис. 4.8, в), поэтому чувствительность метода значительно ухудшается с увеличением толщины просвечиваемого материала. Совершенно избавиться от рассеивания излучения нельзя. Уменьшить его можно применением специальных фильтров, представляющих собой тонкий слой оловянной (0,025 мм) или свинцовой (0,075–0,15 мм) фольги, расположенной либо между источни-

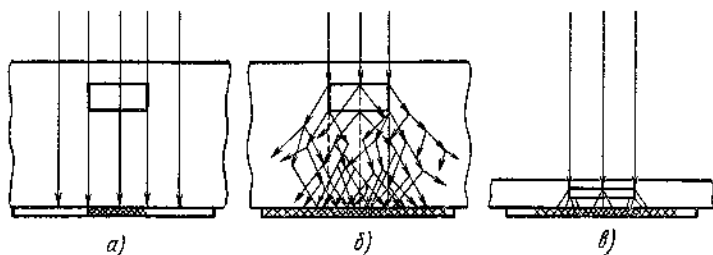


Рис. 4.8. Влияние рассеянного излучения на четкость изображения при просвечивании:

a — четкость изображения на пленке при параллельном нерассеянном пучке излучения, *б* — ухудшение четкости изображения от рассеянного излучения при просвечивании толстостенных материалов, *в* — четкость изображения улучшается при просвечивании тонкостенных материалов тем же пучком излучения

ком и контролируемым объектом, либо между пленкой и объектом. Рассеивание излучения можно уменьшить, сократив площадь облучения. Последнее достигается либо с помощью диафрагмы, помещаемой у источника излучения, либо с помощью свинцовой маски с отверстием, помещаемой над просвечиваемым объектом. Рассеивание уменьшается, если увеличить расстояние от контролируемого объекта до пленки.

Толщина материала. Чувствительность более сложным образом зависит от толщины контролируемого материала (рис. 4.9). Вначале чувствительность возрастает вследствие того, что с увеличением толщины материала убывает эффективный коэффициент ослабления. Мягкие составляющие излучения ослабляются сильнее, чем жесткие, и в последующие слои попадает излучение, уже частично отфильтрованное в предыдущих слоях. По мере прохождения через вещество излучение становится все более жестким и при этом одновременно замедляется убывание коэффициента эффективного ослабления — он приближается к постоянному значению. Для

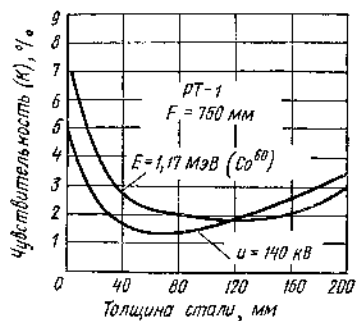


Рис. 4.9. Зависимость чувствительности радиографического контроля от толщины контролируемого соединения

сравнительно больших толщин подъем кривой (ухудшение чувствительности) объясняется эффектом рассеяния. В конечном итоге ухудшение чувствительности из-за наличия рассеянного излучения определяет предел применимости всего метода просвечивания материалов до определенной толщины (100—150 мм).

Форма дефектов и их ориентация в шве. Дефекты (непровары), имеющие прямолинейные грани, ориентированные параллельно направлению распространения излучения, выявляются значительно лучше вследствие большой резкости изображения их границ (рис. 4.10, *а*), чем дефекты цилиндрической (шлаковые включения) или шаровой (поры) или другой формы (рис. 4.10, *б*, *в*). Действительно, непровар имеет постоянную высоту (ΔS) по сечению падающего пучка излучения, тогда как у объемных дефектов эта высота переменная и поэтому плотность потемнения изображения в этом случае будет постепенно и равномерно снижаться до максимума, определяемого диаметром дефекта, до плотности потемнения всего поля пленки. Вследствие этого резкость изображения отсутствует, а следовательно, и контрастность снимка, воспринимаемая глазом, значительно ухудшается.

Наилучшая выявляемость наблюдается при прохождении излучения вдоль дефектов, т. е. когда угол α (рис. 4.11) равен 0° . При ориентации дефекта под некоторым углом к направлению излучения выявляемость ухудшается; в этом случае пучок излучения будет проходить не всю высоту (ΔS), а только опре-

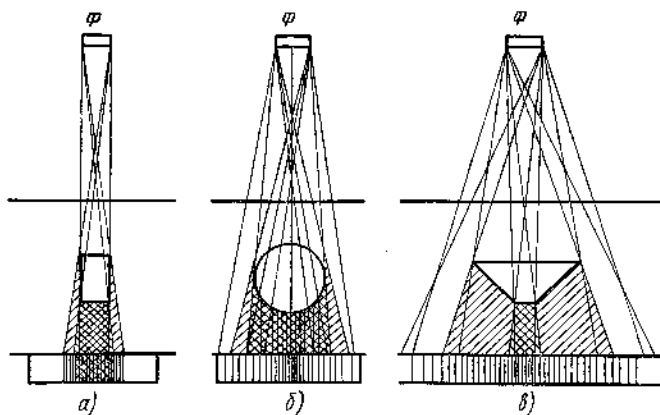


Рис. 4.10. Влияние формы дефекта на четкость его изображения

а — прямоугольной, *б* — шаровой, *в* — трапецидальной

деленную часть ее. Чувствительность просвечивания при этом будет определяться шириной раскрытия дефекта (Δ). В практике очень часто встречаются дефекты, у которых ширина раскрытия (Δ) незначительна при достаточно большой высоте (ΔS). В этом случае на пленке проекция изображения дефекта не будет видна из-за малой разницы в плотностях потемнения пленки в дефектном и бездефектном местах. К подобным дефектам относятся, например, трещины, стянутые непровары, несплавления по кромкам. Вероятность выявления подобных дефектов очень мала ($\sim 35-40\%$). Расслоения в прокатанных листах, расположенные параллельно поверхности листов, как правило, просвечиванием не выявляются. По этой же причине слабо обнаруживаются несплавления по катетам шва в тавровых, угловых и нахлесточных соединениях.

Фокусное расстояние. Увеличение величины фокусного расстояния (рис. 4.12) аналогично энергии ослабления излучения делает его более мягким, вследствие чего улучшается чувствительность контроля. Следует заметить, что фокусное расстояние (F) связано с временем просвечивания (t) следующим соотношением: $t/t_0 = (F/F_0)^2$, где t — время просвечивания при выбранном фокусном расстоянии F , см; t_0 — время просвечивания при фокусном расстоянии F_0 , см, взятом по номограмме. Из соотношения видно, что при увеличении фокусного расстояния резко возрастает время просвечивания. Чем меньше размер фокуса, тем более четкий рельеф изображения дефекта на

Рис. 4.11. Выявляемость трещины в зависимости от ориентации ее к направлению излучения

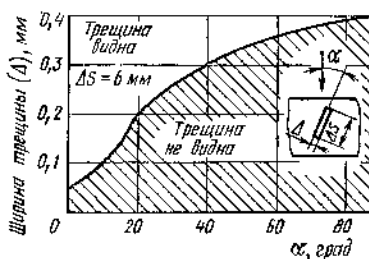
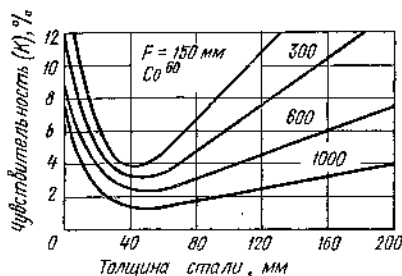


Рис. 4.12. Чувствительность при просвечивании стали γ -излучением на различных фокусных расстояниях F



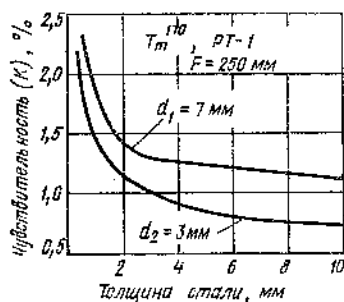


Рис. 4.13. Влияние размера фокуса (d) на чувствительность контроля

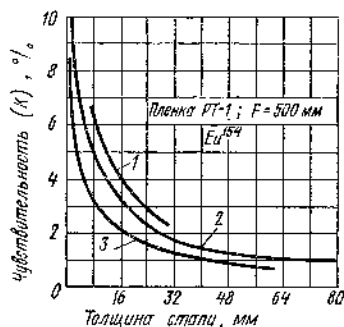


Рис. 4.14. Влияние усиливающих экранов на чувствительность радиографического метода при просвечивании стали γ -излучением Eu^{154} :

1 — флуоресцентные экраны, 2 — без экранов, 3 — металлические экраны (свинец 0,1 мм)

снимке, тем меньше область полутени, тем выше чувствительность контроля (рис. 4.13).

Усиливающие экраны. Из рис. 4.14 видно, что применение металлических экранов обеспечивает некоторое повышение чувствительности, обусловленное уменьшением воздействия вторичного излучения, источником которого является сам контролируемый материал. Рассеянное вторичное излучение уменьшает резкость и контрастность изображения объекта. Рассеянное излучение от тяжелых элементов, подобных свинцу, сравнительно невелико, они выполняют роль своеобразного фильтра, особенно для первичного излучения низких энергий.

Тип пленки. В зависимости от типа пленки, обусловленного размером зерна и реакцией к излучению, чувствительность радиографического контроля при прочих равных условиях (энергии излучения, рода и толщины материала) может изменяться от 0,5% (РТ-5) до 3% (РТ-2). Пленки, обеспечивающие лучшую чувствительность, имеют мелкозернистую структуру и слабую реакцию к излучению, но требуют большего времени для просвечивания.

4.3. АППАРАТУРА И МАТЕРИАЛЫ

Для получения и использования рентгеновского и гамма-излучений применяют различную радиационную технику: рентгеновские аппараты, гамма-аппараты, линейные ускорители и бетатроны.

Рентгеновские аппараты. В общем виде рентгеновский аппарат состоит из рентгеновской трубки в защитном кожухе, высоковольтного генератора и пульта управления. Высоковольтный генератор состоит из высоковольтного трансформатора, трансформатора накала трубки и выпрямителя. В пульт управления обычно входят автотрансформатор, регулятор напряжения и тока, измерительные приборы, сигнальная система и система управления.

В практике радиационной дефектоскопии широко применяют аппараты с постоянной нагрузкой и импульсные (табл. 4.2). В свою очередь, аппараты с постоянной нагрузкой подразделяют на аппараты — моноблоки и аппараты кабельного типа.

Аппараты-моноблоки, у которых рентгеновские трубки и высоковольтный трансформатор смонтированы в единые блок-трансформаторы, залитые маслом или заполненные газом. Основное требование к таким аппаратам — ми-

4.2. Характеристики рентгеновских аппаратов

Тип аппарата	Напряжение на трубке, кВ	Ток трубки, мА	Размер фокусного пятна, мм	Масса аппарата, кг	Толщина просвечиваемой стали, мм
Моноблоки					
РУП-120-5	50—120	5	2×2	75	25
РУП-200-5	70—200	5	2×2	110	50
РУП-400-5	250—400	5	7	600	120
РАП-160-10П	50—160	10	1,3×4	60	40
Кабельные					
РУП-100-10	10—100	10	1×1	200	30
РУП-150-10 (две трубки)	35—100	10 2	5 0,3	670	45
РУП-150-300-10 (три трубки)	35—300	10 10 2	4×4 5 0,3	1000	70
РАП-150/300-01 (четыре трубки)	35—300	2 10	0,3 4×4	800	70
Импульсные					
РИНА-1Д	100	—	3	12	10
РИНА-2Д	300	—	3	15	20
РИНА-3Д	400	—	4	46	40
МИРА-2Д	200	—	3	15	20
МИРА-3Д	300	—	4	25	40

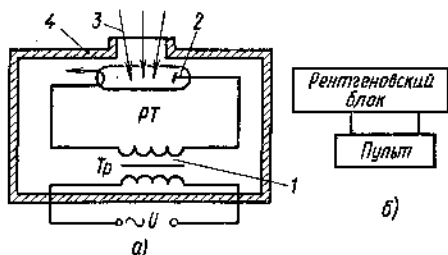


Рис. 4.15. Принципиальная (а) и блок-схемы (б) рентгеновского аппарата-моноблока:

1 — трансформатор Tr , 2 — труба PT , 3 — рентгеновское излучение, 4 — кожу

нимальные габаритные размеры и масса. Для достижения этого поступаются такими важными показателями процесса контроля, как качество излучения и длительность непрерывной работы. Последнее объясняется следующим обстоятельством. В аппаратах-моноблоках обычно применяют наиболее простую схему (рис. 4.15) — полуволновую безвентильную, в которой выпрямителем служит сама рентгеновская трубка. На трубку подается ток непосредственно от трансформатора высокого напряжения, она пропускает ток только в одном направлении в течение первого полупериода, а затем во время второго полупериода запирает ток, работая как выпрямитель. Применение подобной схемы сокращает срок службы трубки.

Выпускается типовой ряд моноблочных аппаратов, комплекствующих унифицированными пультами управления. К этим аппаратам относят как портативные для работы в полевых и монтажных условиях (например, РУП-120-5, РАП-160-6П, РУП-200-5, РАП-220-5Н, РАП-300-5Н), так и стационарные высоковольтные (например, РУП-400-5). Моноблоки применяют преимущественно там, где требуется удалить излучатель от пульта управления на большое расстояние (до 30 м и более) и получить большую маневренность излучателя. Характерным примером может служить аппарат РАП-160-6П, предназначенный специально для контроля магистральных трубопроводов. Он создает панорамное поле облучения, что позволяет просвечивать кольцевые стыки труб за одну экспозицию при помещении аппарата внутрь трубы.

Аппараты кабельного типа состоят из самостоятельного генераторного устройства, рентгеновской трубки и пульта управления. В аппаратах кабельного типа применяют, как правило, схемы удвоенного напряжения с двумя выпрямителями (рис. 4.16). Во время отрицательного полупериода на-

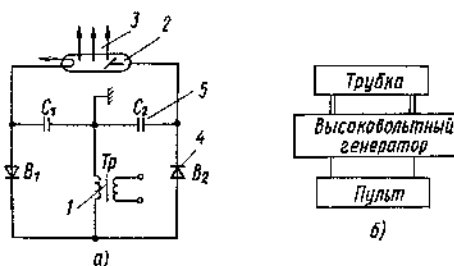


Рис. 4.16. Принципиальная (а) и блок-схемы (б) кабельного аппарата:

1 — трансформатор Tr , 2 — рентгеновская трубка, 3 — рентгеновское излучение, 4 — выпрямители, 5 — конденсаторы

пряжения конденсаторы C_1 и C_2 заряжаются через выпрямители B_1 и B_2 до амплитудного значения. С приходом положительного полупериода они оказываются включенными последовательно со вторичной обмоткой трансформатора и напряжение на аноде трубки увеличивается в два раза. Выход рентгеновского излучения происходит в течение полупериода. Аппараты этого типа выпускают, как правило, передвижными и используют для работы в цеховых и лабораторных условиях (например, РУП-150-10, РУП-150/300-10, РАП-150-7, РАП-150/300-01). К аппаратам этого класса относится рентгеновская установка РУП-100-10, которая снабжена легким (6 кг) защитным кожухом рентгеновской трубки. Малая масса блока излучения и возможность установок высоковольтного генератора и пульта управления на значительное расстояние (до 10 м) от рентгеновской трубки позволяют использовать аппарат РУП-100-10 для контроля труднодоступных мест.

Импульсные рентгеновские аппараты конструктивно выполнены из двух блоков: управления и рентгеновского (рис. 4.17). Конденсатор C заряжается через выпрямитель B от трансформатора Tr_1 . С помощью электронного ключа ЭК конденсатор разряжается на повышающий трансформатор Tr_2 в цепи трубки.

Под действием импульса высокого напряжения в специальной рентгеновской трубке с холодным катодом возникает автоэлектронный ток. В результате этого происходит разогрев катода и с его поверхности эмитируются электроны, образуя облако плазмы, которое движется к аноду трубки с постоянной скоростью. В результате высокое напряжение (250–300 кВ), возникающее на вторичной обмотке высоковольтного трансформатора, оказывается приложенным между передним фронтом движущейся плазмы и анодом. Это обстоятельство приво-

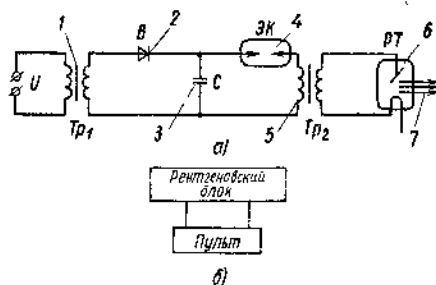


Рис. 4.17. Принципиальная (а) и блок-схемы (б) импульсного рентгеновского аппарата:

1 — трансформатор Tr_1 , 2 — выпрямитель В, 3 — конденсатор С, 4 — электронный ключ ЭК, 5 — импульсный трансформатор Tr_2 , 6 — трубка РТ, 7 — рентгеновское излучение

дит к росту анодного тока и, как следствие, к генерации рентгеновского излучения. Анодом трубки служит массивный вольфрамовый стержень с наконечником в форме конуса (угол при вершине 30°); катодом двухэлектродной трубки — вольфрамовый цилиндр с заостренной торцевой кромкой. При работе рентгеновской трубки эмиссия электронов начинается не из всей торцевой поверхности катода, а только из точки с наибольшей напряженностью электрического поля. Поэтому интенсивность излучения распределена неравномерно. С ростом числа включений меняется микроструктура катода, сглаживаются особо острые зубцы на его поверхности и, как следствие, увеличивается напряжение начала автоэлектронной эмиссии. Это приводит к нестабильности рентгеновского излучения от включения к включению по интенсивности и спектральному составу. Импульсные трубки имеют большую мгновенную мощность, но длительность импульса очень мала (2–100 нс), а достигнутая частота их повторения не превышает 50 Гц. Мощность дозы излучения на расстоянии 1 м не превышает 2 Р/мин, тогда как трубки с разогретым катодом при таких же напряжениях (250–300 кВ) дают до 10 Р/мин. Ресурс работы импульсных трубок много меньше, чем трубок накала: в новейших аппаратах серии МИРА он достигнет $5 \cdot 10^6$ импульсов, что при частоте 25 Гц обеспечивает всего 50 ч работы по сравнению с 500 ч работы трубок накала.

Следует отметить, что небольшие габаритные размеры и малая масса импульсных аппаратов обусловили их широкое применение в промышленности (см. табл. 4.1). Они используются главным образом при контроле магистральных трубо-

проводов, судостроительных конструкций и монтаже для проверки соединений толщиной 30 мм.

Основным недостатком рентгеновских аппаратов является малый срок службы трубки и более низкая чувствительность в сравнении с обычными аппаратами. Преимущество — малая масса, портативность и низковольтные источники питания (12 В).

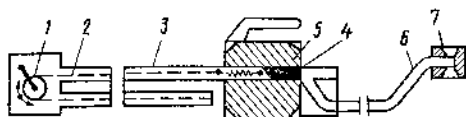
Из зарубежных кабельных аппаратов наибольшее распространение получили установки фирм «Филипс», «Зайферт» и др. Отличительной особенностью зарубежных аппаратов в сравнении с отечественными являются малая масса и небольшой размер фокусного пятна.

Гамма-аппараты. Радиоизотопный дефектоскоп в простейшем виде представляет собой радиационную головку с радиоактивным изотопом, включает привод источника, ампулопровод и пульт управления. Все типы выпускаемых дефектоскопов (табл. 4.3) условно можно разделить на установки общепромышленного назначения (универсальные шланговые дефектоскопы) и специального назначения для фронтального и панорамного просвечивания (затворного типа).

В универсальных шланговых дефектоскопах источник излучения может подаваться в зону контроля из радиационной головки по гибкому ампулопроводу, формируя панорамный пучок излучения, либо оставаясь в ней, — направленный пучок излучения с помощью сменных коллимирующих головок. Преимущества дефектоскопов этого типа (универсальность и возможность подачи малогабаритного источника на расстояние 5–12 м) перед рентгеновскими аппаратами и другими типами гамма-дефектоскопов делают их предпочтительными при радиографическом контроле в нестационарных условиях, особенно при контроле изделий с труднодоступными участками. Подача источника в установках такого типа (рис. 4.18) из радиационной головки 5 в коллимирующую 7 производится по гибкому или жесткому ампулопроводу 6 с помощью гибкого зубчатого троса 2, находящегося в зацеплении с зубчатым приводным колесом 1. Из этого класса наиболее широко

Рис. 4.18. Кинематическая схема шланговых дефектоскопов «Гаммарид»:

1 — приводное колесо, 2 — подающий трос, 3 — соединительный шланг, 4 — держатель источника излучения, 5 — радиационная головка, 6 — ампулопровод, 7 — коллимирующая головка

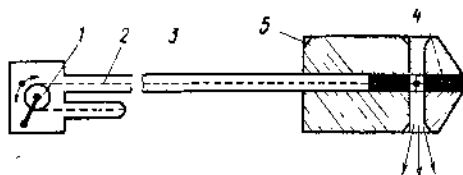


4.3. Основные характеристики некоторых отечественных гамма-аппаратов

Тип аппарата	Источник излучения	Диаметр активной части, мм	Мобильность	Расстояние от пути до радиационной головки, м	Масса аппарата, кг	Толщина просвечиваемой стали, мм
Универсальные шланговые						
«Гаммарид-11»	Тулий-170	3	Переносный	5	10,5	1-15
«Гаммарид-21»	Цезий-137	3	»	5	16	6-50
«Гаммарид-23»	Цезий-137	5	»	8	19	15-80
«Гаммарид-25»	Цезий-137	5	»	13	19	15-80
РИД-41	Кобальт-60	7	Передвижной	50	45	30-200
Затворные						
«Магистраль-1»	Цезий-137	5	Передвижной	30	35	15-80
РИД-12	Тулий-170	9	Переносный	5	11	1-15
РИД-32	Кобальт-60	7	Передвижной	30	295	30-200
РИД-44	Кобальт-60	15	Стационарный	50	620	30-200
«Гаммарид-20»	Иридий-192	3	Переносный	8	15	6-60
«Стапель-5»	Иридий-192	1,5	»	3,5	11,5	6-40
«Стапель-20»	Иридий-192	3	»	30	24	6-40

Рис. 4.19. Кинематическая схема дефектоскопа для фронтального и панорамного просвечивания «Магистраль-1»:

1 — привод управления, 2 — подающий трос, 3 — соединительный шланг, 4 — держатель источника излучения, 5 — радиационная головка



ко применяют дефектоскопы РИД-41, серии «Гаммарид» и др.

Гамма-дефектоскопы для фронтального просвечивания предназначены для работы в полевых, монтажных условиях, на стапелях в доке или цехе, когда применение универсальных шланговых дефектоскопов невозможно из-за ограниченных размеров радиационно-защитных зон. Дефектоскопы с фронтальным (направленным) облучением широко применяют для контроля сварных соединений при строительстве нефтегазопроводов («Газопром»), в судостроительной промышленности («Стапель-5М» и «Стапель-20») и существенно меньше в машиностроении (РИД-32) при контроле изделий с большой толщиной.

Гамма-установки для панорамного просвечивания широко применяют при контроле качества магистральных газонефтепроводов, сосудов высокого давления в форме шара или цилиндра, а также других изделий типа полых тел вращения.

В отличие от дефектоскопов шлангового типа в дефектоскопе «Магистраль-1» для подачи источника излучения (перемещения держателя источника 4 из радиационной головки 5) может быть использован как ручной, так и электромеханический привод 1 (рис. 4.19). Электромеханический привод обеспечивает перемещение головки внутри трубопровода на расстояние до 1,5 км.

За рубежом широко применяют гамма-аппараты «Гамма-мат», ТК-30, Гаммавольт СО-100 фирмы «Зайферт» (ФРГ), ГАМ-120 фирмы АГС (Франция), Марк III фирмы «Продактс» (Англия) и др. В этих аппаратах в качестве источника излучения используется изотоп Иридий-192. Характерной особенностью данных аппаратов является небольшая масса и высокая мобильность.

Источники высокоэнергетического фотонного излучения. В радиационной дефектоскопии применяют следующие ускорители электронов: линейные ускорители, микротроны и бетатроны. Благодаря высокой энергии излучения эти источники

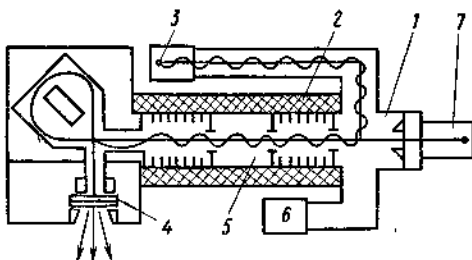


Рис. 4.20. Схема линейного ускорителя:

1 — камера, 2 — электромагнит, 3 — генератор, 4 — мишень, 5 — волновод, 6 — вакуумный насос, 7 — электронная пушка

целесообразно использовать при контроле изделий толщиной 70 мм и выше.

Линейный ускоритель (рис. 4.20) выполнен в виде вакуумной цилиндрической ускорительной камеры 1 с фокусирующим электромагнитом 2, расположенным на поверхности цилиндра. Высокочастотный генератор 3 обеспечивает получение в волноводе 5 бегущей электромагнитной волны, электрическое поле которой направлено по оси цилиндра. Электроны, генерируемые пушкой 7 импульсно с энергией 30–100 кэВ, ускоряются электрическим полем бегущей волны. Затем ускоренные электроны попадают на мишень 4, в которой возникает тормозное излучение с экспозиционной дозой $(5 \div 75\,000) \cdot 10^{-5}$ Кл/кг. Преимущество линейных ускорителей состоит в большой интенсивности тормозного излучения. Так, линейные ускорители с энергией 10–25 МэВ создают тормозное излучение, мощность экспозиционной дозы которого составляет 2000–25 000 Р/мин на расстоянии 1 м от мишени. Благодаря этому они с успехом применяются при контроле сварных швов толщиной 400–500 мм.

Ускорители представляют собой компактные установки, состоящие из излучателя и блоков электропитания, теплообменников и управления. В промышленности применяют ускорители ЛУЭ-10/1Д, ЛУЭ-10/2Д, ЛУЭ-15-1500Д, ЛУЭ-8-5В, ЛУЭ-5-500Д.

Микротрон (рис. 4.21) — циклический резонансный ускоритель электронов с постоянным во времени и однородным магнитным полем. В микротроне электроны, запущенные в вакуумную камеру 1, движутся по окружностям различного радиуса, но имеющих общую точку касания в том месте, где расположен резонатор 2, сверхвысокочастотное поле которого ускоряет электроны. Резонанс ускорения создается в результате

кратного увеличения периода высокочастотного напряжения при каждом пересечении электронами ускоряющего зазора резонатора. Резонатор возбуждается через волновод 4 посредством мощного импульсного магнетрона 5. Вакуумная камера находится под непрерывной откачкой с помощью насоса 8. Ускоренные электроны на последней орбите либо попадают на мишень 6, в которой возникает рентгеновское излучение с экспозиционной дозой в диапазоне $(4 \div 70) \cdot 10^{-3}$ Кл/кг, либо с помощью специального устройства выводятся из камеры. Электронный пучок микротрона в отличие от других типов ускорителей обладает высокой моноэнергетичностью. Основные преимущества микротрона заключаются в высокой интенсивности рентгеновского излучения, малой расходимости и относительно малом поперечном сечении пучка электронов (эффективное фокусное пятно составляет 2—3 мм) в диаметре. В промышленности применяют микротроны РМД-10Т, МТ-20, МР-30 и др.

Линейные ускорители и микротроны обладают малым фокусом и обеспечивают получение тормозного рентгеновского излучения высокой интенсивности, благодаря чему являются перспективными источниками излучения для радиационной де-

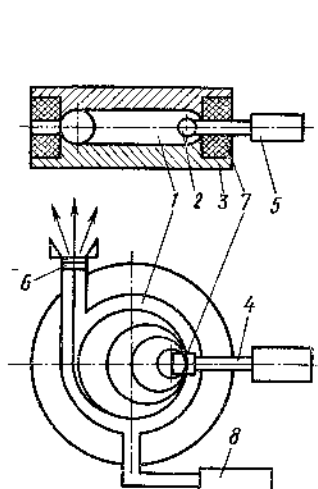


Рис. 4.21. Схема микротрона:

1 — камера, 2 — резонатор, 3 — электромагнит, 4 — волновод, 5 — магнетрон, 6 — мишень, 7 — обмотка возбуждения, 8 — вакуумный насос

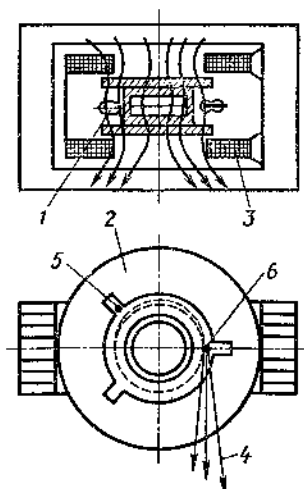


Рис. 4.22. Схема бетатрона:

1 — камера, 2 — корпус магнита, 3 — электромагнит, 4 — рентгеновское излучение, 5 — электронная пушка, 6 — мишень

фектоскопии. Например, при использовании линейного ускорителя ЛУЭ-10/1Д время просвечивания по сравнению с изотопом Co^{60} сокращается в 15—20 раз, а чувствительность контроля составляет 0,8—1%.

Наиболее распространены в радиационной дефектоскопии другие ускорители электронов — бетатроны. В бетатронах ускорение электронов происходит при их движении по круговой орбите в возрастающем во времени магнитном поле. Бетатрон (рис. 4.22) выполнен в виде тороидальной вакуумной ускорительной камеры 1, расположенной между полюсами электромагнита 3. Электронная пушка 5 генерирует электроны в тороидальную камеру, где они ускоряются в вихревом электрическом поле, создаваемом переменным магнитным полем. Возрастающее во времени магнитное поле не только обеспечивает ускорение электронов, но и удержание их на орбите постоянного радиуса, проходящей внутри камеры бетатрона. В конце цикла ускорения электроны смещаются со своей орбиты и попадают на мишень 6, в которой возникает тормозное излучение со сплошным спектром.

Фокусировка пучка электронов происходит в процессе их ускорения, в результате этого диаметр пучка перед соударением с мишенью составляет несколько десятых долей миллиметра. Таким образом, фокус пучка тормозного излучения у бетатронов меньше по размерам, чем у линейных ускорителей и микротронов. Несмотря на то что бетатроны обеспечивают меньшую интенсивность излучения, чем линейные ускорители и микротроны, их наиболее широко применяют в дефектоскопии благодаря меньшей массе, небольшим габаритным размерам и более высоким эксплуатационным и экономическим показателям.

Промышленностью выпускаются как переносные бетатроны типа ПМБ-6 массой около 100 кг, так и стационарные Б-30 и Б-35 массой до 6 т. С помощью этих бетатронов можно контролировать стальные изделия толщиной до 500 мм. Микротроны и бетатроны являются источниками ионизирующего излучения только при радиографии.

Радиографические пленки. Они являются основным средством регистрации прошедшего ионизирующего излучения. По свойствам и назначению выпускаемые рентгеновские пленки (табл. 4.4) подразделяют на две группы: безэкранные для использования без флуоресцентных экранов или с металлическими усиливающими экранами и экранные пленки с применением флуоресцентных усиливающих экранов. К первой группе относят пленки РТ-5, РТ-4, РТ-3, РТ-1; ко второй группе — РТ-2, РМ-1, РМ-2 и РМ-3. Основными характеристиками

4.4. Основные характеристики радиографических пленок

Тип пленки	Чувствительность, P^{-1}	Коэффициент контрастности	Разрешающая способность, mm^{-1}
Безэкранные			
PT-1	50—60	3,5	68—73
PT-3	20—30	3,9	80—110
PT-4	9—12	3,5	110—140
PT-5	3—5	3,5	140—180
Экраниые			
PT-2	350	3,0	73—78
PM-1	300	3,0	73—78
PM-2	400	2,8	78
PM-3	300	2,7	78

пленки являются спектральная чувствительность, контрастность и разрешающая способность.

Спектральная чувствительность пленки (Q) определяется ее способностью получать различные плотности почернения при проявлении после облучения излучениями различной энергии с одинаковой экспозиционной дозой. На практике Q характеризуется величиной, обратной дозе ионизирующего излучения, необходимой для получения одинаковой плотности почернения: $Q = 1/P$ или P^{-1} . Оптимальная спектральная чувствительность пленки достигается при напряжении на рентгеновской трубке 50—110 кВ.

Плотность почернения D пленки есть логарифм отношения яркости падающего света h_0 к яркости света, прошедшего через пленку, h_n : $D = \lg(h_0/h_n)$. При просвечивании изделий рентгеновским или гамма-излучением наиболее оптимальные значения D лежат в пределах 1,8—2,2, т. е. лучшую спектральную чувствительность можно получить именно при этих значениях D .

Контрастность γ_D есть отношение приращения плотности почернения к приращению относительного времени экспозиции. При оптимальных значениях плотности почернения ($D = 1,2 \div 2,2$) контрастность экранных пленок лежит в интервале 2,5—3, а безэкранных 2,5—4,5.

Разрешающая способность определяет свойства пленки раздельно регистрировать близко расположенные дефектные участки. Количественно эта характеристика оценивается числом штриховых линий одинаковой толщины, различимых на участке длиной 1 мм (mm^{-1}).

Усиливающие металлические и флуоресцентные экраны. Их применяют для сокращения времени просвечивания. Усиливающее действие экранов характеризуется коэффициентом усиления — отношением времени просвечивания без экрана к времени просвечивания с экраном.

Усиливающее действие металлических экранов основано на освобождении из них вторичных электронов под действием ионизирующего излучения. Освобожденные электроны действуют на эмульсию пленки и вызывают дополнительную фотохимическую реакцию, усиливающую действие первичного излучения. Металлические экраны рекомендуется применять с безэкранными пленками РТ-1, РТ-3, РТ-4 и РТ-5. Эти экраны выполнены в виде свинцовой фольги толщиной от 0,05 до 0,5 мм, нанесенной на гибкую пластмассовую подложку.

Практика показывает, что наиболее эффективны металлические экраны из медной или титановой фольги. Они обеспечивают гораздо лучшую контрастность снимков по сравнению со свинцовыми экранами.

Усиливающее действие флуоресцентных экранов обусловлено дополнительным воздействием на пленку свечения, возникающего в люминофоре под действием рентгеновского или гамма-излучения. В качестве люминофоров используют сернистый цинк, сернистый кадмий, вольфрамовокислый кальций и т. д. Эти экраны выполняют в виде пластмассовых или картонных подложек, на которые нанесен слой люминофора. Их рекомендуется использовать с экранными пленками РТ-2, РМ-1, РМ-2, РМ-3.

При использовании флуоресцентных экранов разрешающая способность существенно ухудшается из-за крупнозернистости самих экранов, что приводит к снижению выделяемости узких непроваров, трещин, мелких дефектов. При контроле ответственных сварных конструкций флуоресцентные экраны не применяют.

Применение экранов позволяет снизить время экспозиции в 2—5 раз. Металлические экраны снижают время экспозиции в 2—3 раза и одновременно повышают чувствительность, поэтому они нашли более широкое применение, чем флуоресцентные экраны.

В настоящее время применяют флуорометаллические усиливающие экраны, выполненные в виде свинцовой подложки с нанесенным на нее слоем люминофора. Эти экраны имеют больший коэффициент усиления, чем металлические, и обеспечивают лучшую чувствительность контроля, чем флуоресцентные экраны.

Эталоны чувствительности. Для определения относительной чувствительности радиографического контроля используют специальные эталоны. Эталон представляет собой пластину с идеальными дефектами, контуры которых резко очерчены. На границе дефектов эталона происходит резкое изменение суммарной толщины просвечиваемого материала, в то время как в реальном металле — постепенное изменение его толщины на границе дефект — бездефектная зона. Кроме того, реальные дефекты часто рассредоточены и имеют неправильные очертания. Вследствие этого поры или шлаковые включения, диаметры которых равны соответственно высоте прорези или диаметру проволоки эталона, могут быть не выявлены, несмотря на то, что изображения искусственных дефектов четко видны.

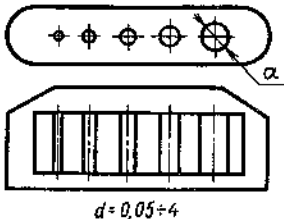
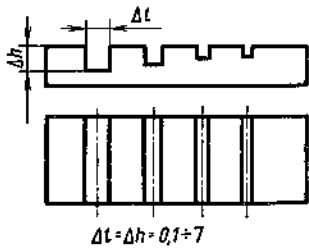
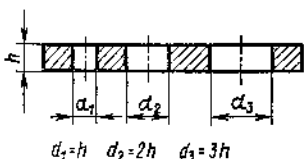
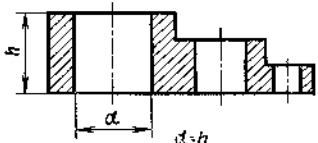
В практике радиационной дефектоскопии применяют несколько типов эталонов чувствительности (табл. 4.5). В СССР в соответствии с ГОСТ 7512—82 наиболее часто применяют канавочные и провололочные эталоны четырех типоразмеров каждый. На канавочном эталоне имеется шесть канавок, глубина рядом расположенных канавок различается в 1,39 раза. Проволоочный эталон представляет собой пластиковый чехол с семью проволоками различного диаметра, рядом расположенные проволоки различаются размерами в 1,25 раза. Материал эталона должен быть аналогичен материалу контролируемого изделия. Эталоны маркируют свинцовыми буквами и цифрами. Буквы обозначают материал эталона, цифры — его номер (например, Cu2, Fe1, Al3, Ti4). Оба вида эталона равнозначны по чувствительности, выбор их определяется условиями работы и удобством использования.

Кассеты, маркировочные знаки и держатели. В практике промышленной радиографии применяют гибкие и реже жесткие кассеты. Гибкая кассета представляет собой двойной конверт из черной светонепроницаемой бумаги или дерматина. Материалом жестких кассет является алюминий. В соответствии с ГОСТ 15843—70 изготавливают 15 типоразмеров гибких и жестких кассет.

С целью обозначения изделия по участкам контроля применяют маркировочные свинцовые знаки, которые размещают на изделии или в кассете. После просвечивания их изображение отпечатывается на снимке.

Гибкие кассеты, заряженные радиографической пленкой и экранами, устанавливают на ферромагнитных материалах с помощью магнитных держателей типа МД-1. На немагнитных материалах кассеты крепят с помощью резиновых полос и ремней. Иногда применяют специальные пояса, снабженные застежками и натяжными ремнями.

4.5. Эталоны чувствительности, применяемые в радиационной дефектоскопии

Тип эталона	Размеры и эскиз	Относительная чувствительность, %	Стандартизован в странах
Проволочный	 <p>$d = 0,05 \div 4$</p>	1	СССР (ГОСТ 7512-82), страны СЭВ, ФРГ, Англия, Япония
Канавочный	 <p>$\Delta l = \Delta h \cdot 0,1 \div 7$</p>	1	СССР, ГОСТ 7512-82
Пластинчатый с отверстиями	 <p>$a_1 = h \quad a_2 = 2h \quad a_3 = 3h$</p>	1,5-2,0	США
Ступенчатый с отверстиями	 <p>$a = h$</p>	2,0-2,5	МИС

4.4. ТЕХНОЛОГИЯ КОНТРОЛЯ

Для испытаний сварных соединений наиболее широко применяют методы радиографического контроля, при которых в качестве детектора ионизирующих излучений используют радиографические пленки.

В зависимости от используемого вида излучения различают рентгено-, гамма- и бетатронную радиографию. Каждый из перечисленных методов имеет свою сферу использования. В частности, рентгенографию как наиболее чувствительный способ применяют преимущественно в цеховых и реже в полевых условиях в случаях, когда к контролю качества сварных соединений предъявляют наивысшие требования по чувствительности. Гаммаграфия доминирует при контроле качества сварных соединений, расположенных в труднодоступных местах, в полевых и монтажных условиях. Бетатронную радиографию используют при дефектоскопии сварных соединений большой толщины преимущественно в цеховых условиях.

При радиографировании сварных соединений соблюдают такую последовательность выполнения основных операций. Выбирают источник излучения, радиографическую пленку и определяют оптимальные режимы просвечивания; подготавливают контролируемый объект к просвечиванию; просвечивают объект; производят фотообработку снимков; расшифровку снимков; оформление результатов контроля.

Выбор источника излучения. Выбор источника излучения обуславливается технической целесообразностью и экономической эффективностью. Основными факторами, определяющими выбор источника, являются заданная чувствительность контроля, плотность и толщина материала контролируемого изделия; производительность контроля; конфигурация контролируемой детали, доступность ее для контроля и др.

Например, при контроле изделий, в которых допускаются дефекты большого размера, наиболее целесообразно применять изотопы с высокой энергией, обеспечивающие малое время просвечивания. Для изделий ответственного назначения используют рентгеновское излучение и только как исключение допускается применять изотопы, имеющие по возможности наименьшую энергию излучения, например Ir (табл. 4.6).

Выбор радиографической пленки. Выбор осуществляют по толщине и плотности материала просвечиваемого объекта, а также требуемой производительности и чувствительности контроля.

Пленку РТ-1 используют главным образом для контроля сварных соединений больших толщин, так как она обладает

4.6. Область применения копизирующего излучения в дефектоскопии

Толщина стали, мм	Гамма-излучение			Рентгеновское излучение	
	источник	энергия, кэВ	аппарат	напряжение, кВ	аппарат
4	^{145}Sm ^{155}Eu	39, 62, 84, 102	РК-2 ГУП-0,5-3	10—60 50—80 35—80	РУТ-60-20-1 РУП-120-5-1 РУП-150-10-1 РИНА-1Д
1—20	^{170}Tm	53, 84	РК-2 ГУП-0,5-3 РИД-21М	60—120 60—140 60—140 220—280 300—350	РУП-120-5-1 РУП-150-10-1 РУП-200-5-1 ИРА-1Д ИРА-2Д
2—40	^{75}Se	75, 130, 280, 405	РК-2 ГУП-0,5-3 РИД-21М	90—180 90—180 300—350	РУП-150/300-10-1 РУП-200-20-5 ИРА-2Д
10—60	^{192}Ir	295, 316, 468, 604	РУП-5-2 РИД-11 РИД-21М «Стальель-5»	140—200 140—300 250—400	РУП-200-20-1 РУП-150/300-10 РУП-400-5-1
30—100	^{137}Cs ^{152}Eu	661 122, 344, 963, 1405	«Газпром» «Трасса», «Нева» ГУП-0,5-2 ГУП-50-3	180—300 250—400 250—1	РУП-150/300-10 РУП-400-5-1 РТД-1
60—200	^{60}Co	1170, 1330	ГУП-1,5-3 ГУП-5-2 ГУП-50-2 «Кама»	250—400 250—100	РУП-400-5-1 РТД-1

Бета-троны на 6 и 18 МэВ

Бетатроны на 6 и 18 МэВ

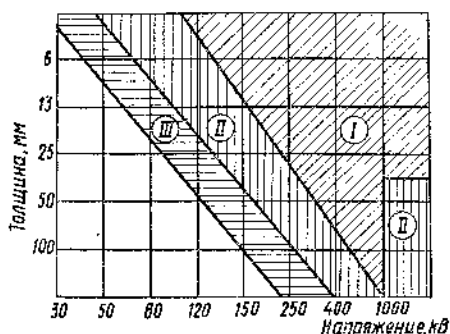


Рис. 4.23. Номограмма областей применения радиографических пленок для просвечивания стали:

I – РТ-5, РТ-4, II – РТ-1, РТ-3,
III – РТ-2

высокой контрастностью и чувствительностью к излучению. Универсальную экранную пленку РТ-2 применяют при просвечивании деталей различной толщины, при этом время просвечивания по сравнению с другими типами пленок наименьшее. Для контроля изделий из алюминиевых сплавов и сплавов черных металлов небольшой толщины можно использовать высококонтрастную пленку РТ-3 и РТ-4. При дефектоскопии ответственных соединений применяют пленку РТ-5. Эта пленка обладает весьма высокой контрастностью, позволяет выявлять незначительные дефекты, хотя и имеет наименьшую чувствительность к излучению, что приводит к увеличению времени экспозиции при контроле. Ориентировочно выбор радиографической пленки целесообразно производить по номограммам (рис. 4.23).

Выбор схемы и параметров просвечивания. Для контроля сварных соединений различных типов выбирается одна из схем просвечивания, приведенных на рис. 4.24. Стыковые односторонние соединения без разделки кромок, а также с V-образной разделкой просвечивают, как правило, по нормали к плоскости свариваемых элементов (схема 1).

Швы, выполненные двусторонней сваркой с К-образной разделкой кромок, наиболее целесообразно просвечивать по схеме 2 с применением в ряде случаев двух экспозиций. В этом случае направление центрального луча должно совпадать с линией разделки кромок. Допускается просвечивать эти швы также и по схеме 1.

При контроле швов нахлесточных, угловых и тавровых соединений центральный луч направляют, как правило, под

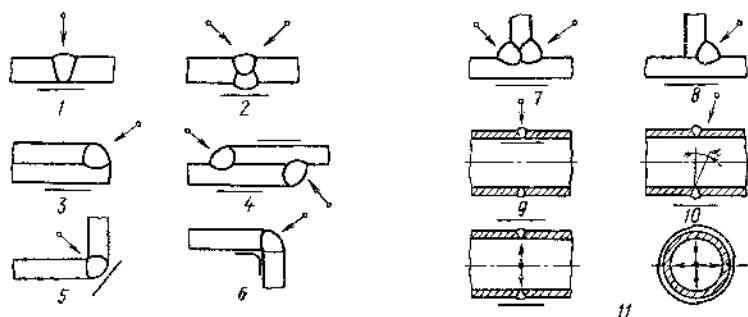


Рис. 4.24. Схемы (1—11) контроля сварных соединений

углом 45° к плоскости листа (схемы 3, 4, 5, 6, 7, 8). Трубы большого диаметра (> 200 мм) просвечивают через одну стенку, а источник излучения устанавливают снаружи или внутри изделия с направлением оси рабочего пучка перпендикулярно шву (схема 9, 11).

При просвечивании через две стенки сварных соединений труб малого диаметра во избежание наложения изображения участка шва, обращенного к источнику излучения, на изображение участка шва, обращенного к пленке, источник сдвигают от плоскости сварного соединения (схема 10) на угол до $20-25^\circ$.

При выборе схемы просвечивания необходимо помнить, что непровары и трещины могут быть выявлены лишь в том случае, если плоскости их раскрытия близки к направлению просвечивания ($0-10^\circ$), а их раскрытие не менее $0,05$ мм.

При контроле кольцевых сварных соединений труб часто применяют панорамную схему просвечивания (схема 11), при которой источник с панорамным излучением устанавливают внутри трубы на ее оси и соединение просвечивают за одну экспозицию. Условие применения этой схемы просвечивания следующее: размер активной части Φ источника излучения, при котором возможно его использование для контроля сварного шва панорамным способом, определяют по формуле $\Phi \leq (u - R)/(r - 1)$, где u — максимально допустимая величина геометрической нерезкости изображения дефектов на снимке, задаваемая, как правило, действующей документацией по контролю, мм; R — внешний радиус контролируемого соединения, мм; r — внутренний радиус контролируемого соединения, мм.

После выбора схемы просвечивания устанавливают величину фокусного расстояния (F). С увеличением фокусного расстояния несколько увеличивается чувствительность метода,

но возрастает (пропорционально квадрату расстояния) время экспозиции.

Фокусное расстояние выбирают в зависимости от схемы просвечивания, толщины материала и размеров активной части (фокусного пятна) источника излучения. Например, для схем 1—8 (см. рис. 4.24) фокусное расстояние должно быть $F \geq (\Phi/u + 1)(S + H)$, где S — толщина сварного соединения в направлении просвечивания, мм; H — расстояние от пленки до обращенной к пленке поверхности изделия. Обычно фокусное расстояние выбирают в диапазоне от 300 до 750 мм.

Время экспозиции и длина контролируемого за одну экспозицию участка при контроле по приведенным выше схемам должны быть такими, чтобы:

плотность почернения изображения контролируемого участка шва, околошовной зоны и эталонов чувствительности была не менее 1,5 и не более 3,0 единиц оптической плотности;

уменьшение плотности почернения любого участка сварного шва на снимке по сравнению с плотностью почернения в месте установки эталона чувствительности было не более 0,4—0,6 единиц оптической плотности в зависимости от коэффициента контрастности пленки, но нигде плотность почернения не должна быть менее 1,5 единиц;

искажение изображения дефектов на краях снимка по отношению к изображениям их в его центре не превышало 10% для прямолинейных и 25% для криволинейных участков.

Обычно длина l прямолинейных и близких к прямолинейным участков, контролируемых за одну экспозицию, должна быть не более $l \leq 0,8f$, где f — расстояние от источника излучения до поверхности контролируемого участка.

Подбор экспозиции при просвечивании изделий производят по номограммам (рис. 4.25), а уточняют ее с помощью пробных снимков. Экспозиция рентгеновского излучения выражается как произведение тока трубки на время; гамма-излучения — как произведение активности источника излучения, выраженной в гамма-эквиваленте радия, на время. Номограммы даются для определенного типа пленки, фокусного расстояния и источника излучения.

Подготовка контролируемого объекта к просвечиванию. Перед контролем изделие должно быть тщательно осмотрено и при необходимости очищено от шлака, грязи и других загрязнений. Наружные дефекты необходимо удалить, так как их изображение на снимках может затемнить изображение внутренних дефектов. Сварное соединение разбивают на участки контроля, которые маркируют, с тем чтобы после просвечивания можно было точно указать расположение выявленных внутренних де-

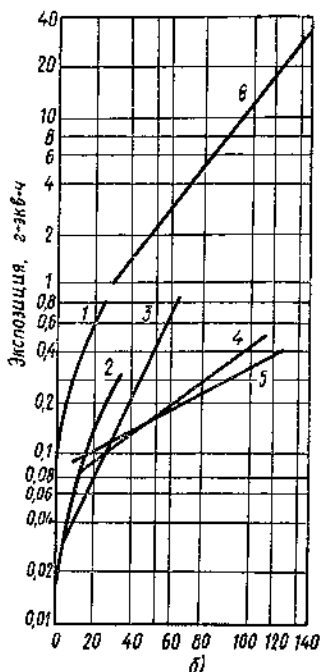
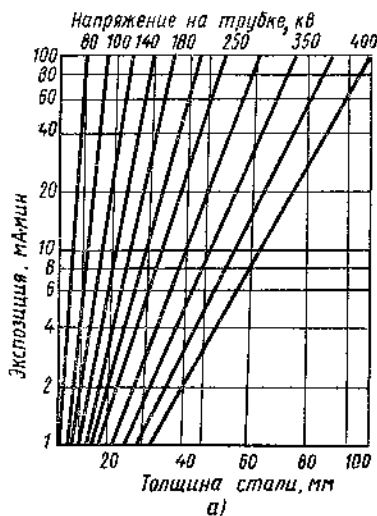


Рис. 4.25. Номограмма для определения экспозиции просвечивания стали:

а — рентгеновским излучением при $F = 750$ мм и пленке РТ-1, б — гамма-излучением при $F = 500$ мм и пленке РТ-1; 1 — Тулий-170, 2 — Стронций-90, 3 — Иридий-192, 4 — Цезий-137, 5 — Европий-152, 6 — Кобальт-60

фектов. Кассеты и радиографические пленки, заряжаемые в них, должны маркироваться в том же порядке, что и соответствующие участки контроля. Выбранную пленку заряжают в кассету, после чего кассету укреплняют на изделии, а со стороны источника излучения устанавливают эталон чувствительности. В случаях, когда его невозможно так установить, например при просвечивании труб через две стенки, разрешается располагать эталон со стороны детектора (кассеты с пленкой).

Просвечивание изделия. После выполнения перечисленных операций и обеспечения безопасных условий работы приступают к просвечиванию изделия. При этом источник излучения необходимо установить таким образом, чтобы во время просвечивания он не мог вибрировать или сдвинуться с места, иначе изображение на пленке окажется размытым. По истечении времени просвечивания кассеты с пленкой снимают и экспонированную пленку подвергают фотообработке.

Фотообработка снимков. Процесс фотообработки пленки включает следующие операции: проявление, промежуточную промывку, фиксирование изображения, промывку в непроточной воде, окончательную промывку и сушку пленки. При проявлении происходит восстановление кристаллов бромистого серебра в металлическое серебро. Пленку проявляют в специальном растворе — проявителе. Время проявления указано на упаковках пленки и раствора. После проявления пленку ополаскивают в кювете с водой. Такая промежуточная промывка предотвращает попадание проявителя в фиксирующий раствор — фиксаж. В фиксаже растворяются непроявленные зерна бромистого серебра, а восстановленное металлическое серебро не претерпевает изменений.

После фиксирования необходимо производить промывку пленки в непроточной воде с последующим извлечением и сбором серебра. Затем пленку промывают в ванне с проточной водой в течение 20—30 мин для удаления оставшихся после фиксирования химических реактивов. После промывки пленки ее сушат 3—4 ч. Температура сушки не должна превышать 35 °С.

Расшифровка снимков — наиболее ответственный этап в проведении работ по фотообработке. Задача расшифровщика заключается в выявлении дефектов, установлении их видов и размеров. При измерении размеров изображений дефектов до 1,5 мм рекомендуется применять измерительную лупу (ГОСТ 25706—83), свыше 1,5 мм — прозрачную измерительную линейку. При расшифровке снимков необходимо отличить дефекты, вызванные плохим качеством пленки или неправильным обращением с ней в процессе фотообработки, от дефектов контролируемого материала. В сомнительных случаях контролируемый материал подвергают повторному просвечиванию.

Заключение о качестве проконтролированного сварного соединения дается в соответствии с техническими условиями (ТУ) на изготовление и приемку изделия. При этом оценку качества изделия производят только по сухому снимку, если он отвечает следующим требованиям (ГОСТ 7512—82): на рентгенограмме четко видно изображение сварного соединения с усилением шва по всей длине снимка; на снимке нет пятен, царапин, отпечатков пальцев, подтеков от плохой промывки пленки и неправильного обращения с ней; на снимке видны изображения эталонов. В противном случае производят повторное просвечивание.

Оформление результатов контроля. Для сокращения записи результатов контроля применяют сокращенные обозначения обнаруженных на снимке дефектов: Т — трещины; Н — непровар;

П — поры; Ш — шлаковые включения; В — вольфрамовые включения; Пд — подрез; См — смещение кромок; Р — разностенность; О — ослабление корня шва. По характеру распределения дефекты объединяют в следующие группы: отдельные дефекты, цепочка дефектов, скопление дефектов. К цепочке относят расположенные на одной линии дефекты в количестве не менее трех с расстоянием между ними, равным трехкратной величине дефекта или меньше. К скоплению дефектов относят кучно расположенные дефекты в количестве не менее трех с расстоянием между ними, равным трехкратной величине дефекта или меньше. Размером дефекта считают наибольший линейный размер изображения его на снимке в миллиметрах. При наличии группы дефектов разных размеров одного вида указывают средний или преобладающий размер дефекта в группе, а также общее число дефектов.

Пример записи результатов контроля. На изображении участка сварного соединения С5 ГОСТ 5264—80 чувствительностью 3% и длиной 300 мм выявлены две трещины длиной по 5 мм, непровар длиной 120 мм, четыре отдельных шлаковых включения размером по 3 мм и одна цепочка пор длиной 25 мм. Максимальная суммарная длина дефектов составляет 45 мм.

Запись в заключение: 2Т-5, Н-120, 4Ш-3, ЦП-25, Σ 45.

4.5. КСЕРОРАДИОГРАФИЧЕСКИЙ И ФЛЮОРОГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ

Ксерорадиография. Этот метод контроля представляет собой процесс получения изображения на поверхности пластины, электрические свойства которой изменяются в соответствии с энергией воспринятого рентгеновского или гамма-излучения. Если зарядить такую пластину электрическим зарядом до определенного уровня, а затем подвергнуть ионизационному облучению, то величина остаточного заряда на любом участке пластины будет однозначно связана с интенсивностью излучения, падающего на данный участок. Причем остаточный заряд будет тем меньше, чем больше интенсивность излучения. Следовательно, в тех местах пластины, на которые попало излучение, прошедшее через какой-либо дефект (непровар, пора, раковина), остаточный заряд будет меньше, чем в других местах пластины. Таким образом, в пластине образуется скрытое электростатическое изображение. Скрытое изображение проявляют с помощью различных красящих мелкоразмолотых порошков на основе талька, окиси цинка, мела (КС4-5, ПС4-1, ПС4-74). Порошок предварительно электризуют, опыляют им пластину, и скрытое изображение превращается в видимое. Затем на пласти-

ну накладывают обычную бумагу, на которой фиксируется полученное изображение объекта. Весь процесс проявления занимает 10—40 с. Пластина состоит из подложки (алюминий, латунь, стальная фольга), сверху которой нанесен слой полупроводника (селен, окись цинка, сера, сульфид кадмия и др.). Чаще всего в качестве подложки применяют алюминий, а полупроводником является аморфный селен.

Чтобы ксерографические пластины оказались чувствительными к воздействию излучения, их необходимо предварительно зарядить коронным разрядом при напряжении 7—12 кВ. Длительность зарядки составляет 10—120 с. К заряженной пластине нельзя прикасаться пальцами и любыми другими предметами, так как это приведет к отводу электрического заряда с поверхности и появлению пятен на проявленном изображении. Кроме того, под действием видимого света заряд будет утекать через металлическую подложку. Поэтому ксерографические пластины помещают в кассеты. Заряд пластины при хранении ее в темном месте сохраняется не более 30 мин. Срок службы пластины типа СЭРП-100П более 700 экспозиций.

Продолжительность экспозиции при просвечивании изделий рентгеновским или гамма-излучением на ксерографические пластины зависит от энергии и интенсивности излучения, толщины и плотности просвечиваемого материала, фокусного расстояния, чувствительности применяемой ксерографической пластины к излучению данной энергии. Продолжительность экспозиции зависит также от толщины селенового слоя и величины заряда пластины.

При одинаковых условиях просвечивания продолжительность экспозиции на ксерографические пластины при энергии излучения от 100 до 400 кэВ меньше в 2—4 раза, чем на рентгеновскую пленку; различие тем больше, чем ниже энергия излучения.

В широком диапазоне энергий (от 50 кэВ до нескольких мегаэлектрон-вольт) плотность и контрастность ксерографических отпечатков уменьшается с повышением энергии излучения. При просвечивании изделий на ксерографические пластины целесообразно применять усиливающие экраны, представляющие собой слой тяжелых металлов (свинец, олово), которые располагают между подложкой и слоем селена. Их применение позволяет увеличить контрастность и четкость изображения. Особенно эффективно применение свинцовых экранов в случае просвечивания изделий жестким рентгеновским и гамма-излучениями. Применять обычные флуоресцирующие экраны в этом случае нецелесообразно, так как из-за крупнозернистости флуоресцирующего слоя и невозможности создать

4.7. Значения чувствительности

Толщина стали, мм	K, %, при	
	радиографии (РУП-150-10, пленка РТ-1)	ксерографии (ПКР-1, пластина СЭРП-100П, порошок КСЧ-5)
4	4,0	5,5
6	3,5	5,0
8	2,5	4,5
12	2,0	4,5
16	2,0	4,0
20	2,0	3,5

тесный контакт между флуоресцирующим экраном и чувствительным слоем заряженной пластины (касание к заряженной пластине отводит заряд с ее поверхности) сильно снижается четкость изображения.

Чувствительность ксерографического метода контроля зависит от энергии излучения, степени ослабления излучения в материале, разрешающей способности пластин и процесса проявления (свойств проявляющего порошка и метода его нанесения). Практически разрешающая способность ксерографической пластины равна 8—12 линий/мм и зависит от размера частичек проявляющего порошка. Практика показывает, что чувствительность K ксерографического метода несколько ниже радиографического на рентгеновскую пленку (табл. 4.7).

К преимуществам ксерографического метода относят оперативность (табл. 4.8) получения снимка и сухой метод проявления. Методом фотосъемки с одной ксерограммы можно сделать высококачественные фотографии с большим числом копий.

При ксерографии отпадает необходимость в дефицитных материалах и процессах фотообработки. Стоимость контроля по сравнению с радиографическим снижается в 6—7 раз.

4.8. Расход времени на обработку снимка

Радиография		Ксерография	
операция	время, мин	операция	время, мин
Зарядка	0,5	Зарядка	0,5
Экспонирование	1—10	Экспонирование	1—10
Проявление	До 8	Проявление	До 1
Закрепление	» 16	Перенос	» 0,5
Промывка	» 20	Закрепление	» 1
Сушка	30—60	Просмотр	2—5
Просмотр	2—5		

Однако ксерография обладает рядом недостатков, что сдерживает ее массовое применение в промышленности. Прежде всего низкое качество пластин, трудности контроля больших изделий из-за ограниченных размеров пластин, возможность использования только плоских пластин. Выпускаемые промышленностью пластины имеют существенные поверхностные дефекты (сетку трещин, царапины), которые резко снижают чувствительность метода. Кроме того, за счет неравномерной толщины покрытия селенового слоя для каждой пластины необходимо подбирать собственный режим просвечивания и проявления. Непостоянная толщина покрытия приводит к неравномерному распределению потенциала по поверхности пластины, что в дальнейшем влияет на качество переноса изображения. Пластины подвержены влиянию влажности и низкой температуры. Отмеченные недостатки не могут служить препятствием для развития ксерографического метода контроля, так как все они вызваны несовершенством технологии изготовления ксерографических пластин и легко устранимы при серийном производстве.

В промышленности применяют установки ПКР-1, ПКР-2, ЭРЕНГ, ЭРГА-С, ЭР7МП, которые позволяют контролировать стальные сварные швы толщиной до 20 мм. В качестве источников излучения чаще всего используют серийные рентгеновские аппараты, хотя могут применяться и гамма-аппараты, имеющие в качестве изотопов Ir^{192} или Cs^{137} .

За рубежом аппараты подобного типа выпускаются фирмами «Дженерал электрик» (США), «Тохиба» (Япония), «Пилорис» (ПНР) и др.

Флюорография. Это один из экономических методов регистрации рентгеновского или гамма-излучения на фотобумагу или фотопленку, содержащих в 7–9 раз меньше серебра, чем рентгеновская пленка. Необходимым условием при этом методе является обязательное сочетание фотобумаги или фотопленки и усиливающих флуоресцентных экранов. Ионизирующее излучение падает вначале на экран с флуоресцентным слоем для формирования оптического изображения, которое фиксируется на фотобумаге, контактирующей с флуоресцентным экраном.

В зависимости от энергии ионизирующего излучения применяется определенная комбинация фоторегистратора и усиливающего экрана, при которой достигается наилучшая чувствительность. Необходимо, чтобы основные характеристики (разрешающая способность, максимум спектра поглощения и высвечивания и др.) фоторегистратора и экранов были достаточно близкими по значениям. Практикой установлено, что при

энергии излучения до 240 кэВ целесообразно использовать флуорографическую пленку РФ-У (или РФ-3) совместно с экраном из CsI (Tl). Фотобумага «Фототелеграфная БС» и фотопленка «Микрат-300» хорошо сочетаются с экранами, имеющими люминофоры из CaWO_4 , CsI (Tl) и NaI (Tl). Для энергии излучения от 240 кэВ до 8 МэВ оптимальна комбинация флуорографической пленки РФ-У с люминесцентным усиливающим экраном из CsI (Tl). Не менее важным фактором, определяющим условия контроля (максимальную чувствительность, минимальное время экспозиции), является тип источника ионизирующего излучения. Практикой установлено, что максимальная чувствительность ($K = 1 \div 3\%$) достигается в случае просвечивания стали толщиной 5–50 мм рентгеновскими аппаратами, а 50–250 мм линейными ускорителями. При необходимости удовлетворительные данные по чувствительности ($K = 2 \div 4,5\%$) в диапазоне толщин 15–70 мм и 70–130 мм можно получить с применением гамма-изотопов Ir^{192} и Co^{60} соответственно. Указанная чувствительность достигается при фокусном расстоянии $F = 500 \div 750$ мм. При $F = 250$ мм чувствительность контроля будет в 2 раза хуже.

Существенным преимуществом при просвечивании на фоторегистратор является резкое уменьшение времени экспозиции и обработки снимка. Время экспозиции при просвечивании рентгеновским аппаратом РУП-150/300-10 на флуорографическую пленку РФ-У в 5–6 раз меньше времени радиографии с применением пленок типов РТ-4М и РТ-5. Время просвечивания при флуорографии и радиографии с помощью высокоэнергетичных источников излучений (Co, линейный ускоритель) фактически одинаково.

Значительно меньше расходуется времени на обработку фотобумаги по сравнению с радиографической пленкой. Время проявления и фиксирования фотобумаги составляет 4–5 мин, тогда как для радиографической пленки эти операции занимают 20–25 мин. Фотобумага сушат в течение 10–15 мин, что в 3–4 раза (см. табл. 4.7) меньше в сравнении с сушкой радиографической пленки. Промывку фотобумаги в проточной воде производят примерно 15–20 мин.

4.6. АВТОМАТИЗАЦИЯ ОСНОВНЫХ ПРОЦЕССОВ РАДИОГРАФИИ

Получение радиографического снимка, оценка качества изделия, оформление результатов контроля производятся оператором-радиографом. Это приводит к тому, что на результатах кон-

троля сильно сказываются субъективные факторы и, как следствие, значительно снижается качество расшифровки снимков и достоверность результатов контроля. Кроме того, большой объем ручного труда ведет к тому, что процесс дефектоскопии сильно отстает от производительности основного процесса — сварки изделия. То же самое можно отнести к установлению времени экспозиции.

Существующие номограммы для определения экспозиции не дают возможности учесть особенности распределения дозы излучения на конкретных просвечиваемых объектах, иногда имеющих сложную конфигурацию. Это может привести к погрешностям в экспозиции, поэтому для ответственных деталей необходимо делать контрольные снимки, что значительно повышает стоимость контроля и снижает его производительность.

Таким образом, можно наметить три взаимосвязанных процесса, автоматизация которых является проблемой первостепенной важности для дальнейшего развития радиографического метода контроля. Это — экспонометрия, фотообработка и расшифровка снимков.

Экспонометрия. Средняя плотность почернения по снимку однозначно определяется поглощенной дозой излучения в эмульсионном слое. Поэтому при разработке экспонометров стремятся создавать измерители дозы с чувствительностью (по спектру регистрируемого излучения), близкой к пленке. В настоящее время широко распространены экспонометры для различных энергий рентгеновского излучения, применяемые в медицине. Такие приборы серийно выпускают фирмы «Сименс», «Кох и Штерцель», «Мюллер» и др., ими же комплектуются рентгеновские аппараты высшего класса.

Рассматривая различные способы схемной реализации экспонометра для радиологии, можно выделить два основных метода: ионизационный и газоразрядных счетчиков. По широте диапазона энергий регистрируемого излучения, простоте выполнения, эксплуатационным качествам приборы, построенные с использованием этих методов, существенно отличаются друг от друга. Наиболее универсальный — ионизационный метод, где в качестве детектора используют ионизационную камеру, позволяет учесть практически все факторы, влияющие на получение качественного снимка. Однако изготовление таких экспонометров связано с некоторыми техническими трудностями. К ним можно отнести сложность изготовления ионизационных камер, высокие требования, предъявляемые к регистрирующим устройствам, и др. Кроме того, ионизационные экспонометры чувствительны к механическим и климатическим воздействиям, в связи с чем их целесообразно применять только

при радиографическом контроле в лабораториях. Однако часто требуется проводить контроль в полевых и цеховых условиях. Для этой цели перспективны экспонометры с газоразрядными счетчиками.

Датчик экспонометра представляет собой выносной блок, позволяющий оценивать радиационную обстановку в местах контроля изделия на расстоянии, безопасном для оператора. Принцип действия датчика основан на преобразовании потока ионизирующего излучения в статистически распределенные электрические импульсы с последующим формированием их по амплитуде и длительности. Средняя частота последовательного поступления импульсов с выхода датчика пропорциональна мощности экспозиционной дозы в месте его нахождения. В качестве детектора излучения может быть применен газоразрядный счетчик, например типа СИЗБГ с фильтром, имеющий постоянную чувствительность к излучению в диапазоне энергий 300—1500 кэВ.

При просвечивании излучение от источника, пройдя контролируемый объект, регистрируется счетчиком СИЗБГ и преобразуется в последовательность электрических импульсов. По кабелю длиной до 100 м импульсы, нормализованные по амплитуде отрицательной полярности, поступают на вход радиоэлектронного блока.

Так как средняя частота поступления импульсов с выхода датчика пропорциональна мощности экспозиционной дозы, то экспозиционную дозу можно характеризовать числом зарегистрированных импульсов. Следовательно, необходимое время просвечивания, при котором обеспечивается оптимальная плотность почернения пленки, можно задавать числом импульсов от детектора, поступивших на вход радиоэлектронного блока.

Количество набираемых импульсов (время экспозиции) определяется положением переключателя «Коэффициент пересчета» и зависит от типа пленки, срока ее хранения, способа зарядки кассеты. Поэтому перед началом работы с новой партией пленки или после ее длительного хранения должна быть проведена градуировка экспонометра. Ее проводят при замене газоразрядного счетчика в детекторе, при изменении режимов фотообработки.

При использовании экспонометра обеспечивается получение выбранной плотности почернения снимка с погрешностью до $\pm 5\%$. Это справедливо при проведении радиографии isotопными источниками γ -излучения с энергией 300—1500 кэВ и в рекомендованном диапазоне толщин просвечиваемых материалов для данного источника.

Автоматическая фотообработка. В настоящее время она находит все более широкое применение в промышленности в связи со значительным ускорением процесса и существенным повышением качества выполняемого снимка.

При создании первых автоматов для фотообработки форматных радиографических снимков копировали приемы ручной фотообработки и применяли такую транспортную систему, при которой рамки с пленками передвигались в определенном рабочем цикле из одного обрабатывающего блока в другой. Автоматы рамочного и подвесного типов не нашли широкого применения в промышленности в связи со сложностью, громоздкостью конструкции и малой надежностью в работе.

Осуществление в промышленном масштабе автоматической фотообработки стало возможным после создания автоматов рольного типа, новых радиографических пленок, ускоренных процессов проявления и фиксирования. Новые радиографические пленки РТ-1Д, РТ-5Д и РНТМ-1Д имеют задубленные фоточувствительные слои и по сравнению с пленками РТ-1, РТ-5 и РНТМ-1, обрабатываемыми вручную, обладают улучшенными физико-механическими свойствами, выдерживают воздействие высоких температур обработки и сушки.

Пленки РТ-1Д, РНТМ-1Д и РТ-5Д, обработанные с использованием ускоренных процессов проявления и фиксирования, обладают лучшими сенситометрическими показателями, чем пленки РТ-1, РНТМ-1 и РТ-5, обработанные вручную в стандартных растворах. Они имеют лучшую спектральную чувствительность, больший средний градиент и меньшую плотность почернения вуали. Улучшение этих показателей (на 10–15%) было достигнуто в результате обеспечения следующих параметров автомата: точность поддержания температуры проявителя $\pm 1,0\%$ с возможностью регулирования температуры от 18 до 35 °С; точность поддержания температуры фиксажа и промывочной воды $\pm 2\%$ с возможностью регулирования температуры от 18 до 35 °С; точность поддержания температуры сушки $\pm 5\%$ с возможностью регулирования температуры от комнатной до 65 °С; точность отсчета-площади обработанной пленки $\pm 5\%$; интервал времени обработки в каждом баке от 1 до 8 мин; точность введения компенсирующей добавки $\pm 10\%$.

Обрабатывающий тракт автомата состоит из многих пар вращающихся роликов, между которыми транспортируется пленка, прижимающаяся к их поверхности. Пленка последовательно проходит через баки проявления, фиксирования, промывки и секцию сушки. Промежуточная промывка при переходе пленки из проявителя в фиксаж не применяется, так как

фиксаж обладает хорошими буферными свойствами, а ролики отжимают остатки проявителя при переходе пленки из одного бака в другой. После окончания фиксирования производится промывка пленки в двух баках, причем в первом из них осуществляется ополаскивание пленки в стоячей воде (для последующего сбора остаточного серебра), а во втором — промывка в проточной воде. Пленка сушится теплым воздухом, который обдувает ее с двух сторон на всем пути движения в секции сушки. Автомат снабжен термостатами, блоками автоматического введения компенсирующих добавок, вентилятором и обогревателем, приводом с регулировкой скорости вращения роликов.

Подобная конструкция автомата позволяет обрабатывать разнообразие типов пленок при различных значениях времени проявления и фиксирования. В отечественном автомате типа АФ-40 могут обрабатываться пленки РТ-1Д, РТ-5Д, РНТМ-1Д с максимальной шириной 40 см и минимальной длиной 10 см.

Возможна также обработка пленок РМ-1, РТ-1, РТ-4М, РТ-5 и некоторых других (например, фототехнических и полиграфических), однако в этих случаях режимы фотообработки и сушки следует специально подбирать по времени и температуре для каждого типа пленки. Одно из дополнительных преимуществ автоматов ролльного типа — возможность обработки рулонной пленки любой длины. Для этого автомат снабжается подающей кассетой, из которой пленка принимается и направляется транспортирующими роликами на обработку, и приемной кассетой, на которую наматывается высушенная пленка.

Расшифровка снимков. Одним из основных этапов процесса контроля является расшифровка радиографического снимка. На расшифровке заняты квалифицированные специалисты, прошедшие специальную дополнительную подготовку, что приводит к существенному повышению стоимости этого этапа, так как расшифровка снимков проводится в основном только визуальным способом. Восприятие расшифровщика вносит значительную погрешность в результаты контроля. Поэтому ставится вопрос о замене оператора автоматическим устройством, хотя бы на отдельных операциях процесса расшифровки.

Процесс расшифровки радиографического снимка включает считывание информации с пленки, кодирование, фильтрацию, классификацию дефектов, заключение о качестве сварного соединения. Информация с радиографической пленки в специальном устройстве считывания представляется в виде последовательности электрических сигналов. Обычно считывание осу-

ществляется при сканировании всего снимка считывающей апертурой, размеры которой меньше размеров минимального дефекта. Электрические сигналы отражают распределение плотности почернения по снимку и координаты площадки считывания.

Устройства считывания, используемые в различных областях техники, можно разделить на три группы: устройства на передающих телевизионных трубках (ПТТ); устройства на электронно-лучевых трубках бегущего луча (ЭЛТ); оптико-механические считывающие устройства.

Принцип действия считывающих устройств на ПТТ заключается в том, что изображение на пленке в проходящем свете проектируется через оптическую систему на входное окно ПТТ. На выходе устройства анализируется распределение видеосигнала, амплитуда которого зависит от плотности почернения отдельных участков пленки. Эти устройства способны обеспечить достаточно высокую разрешающую способность. Кроме того, при их использовании открывается перспектива — перейти в дальнейшем от расшифровки результатов радиографического контроля к полной автоматизации визуальных методов.

В считывающих устройствах второй группы электронно-лучевая трубка (ЭЛТ) используется как точечный источник света. Растр с ЭЛТ проектируется через оптическую систему на пленку. Прошедший через пленку световой поток регистрируется одним или несколькими ФЗУ, сигнал с которых поступает на схему регистрации и анализа. Устройства на ЭЛТ обладают несколькими достоинствами. Обратные связи, компенсирующие флуктуации яркости свечения экрана и неравномерность светового потока, прошедшего через оптическую систему, обеспечивают хорошую стабильность и чувствительность считывающих устройств на ЭЛТ. К достоинствам этих устройств относится также возможность осуществления программного управления разверткой изображения. При введении связи между блоками анализа информации и развертки изображения такое программное управление позволит повысить надежность расшифровки снимка за счет многократного просмотра наиболее интересных участков.

Оптико-механические считывающие устройства обеспечивают наиболее высокое отношение сигнал/шум, и при их использовании сравнительно несложно достичь требуемой чувствительности к изменению регистрируемого потока. Эта особенность — их основное достоинство. Быстродействие и разрешающая способность оптико-механических устройств достаточны для решения поставленной задачи.

Дальнейшая обработка сигналов осуществляется в виде числовых кодов в ЭВМ. Если подсчитать количество информации на радиографическом снимке, то оказывается, что для хранения ее потребуется объем памяти, намного превышающий оперативную память вычислительной машины. В то же время сигналы, поступающие с устройства считывания, содержат «полезный» сигнал (сигнал о дефекте), шумовую его составляющую, обусловленную зернистостью пленки, неравномерностью ее полива, флуктуациями проявившегося числа зерен, и сопутствующий сигнал. Последний определяется изменениями плотности почернения пленки из-за колебаний толщины или средней плотности контролируемого изделия. Из этих составляющих для вынесения заключения о качестве важна только первая. Поэтому большое значение имеет фильтрация информации, т. е. выделение полезной составляющей. Эта фильтрация может осуществляться над сигналами с устройства считывания до их кодирования и над самими кодами. В последнем случае фильтрация может быть частью программы обработки информации в ЭВМ.

Следующий этап расшифровки — классификация обнаруженных дефектов, т. е. определение их вида, характеристик и места расположения на снимке. Эта задача является частным случаем распознавания полутоновых изображений. Простейший метод распознавания образов заключается в их сопоставлении с эталонами. При этом каждый класс образов хранится в памяти машины в качестве эталона. Распознаваемый образ сравнивается с эталоном каждого класса. Классификация основывается на заранее выбранном критерии соответствия или критерии подобия, т. е. если входной образ лучше соответствует эталону i -го класса образов, чем любому другому эталону, то входящий образ классифицируется как принадлежащий i -му классу образов. Недостаток этого метода в том, что в некоторых случаях трудно выбрать подходящий эталон для каждого класса образов и установить необходимые критерии соответствия, когда образы, принадлежащие одному классу, могут значительно изменяться и искажаться.

Другой метод заключается в том, что вместо сравнения входного образа с эталоном классификация основывается на некотором множестве отобранных замеров, производимых на входных образах. Эти отобранные замеры, называемые признаками, предполагаются инвариантными и малочувствительными по отношению к обычно встречающимся изменениям и искажениям и обладающими небольшой избыточностью. В этом случае распознавание образов состоит из двух задач.

Первая задача заключается в определении того, какие из-

мерения должны быть сделаны на входном образе. Обычно решение задачи выбора признаков является в известной степени субъективным. Критерий отбора признаков или упорядочивания основывается на важности этих признаков для характеристики образа или на влиянии этих признаков на качество распознавания (т. е. точность распознавания).

Вторая задача заключается в классификации (т. е. в принятии решения о принадлежности к тому или иному классу), которая основывается на измерении отобранных признаков.

Завершающий этап автоматической расшифровки снимков — это оценка качества изделия. Решение этой задачи невозможно без существования обоснованных норм дефектности и правил контроля, пригодных для вынесения на их основе заключения с использованием ЭВМ. Такие нормы и правила пока не внедрены в практику контроля, что в некоторой степени сдерживает автоматизацию расшифровки радиографических снимков.

В настоящее время в СССР сделаны только опытные образцы установок автоматической расшифровки снимков, в основе которых заложены считывающие устройства на ПТТ, оптико-механические считывающие устройства, а также ЭВМ «Минск-22». В США фирмой «Локхид Мисайлз» разработан макет устройства для расшифровки радиографических снимков протяженных сварных швов. В ближайшие годы подобные установки должны найти применение в промышленности.

4.7. СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ РАДИАЦИОННОЙ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ

Радиоскопия. Этот метод контроля основан на просвечивании контролируемых объектов рентгеновским излучением, преобразовании радиационного изображения объекта в светотеневое или электронное и передаче этого изображения на расстояние с помощью оптики или телевизионной техники и последующего визуального анализа его на выходных экранах. Назначение радиоскопического метода в основном то же, что и назначение радиографии. Целесообразность контроля сварных соединений этим методом определяется с учетом того, что по сравнению с радиографией чувствительность радиоскопического метода к дефектам примерно в 2 раза ниже, а производительность в 3—5 раз выше. Этот метод позволяет просматривать внутреннюю структуру контролируемого изделия в процессе его перемещения относительно входного экрана со скоростью от 0,3 до 1,5 м/мин в зависимости от типа преобразователя и толщины изделия. В качестве преобразователей

теневого радиационного изображения в светотеневое или электронное служат флуороскопический экран, сцинтилляционный кристалл, электронно-оптический преобразователь и реже электролюминесцентный экран. Особое положение занимает рентген-видикон, преобразующий рентгеновское изображение объекта непосредственно в видеосигнал без потери информации.

Флуороскопические экраны изготовляют нанесением на картонную основу флуоресцентного вещества (люминофора), которое представляет собой, например, смесь кристаллов сульфида цинка (ZnS) и сульфида кадмия (CdS), активизированного серебром. В результате процессов взаимодействия рентгеновского и гамма-излучений с веществом люминофора возникает люминесценция со свечением в зеленой или желто-зеленой части видимого спектра. Чувствительность контроля оказывается в 3—6 раз ниже, чем при радиографии. Эти экраны служат для регистрации электронов, протонов, α -частиц, а также могут быть использованы входными элементами рентгеновских электронно-оптических преобразователей (ЭОП) и во флуорографии.

Сцинтилляционные кристаллы представляют собой монокристаллы неорганического (щелочно-галогидные) и органического (антрацен) происхождения с различными активаторами. Наибольшее распространение получили монокристаллы первого типа на основе иодистого натрия (NaI), иодистого калия (KI), иодистого цезия (CsI), активированные талием (Tl). Принцип действия сцинтилляционных кристаллов основан на способности люминофоров светиться кратковременными вспышками (порядка 100 мкс—1 нс). Кристаллы CsI имеют меньшую яркость свечения, чем кристаллы NaI , при воздействии на них одинаковыми дозами излучения одной энергии. Однако большее применение нашли первые из них в связи с высокой гигроскопичностью кристаллов NaI .

Сцинтилляционные кристаллы по ряду параметров превосходят флуороскопические экраны, в частности разрешающая способность кристаллов CsI составляет 10—12 линий/мм, тогда как при использовании флуороскопических экранов разрешающая способность не превышает 3 линий/мм.

К преимуществам этих кристаллов относят беззернистую структуру, позволяющую создавать детекторы большой толщины для эффективной регистрации высоких энергий (15—30 МэВ); небольшой промежуток времени между свечениями 10^{-5} — 10^{-8} с), что обеспечивает безынерционность появления и исчезновения изображения; удовлетворительное совпадение спектра свечения кристалла со спектральной характеристикой фотокатодов усилителей яркости изображения; большая плот-

ность вещества и прозрачность для собственного излучения; возможность получения монокристаллов большого размера (до 230 мм).

Эти кристаллы широко используют в рентгенотелевизионных установках типа «Интроскоп». При их использовании чувствительность контроля в 2,5–2 раза ниже, чем при радиографии, скорость контроля 1–1,5 м/мин.

Электролюминесцентные экраны основаны на свечении некоторых люминофоров под действием переменного электрического поля. Они работают по следующему принципу. К экрану в местах проводящих покрытий подведено высокое напряжение (600–800 В), которое падает на фотопроводнике из-за его высокого электрического сопротивления, в то время как на слой люминофора приходится незначительная часть падающего напряжения. При облучении сопротивление фотопроводника резко падает, а на люминофоре возрастает, что вызывает его свечение. К недостаткам электролюминесцентных экранов следует отнести небольшой промежуток времени между свечениями, а также свечение люминофора, приводящее к возникновению при приложенном напряжении первоначального фона, который снижает контраст получаемого изображения. Электролюминесцентные экраны, используемые в качестве преобразователей, увеличивают яркость свечения в 100 раз. Однако их применяют при контроле сварных швов из-за отмеченных выше недостатков.

При непосредственном наблюдении флуороскопический экран и сцинтилляционный монокристалл не могут обеспечить оптимальную для расшифровки яркость изображения. Для создания таких изображений применяют специальные усилители рентгеновского изображения — рентгеновские электронно-оптические преобразователи РЭОП (рис. 4.26). В РЭОП, по существу, совмещены флуороскопический экран 6 (преобразователь радиационного изображения в оптическое) и фотокатод 7 (преобразователь оптического изображения в электронное). Полупрозрачный сурьмяно-цезиевый фотокатод под действием свечения люминофора, которое вызывается рентгеновским излучением, испускает электроны в количестве, пропорциональном интенсивности света. Электроны, ускоренные по энергии в 10^4 раз (разность потенциалов 25 кВ), фокусируются на выходных экранах 8 и 9, где посредством люминофора электронное изображение преобразуется в оптическое. Усиление яркости изображения достигается, с одной стороны, увеличением светового потока на выходном экране примерно в 100 раз благодаря ускоряющему напряжению и, с другой стороны, увеличением светимости выходного экрана

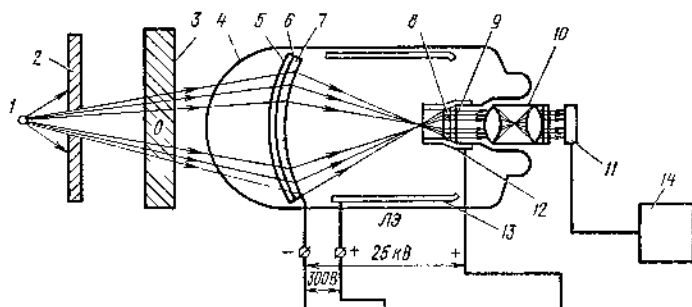


Рис. 4.26. Схема электронно-оптического преобразователя:

1 — источник излучения, 2 — свинцовая диафрагма, 3 — просвечиваемый объект, 4 — стеклянная вакуумная колба, 5 — алюминиевая подложка, 6 — флуороскопический экран, 7 — фотокатод, 8, 9 — выходные экраны, 10 — оптика, 11 — передающая телекамера, 12 — анод, 13 — металлизированное покрытие, 14 — экран телевизора

примерно в 16 раз в результате уменьшения электронно-оптического изображения в 4 раза. Изображение на выходном экране рассматривается с помощью оптики 10 или передается с помощью передающей телекамеры 11 на видеоконтрольное устройство 14.

В установке РИ-60ТЭ использован монокристалл, заблокированный с одноканальным ЭОП и передающей телевизионной трубкой (рис. 4.27). Установка позволяет контролировать толщины до 70 мм при относительной чувствительности метода 6–4%.

Рентген-видиконы — сочетают в себе световую передающую телевизионную камеру (видикон) с чувствительным к рентгеновскому излучению фотопроводящим слоем на основе окиси цинка, окиси свинца, аморфного селена, сернистой сурьмы и других соединений, нанесенного на алюминиевый диск (рис. 4.28). Под действием ионизирующего излучения с фото-

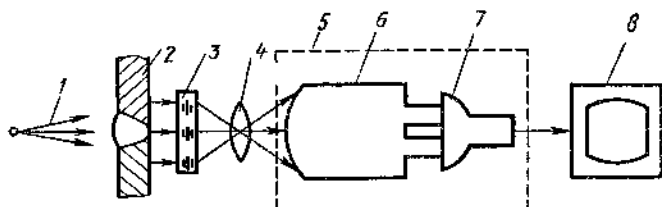


Рис. 4.27. Блок-схема установки на монокристалле:

1 — излучение, 2 — сварное соединение, 3 — монокристалл, 4 — объектив, 5 — передающий блок, 6 — ЭОП, 7 — телевизионная трубка, 8 — информационная телевизионная система

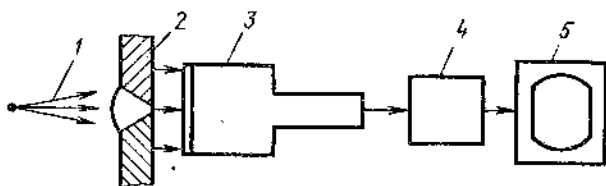


Рис. 4.28. Блок-схема рентген-видикона:

1 — излучение, 2 — сварное соединение, 3 — рентген-видикон, 4 — блок связи, 5 — информационная телевизионная система

проводящего слоя испускаются фотоэлектроны, которые ускоряются электрическим полем и регистрируются катодом трубки. Далее полученный сигнал передается через телевизионный блок связи на приемную трубку, где происходит преобразование электронного изображения в световое. Увеличение рентген-видикона составляет $2-50\times$, разрешающая способность $30-50$ линий/мм.

Недостатком рентген-видикона являются значительная инерционность и низкий динамический диапазон. Малая толщина (не более $0,3$ мм) входного экрана не позволяет применять рентген-видиконы для регистрации фотонов в диапазоне высоких энергий. Существенным недостатком следует считать малую площадь рабочего поля, диаметры входных экранов рентген-видиконов ЛИ-417 и ЛИ-423 составляют 18 и 90 мм соответственно. Для сравнения отметим, что диаметр монокристалла может составлять 230 мм при толщине до 3 мм.

При контроле сварных соединений толщиной до 15 мм интроскопами (ПТУ-38, ПТУ-39, «Дефектоскоп-1», «Дефектоскоп-2» и др.), использующими рентген-видиконы, чувствительность контроля колеблется от 5 до 25% , а производительность $0,3-0,5$ м/мин.

В тех случаях, когда радиоскопический метод контроля по выявляемости дефектов удовлетворяет требованиям технических условий, он может быть введен вместо радиографического метода. Если радиоскопический метод контроля по выявляемости дефектов не удовлетворяет требованиям технических условий, он может быть использован в сочетании с радиографическим и применяться для предварительного контроля.

Многие зарубежные фирмы для контроля швов выпускают интроскопы, в которых в качестве преобразователей излучения использованы указанные выше устройства. Среди них можно отметить интроскопы с флуороскопическими экранами типа «Лимикон» (США), «Маркони» (Англия), «Балтаскоп» (Бельгия), «Филипс» (Голландия) и др. В США выпускаются установки типа «Сечрей» с рентген-видиконами.

Радиометрический метод. Он основан на просвечивании изделий ионизирующим излучением с преобразованием плотности потока или спектрального состава прошедшего излучения в пропорциональный или электрический сигнал. Любая система радиометрического контроля содержит источник излучения, детектор, схему обработки и регистрации информации (рис. 4.29). В качестве источников излучения применяют в основном гамма-изотопы, ускорители и реже рентгеновские аппараты. В качестве детекторов излучения используют в основном сцинтилляционные кристаллы с фотоэлектронными умножителями (ФЭУ), реже ионизационные камеры и газоразрядные счетчики.

В качестве сцинтилляторов используют люминофоры сульфида цинка (ZnS), сульфида кадмия (CdS), активированных серебром, вольфрамата кальция ($CaWO_4$), вольфрамата кадмия ($CdWO_4$), кристаллы иодистого цезия (CsI), иодистого натрия (NaI) и др.

Узкий (коллимированный) пучок ионизирующего излучения (см. рис. 4.29) перемещается по контролируемому объекту, последовательно просвечивая все его участки. Излучение, прошедшее через объект, регистрируется счетчиком, на выходе которого образуется электрический сигнал с величиной пропорциональной интенсивности поступающего излучения. Электрический сигнал, прошедший усилитель, регистрируется устройством, которым может быть самописец, осциллограф, миллиамперметр и т. д. При наличии дефекта в шве регистрирующее устройство отмечает возрастание интенсивности.

Преимущества радиометрии: высокая чувствительность (0,3–3,0%); возможность бесконтактного контроля; сравнительно (с радиографией) высокая производительность. Недостатки: необходимость одновременного и на одинаковом расстоянии по разные стороны от объекта перемещения источника

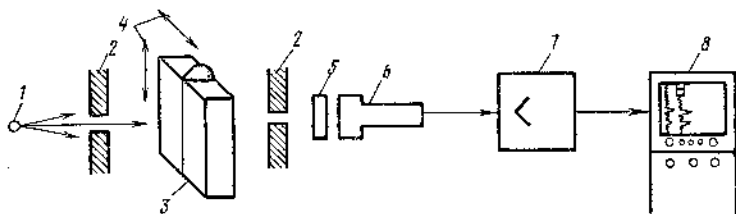


Рис. 4.29. Схема ионизационного метода контроля:

1 — источник излучения, 2 — коллиматоры, 3 — контролируемый предмет, 4 — направления перемещения, 5 — сцинтилляционный кристалл, 6 — фотоэлектронный умножитель, 7 — усилитель, 8 — регистрирующий прибор (самопишущий)

и детектора; невозможность определения формы и глубины дефекта; влияние рассеянного излучения. В промышленности при контроле стальных изделий толщиной от 20 до 100 мм применяют установки РДР-21; от 70 до 200 мм — РДР-25; от 100 до 1000 мм — РД-10Р и др.

Томография. Сущность метода заключается в получении резкого изображения только тех частей объекта, которые находятся в тонком (не более 2 мм) слое на определенной глубине или в нескольких тонких слоях, разделенных интервалами заданной толщины (шагом томографии). Этого добиваются, например (рис. 4.30), синхронным перемещением рентгеновской трубки ($A_1 \rightarrow A_3$) и кассеты с экранами и пленкой ($O_1 \rightarrow O_3$) относительно пространственного центра качения O . В результате получают изображение выделенного слоя MN , расположенного в плоскости, проходящей через центр качения. Это изображение представляет собой геометрическое место точек выделенного слоя, тени которых неподвижны по отношению к пленке. Таким образом, в томографии используется эффект динамической нерезкости изображения. При этом методе синхронное движение источника излучения и пленки относительно объекта позволяет размыть изображения неанализируемых дефектов или слоя, изображения которых в обычно принятом методе радиографии накладываются друг на друга, и более резко выделить изображение требуемого для обнаружения дефекта или слоя. Минимальная толщина выделяемого слоя составляет примерно удвоенную ширину (диаметр в плоскости изображения) дефекта и равна 1,5 мм. Стандартным регистратором изображения служит экранная пленка РМ-1 в сочетании с усиливающим люминесцентным экраном.

В настоящее время широко используют вычислительную томографию. В основе ее лежит принцип получения

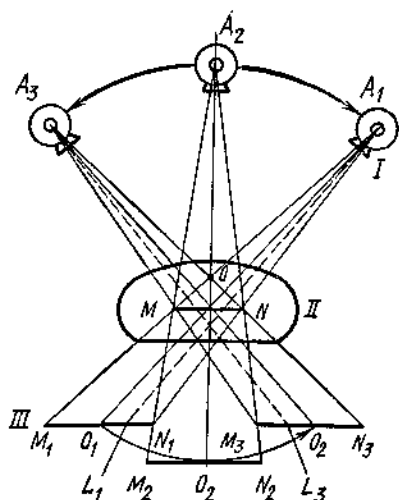


Рис. 4.30. Схема образования томографического изображения:

I — рентгеновская трубка,
 II — объект контроля,
 III — кассета с пленкой

изображения при послойном поперечном сканировании объекта коллимированным пучком излучения, измерении этого излучения за объектом детекторами, анализе и построении по совокупности измерительных данных, относящихся к выбранному слою, полутонового изображения на экране дисплея.

Если сканирование объекта производится пучком веерообразной формы, полностью перекрывающим объект, то система излучатель — детекторы совершает непрерывное вращение вокруг объекта на 360° . Излучение подается импульсами с длительностью 1—5 мкс, измеряется 250—500 детекторами. Информация с детекторов после аналого-цифрового преобразования подается в мини-ЭВМ. Принципиальное отличие вычислительной томографии от обычного теневого метода состоит в том, что результаты исследования представляются в количественной форме; получаемое изображение не имеет полутеней; благодаря высокой точности измерений объем информации, содержащейся в томограмме, при прочих равных условиях примерно в 100 раз больше, чем в обычной рентгенограмме. Существенным преимуществом томографии является высокое разрешение по плотности до 0,2%. Для радиографии этот показатель равен 10—20%.

Контрольные вопросы

1. Объясните процесс получения рентгеновского и гамма-излучений.
2. Опишите причины рассеяния ионизирующего излучения.
3. На чем основано выявление дефектов при просвечивании?
4. Какие факторы влияют на чувствительность при радиографии?
5. Какое принципиальное отличие импульсных аппаратов от аппаратов с нагретым катодом?
6. Назовите типы рентгеновских пленок и их основные характеристики.
7. Каково назначение экранов и на чем основан принцип усиления?
8. Какие эталоны используются при просвечивании?
9. В чем преимущества и недостатки ксерографии и флуорографии?
10. Назовите основные схемы радиоскопического контроля.
11. Объясните принцип томографии.

5. УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ДЕФЕКТОСКОПИЯ

5.1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

Распространение ультразвуковых волн. Ультразвуковыми колебаниями называют механические колебания упругой среды, частота которых лежит за порогом слышимости человеческого уха, т. е. больше 20 000 Гц (20 кГц). Для ультразвукового контроля применяют колебания частотой 0,5—10 МГц.

В качестве излучателей и приемников ультразвука используют пьезопластины из пьезоэлектрической керамики или пьезокварца. Излучатели и приемники ультразвуковых волн называют пьезопреобразователями. При подаче на пьезопластину электрического напряжения она изменяет свою толщину вследствие так называемого обратного пьезоэлектрического эффекта. Если напряжение знакопеременно, то пластина колеблется в такт с этими изменениями, создавая в окружающей среде упругие колебания. При этом пластина работает как излучатель (рис. 5.1, а). И, наоборот, если пьезоэлектрическая пластина воспримет импульс давления (отраженная ультразвуковая волна), то на ее обкладках вследствие прямого пьезоэлектрического эффекта появятся электрические заряды, величина которых может быть измерена. В этом случае пьезопластина работает как приемник (рис. 5.1, б). Для приложения и съема электрического поля на противоположных поверхностях пьезопластины нанесены серебряные электроды.

Процесс распространения ультразвука в пространстве является волновым. Граница, отделяющая колеблющиеся частицы среды от частиц, еще не начавших колебаться, носит название ф р о н т а в о л н ы. Упругие волны характеризуются скоростью распространения C , длиной волны λ и частотой f . При этом под длиной волны понимается расстояние между ближайшими частицами, колеблющимися одинаковым образом (в одинаковой фазе). Число волн, проходящих через данную точку

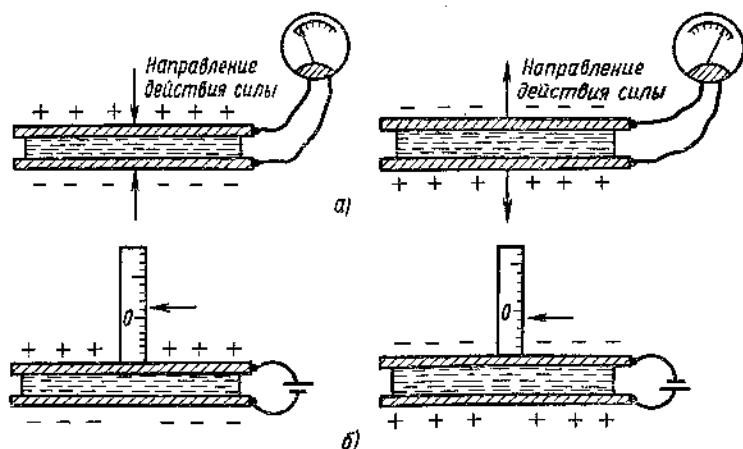


Рис. 5.1. Схема работы пьезопластины при излучении (а) и приеме (б) ультразвука

пространства в каждую секунду, определяет частоту ультразвука. Длина волны связана со скоростью ее распространения и частотой колебания соотношением $\lambda = c/f$.

В зависимости от направления колебания частиц различают несколько типов волн. Если частицы среды колеблются вдоль направления распространения волны, то такие волны (рис. 5.2, а) называются *продольными* (волнами растяжения—сжатия). Если частицы среды колеблются перпендикулярно направлению распространения волны, то такие волны (рис. 5.2, б) называют *поперечными* (волнами сдвига). Поперечные волны могут возникать лишь в среде, обладающей сопротивлением сдвига. Поэтому в жидкой и газообразной средах образуются только продольные волны. В твердой среде могут возникать как продольные, так и поперечные волны. Скорость поперечной волны C_t в металлах составляет примерно 0,55 скорости продольной волны C_p .

Вдоль свободной поверхности твердого тела могут распространяться *поверхностные волны* (волны Релея). Они являются комбинацией поперечных и продольных волн. Плоскость поляризации, т. е. плоскость, в которой колеблются частицы среды, у них перпендикулярна поверхности. Глубина распространения этих волн в теле примерно равна длине волны, а скорость составляет $0,9C_p$ (рис. 5.2, в, табл. 5.1). В плакирующих слоях биметаллов, толщина которых соизмерима с длиной волны, распространяются *нормальные волны*.

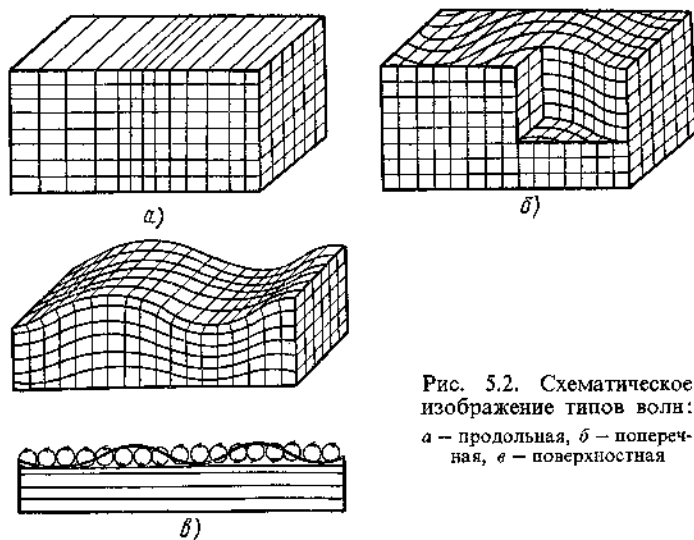


Рис. 5.2. Схематическое изображение типов волн:
а — продольная, б — поперечная, в — поверхностная

5.1. Скорость распространения ультразвуковых волн в различных средах

Среда распространения	Скорость распространения волн, м/с		
	продольных	поперечных	поверхностных
Воздух	335	—	—
Масло трансформаторное	1400	—	—
Стекло органическое	2670	1300	1050
Вода	1490	—	—
Сталь (Ст3)	5860	3230	3000
Титан	6000	3500	2790
Алюминий	6205	3080	2800

ны, или, как их еще называют, волны Лэмба. Они заполняют всю толщину пластины. В плакирующих слоях биметаллических листов могут распространяться поверхностные волны с горизонтальной поляризацией (волны Лява).

Рассмотрим процесс прохождения короткого (зондирующего) импульса ультразвуковых колебаний в среде. Пьезоэлемент в виде круглого диска диаметром $2a$ (см. рис. 5.4) служит одновременно излучателем и приемником ультразвука. При излучении пьезоэлементом импульса ультразвуковых колебаний (УЗК) в среде возникает ультразвуковое поле излучения, которое имеет вполне определенные пространственные границы и распределение звукового давления внутри пучка.

Вблизи от излучателя на участке, называемом ближней зоной (рис. 5.3), ультразвуковой пучок почти не расходится и имеет цилиндрическую форму. Протяженность r_0 этой зоны равна $r_0 = a^2/\lambda = (a^2 f)/C$. В дальней зоне начинается постепенное расхождение ультразвуковой волны и пучок приобретает форму усеченного конуса (см. рис. 5.3).

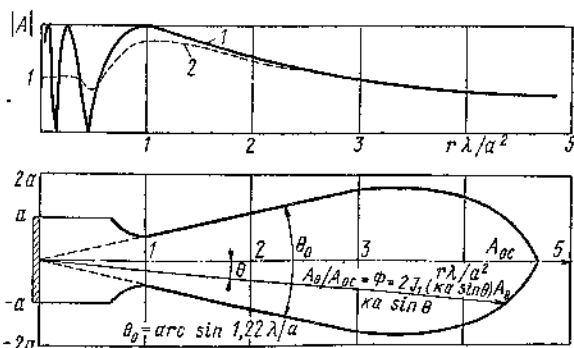


Рис. 5.3. Структура ультразвукового поля излучателя

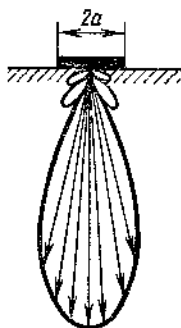


Рис. 5.4. Диаграмма направленности ультразвукового поля

Распределение энергии в поперечном сечении этого конуса неравномерно: максимальная интенсивность излучения сосредоточена по оси пучка, а минимальная — на периферии конуса. Распределение интенсивности излучения в дальней зоне, представленное в виде графика в полярных координатах, называют диаграммой направленности (рис. 5.4). Диаграмма направленности ультразвукового поля тем острее, чем больше произведение радиуса излучателя a на частоту f излучаемых колебаний.

При распространении ультразвуковых волн от источника интенсивность излучения падает. Это обусловлено не только расхождением пучка по конусу, но и затуханием. По оси пучка затухание ультразвуковых колебаний происходит по экспоненциальному закону $A = A_0 e^{-\delta x}$, где A — амплитуда ультразвука на расстоянии от излучателя, A_0 — амплитуда зондирующего импульса, δ — коэффициент затухания, e — основание натуральных логарифмов.

Коэффициент затухания в металлах в основном зависит от соотношения между средней величиной зерна \bar{D} и длиной волны ультразвука λ . Если $\lambda > 10\bar{D}$, то затухание мало и можно контролировать изделия толщиной до 10 мм. Если зерно металла имеет соизмеримые или большие размеры, чем длина волны λ , то ультразвуковой контроль осуществлять весьма затруднительно или даже невозможно из-за значительного затухания ультразвука. По этой причине затруднительно или даже нельзя проконтролировать, например, сварные швы литых деталей, швы, выполненные электрошлаковой сваркой без термообработки, и швы аустенитных (нержавеющих) сталей.

Важной характеристикой среды, в которой распространяются ультразвуковые колебания, является ее акустическое сопротивление $z = \rho C$, где ρ — плотность среды, C — скорость распространения ультразвука в данной среде. При прохождении ультразвука из одной среды в другую происходит отражение части энергии волны от границы раздела сред. Коэффициенты отражения R и прохождения D ультразвука зависят от соотношения акустических сопротивлений двух сред. Чем больше разница акустических сопротивлений z_1 и z_2 , тем больше коэффициент отражения ультразвука R . Поэтому, чтобы увеличить коэффициент прохождения ультразвука, на поверхность контролируемого изделия наносят контактную жидкость

(воду, масло, глицерин и др.), акустическое сопротивление которой значительно больше акустического сопротивления контролируемого металла и материала призмы пьезопреобразователя. При наличии воздушного зазора между преобразователем и поверхностью изделия ультразвук в металл практически не входит.

Если размеры площадки раздела двух сред (например, дефекта) меньше поперечных размеров пучка и соизмеримы с длиной волны, то возникает дифракция (явление огибания волной препятствия), в результате чего доля отраженной дефектом энергии уменьшается. Наличие дифракции ультразвуковых волн приводит к тому, что округлые дефекты небольших размеров (поры) выявляются плохо.

При наклонном прохождении (под углом β) продольной волны из одной твердой среды *I* в другую твердую среду *II* на границе раздела происходит отражение, преломление и трансформация (расщепление волны). В общем случае (рис. 5.5, а) возникает четыре волны: две преломленные (продольная C'_l и поперечная C'_t) и две отраженные (продольная C_l и поперечная C_t). Углы отражения и преломления волн связаны с углом падения выражением Снеллиуса; $\sin \beta / C_l = \sin \beta_t / C_t = \sin \beta_l / C_l = \sin \alpha_l / C'_l = \sin \alpha_t / C'_t$, где C_l, C_t — скорости распространения продольной и поперечной волн в первой среде, C'_l, C'_t — скорости распространения продольной и поперечной волн.

Углы, при которых исчезают те или иные типы волн в процессе преломления или отражения ультразвука, называют критическими (рис. 5.5, б, в). По мере увеличения угла

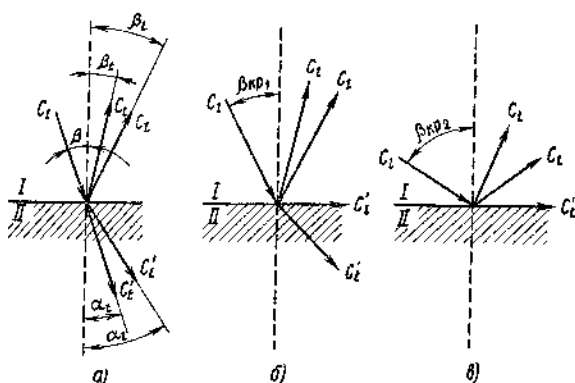


Рис. 5.5. Отражение и преломление продольной волны на границе раздела двух твердых фаз

падения β начиная с некоторого значения $\beta_{кр1}$, называемого первым критическим углом, исчезает преломленная продольная волна $C_l(\alpha_l = 90^\circ)$. При дальнейшем увеличении угла β наступает момент, когда исчезает поперечная волна $C_t(\alpha_t = 90^\circ)$. Это явление соответствует второму критическому углу $\beta_{кр2}$.

При углах падения меньших, чем второй критический угол, и больших, чем первый, во второй среде возникает лишь поперечная волна. Для системы оргстекло — сталь расчетные критические углы равны соответственно 27 и 56°. Отмеченное свойство имеет большое практическое значение. В частности, если разместить излучатель на призме из оргстекла и выбрать угол β в пределах 30—55°, то в стальном изделии будет распространяться только одна поперечная волна, что существенно упрощает дешифровку результатов контроля.

Методы ультразвукового контроля. Ультразвуковая дефектоскопия (УЗД) основана на свойстве ультразвуковых волн направленно распространяться в средах и отражаться от границ сред или нарушений сплошности (дефектов), обладающих другим акустическим сопротивлением. В практике контроля качества сварных соединений используют в основном эхо-импульсный метод (или метод эхо-локации). Он заключается в озвучивании изделия короткими импульсами 1 ультразвука и регистрации эхо-сигналов 3, отраженных от дефекта к приемнику. Признаком дефекта является появление эхо-сигнала (импульса) 3 на экране дефектоскопа (рис. 5.6, а).

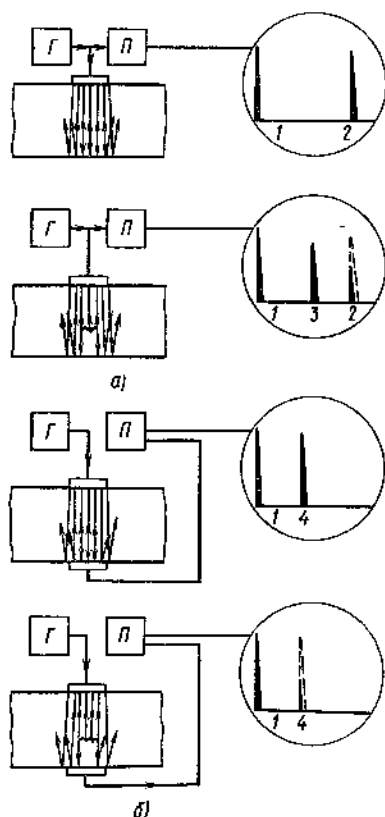


Рис. 5.6. Схема ультразвукового контроля эхо-импульсным (а) и теньвым (б) методами:

Γ — генератор зондирующих импульсов, Π — приемник

В некоторых случаях ультразвуковой контроль целесообразно осуществлять теньевым (рис. 5.6, б) или зеркально-теньевым методом. При теньевом методе признаком дефекта является уменьшение амплитуды сигнала 4, прошедшего от излучателя к приемнику. Теньевой метод позволяет использовать не импульсное, а непрерывное излучение. Признаком дефекта при зеркально-теньевом методе является уменьшение амплитуды сигнала 2 (см. рис. 5.6, а), отраженного от противоположной (донной) поверхности изделия.

К основным преимуществам ультразвуковой дефектоскопии относятся высокая чувствительность, мобильность аппаратуры, оперативность в получении результатов, низкая стоимость контроля, отсутствие радиационной опасности. Метод широко распространен в промышленности для выявления дефектов: трещин, непроваров, шлаковых и других включений в сварных швах толщиной от 1,0 до 2800 мм. Например, в энергомашиностроении, судостроении, химическом машиностроении и других отраслях промышленности ультразвуковая дефектоскопия является основным методом неразрушающего контроля ответственных швов как при их изготовлении, так и в процессе эксплуатации.

5.2. АППАРАТУРА

Аппаратура для ультразвукового контроля состоит из пьезопреобразователя, содержащего пьезоэлемент для излучения и приема ультразвуковых колебаний, электронного блока (собственно дефектоскопа) и различных вспомогательных устройств.

Преобразователи. Их делят на три основных типа (рис. 5.7): прямые (а), излучающие в изделие продольную волну перпендикулярно контактной поверхности (поверхности ввода УЗК), наклонные (б), которые вводят в металл поперечную волну под углом к поверхности ввода, и раздельно-совмещенные (в), обеспечивающие ввод в металл продольной волны под углом $5-10^\circ$ к плоскости, перпендикулярной поверхности ввода. Основным элементом пьезопреобразователя является пьезоэлемент в виде диска или прямоугольной пластины толщиной, равной половине длины волны излучаемых ультразвуковых колебаний.

С рабочей стороны прямых преобразователей на пьезопластине 3 имеется защитное донышко 4 (протектор), предохраняющее пьезопластину от механических повреждений. С противоположной стороны к пьезопластине 3 приклеен демпфер 2 из материала с большим поглощением ультразвука. Демпфер уменьшает длительность колебания пьезопластины, т. е. спо-

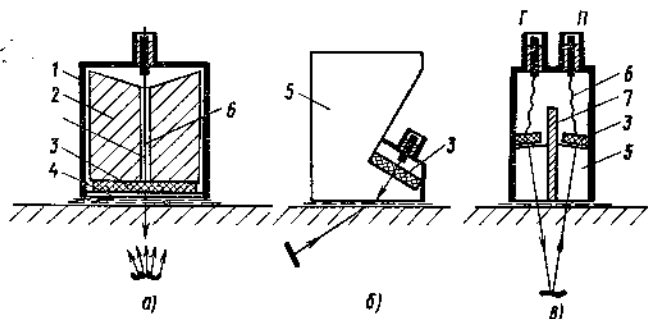


Рис. 5.7. Ультразвуковые преобразователи:

а — прямой, б — наклонный (призматический), в — раздельно-совмещенный (РС); 1 — корпус, 2 — демпфер, 3 — пьезопластина, 4 — защитное доньшко (протектор), 5 — призма, 6 — токоподвод, 7 — акустический экран

способствует получению коротких зондирующих импульсов. Прямой преобразователь размещен в стальном корпусе 1.

В наклонных и РС-преобразователях пьезопластина 3 приклеена к призмам 5 из оргстекла, полистирола, поликарбоната, капролона и других материалов. В этих материалах ультразвук распространяется с небольшой скоростью, что позволяет при относительно малых углах падения вводить поперечные волны в контролируемый металл под большими углами (до 90°). Высокое затухание ультразвука в призме обеспечивает быстрое гашение ультразвуковых колебаний, отраженных от границы с контролируемым металлом.

Прямые и наклонные преобразователи работают в основном по совмещенной схеме, т. е. один и тот же пьезоэлемент является излучателем и приемником ультразвуковых колебаний.

В РС-преобразователях одна пьезопластина подключена к генератору электрических колебаний и служит излучателем УЗК, а другая к приемнику. Между ними размещен акустический экран 7.

В зависимости от толщины слоя контактной жидкости между протектором 4 и изделием преобразователи делят на контактные, у которых слой жидкости значительно меньше длины волны ультразвука; щелевые, у которых толщина слоя соизмерима с длиной волны; иммерсионные, у которых контактный слой значителен по толщине. Выбор типа преобразователя по способу создания акустического контакта зависит от качества поверхности контролируемого изделия. Например, для контроля изделий с грубой поверхностью (например, после пескоструйной обработки) целесообразно использовать щелевой преобразователь.

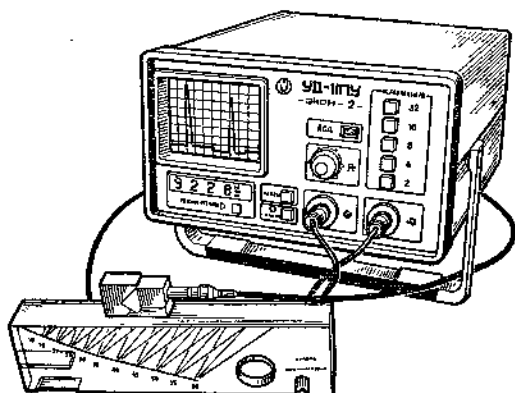


Рис. 5.8. Общий вид дефектоскопа УД-11ПУ

Эффективны также преобразователи, в которых протектор выполнен из эластичного материала, например полиуретана, или в виде гидравлической подушки с резиновой оболочкой (иммерсионной локальной ванны), которая обеспечивает надежный акустический контакт.

Электронный блок. Он предназначен для генерирования зондирующих импульсов высокочастотного напряжения, для усиления и преобразования эхо-сигналов, отраженных от дефекта, и наглядного отображения амплитудно-временных характеристик эхо-сигналов на экране электронно-лучевой трубки (ЭЛТ).

Для контроля сварных швов применяют отечественные дефектоскопы УД-11ПУ, УД-10П и др. Дефектоскоп УД-11ПУ (рис. 5.8) работает следующим образом. От синхронизатора тактовые импульсы поступают на генератор зондирующих импульсов и запускают его. При подаче запускающего импульса в контуре, состоящем из индуктивности, емкости, пьезопластин и накопительного конденсатора, возникают кратковременные свободные радиочастотные колебания (зондирующие импульсы). Зондирующие импульсы возбуждают в пьезопластине ультразвуковые колебания соответствующей частоты. Одновременно тактовые импульсы с синхронизатора подаются также и на генератор развертки электронно-лучевой трубки. Для прозвучивания металла различной толщины (до 5000 мм — сталь) скорость развертки может регулироваться.

Отраженные от дефекта импульсы упругих колебаний попадают на пьезопластину и преобразовываются в ней в электрические сигналы. Эти сигналы усиливаются в усилителе, а затем подаются на экран электронно-лучевой трубки (ЭЛТ).

Горизонтальная развертка ЭЛТ является временной. Расстояние по развертке от зондирующего импульса до принятого сигнала пропорционально времени прохождения импульса от пьезопластины до дефекта и обратно. Таким образом, зная скорость ультразвука и направление хода — потока излучения, можно определить координаты дефектов или толщину изделия измерением этого времени с помощью подвижной П-образной метки глубиномера, называемой строб-импульсом. Погрешность измерения координат не превышает 2 мм.

Отклонение луча на ЭЛТ в вертикальном направлении (высота импульсов) характеризует амплитуду принятого сигнала и пропорционально величине дефекта. Для измерения амплитуды в дефектоскопах имеются специальные градуированные приборы — аттенуаторы.

Вспомогательные устройства. В дефектоскопе предусмотрен специальный переключатель, с помощью которого усилитель может быть непосредственно подключен к генератору радиоимпульсов (при работе по совмещенной схеме, когда преобразователь выполняет функции и излучателя, и приемника УЗК) или отключен от него (раздельная схема). В дефектоскопе имеется также автоматический сигнализатор дефектов (АСД), предназначенный для звуковой или световой сигнализации дефектов. Сигнализатор срабатывает, если сигнал попадает в строб-импульс. В зависимости от задач контроля ширина строб-импульса может регулироваться в больших пределах.

Некоторые дефектоскопы содержат дополнительные блоки, существенно упрощающие труд оператора и расширяющие возможности ультразвукового контроля. Например, блок временной регулировки чувствительности (ВРЧ) обеспечивает получение одинаковой амплитуды эхо-сигнала от равных дефектов, залегающих на различной глубине. ВРЧ позволяет существенно повысить достоверность обнаружения дефектов и точность их измерения.

Для ускорения отсчетов и повышения их точности процесс измерения величины и координат дефектов автоматизируют. В ЦНИИТмаш разработан дефектоскоп УДЦ-105М, который обеспечивает не только автоматическое измерение амплитуды эхо-сигнала и отображение ее на цифровом табло, но и запоминание измеренной величины на любое время (рис. 5.9). Полная автоматизация измерений достигнута в дефектоскопе УДЦ-100, конструкции ЦНИИТмаш. Он обеспечивает автоматическое измерение, запоминание и отображение на цифровом табло эквивалентной площади дефектов и координат их залегания. Кроме того, дефектоскоп снабжен блоками автоматического слежения строб-импульса за эхо-сигналом, автомати-

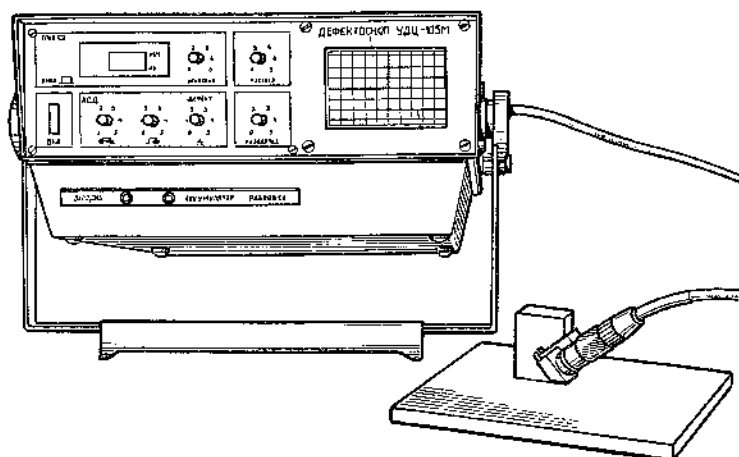


Рис. 5.9. Ультразвуковой дефектоскоп УДЦ-105М

ческого перехода на нужный диапазон усиления в зависимости от амплитуды эхо-сигнала и др.

В настоящее время применяют микропроцессорные дефектоскопы, позволяющие производить многопараметровую обработку отраженного сигнала, что повышает информативность контроля.

К вспомогательным приспособлениям дефектоскопов относятся координатные линейки и шаблоны различных конструкций, упрощающие определение координат дефектов при прямолинейных и криволинейных поверхностях изделия, планшеты (АРД-диаграммы) для определения размеров дефектов по амплитуде эхо-сигнала, ограничители перемещения искателей, необходимые для контроля угловых сварных швов, и др.

5.3. ТЕХНОЛОГИЯ КОНТРОЛЯ

Измерение величины и оценка характера дефектов. На практике для оценки величины и характера выявленного дефекта используют только такие его информативные признаки, которые легко измеряются в любых условиях, любым оператором и выражаются в простой числовой форме. Для оценки качества швов обычно используются следующие измеряемые характеристики дефектов:

1. Амплитуда эхо-сигнала, которая пропорциональна проекции отражающей поверхности дефекта на плоскость, перпендикулярную оси ультразвукового пучка.

2. Условная протяженность, определяемая длиной зоны перемещения преобразователя вдоль шва, в пределах которой фиксируется эхо-сигнал от выявленного дефекта.

3. Условная высота, равная разности глубин залегания дефектов, которые измеряют в крайних положениях наклонного преобразователя при перемещении его перпендикулярно оси шва. Крайними положениями наклонного преобразователя являются положения, соответствующие появлению и исчезновению эхо-сигнала от дефекта на развертке дефектоскопа.

4. Количество дефектов на единицу длины шва.

5. Координаты дефекта по сечению и длине шва.

Для оценки характера дефекта используют дополнительные информативные признаки, рассматриваемые ниже. Местоположение дефекта в сварном шве определяют три координаты: H — глубина залегания дефекта, отсчитываемая по нормали к поверхности, X — расстояние от центра излучения искателя до дефекта вдоль поверхности изделия, L — расстояние вдоль оси шва от дефекта до какой-либо выбранной точки отсчета.

Глубиномерное устройство дефектоскопа измеряет временной интервал T между зондирующим импульсом и эхо-сигналом от дефекта. Так как скорости распространения ультразвуковых колебаний в металле и призме и углы ввода ультразвука обычно известны, то по T можно определить H и X .

Измерение амплитуды эхо-сигнала в ультразвуковой дефектоскопии производят методом, который заключается в сравнении эхо-сигнала от дефекта с каким-либо опорным сигналом, полученным тем же преобразователем от отражателя известной величины и геометрической формы. Если было бы заранее известно, какого характера дефект обнаружен, то наиболее правильно было бы сравнить эхо-сигнал от дефекта с сигналом от искусственного отражателя, форма которого наиболее близка к форме дефекта. Но чаще всего невозможно достаточно уверенно распознать тип дефекта. Кроме того, размер дефекта должен выражаться через какую-то стандартизированную величину, воспроизводимую при любых измерениях. Поэтому в целях унификации измерения амплитуды эхо-сигнала введено понятие эквивалентная площадь дефекта (или эквивалентный диаметр).

Эквивалентную площадь S_d дефекта измеряют площадью искусственного отражателя (дна плоскодонного отверстия), расположенного на той же глубине, что и дефект, и дающего эхо-сигнал такой же амплитуды. Аналогично определяют эквивалентный диаметр. Общепринято, что при измерении эквивалентного размера дефекта по совмещенной схеме наклонным

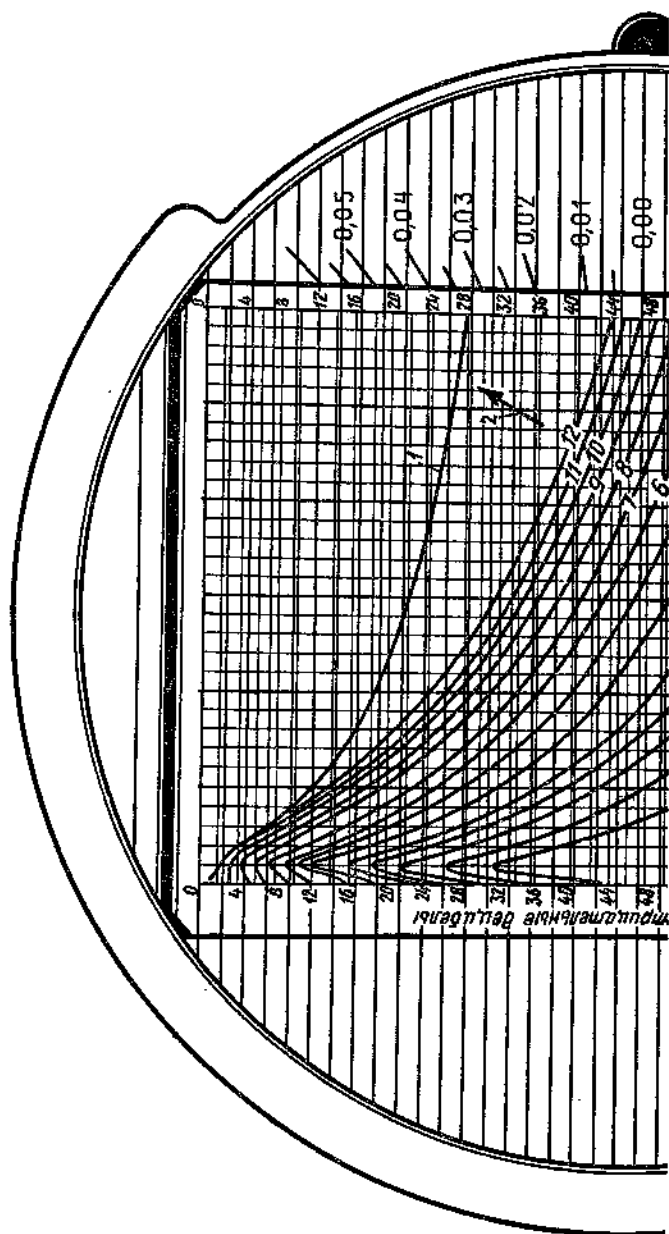
преобразователем ось плоскодонного отверстия соосна акустической оси пучка, при измерении РС-искателями ось отверстия перпендикулярна поверхности.

Существуют два способа измерения эквивалентного размера дефектов: с помощью тест-образцов и по АРД-диаграммам. Первый способ состоит в том, что эхо-сигнал от дефекта последовательно сравнивается с сигналом от плоскодонных отверстий различной величины, изготовленных в тест-образце на той глубине, что и дефект. Тест-образец представляет собой копию контролируемого изделия. Все операции по измерению эквивалентного размера дефектов сводятся к тому, что необходимо найти отверстие, от которого фиксируется эхо-сигнал, равный эхо-сигналу от дефекта.

К основным преимуществам способа относятся его простота и доступность. Однако недостатком способа является необходимость изготовления большого числа образцов с широким набором плоскодонных отражателей по диаметру и глубине расположения. Кроме того, необходимо, чтобы качество поверхности и акустические свойства тест-образца полностью соответствовали контролируемому изделию.

Другой способ измерения эквивалентного размера разработан И. Н. Ермоловым и И. Крауткремером и базируется на использовании специальных АРД-диаграмм, полученных экспериментально или на основе расчетов. Они графически связывают между собой для данного преобразователя амплитуду эхо-сигнала, эквивалентный размер плоскодонного отражателя и расстояние до него (рис. 5.10). По оси ординат АРД-диаграммы отложена относительная амплитуда эхо-сигнала в отрицательных децибелах, а по оси абсцисс — глубина залегания дефектов. Выбор угла наклона координатной сетки определяется величиной затухания ультразвука в изделии. АРД-диаграмма является хорошо отработанным и универсальным инструментом, с помощью которого могут решаться все практические задачи измерения эквивалентных размеров и настройки чувствительности. Для удобства практического использования в настоящее время разработаны и применяются АРД-линейки различной конструкции.

Приближенную оценку размеров реальных дефектов можно выполнить с помощью экспериментально установленного коэффициента выявляемости K_v , под которым понимается отношение эквивалентной площади дефекта S_s к его истинной площади S_d , определенной путем вскрытия $K_v = S_s/S_d$. Например, для расслоений в прокате $K_v = 0,70 \rightarrow 0,85$. В сварных швах оценить истинный размер дефекта очень трудно, так как многообразие дефектов сварных швов по характеру, ориентации



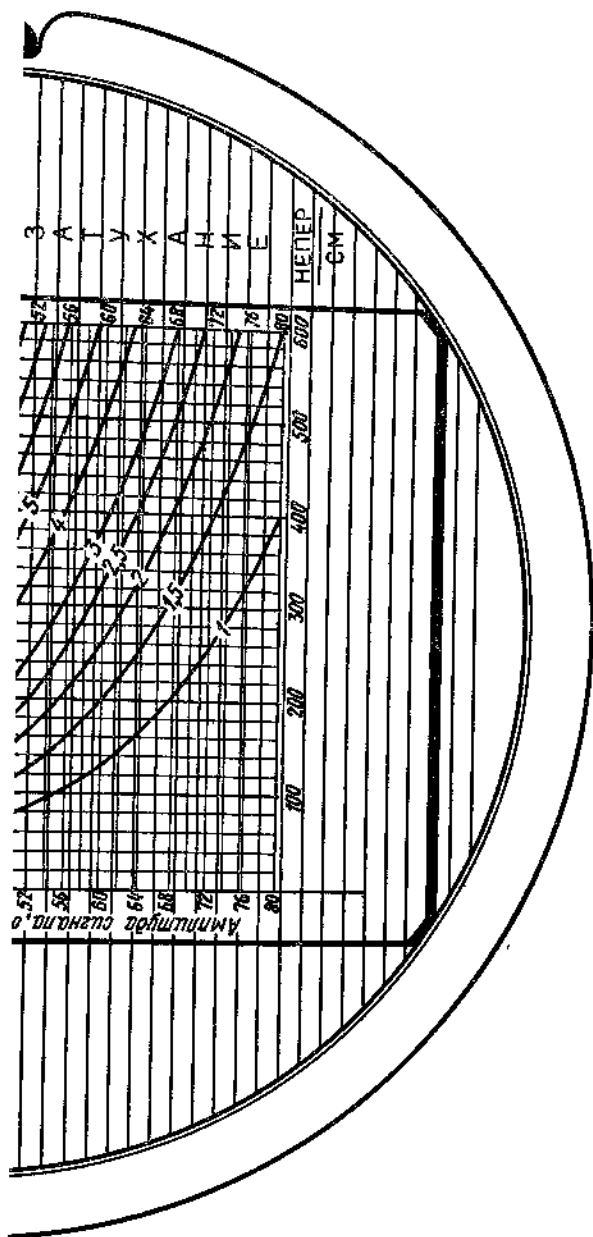


Рис. 5.10. Планшет с АРД-диаграммой для наклонного пьезогласового искателя ($\alpha = 40^\circ$, диаметр пьезопластины 12 мм, $f = 2,5$ МГц):

1 — донный сигнал, 2 — диаметр дефекта

и местоположению приводят к тому, что K_n для них имеет большой разброс: от 0,5 до 1,5.

В практике ультразвукового контроля распространен также способ оценки величины дефектов измерением их условных размеров на поверхности изделия. Сущность этого метода состоит в том, что при перемещении преобразователя вдоль дефекта на поверхности изделия производят замер расстояния между его положениями, в которых при заданном уровне чувствительности дефектоскопа эхо-импульс от дефекта исчезает с экрана.

Схема измерения условных протяженности ΔL и высоты ΔH дефекта наклонным преобразователем изображена на рис. 5.11. Как видно из рисунка, условные размеры превышают действительные размеры дефекта за счет того, что ультразвуковой пучок имеет значительную ширину, увеличивающуюся с расстоянием, поэтому, например, один и тот же дефект при прозвучивании с разных поверхностей контролируемого изделия

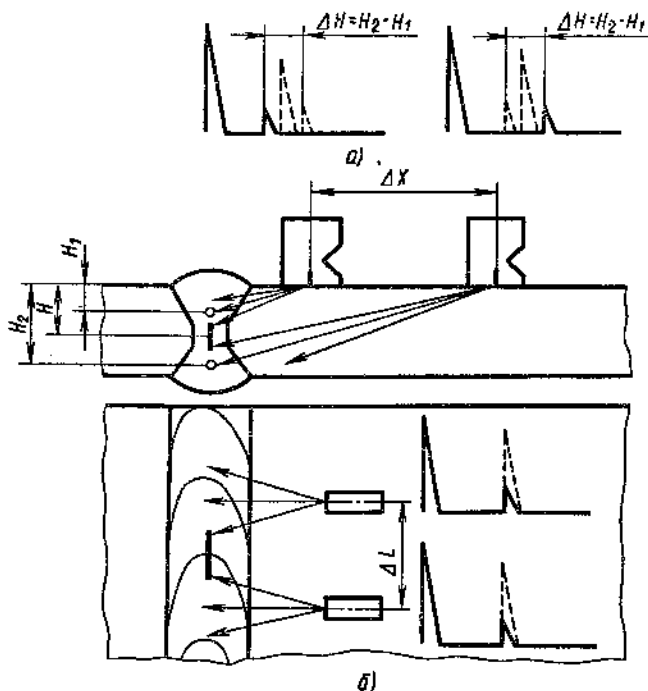


Рис. 5.11. Схемы измерения условной высоты (а) и условной протяженности (б) дефекта

может иметь различное значение ΔL в зависимости от его расположения по сечению шва.

Необходимо отметить, что определение условной высоты небольших по сравнению с пьезоэлементом дефектов связано с большими измерительными погрешностями и практически не дает новой информации о величине дефекта. Однако условную высоту всегда целесообразно измерять дополнительно к амплитуде, чтобы не пропустить какой-либо крупный плоскостной дефект (трещину) со слабой отражательной способностью.

В настоящее время для точной оценки размеров трещин применяют временные методы. Для измерения трещин, находящихся в сечении шва, преобразователи устанавливают с обеих его сторон и дополнительно измеряют разность прихода сигналов, дифрагированных на концах трещины, к каждому преобразователю. Такой метод позволяет также определить наклон трещины в вертикальной плоскости. Но он очень трудоемок и требует высокой квалификации операторов. Глубину трещин, выходящих на поверхность, оценивают по времени прихода поверхностной волны от излучателя к приемнику. Этот метод основан на том, что поверхностная волна может распространяться по берегам трещины и степень ее запаздывания на выбранной базе между преобразователями характеризует глубину трещины.

Проведение контроля на произвольном уровне чувствительности дефектоскопа может привести к регистрации эхосигналов от мелких неопасных дефектов или структурных неоднородностей или к пропуску опасных дефектов. Поэтому обнаружение дефектов должно производиться на строго определенном уровне чувствительности. Чтобы установить заданный уровень предельной (или контрольной) чувствительности дефектоскопа, его настраивают по образцу, представляющему собой копию сварного шва, в котором выполнено плоскостное отверстие или другой отражатель. Эквивалентная площадь отражателя регламентируется соответствующим нормативным документом. Выбор типа отражателя определяется его отражательными свойствами, технологичностью и воспроизводимостью изготовления.

На практике используют следующие виды эталонных отражателей (ГОСТ 14782-76): плоскостное отверстие (а), боковой цилиндрический (б), угловой (в) и сегментный (г) (рис. 5.12). Эти отражатели относительно легко изготавливаются в образцах, имеют простую геометрическую форму и, что самое главное, величина эхо-сигнала от отражателей пропорциональна их площади.

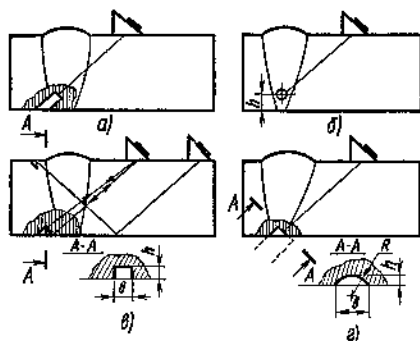


Рис. 5.12. Эталонные отражатели:

а — плоскостное отверстие,
б — боковой цилиндрический, в — угловой, г — сегментный

По своей форме дефекты сварных швов могут быть разделены на два типа: объемные с округлыми краями и плоскостные с острыми краями, на которых возникает концентрация больших напряжений. Последние дефекты неизмеримо более опасны при эксплуатации изделий, чем объемные. Поэтому от любого метода дефектоскопии требуется распознать тип дефекта.

При ультразвуковом контроле это можно сделать, если проанализировать совокупность нескольких информативных признаков, основанных на том, что плоскостные дефекты отражают ультразвук направленно, т. е. преимущественно в каком-то одном направлении, а объемные — приблизительно равномерно по всем направлениям.

Наиболее достоверные результаты в определении типа дефектов достигнуты при измерении коэффициента формы дефекта K_Φ (метод предложен В. Г. Щербинским и В. Е. Белым). K_Φ определяют как отношение амплитуд сигналов $K_\Phi = A_0/A_2$, где A_0 — амплитуда сигнала, отраженного от дефекта обратно к преобразователю, A_2 — амплитуда сигнала, испытавшего двойное зеркальное отражение от дефекта и внутренней поверхности изделия ко второму преобразователю, включенному по схеме «тандем» (рис. 5.13). Установлено, что с вероятностью 0,95 у плоскостных дефектов (трещин, непроваров) $K_\Phi < 1$, а у объемных (поры, включения) $K_\Phi > 1$. В сварных швах небольшой толщины K_Φ измеряют при расположении преобразователей друг к другу под углом к горизонтальной плоскости.

Часто применяемым информативным признаком является также ширина индикатрисы обратного рассеяния, измеренная на поверхности изделия. Плоскостные дефекты в силу направленных отражательных свойств дают узкую индикатрису (менее 30°), а объемные — широкую.

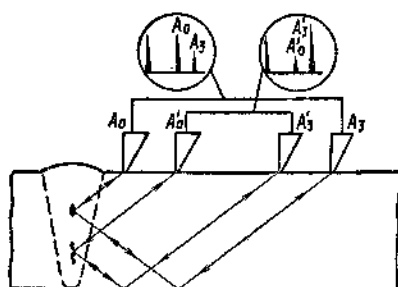


Рис. 5.13. Определение типа дефекта по коэффициенту формы при прозвучивании по схеме «тандем»

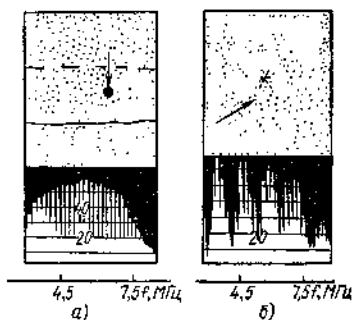


Рис. 5.14. Амплитудные спектры ультразвуковых волн, отраженных от объемных (а) и плоскостных (б) дефектов

Имеются и другие количественные признаки типа дефекта: скорость изменения амплитуды на краю дефекта, соотношение между условной высотой и условной шириной, условной высотой и условной протяженностью и др.

Перспективным методом определения типа дефекта является ультразвуковая спектрометрия, основанная на исследовании спектра эхо-сигналов, отраженных от дефектов различного типа при варьировании частоты ультразвуковых колебаний зондирующего импульса.

Принятые при таком прозвучивании эхо-сигналы обрабатываются и изображаются на экране спектрального анализатора в виде отдельных импульсов, высота которых пропорциональна амплитуде эхо-сигнала, а положение на развертке — частоте. У объемных дефектов спектр имеет монотонный характер, а у плоскостных — гребенчатый с периодически следующими максимумами и минимумами (рис. 5.14).

Способ прозвучивания. Используемая для ультразвукового контроля методика должна обеспечивать выявление всех недопустимых дефектов во всем сечении шва и околошовной зоне. Поэтому выбор типа преобразователя, параметров и схемы контроля при ультразвуковой дефектоскопии сварных швов должен исходить из конструкции соединения и базироваться на основе вероятностно-статистических характеристик распределения дефектов по сечению, ориентации их относительно главных осей шва и типа дефектов. В свою очередь, эти характеристики определяются типоразмером сварного шва и технологией сварки.

Так, анализ распределения дефектов, встречающихся в раз-

личных зонах по сечению шва, позволяет выделить те зоны, которые нуждаются в наиболее тщательном контроле. Кроме того, подобный анализ позволяет сделать рекомендации по изменению конструкции изделия с целью повышения дефектоскопичности, т. е. обеспечения возможности прозвучивания всего металла шва. Такой подход — от изучения характеристик реальных дефектов к разработке методики контроля — является наиболее правильным и обеспечивает высокую достоверность результатов контроля.

Для контроля сварных швов применяют в основном прозвучивание прямым лучом, прямым и однократно отраженным лучом, многократно отраженным лучом, по слоям (все по совмещенной схеме включения в дефектоскоп), эхо-зеркальным методом, зеркально-теневым и теневым методами.

При прозвучивании прямым лучом (рис. 5.15, а) преобразователь перемещают в околосшовной зоне между валиком усиления шва и точкой, расположенной от шва на расстоянии $X_2 = \delta \operatorname{tg} \alpha + l/2$, где δ и l — соответственно толщина и ширина шва. Способ наиболее помехоустойчив, т. е. при его применении наблюдается минимум ложных эхо-сигналов от ка-

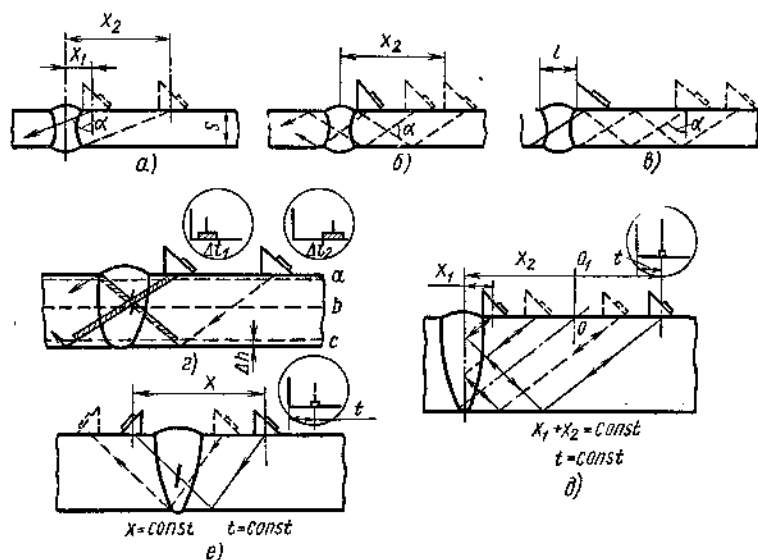


Рис. 5.15. Схемы прозвучивания стыковых сварных швов:

а — прямым лучом, б — прямым и однократно отраженным лучом, в — многократно отраженным лучом, г — по слоям, д — эхо-зеркальным методом «тандем», е — зеркально-теневым методом

ких-либо элементов конструкции в зоне соединения (приварных косынок или штуцеров, различных выфрезеровок, валика усиления и др.). Недостатком способа является наличие «мертвой зоны», вызванной тем, что преобразователь упирается в валик усиления шва.

Для уменьшения «мертвой зоны» верхнюю часть шва целесообразно прозвучивать преобразователями с большими углами ввода ультразвука. Этот способ является единственно пригодным для прозвучивания швов толщиной 3,5–10 мм, выполненных односторонней сваркой с проплавлением, дефекты в которых находятся в основном в корне шва.

Контроль прямым и однократно отраженным лучом (рис. 5.15, б) осуществляют при перемещении преобразователя в околошовной зоне. Этот способ позволяет осуществить контроль с одной стороны изделия, а также прозвучивать «мертвую зону». Преобразователь при прозвучивании прямым и однократно отраженным лучом перемещают до линии, отстоящей от оси шва на расстоянии $X_2 = 2 \cdot \delta \operatorname{tg} \alpha + l/2$.

Контроль многократно отраженным лучом сопровождается большим числом ложных сигналов от валика усиления шва и является наименее помехоустойчивым. Применение этого способа ограничивается случаями, когда не имеется доступа непосредственно к шву, например стыковое соединение с обеих сторон закрыто приварными накладками (рис. 5.15, в).

Контроль по слоям обладает наибольшей достоверностью. Но его рекомендуется применять начиная с толщины 40 мм. Он заключается в том, что хотя прозвучивание производят любым из вышеперечисленных способов, но эхо-сигналы фиксируют только на определенном рабочем участке развертки (рис. 5.15, г). Так, если выделить участок развертки Δ_1 , то при прозвучивании в него будут попадать только дефекты, залегающие в слое $a - в$, если выделить участок Δ_2 , то фиксироваться будут эхо-сигналы, пришедшие из слоя $в - с$.

Эхо-зеркальный метод контроля («тандем») заключается в одновременном прозвучивании шва двумя преобразователями, расположенными с одной стороны шва друг за другом и синхронно перемещающимися в разные стороны относительно оси симметрии O_1O (рис. 5.15, д). При таком перемещении преобразователей сумма расстояний от оси шва $X_1 + X_2$ и время t прихода сигналов, зеркально отраженных от дефектов и внутренней поверхности изделия, постоянны для данной толщины δ шва. Последнее существенно облегчает контроль, так как эхо-сигнал от любого дефекта бу-

дет находиться на фиксированном участке развертки, на которой можно установить строб-импульс блока АСД и тем самым получить звуковую индикацию дефекта. Преобразователи могут включаться по отдельной или совместно-совмещенной схеме. В последнем случае регистрируются дополнительно эхо-сигналы, отраженные обратно к каждому из преобразователей.

Для облегчения сканирования по системе «тандем» в ЦНИИТмаш разработаны специальные преобразователи и приспособления (рис. 5.16). Преобразователи (а) в этих приспособлениях (б) кинематически связаны таким образом, что при перемещении одного из них второй синхронно перемещается в противоположную сторону.

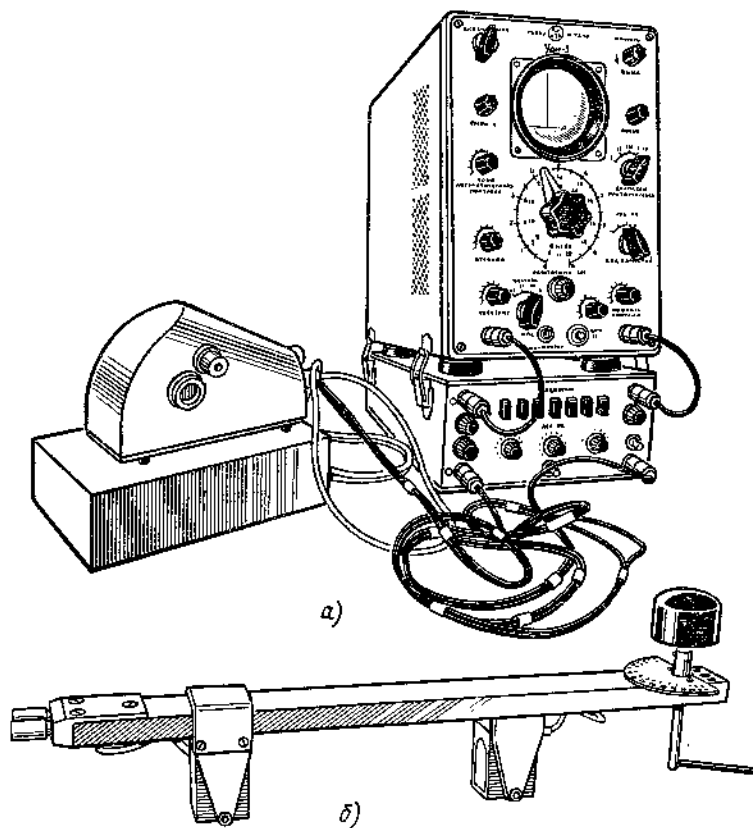


Рис. 5.16. Преобразователь «тандем» конструкции ЦНИИТмаш

Зеркально-теневой и теневой способы могут быть рекомендованы только для выявления относительно грубых дефектов. Прозвучивание осуществляется двумя преобразователями, включенными по раздельной схеме. Преобразователи размещены с обеих сторон шва навстречу друг другу и закреплены с помощью какого-либо приспособления на одном расстоянии X . О наличии дефекта судят по пропаданию сигнала в строб-импульсе (см. рис. 5.15, е). Метод перспективен для контроля швов, выполненных сваркой трением или контактной сваркой давлением.

Особенности контроля. Сварные швы контролируют в основном с обеих сторон шва, с одной (при толщине до 50 мм) или с обеих поверхностей соединения. Контроль проводят после выполнения внешнего осмотра и устранения выявленных при этом недопустимых поверхностных дефектов. Непосредственно перед контролем подготовленную поверхность околошовной зоны тщательно протирают ветошью и покрывают слоем контактной смазки. Наиболее целесообразно использовать минеральные масла (автолы, компрессорные и др.).

Поиск дефектов в шве производят на несколько повышенной чувствительности путем продольно-поперечного перемещения преобразователя по всей контролируемой зоне сначала с одной, а затем с другой стороны (рис. 5.17). Шаг продольного перемещения преобразователя должен быть не более половины диаметра пьезоэлемента. В процессе перемещения наклонный преобразователь необходимо непрерывно проворачивать вокруг своей оси на $\pm 15^\circ$ для того, чтобы обнаружить различно ориентированные дефекты. Контакт преобразователя с поверхностью контролируемого изделия надо обеспечивать легким нажатием руки на преобразователь.

При появлении эхо-сигналов от дефекта на рабочем участке развертки зону перемещения преобразователя сокращают

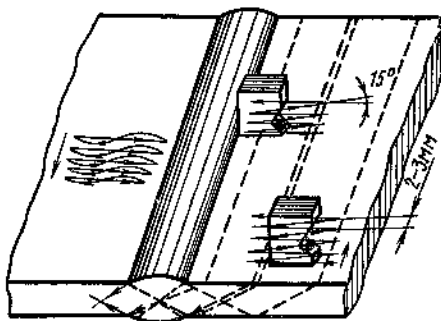


Рис. 5.17. Перемещение искателя в околошовной зоне при поиске дефектов

и производят измерение информативных характеристик: координат, амплитуды эхо-сигнала, условной высоты, условной протяженности, коэффициента формы K_f и количества дефектов на стандартном участке шва.

Нормы оценки качества каждого типа сварного соединения составляют с учетом особенностей информации, получаемой при ультразвуковом контроле, на основе норм Госгортехнадзора, СНиПа и других действующих нормативных документов, определяющих качество изделия. Ультразвуковой контроль сварных швов из углеродистых и низколегированных сталей малых толщин (до 15 мм) наиболее эффективен преобразователями с большими углами призмы ($\beta = 53 \div 56^\circ$, $f = 5$ МГц). В МВТУ имени Баумана разработан наклонный РС-преобразователь типа РСМП, который характеризуется повышенным отношением сигнал-помеха и обеспечивает уверенное выявление круглых дефектов размером 0,7 мм и выше.

Швы толщиной 16–30 мм, выполненные односторонней сваркой, контролируют одним преобразователем прямым и однократно отраженным лучом за один прием. Наиболее эффективен стандартный преобразователь ($\beta = 50^\circ$, $f = 2,5$ МГц). Если же в таких швах возникают ложные эхо-сигналы от провисаний, то с целью повышения надежности и помехоустойчивости контроль целесообразно проводить раздельно в корневой и остальной части шва. При этом верхнюю часть шва предпочтительнее контролировать преобразователем $\beta = 40^\circ$.

Односторонние сварные швы листовых конструкций без подварки корня, как правило, весьма неудовлетворительного качества. При сварке в корне шва образуются провисания и мениски значительной величины (3–5 мм). Контроль корневой зоны таких швов возможен только после удаления всех неровностей шлифовальной машинкой.

Швы толщиной 31–200 мм, выполненные двусторонней или односторонней сваркой с подваркой корня, контролируют наклонными преобразователями с $\beta = 30$ и 40° на частоте 1,8 и 2,5 МГц. Статистика контроля показывает, что в этих швах дефекты распределяются следующим образом: около 65–70 % шлаковых включений, 10 % пор и 20–25 % плоскостных дефектов (из них трещин 5–7 %).

Наиболее опасные дефекты — трещины и непровары — ориентированы преимущественно в вертикальной плоскости. Такие дефекты, расположенные в сечении шва, плохо выявляются при однощуповой схеме прозвучивания. Для обнаружения трещин необходимо применять схему «тандем».

Сварные швы толщиной свыше 200 мм необходимо контролировать на пониженной частоте 1,0–1,25 МГц. Особенно важным требованием при контроле толстостенных швов является проведение сдаточного контроля после термообработки, если она предусмотрена технологией. Термообработка измельчает зерно и делает структуру более однородной, что уменьшает затухание ультразвука в шве и околошовной зоне и повышает достоверность контроля. Например, при контроле швов после термообработки количество выявленных дефектов увеличивается на 20–25%. Контроль до термообработки может проводиться, но лишь факультативно (необязательно).

Весьма специфичной задачей ультразвукового контроля сварных соединений является выявление поперечных трещин. Эти трещины возникают при грубых нарушениях сварочной технологии в сталях, склонных к трещинообразованию. Поперечные трещины расположены в наплавленном металле и зоне термического влияния поперек шва в вертикальной плоскости.

Наиболее часто поперечные трещины возникают в корневой зоне швов, выполненных двусторонней сваркой без подогрева. Поперечные трещины имеют малую шероховатость поверхности и отражение ультразвука от них носит в основном зеркальный характер, что затрудняет их обнаружение (рис. 5.18).

Схема прозвучивания одним преобразователем самая простая и наименее надежная (рис. 5.18, а), применяется для контроля швов небольшой толщины (до 20 мм). Значительно большая чувствительность к трещинам достигается при

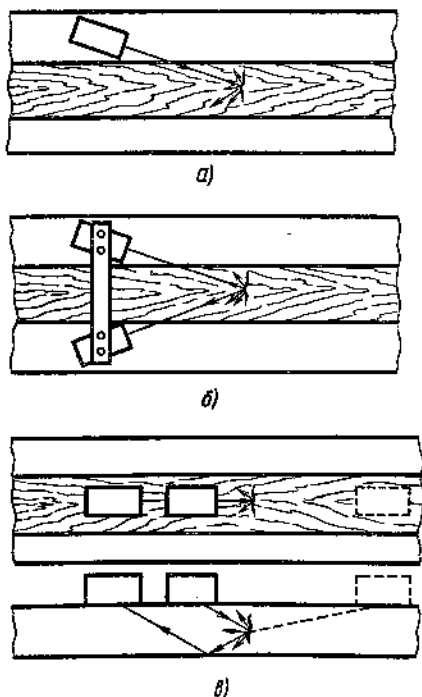


Рис. 5.18. Схемы прозвучивания поперечных трещин:

а — одним искателем, б — двумя искателями, в — одним искателем или двумя искателями при снятом усилении шва

использовании двух преобразователей, расположенных под углом к шву (рис. 5.18, б). Такое их размещение способствует регистрации максимального по амплитуде зеркального сигнала. В случае контроля швов большой толщины можно применять эхо-зеркальный метод прозвучивания («тандем») при размещении преобразователей по обеим сторонам усиления шва.

Все эти способы позволяют вести контроль без снятия усиления шва, что является их преимуществом, но связаны с применением специальных приспособлений для крепления преобразователей. Следует отметить, что сравнительная эффективность этих способов еще не установлена. Поэтому на практике очень часто контроль швов проводят после снятия валика усиления одним (рис. 5.18, в) или двумя преобразователями, размещенными в одной плоскости.

Ультразвук широко применяют для контроля стыковых швов различных конструкций, например звеньев корабельных цепей, арматуры железобетонных конструкций и др. Способ прозвучивания выбирают в зависимости от конфигурации конструкции. Так, швы звеньев цепей контролируют по схеме «тандем» при размещении преобразователей с одной стороны шва симметрично оси звена. Стержни арматуры имеют периодический профиль. Это существенно усложняет их контроль эхо-импульсным методом, так как резко ухудшается акустический контакт и увеличивается уровень ложных сигналов. Поэтому швы арматуры контролируют теньвым методом (рис. 5.19). О наличии и величине дефекта судят по уменьшению амплитуды A эхо-сигнала, отраженного от него (рис. 5.19, б). Величина ослабления амплитуды A_0 (рис. 5.19, а) пропорциональна площади S_d дефекта.

Основные схемы контроля тавровых и угловых соединений изображены на рис. 5.20, а, б, в, г. Наиболее эффективной является схема ввода ультразвуковых колебаний через основной металл привариваемого листа, так как она позво-

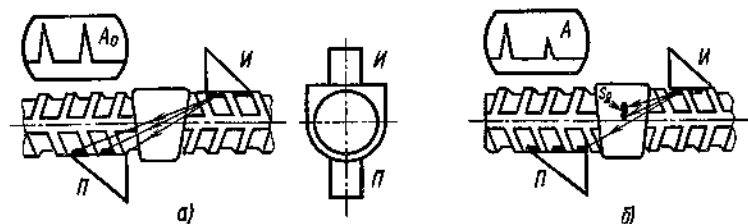


Рис. 5.19. Контроль швов арматуры:
И — излучатель, П — приемник

лест выявить все виды при минимальном уровне ложных сигналов.

Ложные сигналы λ возникают при отражении ультразвука от грубых неровностей валика усиления и в случае угловых швов — от угла элемента конструкции. Ложные сигналы можно отличать от сигналов дефекта селективированием их по времени прихода.

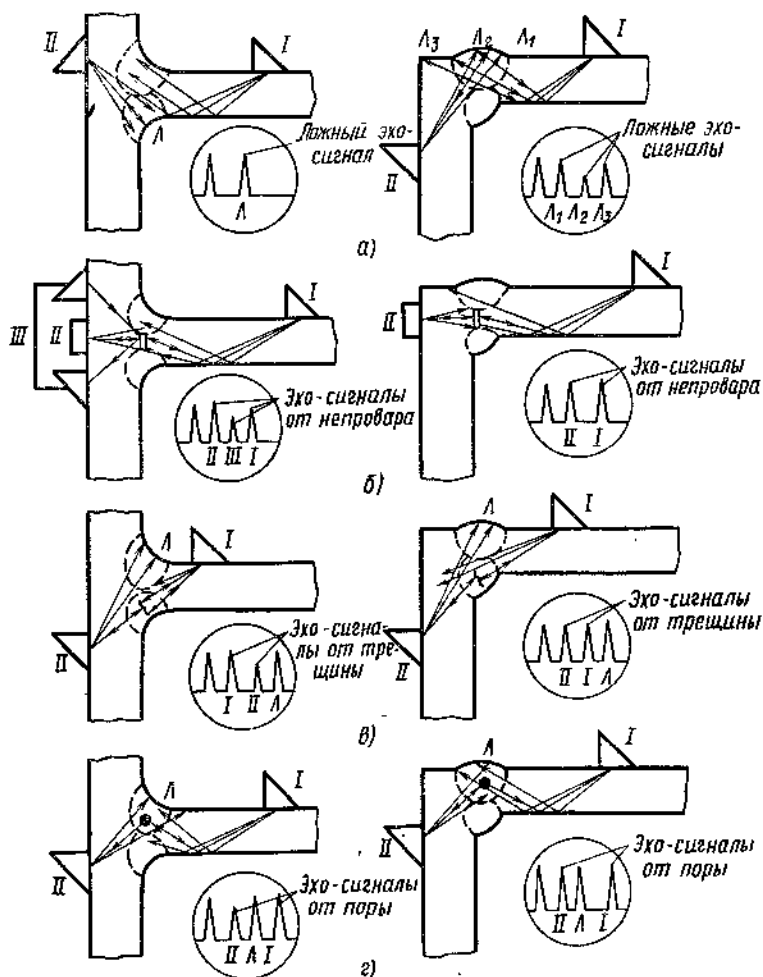


Рис. 5.20. Схемы контроля тавровых и угловых соединений

Для выявления несправов угловых и тавровых соединений при свободном доступе к ним со стороны вертикального листа (рис. 5.21) часто применяют прямые или РС-преобразователи. Для контроля тавровых соединений используют также сдвоенные наклонные преобразователи конструкции НИИмостов.

Разновидностью таврового соединения является стык приварки стержня к пластине. Эти так называемые закладные детали широко применяют в строительной индустрии. В МВТУ имени Баумана разработана методика их контроля, которая внедрена на заводах железобетонных конструкций. Контроль основан на применении специального устройства для фиксации РС-преобразователей на детали (см. рис. 5.21).

Контроль нахлесточных соединений осуществляют зеркально-теневым способом по схеме, изображенной на рис. 5.22. При отсутствии дефекта ультразвук беспрепятственно проходит от излучателя к приемнику и на экране ЭЛТ появляется сигнал. Если в соединении имеется дефект, то этот сигнал уменьшается или исчезает совсем. Для такого контроля необходимы специальные приспособления, закрепляющие преобразователи на определенном расстоянии друг от друга в зависимости от толщины соединенных элементов.

Все большее распространение ультразвуковой метод находит при контроле швов контактной сварки. Основные дефекты этих швов, так называемые окисные пленки, выявляются ультразвуком плохо. Эти дефекты имеют весьма малое раскрытие (0,5—3 мкм) и гладкую поверхность, в результате чего ультразвук от них практически не отражается. Но в тех случаях, когда окисным пленкам сопутствуют включения или несправы, имеющие большую ширину раскрытия, основные дефекты могут быть выявлены. В контактных стыках рельсов эти дефекты надежно выявляются эхо-импульсным методом с одним преобразователем. В контакт-

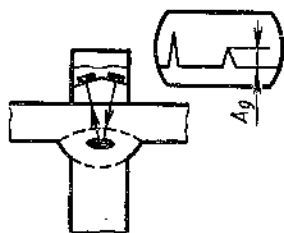


Рис. 5.21. Контроль шва закладной детали

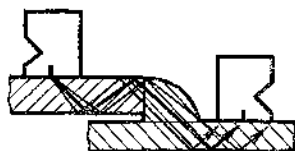


Рис. 5.22. Контроль нахлесточных швов двумя излучателями

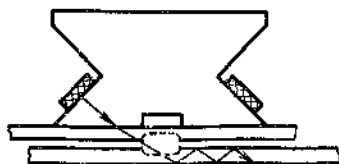
ных стыках труб котлоагрегатов тепловых электростанций наилучшие результаты контроля достигнуты применением эхо-зеркального метода.

Ультразвуковой метод применяют также при контроле сварных точек. Сварные точки после окончания сварки контролируют зеркально-теневым методом (рис. 5.23). Признаком непровара между листами является приход донного сигнала от первого листа к приемному преобразователю. Размеры сварной точки можно определить, измерив расстояние между границами перемещения преобразователя на поверхности листа. Недостатком зеркально-теневого метода является невозможность выявления слабо окисленного непровара, который практически полностью пропускает ультразвук в нижний лист.

Этот недостаток устраняется, если вести контроль непосредственно в процессе сварки эхо-импульсным методом по совмещенной схеме. Вследствие того, что акустические сопротивления жидкого и твердого металла различны, ультразвук в момент образования расплавленного ядра между листами отражается от него. По интервалу времени от момента появления эхо-сигнала, свидетельствующего о начале формирования ядра, до момента выключения сварочного тока можно оценить размеры ядра. Недостатками этого метода являются его довольно сложная аппаратная реализация и сложность создания акустического контакта вблизи сварочного электрода.

Поэтому наиболее перспективен способ прозвучивания теневым методом, когда излучающий и приемный преобразователи встроены в электроды сварочной машины. Непрерывные ультразвуковые колебания излучаются при сжатии сварочных листов электродами. В момент расплавления металла ультразвук в нем сильно поглощается и амплитуда прошедшего сигнала уменьшается. После застывания металла амплитуда сигнала возрастает. По перепаду амплитуд судят о качестве сплавления листов. При таком контроле наиболее эффективно применение поперечных волн, так как они совершенно не проходят через жидкий металл, и поэтому перепад амплитуд, а следовательно, и точность метода наибольшие.

Рис. 5.23. Контроль сварной точки



Выше рассматривались вопросы контроля сварных швов из углеродистых и низколегированных сталей. Однако с каждым годом увеличивается использование алюминиевых сплавов, высоколегированных сталей, медных сплавов и других конструкционных материалов, ультразвуковой контроль которых имеет свои особенности.

Алюминиевые сплавы имеют малое затухание ультразвука, что практически позволяет их контролировать по обычным методикам. Что касается соединений из высоколегированных сталей, медных сплавов, то их контроль весьма затруднен. Это объясняется тем, что сварные швы этих материалов характеризуются крупнозернистой упругоанизотропной структурой, в которой ультразвук, во-первых, сильно затухает, а во-вторых, дает ложные отражения от границы зерен. Для контроля таких швов приходится в 2—3 раза снижать частоту ультразвуковых колебаний, что, естественно, ухудшает выявляемость малых дефектов. Однако в ряде случаев и эта мера не даст положительных результатов и ультразвуковой контроль обычным дефектоскопом осуществить невозможно. Сейчас ведутся разработки по созданию специальных дефектоскопов для контроля крупнозернистых материалов. Контроль основан на статистическом анализе полезных сигналов от дефекта и ложных — от структуры.

5.4. МЕХАНИЗАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ

Общие сведения. Процедура ручного ультразвукового контроля состоит из целого ряда простых и ложных операций. Оператор перемещает преобразователь в околошовной зоне по сложной траектории, зависящей от типоразмера шва, его пространственного положения, количества, местоположения и типа обнаруженного дефекта, непрерывно наблюдает за экраном дефектоскопа и выполняет логические операции по переработке полученной информации и оценке качества шва. Такая напряженная работа приводит к быстрому физическому утомлению оператора и обуславливает пропуск дефектов.

Автоматизировав контроль, можно значительно повысить его производительность и достоверность. Последнее достигается тем, что фиксация дефектов производится не визуально оператором, а за счет получения дефектограммы на бумажной ленте с помощью какого-либо регистрирующего устройства.

Если все функции, выполняемые оператором, передать контрольному устройству, то конструкция устройства должна включать следующие основные узлы: акустический блок с

преобразователями и механизмом для их перемещения вдоль и поперек шва и с поворотом вокруг своей оси, системы слежения за швом и качеством акустического контакта, электронный блок для генерирования зондирующих импульсов и приема эхо-сигнала, систему передачи и сбора контактной жидкости, электронный блок для логической обработки информации о дефекте, включая ЭВМ, регистраторы информации на дефектограмме в аналоговой или цифровой форме, систему обратной связи для управления траекторией и скоростью сканирования в зависимости от полученной информации о дефекте, систему автоматической отбраковки и др.

Уровень автоматизации определяется наличием в ней упомянутых систем. Если все эти системы входят в конструкцию установки, то достигается полная автоматизация всех контрольных операций. Такие установки называют автоматическими стендами (или линиями). Стенды весьма сложное, громоздкое и дорогостоящее оборудование, поэтому применять автоматическую линию на производстве не всегда целесообразно.

В целом ряде случаев целесообразно механизировать (частично автоматизировать) отдельные контрольные операции, передавая контрольному устройству, например, функции поиска и регистрации дефектов. Такие устройства значительно менее сложны по конструкции и могут быть выполнены в виде малогабаритных дефектоскопов.

Совершенно очевидно, что применение этих упрощенных устройств не должно повлиять на достоверность контроля. Поэтому выбор конструкции установки и оптимизация параметров автоматического контроля должны производиться на основе анализа закономерностей статистического распределения дефектов в сварных швах по местоположению, ориентации, типу, величине и другим признакам.

Эффективность неразрушающих методов контроля (НМК) будет максимальна только при условии хорошего согласования их с технической цепочкой изготовления изделий. Поэтому выбор уровня автоматизации определяется целым рядом производственных факторов (табл. 5.2).

Из табл. 5.2, в частности, следует, что целесообразно автоматизировать контроль длинномерных сварных швов труб и сосудов и нецелесообразно автоматизировать контроль угловых сварных швов патрубков.

Анализ состояния средств автоматизированного ультразвукового контроля сварных соединений подтверждает, что в СССР и за рубежом наибольшие успехи достигнуты в об-

5.2. Выбор способа контроля

Характеристика объекта контроля	Производственные факторы	Уровень автоматизации		
		полная автоматизация	механизация	ручной контроль
	Величина потока однотипных изделий	Большая	Средняя	Малая
	Протяженность швов	»	»	»
	Конфигурация околошовной поверхности	Плоская, цилиндрическая	Поверхность сложной конфигурации, $R > 300$ мм	Поверхность сложной конфигурации, $R < 300$ мм
	Доступность околошовной зоны	300—350 мм	Ограниченная	Ограниченная
Условия контроля (наличие специального участка)		Есть	Нет	Нет
Общий уровень квалификации службы НМК		Высокий	Средний	Средний

ласти контроля продольно- и спирально-шовных труб с малой толщиной стенки.

Оборудование. Для автоматического контроля сварных продольных швов труб диаметром 159—529 мм и с толщиной стенки 2,5—10 мм одной из первых была применена установка ДУК-15ЦЛАМ. Установка смонтирована в технологическом потоке трубоэлектросварочного стана и состоит из системы обнаружения дефектов сварного шва и системы обеспечения нормальной работоспособности всех узлов. Установка работает по эхо-теневому методу. Два наклонных преобразователя располагаются на трубе симметрично относительно сварного шва и поочередно излучают ультразвуковые импульсы. Эти импульсы через струю воды вводятся в стенку трубы и распространяются в ней в направлении сварного шва. Дефекты отмечаются непосредственно на трубе. Скорость контроля достигает 60 м/мин.

Установка АИСТ-1 предназначена для ультразвукового автоматического контроля технологического режима электрической сварки труб токами повышенной частоты в потоке

стана 19-102. Поверхность трубы очищается специальным устройством, акустический контакт между искательными головками установки АИСТ-1 и поверхностью трубы осуществляется, как и при контроле охлажденного шва, струей воды, несмотря на то, что температура сварного шва в зоне контроля составляет 900—1000 °С. Это объясняется высокой локальностью зоны нагрева при сварке. Чтобы исключить неблагоприятное воздействие на искательные головки высокой температуры, они выполнены так, что пьезопреобразователи постоянно охлаждаются проточной водой, применяемой в качестве контактной среды. Используемые искательные головки целевого типа позволяют изменять в пределах 1—3° угол ввода ультразвуковых колебаний. Шарнирная подвеска установки обеспечивает постоянство положения искательных головок относительно сварного шва. Подъем и опускание искательных головок осуществляется элементами механизма слежения. Результаты контроля технологического процесса сварки установкой АИСТ-1 фиксируются на диаграммной ленте самописца блока статистической оценки качества сварного шва.

Для автоматического контроля продольных или спиральных швов зарубежные фирмы выпускают ряд установок, в которых главное внимание сосредоточено на взаимном расположении преобразователей, на выборе режима их работы, контроле качества акустического тракта и обеспечении прозвучивания сечения всего шва.

Одной из самых распространенных установок для контроля сварного шва труб диаметром 400—2000 мм и толщиной стенки 6—15 мм является установка SNUP фирмы «Крауткремер» (ФРГ). Контроль ведется двумя преобразователями, расположенными с обеих сторон шва. Скорость контроля 3 м/мин. Модификация установки имеет четыре преобразователя; при этом вторая пара прозвучивает шов под углом 45°.

Опыт автоматического контроля крупноразмерных сварных швов крайне мал, так как существуют определенные трудности в создании средств автоматического контроля сварных швов большой толщины: большое разнообразие дефектов по типоразмеру, ориентации и местоположению; необходимость прозвучивания значительного объема наплавленного металла; относительно малая протяженность швов.

Задача обеспечения надежного и воспроизводимого автоматического контроля в этих условиях обуславливает необходимость создания весьма сложных механических, акустических и электронных систем. А это, в свою очередь, ухуд-

шает эргономические факторы, в частности увеличивает габаритные размеры и массу установки, усложняет условия ее эксплуатации и увеличивает время вспомогательных операций. Тем не менее в ЦНИИТмаш и НИИХИМмаш созданы установки для автоматизированного контроля сварных швов роторов турбин и толстостенных (до 300 мм) сосудов высокого давления для химической и энергетической промышленности. Так, для сосудов и аппаратов используют установки УКСА, обеспечивающие автоматическое сканирование и регистрацию дефектов. Применение этих установок повышает производительность контроля по сравнению с ручным в 5–10 раз и, что самое главное, обеспечивает получение объективного документа контроля в виде дефектограммы.

Для повышения надежности обнаружения вертикальных трещин в ЦНИИТмаш разработана и внедрена в промышленность электронно-акустическая аппаратура «Циклон», обеспечивающая автоматизированный контроль швов толщиной 100–200 мм преобразователями с углами ввода 30 и 40°, а также по схеме «тандем».

Механизация контроля сварных швов небольшой толщины осуществляется, как правило, на базе использования портативных установок, в частности серийно выпускаемых установок типа УД-91 ЭМ.

Разработанная НИИмостов аппаратура типа УЗД-НИИМ-17 или УЗД-НИИМ-18 позволяет контролировать сварные швы на частоте 1,8 и 2,5 МГц толщиной 20–60 мм. Она состоит из электронного блока (дефектоскопа), в который входит преобразователь, механизм его перемещения и поворота, регистр с бумажным носителем. Контроль ведется методом продольно-поперечного перемещения преобразователя.

Установка УЗД-МВТУ-22А (УД-25ПС) позволяет производить автоматизированный ультразвуковой контроль качества сварных соединений труб, резервуаров и плоских элементов толщиной 5–30 мм в монтажных и заводских условиях.

Многоэлементный пьезоэлектрический преобразователь, обеспечивающий прозвучивание всего сечения шва с равномерной чувствительностью по глубине без поперечного сканирования, размещен на самодвижущейся тележке с магнитными присосками. Электронный блок обеспечивает генерирование зондирующих импульсов; коммутирование их в каналах по заданной программе и обработку отраженных информационных сигналов, а также отображение результатов контроля на 16-разрядном цифровом печатающем устройстве.

При этом на бумажном носителе регистрируются амплитуда сигнала в децибелах, местоположение дефекта по глубине и длине шва, тип дефекта, номер канала зарегистрированного дефекта, причина вынужденной остановки механизма перемещения и отметка недопустимых дефектов, превышающих браковочный уровень. Сменные преобразователи позволяют одной установкой контролировать трубы диаметром от 57 до 1420 мм. Эквивалентная площадь минимально выявленного дефекта составляет 1,0 мм², что превышает требования нормативных документов на контроль. Скорость контроля 1—2 погонных метра шва в минуту.

Достоверность оценки типа дефекта при ручном контроле может быть существенно повышена при использовании электронной логической приставки к дефектоскопу типа АВД-1. Эта приставка автоматизирует измерение и сравнение величины эхо-сигналов от дефекта при прозвучивании его с четырех сторон и выдает по величине разностного сигнала информацию о типе дефекта (плоскостной или объемный).

Контрольные вопросы

1. Перечислите особенности распространения ультразвуковых волн в твердых телах.
2. Назовите основные элементы конструкции ультразвукового дефектоскопа.
3. Как производится оценка дефекта по измеряемым характеристикам?
4. Что такое эквивалентный размер дефекта?
5. В чем заключаются особенности ультразвукового контроля сварных швов различной толщины?
6. Какие основные конструктивные элементы включают установки автоматизированного контроля?

6. МАГНИТНАЯ И ВИХРЕТОКОВАЯ ДЕФЕКТОСКОПИЯ

6.1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МАГНИТНОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ

Магнитные методы контроля основаны на обнаружении магнитных потоков рассеяния, возникающих при наличии различных дефектов, в намагниченных изделиях из ферромагнитных материалов. Магнитный поток Φ через площадку S , расположенную перпендикулярно магнитным линиям в однородном магнитном поле, равен произведению магнитной индукции B на площадку S ($\Phi = BS$).

Магнитный поток выражается в веберах (Вб). Магнитная индукция выражается в теслах (Тл).

Способность материала деталей намагничиваться характеризуют абсолютной магнитной проницаемостью μ_a . Отношение абсолютной магнитной проницаемости материала к магнитной проницаемости вакуума μ_0 называется относительной магнитной проницаемостью $\mu = \mu_a / \mu_0$. С количественной стороны магнитная проницаемость μ показывает, во сколько раз результирующее поле в намагниченной среде сильнее поля, создаваемого этим же током в вакууме. Магнитная проницаемость μ — безразмерная величина. В зависимости от ее значения все материалы подразделяют на три группы: диамагнитные, у которых μ на несколько миллионных или тысячных долей меньше единицы (медь, цинк, серебро и др.); парамагнитные, у которых μ на несколько миллионных или тысячных долей больше единицы (марганец, платина, алюминий); ферромагнитные, у которых μ достигает десятков тысяч. К таким материалам принадлежат только четыре элемента (железо, никель, кобальт, гадолиний) и некоторые сплавы металлов.

Магнитными методами могут быть проверены детали, выполненные только из ферромагнитных материалов. Ферромагнитные свойства металлов обусловлены внутренними молекулярными токами, в основном вращением электронов вокруг собственной оси. В пределах малых объемов (примерно $10^{-8} - 10^{-3}$ см³) элементарных областей так называемых доменов магнитные поля молекулярных токов образуют результирующее поле домена.

При отсутствии внешнего магнитного поля поля доменов направлены произвольно и компенсируют друг друга. Суммарное поле доменов в этом случае равно нулю, деталь оказывается размагниченной (рис. 6.1, а). Если на деталь действует внешнее поле, то под его влиянием поля отдельных доменов устанавливаются по направлению внешнего поля с одновременным изменением границ между доменами. В результате образуется общее магнитное поле доменов, деталь оказывается намагниченной (рис. 6.1, в). При намагничивании магнитное поле доменов накладывается на внешнее магнитное поле в контролируемой детали.

Сущность магнитного поля. Магнитный поток, распространяясь по изделию и встречая на своем пути дефект, огибает его вследствие того, что магнитная проницаемость дефекта значительно ниже (~ 1000 раз) магнитной проницаемости основного металла. В результате этого часть магнитно-силовых линий вытесняется дефектом на поверхность, образуя

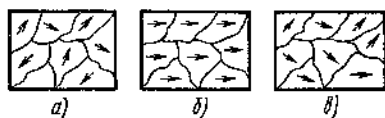


Рис. 6.1. Ориентация доменов в ферромагнитном материале:

а — деталь размагничена, *б* — деталь намагничена до индукции насыщения, *в* — деталь намагничена до остаточной намагниченности

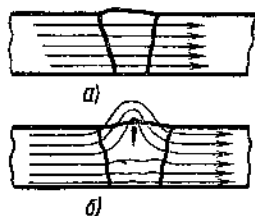


Рис. 6.2. Распределение магнитного потока по сечению качественного сварного шва (*а*) и дефектного (*б*)

местный магнитный поток рассеяния (рис. 6.2). Дефекты, которые вызывают возмущение в распределении силовых линий магнитного потока без образования местного потока рассеяния, не могут быть обнаружены методами магнитной дефектоскопии. Возмущение потока происходит тем сильнее, чем большее препятствие представляет собой дефект. Так, если дефект расположен вдоль направления магнитных силовых линий, то возмущение магнитного потока невелико, в то время как тот же дефект, расположенный перпендикулярно или наклонно направлению магнитного потока, создает значительный поток рассеяния.

В зависимости от способа регистрации магнитного потока рассеяния магнитные методы контроля подразделяют на магнитопорошковый, магнитографический, феррозондовый и магнитополупроводниковый. При дефектоскопии сварных швов применяют в основном три метода, магнитопорошковый, магнитографический и магнитоферрозондовый. В первом случае потоки рассеяния выявляются с помощью магнитного порошка, во втором — регистрируются на магнитную ленту, а в третьем — феррозондовым преобразователем. Для контроля сварных соединений используют два первых метода.

6.2. МАГНИТОПОРОШКОВЫЙ МЕТОД

Сущность магнитопорошкового метода заключается в том, что на поверхность намагниченной детали наносят ферромагнитный порошок в виде суспензии с керосином, маслом, мыльным раствором («мокрый» метод) или в виде магнитного аэрозоля («сухой» метод). Под действием втягивающей силы магнитных полей рассеяния частицы порошка перемещаются по поверхности детали и скапливаются в виде ва-

ликов над дефектами. Форма этих скоплений соответствует очертаниям выявляемых дефектов.

Методика контроля. Методика магнитопорошкового способа включает следующие операции (ГОСТ 21105—75):

1. Подготовку поверхностей перед контролем и очистку их от загрязнений, окалины, следов шлака после сварки.

2. Подготовку суспензии, заключающуюся в интенсивном перемешивании магнитного порошка с транспортирующей жидкостью.

3. Намагничивание контролируемого изделия.

4. Нанесение суспензии или порошка на поверхность контролируемого изделия.

5. Осмотр поверхности изделия и выявление мест, покрытых отложениями порошка.

6. Размагничивание.

Метод отличается высокой чувствительностью к тонким и мелким трещинам, простотой выполнения, оперативностью и наглядностью результатов. Этот метод широко применяют для контроля продольных сварных швов изделий, выполненных из магнитных материалов и, в частности, для выявления трещин и узких (стянутых) непроваров в стыковых швах трубопроводов, сваренных дугowymi способами. Для повышения чувствительности контроля усиление швов перед испытанием целесообразно удалить.

Чувствительность контроля. Чувствительность магнитопорошкового метода зависит от ряда факторов: размера частиц порошка и способа его нанесения, напряженности приложенного намагничивающего поля, рода приложенного тока (переменный или постоянный), формы, размера и глубины залегания дефектов, а также от их ориентации относительно поверхности изделия и направления намагничивания, состояния и формы поверхности, способа намагничивания.

Частицы порошка должны иметь размер 5—10 мкм. Для выявления глубоко залегающих дефектов применяют более крупный магнитный порошок. Для магнитных суспензий («мокрый» метод) применяют магнитный порошок с мелкими частицами. Кроме того, частицы магнитного порошка должны обладать максимальной подвижностью. С этой целью необходимо применять частицы неправильной формы. Дополнительную подвижность частицы магнитного порошка получают после покрытия их пигментом с низким коэффициентом трения.

Намагничивание постоянным или переменным током, а также «сухой» или «мокрый» метод нанесения порошка существенно не влияют на обнаружение поверхностных де-

фектов (рис. 6.3). Однако род тока намагничивания, а также метод нанесения порошка сильно сказываются на обнаружении подповерхностных дефектов. В этом случае резко выявляется преимущество постоянного тока перед переменным. Это объясняется тем, что постоянный ток создает магнитное поле, глубоко проникающее в металл. Однако детали с толщиной стенки 20 мм не следует намагничивать постоянным током, так как такие детали невозможно размагнитить после контроля. При намагничивании переменным током из-за так называемого скин-эффекта плотность тока, а следовательно, и плотность магнитного потока будет больше у поверхности намагничиваемого изделия. По этой причине при намагничивании переменным током лучше выявляются только поверхностные дефекты.

«Сухой» метод контроля имеет преимущество перед «мокрым» при обнаружении подповерхностных дефектов (см. рис. 6.3). Это объясняется тем, что суспензия обладает определенной вязкостью и для перемещения ферромагнитной частицы в этой вязкой среде требуется большая сила воздействия магнитного потока, чем для перемещения той же частицы в воздухе.

С увеличением напряженности приложенного поля (до достижения индукции насыщения, см. рис. 6.1,б) возрастает чувствительность метода.

При контроле магнитными методами наиболее уверенно выявляются плоскостные дефекты: трещины, непровары и несплавления, наибольший размер которых ориентирован под прямым или близким к нему углом относительно направления магнитного потока. Дефекты округлой формы (поры, шла-

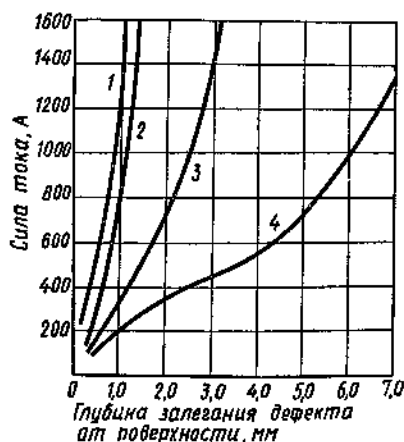


Рис. 6.3. Зависимость чувствительности магнитопорошкового метода от вида тока и способа нанесения порошка:

1 — переменный ток, «мокрый» метод, 2 — переменный ток, «сухой» метод, 3 — постоянный ток, «мокрый» метод, 4 — постоянный ток, «сухой» метод

ковые включения, раковины) не могут создавать достаточного потока рассеяния и, как правило, при контроле обнаруживаются плохо. Практикой установлено, что магнитопорошковым методом выявляются поверхностные и подповерхностные (на глубине не более 2 мм) трещины с раскрытием от 0,001 мм, глубиной (высотой дефекта) от 0,05 мм и длиной 0,5 мм и более.

Могут быть выявлены относительно крупные дефекты (непровары, поры, шлаковые включения и др.) сечением более 2–3 мм², лежащие на глубине 5–6 мм под поверхностью. Плоскостные дефекты могут быть выявлены в случае, если они ориентированы к поверхности детали под углом более 20° (максимум чувствительности под углом 90°). С увеличением глубины залегания дефектов уменьшается скорость скопления магнитного порошка, что затрудняет выявление дефектов и определение их характера.

В значительной мере чувствительность контроля зависит от качества поверхности, на которую наносят суспензию или порошок. Оптимальная шероховатость поверхности деталей, подвергаемых магнитопорошковому контролю, соответствует по параметру Ra 2,5–1,25 мкм. На такой поверхности может быть получена наивысшая чувствительность. Увеличение шероховатости поверхности ведет к снижению чувствительности контроля — так обработка поверхности контролируемого изделия с шероховатостью $Rz = 20$ мкм приводит к тому, что контроль по режимам, обеспечивающим выявление тонких дефектов (с раскрытием 0,001 мм), затрудняется из-за появления фона из магнитного порошка. Это ведет к необходимости уменьшения напряженности намагничивающего поля и, следовательно, к снижению чувствительности контроля. Шлифованные поверхности (начиная с шероховатости $Ra = 0,32$ мкм) из-за наличия бликов на поверхности трудно осматривать и разбраковывать, особенно при прямом освещении лампами накаливания. При контроле шлифованных поверхностей осмотр желательно проводить в рассеянном свете или покрывать блестящие поверхности очень тонким, снимающим блеск слоем (не более 15 мкм) краски, например нитроэмалью НЦ-25.

Если на поверхности контролируемого изделия имеются резкие переходы (например, усиление валика шва, чешуйчатость, подрезы) или крупные микронеровности, то магнитный порошок интенсивнее скапливается не над дефектами, а в местах переходов и углублений. Поэтому при контроле сварных швов с усилением или грубой чешуйчатостью нельзя однозначно судить о наличии внутренних дефектов.

Способы намагничивания. Магнитный контроль можно проводить способом приложенного магнитного поля или способом остаточной намагниченности. Способ приложенного магнитного поля проводят в тех случаях, когда деталь выполнена из магнитомягкого материала, например из сталей (Ст3, сталь 10, сталь 20 и др.); деталь имеет сложную форму; деталь контролируют для обнаружения подповерхностных дефектов, расположенных на глубине более 0,01 мм; мощность дефектоскопа не позволяет намагничивать всю деталь вследствие ее больших размеров.

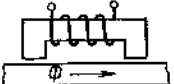
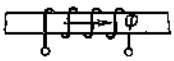
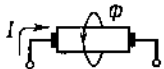
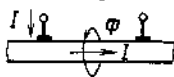
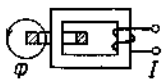
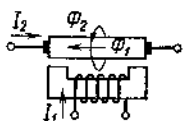
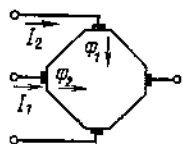
Контроль в приложенном магнитном поле не всегда обеспечивает более высокую чувствительность, чем контроль на остаточной намагниченности.

При контроле на остаточной намагниченности деталь предварительно намагничивают, а затем после снятия намагничивающего поля на ее поверхность наносят магнитную суспензию или порошок. Контроль на остаточной намагниченности возможен при достаточно большой остаточной намагниченности деталей. Поэтому его применяют для проверки деталей из магнитотвердых материалов, у которых величина коэрцитивной силы $H_c > 800$ А/м. Если деталь выполнена из материала с $H_c < 800$ А/м, то проверять ее способом остаточной намагниченности нельзя, так как над дефектом образуются слабые магнитные поля. Этот способ имеет следующие преимущества: возможность установки детали в любое требуемое положение для хорошего освещения поверхности и осмотра невооруженным глазом; меньшая возможность прижога деталей в листах и контакта с головками дефектоскопа, так как для остаточного намагничивания ток пропускают по детали кратковременно (0,1–0,5 с) с перерывами между включениями 1–2 с.

В практике магнитного контроля существуют следующие способы намагничивания изделий: комбинированное, циркулярное и полюсное (табл. 6.1). Комбинированное намагничивание осуществляется только в приложенном магнитном поле. Циркулярное и полюсное намагничивание можно применять как в приложенном магнитном поле, так и на остаточной намагниченности.

Комбинированное намагничивание осуществляется при одновременном намагничивании детали двумя или несколькими магнитными полями. Примером комбинированного намагничивания может быть намагничивание трубы соленоидом и пропускание тока через проводник, проходящий внутри трубы. В результате два поля складываются в результирующее, силовые линии которого направлены по винтовым

6.1. Основные способы намагничивания

Наименование способа	Средство намагничивания	Графическая схема намагничивания
Продольное (полюсное)	Постоянным магнитом	
	Электромагнитом	
	Соленоидом	
Циркулярное	Пропусканием тока по детали	
	С помощью провода с током, помещаемого в отверстие детали	
	С помощью контактов, устанавливаемых на деталь	
	Индукцированием тока в детали	
Комбинированное	Пропусканием тока по детали и с помощью электромагнита	
	Пропусканием двух (или более) сдвинутых по фазе токов по детали во взаимно перпендикулярных направлениях	
	Индукцированием тока в детали и током, проходящим по проводнику, помещаемому в отверстие детали	

линиям. Такое поле проходит через все части объекта под различными углами направления, что дает возможность повысить выявляемость дефектов, ориентированных различным образом.

Циркулярное намагничивание применяют для выявления продольных дефектов типа трещин, непроваров, вытянутых шлаковых включений. Его осуществляют при пропускании тока по контролируемой детали или через проводник, помещенный в отверстие детали.

Наиболее эффективно циркулярное намагничивание при контроле цилиндрических деталей. Силу тока в амперах для циркулярного намагничивания пропусканием тока по детали цилиндрической формы рассчитывают по формуле $I = \pi H D$, где H — напряженность поля, А/см; D — диаметр детали, см.

При выборе величины H необходимо иметь в виду следующее обстоятельство (рис. 6.4). Если начальное намагничивание металла таково, что точка P оказывается слева от точки μ_{\max} на кривой магнитной проницаемости, то уменьшение поперечного сечения металла за счет дефекта вызовет увеличение магнитной индукции, а также может привести к более высокой магнитной проницаемости, следствием которой явится уменьшение потока рассеяния, в результате дефект может быть не обнаружен. Наилучшие условия для обнаружения дефектов создаются при работе на крупном правом спаде кривой $\mu = f(H)$. Если же работать при больших напряженностях поля, то с увеличением H разница между потоками рассеяния над дефектами и в окружающей среде относительно меньше, что затрудняет обнаружение дефектов. Для выявления большинства поверхностных дефектов в деталях из конструкционных сталей оптимальная напряженность магнитного поля на поверхности изделия должна составлять 8000—16 000 А/м при контроле на остаточной намагнитченности.

Ток в амперах, необходимый для циркулярного намагничивания пластин, определяют по формуле $I = 2H(b + S)$, где b — ширина пластины, см; S — толщина пластины, см; H — напряженность, А/см. Если $H = 800$ А/см, то $I = 1600(b + h)$.

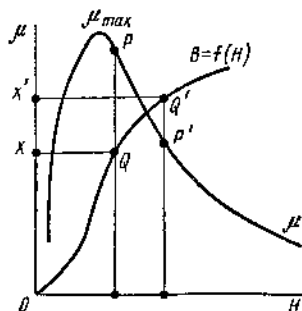


Рис. 6.4. Зависимость B и μ от H для ферромагнитного материала

Полюсное намагничивание подразделяют на продольное, поперечное и нормальное. При продольном намагничивании направление намагничивающего поля совпадает с направлением оси детали. Продольное намагничивание осуществляют с помощью электромагнитов, постоянных магнитов или соленоидов. Его применяют для обнаружения поперечных дефектов, расположенных под углом не менее $20-30^\circ$ к продольной оси шва. При поперечном намагничивании направление вектора напряженности магнитного поля перпендикулярно продольной оси шва. Нормальное намагничивание — частный случай продольного и поперечного намагничивания.

Чувствительность магнитного метода на продольной остаточной намагниченности существенно зависит от скорости снятия намагничивающего поля. При быстром уменьшении напряженности поля дефекты выявляются уверенно, при медленном уменьшении поля той же напряженности дефекты не выявляются или выявляются слабо. Время уменьшения тока от максимального значения до нуля не должно превышать 5 мкс.

Аппаратура и материалы. Дефектоскопы для магнитопорошкового метода контроля включают источники тока, устройства для подвода тока к детали, устройства для полюсного намагничивания (соленоиды, электромагниты), устройства для нанесения на контролируемую деталь порошка или суспензии, измерители тока (или напряженности поля). В дефектоскопах наиболее распространено циркулярное намагничивание пропусканием переменного тока по детали (или через стержень) и продольное намагничивание постоянным током. Для магнитопорошкового контроля в основном применяют дефектоскопы трех видов, стационарные универсальные, передвижные и переносные, специализированные (стационарные и передвижные).

Стационарные универсальные дефектоскопы широко распространены на предприятиях с крупносерийным выпуском разнотипных деталей. На таких установках можно контролировать детали (или их партии) различной конфигурации с производительностью от десятков до многих сотен деталей в час. На стационарных универсальных установках можно производить намагничивание всеми известными способами (продольное, циркулярное, комбинированное). В СССР выпускают несколько типов стационарных установок, например УМДЭ-2500, ХМД-10П, МД-5 и др. Эти установки различаются родом намагничивающих токов, мощностью и размерами контролируемых деталей.

Из группы переносных и передвижных дефекто-

скопов серийно выпускаются дефектоскопы ПМД-70 и МД-50П. Переносный магнитный дефектоскоп ПМД-70 предназначен для магнитного контроля сварных швов в полевых условиях. В нем реализовано полюсное продольное намагничивание и циркулярное. Передвижной дефектоскоп МД-50П предназначен для контроля крупногабаритных массивных изделий по участкам.

За рубежом выпускается широкая номенклатура дефектоскопов для магнитопорошкового контроля типа VH фирмы «Карл Дейч» (ФРГ), КРН-4Д фирмы «Магнафлокс» (США) и др.

В качестве материала для приготовления порошков в основном используют мелко помолотую закись—окись железа с размером частиц 5—20 мкм. Иногда применяют чистую железную окалину, получаемую при ковке и прокатке, а также стальные опилки, образующиеся при шлифовании стальных изделий. Для лучшей индикации дефектов изделий различного цвета применяют цветные порошки (красный, серебристый и др.). Их получают окрашиванием темных порошков или отжигом по специальной технологии.

Для приготовления магнитных суспензий чаще всего используют масляно-керосиновые смеси (соотношение масла и керосина 1 : 1), содержащие 50—60 г порошка на 1 л жидкости. Могут применяться и водные суспензии, например мыльно-водная с содержанием в 1 л воды 5—6 г мыла, 1 г жидкого стекла и 25—30 г магнитного порошка.

6.3. МАГНИТОГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД

Сущность этого метода заключается в намагничивании контролируемого участка сварного шва и околошовной зоны с одновременной записью магнитного поля на магнитную ленту (рис. 6.5) и последующем считывании полученной информации с нее специальными устройствами магнитографических дефектоскопов.

Методика контроля. Технология магнитографического контроля включает следующие операции (ГОСТ 25225—82):

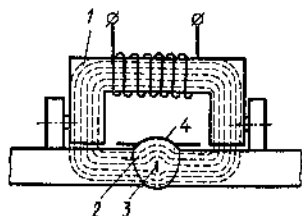


Рис. 6.5. Схема магнитографического контроля:

1 — намагничивающее устройство, 2 — сварной шов, 3 — дефект, 4 — магнитная пленка

1. Осмотр и подготовку поверхности контролируемого изделия. При этом с поверхности контролируемых швов должны быть удалены остатки шлака, брызги расплавленного металла, грязь и т. д.

2. Наложение на шов отрезка магнитной ленты. Перед началом работы магнитная лента должна быть подвергнута размагничиванию. Прижим ленты ко шву плоских изделий производят специальной эластичной «подушкой». При контроле кольцевых швов труб, сосудов и других изделий магнитную ленту к поверхности шва прижимают по всему периметру эластичным резиновым поясом.

3. Намагничивание контролируемого изделия при оптимальных режимах в зависимости от типа намагничивающего устройства, толщины сварного шва и его магнитных свойств.

4. Расшифровку результатов контроля, для чего магнитную ленту устанавливают в считывающее устройство дефектоскопа и по сигналам на экранах дефектоскопа выявляют дефекты.

Магнитографический метод в основном применяют для контроля стыковых швов, выполненных сваркой плавлением, и в первую очередь при дефектоскопии швов магистральных трубопроводов. Этим методом можно контролировать сварные изделия и конструкции толщиной до 20—25 мм.

Чувствительность метода. Чувствительность магнитографического метода контроля K определяется как отношение вертикального размера (глубины) ΔS минимально выявляемого дефекта к толщине основного металла контролируемого изделия S : $K = \Delta S/S$.

Чувствительность магнитографического контроля зависит от размеров, формы, глубины и ориентации дефектов, геометрии поверхности, параметров считывающей головки дефектоскопа и типа магнитной ленты. Магнитографией наиболее уверенно выявляются плоскостные дефекты (трещины, непровары, несплавления), а также протяженные дефекты в виде цепочек шлака, преимущественно ориентированные поперек направления магнитного потока. Значительно хуже выявляются округлые дефекты (поры, шлаковые включения). Практикой установлено, что этим методом уверенно обнаруживаются внутренние плоскостные дефекты, когда их вертикальный размер составляет 8—10% толщины сварного шва. При снятом усилении шва максимальная чувствительность контроля к указанным дефектам достигает 5%. Округлые внутренние дефекты обнаруживаются, когда их размер по высоте не меньше 20% толщины изделия. Чувствительность магнитографического метода к поверхностным дефектам примерно такая же или несколько хуже, чем у магнитопорошкового. Чем

глубже расположен дефект от поверхности изделия, на которую укладывается магнитная лента, тем хуже он выявляется. Современная аппаратура позволяет обнаруживать дефекты с вертикальным размером 10–15% толщины изделия на глубине залегания до 20–25 мм.

На чувствительность магнитографического метода сильно влияют высота и форма усиления шва, а также состояние его поверхности. Для лучшей выявляемости дефектов необходимо выполнять сварку таким образом, чтобы высота усиления шва не превышала 25% толщины основного металла, а переход от наплавленного металла к плоскости был плавным. При этом чешуйчатость на поверхности шва должна составлять не более 25–30% высоты усиления, но не более 1 мм. При контроле швов с грубой чешуйчатостью необходимо производить зачистку шва. Не допускается проводить контроль сварных швов со смещением кромок стыкуемых элементов. Наилучшие результаты получаются при контроле сварных швов, выполненных автоматической сваркой.

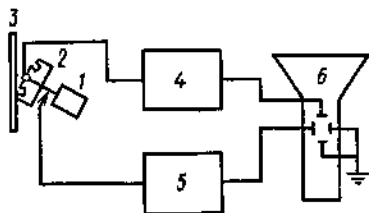
Чувствительность метода можно повысить за счет увеличения чувствительности магнитных лент и избирательности аппаратуры считывания результатов контроля с магнитной ленты.

Схемы намагничивания. При магнитографическом контроле изделия намагничивают с помощью специальных электромагнитов (см. рис. 6.5.), реже применяют циркулярное намагничивание. Для обнаружения внутренних дефектов намагничивание производят постоянным током, а для обнаружения поверхностных и подповерхностных дефектов — переменным током.

Аппаратура и материалы. Считывание результатов контроля с магнитной ленты производится магнитографическими дефектоскопами. Простейшая блок-система магнитографического дефектоскопа изображена на рис. 6.6. Дефектоскоп имеет электродвигатель, приводящий во вращение барабан с несколькими магнитными головками. Головки перемещаются поперек магнитной ленты. Электрические сигналы с головки поступают в усилитель, усиливаются в нем и подаются на электронно-лучевую трубку.

Рис. 6.6. Блок-схема магнитографического дефектоскопа:

1 — электродвигатель, 2 — блок головок, 3 — магнитная лента, 4 — усилитель, 5 — генератор развертки, 6 — электронно-лучевая трубка



Промышленность выпускает дефектоскопы, имеющие два вида индикации: импульсную и телевизионную. При импульсной индикации на экране электронно-лучевой трубки (ЭЛТ) возникают импульсы, амплитуда которых характеризует величину дефектов в вертикальном направлении, а при видеоиндикации магнитный потенциальный рельеф полей рассеяния от дефектов переносится на экран ЭЛТ в виде телевизионного изображения магнитограммы отдельных участков шва.

Известны дефектоскопы типа МД-9 с импульсной индикацией и МД-11 с видимым изображением. Наиболее совершенные дефектоскопы МДУ-2У, МД-10ИМ и МГК-1 имеют двойную индикацию. Из зарубежных дефектоскопов наибольшее применение нашли магнитографы типа 9.052 (институт Ферстера, ФРГ).

В комплект дефектоскопа входит намагничивающее устройство. Намагничивающее устройство состоит из П-образного магнитомягкого сердечника (магнитопровода) и обмотки. Для перемещения намагничивающего устройства вдоль шва оно выполняется с удлиненными полюсами, опирающимися на четыре немагнитных ролика. Опорные ролики создают между поверхностью контролируемого изделия и полюсами намагничивающего устройства воздушный зазор (2—3 мм) постоянной величины, позволяющий электромагниту свободно перемещаться вдоль сварного шва. Промышленность выпускает несколько типоразмеров передвижных намагничивающих устройств (ПНУ): ПНУ-М1, ПНУ-М2, УНУ, которые предназначены для намагничивания сварных стыков труб диаметром 150—1200 мм и плоских изделий толщиной до 16 мм. Для магнитографического контроля сварных швов труб большого диаметра (до 1420 мм) и плоских конструкций толщиной до 20 мм применяют шаговые намагничивающие устройства (МНУ-1). Намагничивание кольцевых швов труб диаметром 57—150 мм производят неподвижным намагничивающим устройством типа НВУ-1.

Все перечисленные намагничивающие устройства питаются постоянным током. В заводских условиях источниками тока служат выпрямители, а в полевых условиях часто применяют переносные автономные станции типа СПП-1 или СПА-1.

Для записи магнитных полей при магнитографическом контроле применяют магнитную ленту. Лента выполняется на триацетатной или лавсановой основе с нанесением на нее мельчайших ферромагнитных частиц. В настоящее время серийно выпускаются ленты типа МК-1 (на триацетатной основе) и МК-2 (на лавсановой основе) шириной 35 мм. Лента МК-2 обладает более высокими физико-механическими свойствами,

чем лента МК-1, и может применяться при температурах окружающего воздуха от $+70$ до -70°C ; лента МК-1 при температурах ниже -30°C теряет эластичность.

6.4. ВИХРЕТОКОВАЯ ДЕФЕКТОСКОПИЯ

Физические основы. Физическую сущность метода можно пояснить следующим образом. Пусть имеются две рядом расположенные катушки (например, трансформатор без сердечника). Если по первой *I* катушке (рис. 6.7) пропустить ток, то при изменении силы тока в ней или при изменении положения катушек во второй *II* наводится электродвижущая сила (эдс). В процессе контроля второй катушкой является контролируемое изделие, в котором наводятся вихревые токи (рис. 6.8). Вихревые токи в металле текут в поверхностном слое со стороны источника поля. Интенсивность и распределение вихревых токов в изделии зависят от его геометрических размеров и электромагнитных параметров. При наличии дефектов в изделии увеличивается сопротивление поверхностного слоя, что приводит к ослаблению вихревых токов, которое регистрируется катушкой-датчиком. Таким образом, электромагнитные методы контроля основаны на регистрации изменения поля вихревых токов, наводимых в изделии.

Методика контроля. Методика контроля (рис. 6.9) включает следующие основные операции:

1. Внешний осмотр изделия и устранение наружных дефектов, мешающих проведению контроля.

2. Установление ползадающей системы *I* на контроли-

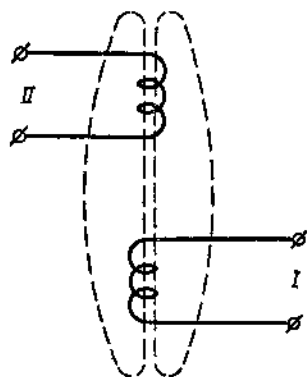


Рис. 6.7. Схема из двух взаимосвязанных катушек

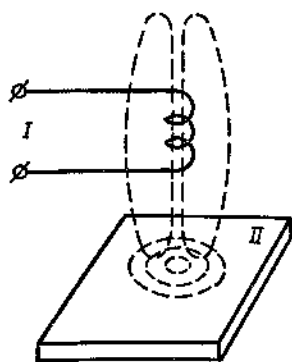


Рис. 6.8. Схема образования вихревых токов в контролируемом объекте

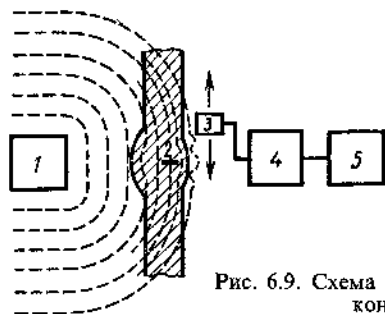


Рис. 6.9. Схема электромагнитного контроля

руемое изделие 2 и пропускание тока через возбуждающую катушку.

3. Сканирование датчика 3 и регистрирующих приборов 4, 5 вдоль поверхности контролируемого объекта.

4. Расшифровку результатов контроля и оценку качества изделия.

Электромагнитный метод применяют для контроля точечной сварки алюминиевых сплавов. В случае наличия литого ядра электропроводность в зоне последнего для сплавов Д16АМг уменьшается на 10–15% по сравнению с электропроводностью основного металла. Для В95, АМг6 и других сплавов это изменение может достигать 15–30%. При наличии дефектов типа «слипание» или непровара электропроводность литого ядра примерно равна электропроводности основного металла.

Электромагнитный метод пока широко не применяют при контроле сварных швов, так как электропроводность отдельных зон шва и околошовной зоны значительно меняется, что создает большие помехи при выявлении дефектов сварки.

Чувствительность метода. На чувствительность электромагнитного метода значительное влияние оказывает зазор между датчиком и поверхностью контролируемого изделия, а также их взаимное расположение, форма и размеры. С увеличением зазора резко падает чувствительность метода. Допускаемый максимальный зазор 2 мм. Структурная неоднородность существенно снижает чувствительность метода к обнаружению дефектов. Этим методом удастся выявить поверхностные и подповерхностные трещины глубиной 0,1–0,2 мм и протяженностью более 1 мм, расположенные на глубине до 1 мм.

Перечисленные геометрические факторы обусловили ряд новых возможностей метода вихревых токов: измерение толщины слоя гальванических, лакокрасочных, теплоизоляционных покрытий и пленок, определение толщины стенки труб, пусто-

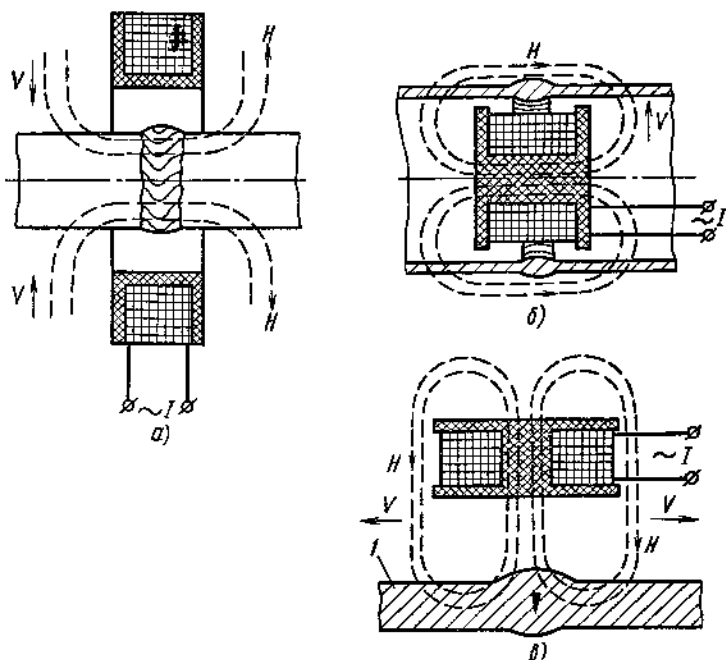


Рис. 6.10. Основные схемы полезающих систем электромагнитного контроля:

H — вектор напряженности магнитного поля, V — направление электромагнитной волны

тельных деталей и других тонколистовых изделий при одностороннем доступе к ним, измерение диаметра прутков и проволоки. Однако в ряде случаев геометрические факторы существенно затрудняют практическое применение метода. Последнее объясняется тем, что при контроле деталей, например, по свойствам их материала, связанным с электропроводностью, отклонения в размерах деталей (даже в пределах допусков) могут оказывать более сильное влияние на параметры датчика, чем исследуемые свойства материала деталей.

Способ контроля. Электромагнитные методы подразделяются в основном по полезающим системам. Полезающие системы могут быть проходными, если катушка с током охватывает детали или вставляется в нее (рис. 6.10, а, б) и накладными, когда катушку с током устанавливают на деталь торцом (рис. 6.10, в). В первом случае электромагнитная волна от полезающей системы распространяется в направле-

нии контролируемого объекта, во втором — вдоль его поверхности. Измерительные катушки (датчики) могут быть выполнены отдельно от полезающих (генераторных) и обычно располагаются вблизи поверхности контролируемого изделия (рис. 6.11).

Накладные преобразователи выполняют с ферромагнитным сердечником или без него. Ферромагнитный сердечник (обычно ферритовый) повышает абсолютную чувствительность преобразователя и уменьшает зону контроля за счет локализации магнитного потока.

Проходные вихретоковые преобразователи (ВТП) подразделяют на наружные и внутренние. Такая классификация проходных преобразователей основана на том, что они в процессе контроля проходят или снаружи объекта, охватывая его, или внутри объекта.

Накладные ВТП применяют в основном при контроле качества объектов с плоскими поверхностями и объектов сложной формы, а также в тех случаях, когда требуется обеспечить локальность и высокую чувствительность.

Наружные проходные ВТП используют при контроле линейно-протяженных объектов (проволока, прутки, трубы и т. д.), а также при массовом контроле мелких изделий. Внутренними проходными ВТП контролируют внутренние поверхности трубы, а также стенки отверстий в различных деталях.

Дефектоскопы с проходными преобразователями. При автоматизированном, высокоскоростном и бесконтактном контроле качества эффективно применяют дефектоскопы с проходными преобразователями, позволяющими проверять в широком диапазоне типоразмеров протяженные объекты (трубы, прутки, проволоку с поперечными размерами 0,15—135 мм) и мелкие детали (шарики и ролики подшипников, метизы и т. д.). При этом производительность контроля может достигать 50 м/с (для проволоки) или несколько тысяч мелких деталей

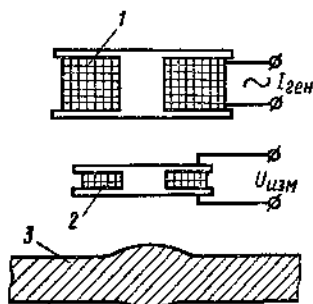


Рис. 6.11. Схема регистрации параметров электромагнитного поля:

1 — полезающая (генераторная) катушка, 2 — измерительная катушка, 3 — контролируемое изделие

в час. Производительность контроля труб, прутков ограничивается инерционностью устройств транспортировки и разбраковки и редко превышает 3 м/с.

Основной параметр дефектоскопа — порог чувствительности — определяется минимальными размерами дефекта заданной формы, при которых отношение сигнал — помеха равно двум. Порог чувствительности обычно устанавливается с помощью калиброванного образца с искусственными дефектами различной формы, например в виде отверстий разного диаметра и глубины в трубах и прутках, в виде продольных рисок на проволоке и т. д. Реальный порог чувствительности зависит от уровня помех, связанных с вариацией параметров объекта, например шероховатости поверхности и др. Порог чувствительности дефектоскопа с проходными преобразователями обычно определяется глубиной узкого длинного продольного дефекта, выраженной в процентах от поперечного размера (диаметра детали).

Дефектоскопы отличаются главным образом конструкцией, наличием блоков сортировки, блоков представления и регистрации информации, блоков маркировки дефектных участков, блоков подмагничивания и т. д. В настоящее время широко применяют отечественные дефектоскопы ИПП-1М, ТНМ-1М, ИДП-1, ВД-30П, АСК-12, ЭЗТМ, ДКВ-2, ВД-20П.

Дефектоскоп ИПП-1М предназначен для выявления в условиях поточного производства поверхностных дефектов в прутках круглого и шестигранного профилей диаметром 4—47 мм, выполненных из ферромагнитных и неферромагнитных металлов и сплавов. Глубина порогового дефекта 1—2% диаметра, но не менее 0,1 мм; длина 2 мм.

Прибор ИДП-1 предназначен для выявления в прутках диаметром 1—5 мм из неферромагнитных и ферромагнитных металлов и сплавов поверхностных дефектов: трещин, волосовин, раковин и т. п. Глубина порогового дефекта 0,05 мм.

Ферромагнитные сварные трубы диаметром до 60 мм контролируют дефектоскопом ЭЗТМ. Проходной преобразователь, выполненный в виде трехвитковой трансформаторной системы, обеспечивает надежную работу устройства в условиях высоких температур при наличии окалины, масел. Дефектоскоп обнаруживает непровары в сварном шве и служит надежной основой для замены гидроиспытаний.

Для контроля протяженных изделий широкого сортамента, типоразмеров и марок материалов разработан универсальный дефектоскоп ВД-30П.

Из зарубежных дефектоскопов наиболее совершенны приборы института Ферстера (ФРГ). В нашей стране их

успешно применяют для контроля труб, прутков, проволоки из ферромагнитных (преимущественно) и неферромагнитных материалов и сплавов. Трубы и прутки контролируют приборами «Дефектограф 2.181», «Дефектовар 2.187», «Дефектомат 2.189», прутки, проволоки, нагретые до 1000 °С, — прибором «Дефектотерм 2.186». Все они выполнены по структурным схемам с выделением информации модуляционным способом и способом проекции. Приборы снабжены набором проходных преобразователей с короткими возбуждающими катушками, а «Дефектовар» — набором внутренних проходных преобразователей с устройством «Интратест 2.187.1» для контроля внутренней поверхности труб.

Дефектоскопы с накладными преобразователями. Для контроля линейно-протяженных объектов круглого сечения (прутки, трубы) применяют сканирующие дефектоскопы с вращающимися вокруг объекта накладными преобразователями. К ним относятся приборы ВД-40Н, ВД-41Н, ВД-43Н. Такие дефектоскопы предназначены для выявления поверхностных дефектов в изделиях из ферромагнитных и слабомагнитных сталей, а также из цветных металлов и сплавов.

Для контроля плоских деталей типа листов, а также изделий, имеющих малую кривизну поверхности, разработан ряд переносных малогабаритных дефектоскопов с преобразователями, вращающимися в плоскости, параллельной поверхности объекта. Наиболее характерен дефектоскоп типа ЭДМ-65. Он предназначен для выявления поверхностных дефектов в зачищенных сварных швах деталей из алюминиевых сплавов.

Сканирующие дефектоскопы, имеющие сравнительно большой диаметр головки, трудно применять для контроля изделий сложной конфигурации. В этих случаях обычно используют переносные и малогабаритные дефектоскопы с малым диаметром преобразователя, работающие в статическом режиме. Наиболее характерны дефектоскопы серий ДНМ и ВД-20НСТ. Приборы серии ДНМ (ДНМ-15, ДНМ-500, ДНМ-2000) предназначены для контроля качества поверхности деталей из алюминиевых и жаропрочных сплавов. Дефектоскоп ВД-20НСТ предназначен для выявления поверхностных дефектов в ферромагнитных и неферромагнитных материалах.

Для контроля мелких деталей (в основном деталей подшипников) разработаны приборы СК27-МДШ5, СК-39, СК-31, МДР-1, МДР-2, МДР-3 отраслевого назначения.

Из зарубежных дефектоскопов наиболее характерны различные модификации приборов института Ферстера серии «Циркограф» и «Дефектометр». Приборы серии «Циркограф» пред-

ставляют собой дефектоскопы с вращающимися накладными преобразователями. Эти приборы снабжены сменными сканирующими головками, что позволяет контролировать детали с диаметром от 2 до 120 мм. Для контроля коротких деталей и изделий, имеющих поверхность вращения сложной формы, к прибору подключается гребенка с плавающими преобразователями, закрепленная в специальных державках. Для контроля внутренней поверхности труб «Циркограф» снабжен внутренними вращающимися преобразователями, которые могут устанавливаться в стационарном или в переносном (в виде ручной дрели) устройстве.

Контрольные вопросы

1. На чем основано выявление дефектов при магнитных и электромагнитных методах контроля?
2. Какие факторы влияют на чувствительность магнитных и электромагнитных методов контроля?
3. Перечислите схемы намагничивания, применяющиеся при магнитных методах контроля.
4. Для каких изделий применимы различные методы электромагнитного контроля?

7. КАПИЛЛЯРНАЯ ДЕФЕКТОСКОПИЯ

7.1. КЛАССИФИКАЦИЯ

Капиллярные методы контроля предназначены для обнаружения нарушений сплошности в поверхностных слоях изделий из металлов и неметаллов.

В большинстве случаев по техническим требованиям необходимо выявлять настолько малые дефекты, что заметить их при визуальном осмотре невооруженным глазом практически невозможно. Применение же оптических приборов, например лупы или микроскопа, не позволяет выявить поверхностные дефекты из-за недостаточной контрастности изображения дефекта на фоне металла и малого поля зрения при больших увеличениях.

Изменить соотношение контрастностей изображения дефекта и фона можно двумя способами. Первый способ заключается в полировании поверхности контролируемого изделия с последующим травлением ее кислотами. При такой обработке дефект забивается продуктами коррозии, чернеет и становится заметным на светлом фоне полированного материала. Этот способ имеет целый ряд ограничений. В частности, в производственных условиях совершенно нерентабельно поли-

ровать поверхность изделия, особенно сварных швов. К тому же способ неприменим при контроле прецизионных полированных деталей или неметаллических материалов. Способ травления чаще применяют для контроля каких-либо локальных подозрительных участков металлических изделий.

Второй способ состоит в изменении светотдачи дефектов заполнением их с поверхности специальными свето- и цвето-контрастными индикаторными жидкостями — пенетрантами. Если в состав пенетранта входят люминесцирующие вещества, т. е. вещества, дающие яркое свечение при облучении их ультрафиолетовым светом, то такие жидкости называются люминесцентными, а метод контроля соответственно — люминесцентным (люминесцентная дефектоскопия — ЛД). Если же основой пенетранта являются красители, видимые при дневном свете, то метод контроля называют цветным (цветная дефектоскопия — ЦД). В ЦД используют красители ярко-красного цвета.

Сущность капиллярной дефектоскопии заключается в следующем. Поверхность изделия очищают от грязи, пыли, жировых загрязнений, остатков флюса, лакокрасочных покрытий и т. п. После очистки, обезжиривания и сушки на подготовленную поверхность контролируемого изделия наносят слой пенетранта и некоторое время выдерживают, чтобы жидкость смогла проникнуть в открытые полости дефектов. Затем поверхность очищают от жидкости, часть которой остается в полостях дефектов. Чтобы повысить выявляемость дефектов, на поверхность изделия после удаления с нее пенетранта наносят специальный проявляющий материал в виде быстро сохнущей суспензии (например, каолина, коллодия) или лаковые покрытия. Проявляющий материал (обычно белого цвета) вытягивает пенетрант из полости дефектов, что приводит к образованию на проявителе индикаторных следов. Индикаторные следы полностью повторяют конфигурацию дефектов в плане, но больше их по размерам. Такие индикаторные следы легко различимы глазом даже без использования оптических средств. Размер индикаторного следа тем больше, чем глубже дефект, т. е. чем больше в нем пенетранта (рис. 7.1) и чем больше выдержка с момента нанесения проявляющего слоя.

Физической основой капиллярных методов дефектоскопии служит явление капиллярной активности, т. е. способность жидкости втягиваться в мельчайшие сквозные отверстия и открытые с одного конца каналы. При попадании жидкости в капиллярный канал ее поверхность искривляется, образуя так называемый мениск. Силы поверхностного натяжения стремятся уменьшить величину свободной границы мениска,

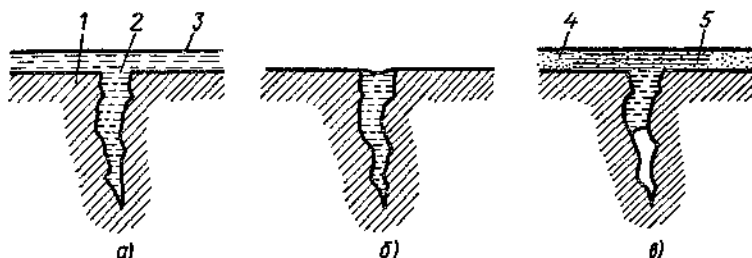


Рис. 7.1. Схема контроля деталей капиллярным методом с применением проявителя:

a — полость трещины заполнена проникающей жидкостью, *б* — жидкость удалена с поверхности детали, *в* — нанесен проявитель, трещина выявлена; 1 — деталь, 2 — полость трещины, 3 — проникающая жидкость, 4 — проявитель, 5 — индикаторный след трещины

и в капилляре начинает действовать дополнительная сила, приводящая к всасыванию смачивающей жидкости. Глубина, на которую жидкость проникает в капилляр, прямо пропорциональна коэффициенту поверхностного натяжения жидкости и обратно пропорциональна радиусу капилляра. Иными словами, чем меньше радиус капилляра (дефекта) и лучше смачиваемость материала, тем жидкость быстрее и на большую глубину проникает в капилляр.

7.2. МЕТОДИКА КАПИЛЛЯРНОГО КОНТРОЛЯ

Процесс контроля капиллярными методами складывается из следующих технологических операций: подготовки изделия к контролю, обработки его дефектоскопическими материалами, выявления дефектов и окончательной очистки изделия.

Подготовка изделия. Она заключается в удалении всевозможных загрязнений, лакокрасочных покрытий, в обезжиривании и сушке контролируемой поверхности.

Для очистки поверхности применяют комбинацию способов механической обработки (шлифование, полирование, шабровку и др.) с последующей промывкой и протиркой поверхности легколетучими жидкими растворителями (скипидаром, ацетоном, бензином, спиртом и др.). Способ очистки выбирают таким, чтобы удалить загрязнения из полости, но не внести в них новые. Сварные швы и околошовные зоны обрабатывают абразивным кругом, а затем наждачной шкуркой различной зернистости. Такая механическая обработка позволяет удалить все неровности (чешуйчатость, наплывы, подрезы) и сгладить валик усиления шва.

Однако в процессе такой очистки абразивная и металлическая пыль заполняет полости дефектов, а тонкий слой пластически деформированного металла закрывает их. Поэтому после механической обработки поверхность должна быть протравлена для вскрытия полостей дефектов.

Следует отметить, что тщательность очистки поверхности во многом определяет чувствительность контроля. Поэтому в настоящее время помимо упомянутых способов очистки применяют весьма перспективный ультразвуковой способ очистки, при котором изделие погружают в ванну с жидкими растворителями и обрабатывают его мощным потоком ультразвукового излучения, используют также анодно-ультразвуковую очистку, при которой на изделие, помещенное в ванну с травильными составами, одновременно воздействуют ультразвук и электрический ток.

Обработка изделия дефектоскопическими материалами. Процесс обработки дефектоскопическими материалами (табл. 7.1) заключается в заполнении полостей дефектов индикаторной жидкостью, в удалении ее избытка и нанесении проявителя.

В состав пенетрантов на водяной основе входят люминесцирующие вещества или красители, а также ингибиторы, т. е. вещества, тормозящие окислительные процессы. Пенетранты наиболее технологичны, безопасны, не воспламеняются и легко удаляются с поверхности простым смывом. Однако в последнем заключается их основной недостаток, так как при смыве удаляется часть жидкости и из полостей дефектов, что снижает чувствительность контроля. Поэтому пенетранты на водяной основе применяют ограниченно.

Наиболее распространены пенетранты на основе различных органических жидкостей (керосина, скипидара, бензола, уайт-спирита и др.). Хотя они и требуют осторожности в обращении, но зато обеспечивают высокую чувствительность выявления дефектов.

Пенетрант наиболее целесообразно наносить с помощью пульверизатора или мягкой кистью. При этом время выдержки независимо от величины образовавшихся дефектов не должно превышать 5 мин.

Выявление дефектов. В методах капиллярной дефектоскопии различают следующие пять способов проявления.

При порошковом («сухом») способе используют проявитель в виде сухого, преимущественно белого сорбента (каолин, мел и др.), поглощающего индикаторный пенетрант.

«Мокрый» способ основан на использовании проявителя в виде концентрированной суспензии, т. е. белого порошка,

7.1. Наборы дефектоскопических материалов, рекомендуемые для массового применения

Отраслевой шифр набора	Условный уровень чувствитель- ности	Рабочая темпера- тура, °С	Рецептура					
			пенетранта		проявителя		очистителя	
			состав	содержание	состав	содержание	состав	содержание
			Люминесцентный метод					
ЛЮМ-А	I	20	Люмоген № 2	20 г	Нитрозмаль белая «Экстра»	30 % (мас.)	Спирт	80 % (мас.)
			ВНИИМ					
			Дитоллил- метан	500 мл	Коллодий ме- дицинский	30 % (мас.)	Эмульга- тор, ОП-7	20 % (мас.)
			Спирт Эмульга- тор, ОП-7	400 мл 100 мл	Ацетон	40 % (мас.)	—	—
ЛЮМ-Б	II	20	Нориол	15 % (мас.)	Бентонит	0,72—2,21 % (мас.)	Спирт	80 % (мас.)
			А		Каолин	6,67—10 % (мас.)	Эмульга- тор, ОП-7	20 % (мас.)
			Керосин топливный	85 % (мас.)	Вода	92—87 % (мас.)	—	—
Цветной метод								
ДК-1 (ЦНИИТмаш)	I	20	Керосин	800 мл	Спирт	500 мл	Вода	99 % (мас.)
			Нориол	200 мл	Вода	500 мл	Эмульга- тор, ОП-7, ОП-10	1 % (мас.)
			А				—	—
			Судан красный 5С	10 г/л	Каолин	400 г/л	—	—

Отраслевой инфр набора	Условный уровень чувствитель- ности	Рабочая темпера- тура, °С	Рецептура					
			пенетранта		проявителя		очистителя	
			состав	содержание	состав	содержание	состав	содержание
ДК-2 (ЦНИИТмаш)	I	20	Родамин С	3 % (мас.)	Каолин	23—26 % (мас.)	Спирт, ОП-7	80 мл 100 мл
			ОП-7	10 мл	Смазиватель СВ-102/50	4,2—4,5 мл	ОП-7	—
Аэро-12А	I (домини- сцентный) II (цвет- ной)	0—40	Спирт	100 мл	Этиленгликоль	3,5—4,0 мл	—	—
			Спирт	90 % (мас.)	Вода	100 мл	Спирт	80 % (мас.)
			ОП-7	10 % (мас.)	Нитрозмаль	30 % (мас.)	ОП-7	20 % (мас.)
			Родамин С	30 г/л	белая «Экстра» Коллоидный ме- дицинский Ацетон	30 % (мас.) 40 % (мас.)	—	—

размешанного (диспергированного) в летучих растворителях (керосине, бензоле и др.), воде или их смесях.

При нанесении на металл слоя краски или лака используют проявитель, состоящий из пигментированного или бесцветного быстросохнущего раствора (например, коллодия), поглощающего (сорбирующего) индикаторный пенетрант.

Пленочный проявитель состоит из бесцветной или белой индикаторной ленты с проявляющим слоем. Слой поглощает индикаторный пенетрант, легко отделяется с индикаторным слоем дефекта от контролируемой поверхности. Пленочный проявитель технологичен и, что самое главное, дает возможность получать дефектограмму, анализировать ее отдельно от изделия и сохранять как объективный документ контроля.

В самопроявляющем способе различают два варианта. Беспорошковый (кристаллофлуорофорный) вариант, при котором деталь погружают в раствор органических кристаллов люминофора в летучем растворителе, а затем извлекают из индикаторной жидкости. Растворитель быстро испаряется, а кристаллы люминофора оседают на краях дефекта. Эти кристаллы ярко люминесцируют под воздействием ультразвукового излучения. Чтобы устранить фоновое свечение всей детали, ее обрабатывают в специальном растворе ингибитора, гасящем люминесценцию на поверхности, но практически не влияющем на люминофор, проникший в капиллярные полости дефекта.

Разновидностью этого способа проявления является самопроявляющий вариант, при котором после пропитки и очистки деталь нагревают, заменяя тем самым проявление. При нагревании специальная индикаторная жидкость выходит из полости дефекта, затвердевает и образует индикаторный след, люминесцирующий под воздействием ультрафиолетового излучения.

При люминесцентной дефектоскопии используют все упомянутые выше способы проявления. Проявление порошком или суспензией наиболее распространено в силу простоты и доступности материалов, но наименее эффективно. Поэтому в ЛД все чаще применяют пленочный и самопроявляющий способы проявления.

В ЦД применяют в основном порошкообразные сорбенты в виде суспензий и белые проявляющие лаки. Чувствительность лаковых проявителей выше.

В зависимости от размеров выявляемых дефектов ГОСТ 18442—73 устанавливает четыре условных уровня чувствительности (табл. 7.2). Для оценки условного уровня чувствительности используют тест-образцы с естественными или искусственными дефектами. Наиболее часто в качестве тест-образцов

7.2. Условные уровни чувствительности

Условный уровень чувствительности	Размеры дефекта, мкм		
	ширина	глубина	длина
I	<1	≤10	≤0,1
II	≤10	≤100	≤1
III	≤100	≤1000	≤10
IV	100 и более	1000 и более	10 и более

используют образцы, в которых имеются трещины, полученные при неправильных режимах шлифования.

После нанесения проявителя на поверхность ее сушат потоком теплого воздуха, а затем производят осмотр поверхности изделия. Осмотр производят дважды — через 5 и 20 мин после нанесения проявителя. В случае ЛД осмотр изделия производят при освещении объекта ультрафиолетовым излучением. При ЦД осмотр осуществляется при электрическом освещении и дневном свете. Освещенность на рабочем участке должна быть не менее 500 лк.

Осмотр проводят невооруженным глазом с применением в случае необходимости луп малого увеличения (1,5—2×) с большим полем зрения. Анализ обнаруженного индикаторного следа проводят с применением оптических средств.

Рисунок индикаторных следов и топография их расположения позволяют судить довольно уверенно о характере дефектов. Так, трещины любого происхождения, волосовины, заковы, неслитины, непровары, неспаи, окисные пленки выявляются в виде четких, иногда прерывистых, окрашенных или люминесцирующих линий различной конфигурации. Растрескивание материала, межкристаллитная коррозия участков поверхности крупнозернистых сплавов проявляется в виде группы отдельных коротких линий или их сетки. Межкристаллитная коррозия участков поверхности мелкозернистых сплавов выявляется в виде пятен, размытых полос. Поры, язвенная коррозия, отдельные очаги межкристаллитной коррозии, выкрашивание материала, эрозийные повреждения поверхности выявляются в виде отдельных точек или звездочек.

Индикаторный рисунок на поверхности детали может быть образован также различными допустимыми повреждениями или загрязнениями поверхности. Задачей контролера является по различным дополнительным признакам отличить эти ложные дефекты от истинных. Отбраковку изделия производят, если количество и размеры выявленных штрихов, линий и точек больше допустимых значений. После проведения контроля

изделие очищают от проявителя протиркой его поверхности растворителями, промывкой и другими способами.

Большое значение при контроле придется выявлению зарождающихся микротрещин с исчезающе малым раскрытием. Такие микродефекты могут быть выявлены с помощью газосорбционного метода. Изделие помещают в вакуумную камеру для того, чтобы освободить полости поверхностных дефектов от молекул воздуха. Затем в камеру вводят радиоактивный газ криптон-85. При этом молекулы газа адсорбируются поверхностными дефектами. Затем изделие удаляют из камеры и на его поверхность накладывают детектор излучения (например, высокочувствительную радиографическую или фото пленку). В местах скопления радиоактивного газа, т. е. в дефектах, пленка засвечивается, и после ее фотообработки на снимке получается визуальное изображение поверхностных дефектов. В перспективе этим методом можно контролировать протяженные сварные соединения крупногабаритных изделий, применяя локальные вакуумные камеры.

Аппаратура. Промышленностью выпускаются различные типы переносных и стационарных дефектоскопов. Наиболее перспективен переносный аэрозольный комплект КД-40ЛЦ. Он предназначен для контроля изделий в полевых, цеховых и лабораторных условиях цветным, люминесцентным и люминесцентно-цветным методами. В комплект входят разборные аэрозольные баллоны, которые можно многократно заряжать дефектоскопическими материалами на зарядном стенде, входящем в комплект. Баллоны комплектованы в три набора, один из которых подогревается электрически, что позволяет проводить контроль при температуре окружающей среды до -40°C . В комплект входит также ультрафиолетовый облучатель КД-33Л.

Для ЦД при небольшом объеме работ используют переносные дефектоскопы ДМК-4, ДАК-2Ц. ДМК-4 выполнен в виде чемодана с гнездами и секциями, в которых размещены принадлежности для контроля: емкости с расходными растворителями, краской и жидкостью, пеналы с кистями и лупы. Дефектоскоп массой 7 кг имеет небольшие габаритные размеры $430 \times 250 \times 200$ мм.

Для контроля изделий на стендах в цехах и лабораториях широко применяют стационарные дефектоскопы, позволяющие механизировать и автоматизировать ряд операций. Эти дефектоскопы снабжены рольгангами, транспортерами для механизированной подачи изделий на контроль, распылительными камерами, мощными осветителями и другими устройствами.

Для автоматизации процессов осмотра и оценки качества изделий начинает применяться телевизионная техника с элек-

тронно-вычислительными машинами. Производительность таких дефектоскопов доходит до 500 и более малогабаритных деталей в час.

Контрольные вопросы

1. На каком физическом явлении основаны методы капиллярной дефектоскопии?
2. Укажите состав и назначение дефектоскопических материалов.
3. Назовите основные технологические операции капиллярного контроля.
4. Перечислите оборудование для капиллярной дефектоскопии.

8. КОНТРОЛЬ ТЕЧЕИСКАНИЕМ

8.1. КЛАССИФИКАЦИЯ

Основным эксплуатационным требованием, предъявляемым к изделиям замкнутого типа (сосудам, трубопроводам), является непроницаемость, или герметичность, их стенок и сварных соединений. Герметичность — это свойство изделия ограничивать проникновение жидкости или газа сквозь элементы конструкций и их соединения. Степень герметичности измеряют величиной течи (утечки) газа или жидкости в единицу времени.

Испытание изделий на герметичность, или контроль течеисканием, выполняют с применением пробных веществ (жидкостей или газов), которые легко проникают через сквозные дефекты и хорошо различимы визуально или с помощью приборов — течеискателей и других средств регистрации.

Контроль течеисканием позволяет обнаруживать в сварных соединениях и основном металле изделий сквозные дефекты типа трещин, непроваров, газовых пор, свищей, прожогов и др. Величину сквозного дефекта ввиду невозможности измерения его линейных размеров условно оценивают потоком пробного вещества, протекающего через дефект в единицу времени. Контроль течеисканием согласно ГОСТ 18353—73 классифицируют на капиллярные, компрессионные и вакуумные методы, которые, в свою очередь, в зависимости от вида и способов индикации пробного вещества, аппаратуры и технологических особенностей применения имеют разновидности, приведенные на рис. 8.1.

Выбор метода течеискания определяется уровнем требований к степени герметичности испытуемых объектов, направлением и величиной рабочей газовой нагрузки на оболочку, пробными веществами, допустимыми к применению.

Направление и величина нагрузки при испытаниях по воз-

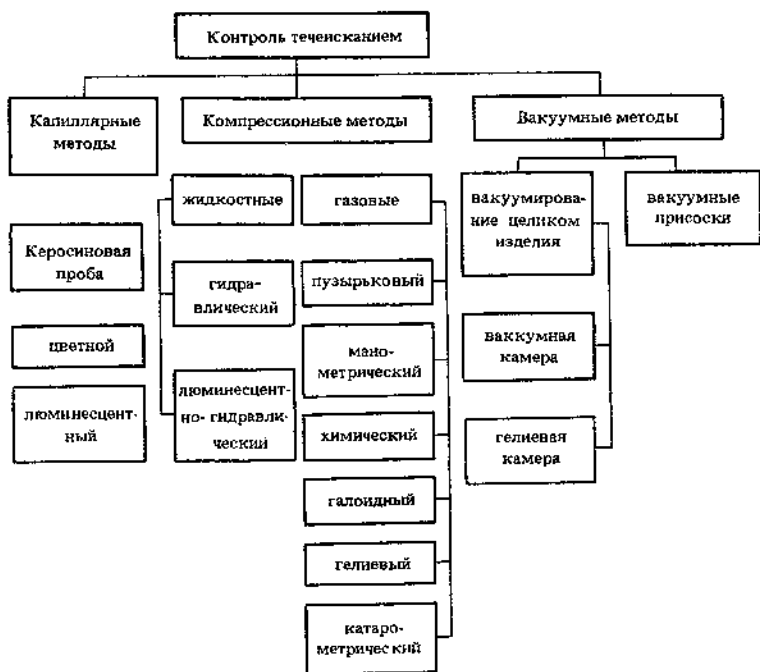


Рис. 8.1. Методы контроля течением

возможности должны совпадать с рабочим давлением в связи с возможными деформациями материала оболочки и появлением течи.

8.2. КАПИЛЛЯРНЫЕ МЕТОДЫ

Капиллярные методы контроля основаны на явлении капиллярного проникновения жидкости, обладающей высокой смачивающей способностью, в сквозные дефекты. При контроле на одну поверхность изделия, предварительно очищенную от загрязнений, обильно наносят проникающую жидкость, например керосин, а на другую — адсорбирующее покрытие в виде меловой обмазки, содержащей 350—480 г молотого мела (или каолина) в 1 л воды.

После определенной выдержки контролируемое соединение осматривают, выявляя сквозные дефекты по желтым пятнам керосина на меловой обмазке. Часто для улучшения выявления пятен керосина добавляют красители ярко-красного цвета (например, 2,5 г «судана-III» на 1 л керосина) или люминес-

цирующие вещества. Метод керосиновой пробы позволяет выявить сквозные дефекты с эффективным диаметром более 0,1 мм. Иногда для повышения чувствительности и производительности контроля поверхность испытуемого изделия после смачивания ее керосином обдувают сжатым воздухом под давлением 0,3—0,4 МПа. Под этим избыточным давлением керосин легче и быстрее проникает в полости дефектов.

Метод керосиновой пробы применяют при контроле сварных соединений наливных емкостей, нефтяных резервуаров, цистерн и других изделий, в которых возможен доступ к сварным швам с обеих сторон.

Другие капиллярные методы течеискания основаны на использовании пенетрантов — красок (цветной метод) или люминофоров (люминесцентный метод).

8.3. КОМПРЕССИОННЫЕ МЕТОДЫ

Компрессионные методы контроля основаны на создании в испытуемом изделии (замкнутой системе) избыточного давления пробного вещества (жидкости или газа) и регистрации на наружной поверхности изделия мест течи пробного вещества. В зависимости от типа пробного вещества различают жидкостные (гидравлические) и газовые методы течеискания.

Жидкостные методы течеискания. Гидравлический метод течеискания применяют в качестве обязательного при контроле различных замкнутых систем (например, паровых котлов, нефтехимического аппарата и др.), работающих под давлением. Контролируемое изделие заполняют рабочей жидкостью или водой, герметизируют, а затем с помощью гидравлического насоса создают в нем избыточное давление и выдерживают под этим давлением некоторое время. Затем производят визуальный осмотр наружной поверхности изделия. Признаком дефекта является появление капель жидкости (например, воды) или отпотевание наружной поверхности. Такой метод контроля позволяет выявлять течи диаметром около 10^{-3} мм. Гидравлическим испытаниям должен предшествовать контроль радиационный или ультразвуковой, если они предусмотрены техническими условиями.

Разновидностью компрессионного метода является люминесцентно-гидравлический, отличающийся тем, что в состав пробного вещества добавляют люминофор и осмотр наружной поверхности изделия проводят в ультрафиолетовом свете.

Иногда для лучшей выявляемости дефектов при гидравлическом методе контроля на наружную поверхность изделия

наносят индикаторное покрытие, в состав которого входит люминесцентное вещество, например динариевая соль флуоресцина, люминесцирующая при попадании на нее воды, и сорбент (крахмал), удерживающий воду в течение длительного времени. Место сквозного дефекта на таком покрытии проявляется в ультрафиолетовом свете в виде зеленого свечения.

Важным элементом при проведении гидравлических испытаний является правильный выбор давления, создаваемого в изделии. Обычно испытания на герметичность совмещают с гидравлическими испытаниями изделия на прочность и проводят их при давлении, в 1,1–1,5 раза превышающем рабочее. При контроле в условиях серийного производства, например спирально-шовных и продольно-шовных труб для газонефтепроводов, применяют специальные испытательные стенды.

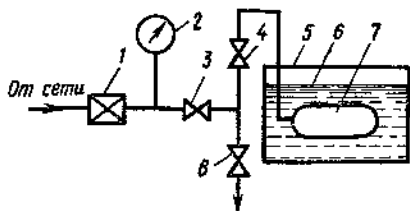
Гидравлический метод иногда применяют и для испытания открытых сосудов, например отстойников. В этих случаях контроль сосудов производят наливом в них жидкости, обстукиванием и осмотром наружной поверхности швов.

Газовые методы течения. Они являются более чувствительными, чем жидкостные, поскольку пробные вещества — газы — значительно легче проходят через мелкие сквозные дефекты. Газовые методы контроля применяют исключительно для испытания замкнутых объемов. Самый простой из газовых методов — пузырьковый, заключающийся в погружении изделия, в котором с помощью, например, воздуха создано избыточное давление, в водяную ванну и регистрации мест течи по появляющимся пузырькам (рис. 8.2). Если размеры изделия велики и в ванну его не поместить, то наружную поверхность изделия покрывают пенообразующим веществом (мыльным раствором) и места течи фиксируют по мыльным пузырькам. Основой пенного индикатора служат поверхностно-активные вещества типа «Лотос», «Ладога» и другие и влагоудерживающий компонент — глицерин (до 90%) с хромпиком (0,01%). Пузырьковый способ позволяет выявить довольно мелкие течи диаметром до 10^{-3} мм.

Химические компрессионные методы основаны на использовании для индикации течей химических реак-

Рис. 8.2. Схема пузырькового метода контроля течением:

- 1 — редукционный клапан,
2 — манометр, 3 — клапан,
4 — предохранительный клапан,
5 — бак, 6 — жидкость,
7 — контролируемое изделие,
8 — вентиль сброса давления



ций пробного вещества с индикаторным слоем, нанесенным на наружную поверхность испытуемого шва.

К компрессионным методам относится и метод контроля воздушно-аммиачной смесью, заключающийся в том, что наружную поверхность шва испытуемого изделия покрывают бумажной лентой, смоченной 5%-ным раствором азотнокислой ртути или раствором фенолфталеина. Затем в изделие подают смесь воздуха с 1—10% аммиака. Бумагу выдерживают 1—15 мин. Аммиак, проникая через сквозные дефекты, оставляет на бумаге в местах течи черные или фиолетовые пятна.

При использовании в качестве пробного вещества CO_2 на наружную поверхность шва взамен бумажной ленты наносят индикаторную массу, имеющую следующий состав (в мас. ч.): дистиллят — 40, агар-агар — 1, фенолфталеин — 0,15, безводная сода — 0,01. Места течи фиксируются в виде бесцветных пятен на малиновом фоне массы.

Весьма технологичен газолюминесцентный способ контроля герметичности. Емкость заполняется обессоленной водой, насыщенной пробным газом, например CO_2 , и аммиаком. На наружную поверхность проверяемого изделия наносится индикаторная адсорбирующая обмазка, имеющая в своем составе химические компоненты, которые при контакте с пробным газом образуют новый индикатор, флуоресцирующий в лучах УФ-излучения.

Наиболее простым из компрессионных методов контроля является манометрический. Метод заключается в регистрации изменения давления внутри сосуда, происходящего в случае его негерметичности, с помощью манометров за определенный период времени. Метод дает приближенную оценку герметичности, но зато может применяться для периодической проверки эксплуатирующего оборудования, работающего под давлением, без каких-либо дополнительных операций.

В практике контроля герметичности изделий необходимо обнаруживать течи значительно меньше тех, что могут выявлять указанные выше методы. Такие дефекты выявляют галоидным и гелиевым течеисканием.

При галоидном методе в качестве пробного газа используют фреон-12 (химическое соединение на основе галоидного элемента фтора), обладающий высокой проникающей способностью. Индикатором при галоидном течеискании служит электронный прибор, содержащий чувствительный элемент в виде платинового диода, зонд и коллектор которого раскалены до 800—900 °C и разделены воздушным или вакуумным промежутком.

При попадании в этот промежуток молекул фреона электрический ток через диод резко возрастает, что фиксируется стрелочным прибором. Промышленностью выпускаются переносные галоидные течеискатели ГТИ-6 и БГТИ-5, отличающиеся друг от друга по конструктивному исполнению. В последнее время находит применение более чувствительный способ индикации фреона по продуктам его распада в результате химических реакций, например с аммиаком.

Течеискатель ГТИ-6 состоит из выносного щупа с датчиком, предназначенным для работы в атмосферных условиях, и измерительного блока со стрелочным прибором и звуковым индикатором-телефоном. В приборе помимо основного атмосферного датчика имеются вакуумный датчик, выносной обдуватель с регулируемым потоком и регистрирующий блок.

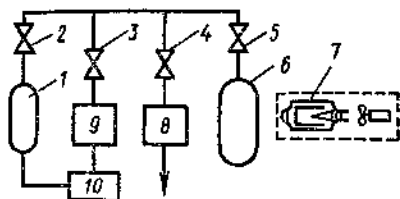
Течеискатель БГТИ-5 имеет автономное питание от батареи аккумулятора и особенно удобен при испытании изделий большой протяженности в монтажных и полевых условиях.

В практике обычно при галоидном течеискании используют способ щупа (рис. 8.3). В закрытом сосуде создают небольшое избыточное давление атмосферы фреона-12. Щупом галоидного течеискателя производят «обнюхивание» наружной поверхности изделия вдоль всей длины шва. Скорость перемещения щупа вдоль шва 10–25 мм/с.

При гелиевом течеискании пробным веществом является газ гелий, обладающий малой молекулярной массой и, следовательно, хорошей способностью проникать через мельчайшие неплотности. Индикация газа производится масс-спектрометром. Гелий, прошедший через сквозные неплотности в испытуемом изделии, попадает в камеру масс-спектрометра, в которой создан высокий вакуум $665 \cdot 10^{-6}$ Па. Камера, находящаяся в магнитном поле, состоит из катода, ионизатора, диафрагмы и коллектора, помещенных в латунный корпус. Молекулы газа, попадающие в масс-спектрометр, под действием потока электронов, эмиттируемого раскаленным

Рис. 8.3. Схема галоидного контроля герметичности способом щупа с заполнением контролируемого изделия чистым фреоном:

1 — баллон с фреоном, 2–5 — вентили, 6 — контролируемое изделие, 7 — щуп с атмосферным датчиком галоидного течеискателя, 8 — механический вакуумный насос, 9 — компрессор, 10 — конденсатор



катодом, ионизируются и превращаются в положительные ионы с зарядом e . Ионы, ускоряющиеся электрическим полем напряжением 300–400 В, попадают в камеру масс-спектрометра и под действием магнитного поля приобретают круговую траекторию движения. В зависимости от массы ионы движутся по разным радиусам. Диафрагмы, расположенные на пути движения ионов, выделяют только ионы гелия, которые попадают на коллектор. При этом происходит усиление ионного тока, что фиксируется миллиамперметром и звуковым индикатором (сиреной). Масс-спектрометр позволяет фиксировать ничтожное количество атомов гелия, прошедших через неплотности контролируемого изделия и попавших в прибор. Чувствительность контроля герметичности гелиевым шумом достигает 10^{-6} мм³·МПа/с.

Промышленностью выпускается несколько типов масс-спектрометрических гелиевых течеискателей. Они состоят в основном из вакуумной откачной системы, масс-спектрометрического анализатора (масс-спектрометра) и электронного блока. Наиболее широко применяют течеискатель передвижного типа ПТИ-7А, обладающий чувствительностью (минимально регистрируемый поток гелия) $6,65 \cdot 10^{-9}$ мм³·МПа/с. Вакуумная система течеискателя состоит из механического (ВН-461М) и паромасляного (НВО-40М) насосов, ловушки, охлаждаемой жидким азотом, и вентиля. Ловушка препятствует прохождению паров масла из насоса в камеру масс-спектрометра. В настоящее время все более широкое применение находит гелиевый течеискатель ПТИ-10 с чувствительностью на порядок выше. Течеискатель имеет выход на электронный автоматический потенциометр. Течеискатели снабжены калиброванными гелиевыми течами, служащими для его настройки.

Весьма перспективны инфракрасные газовые течеискатели, в которых используются методы индикации газов, основанные на избирательном поглощении инфракрасного излучения анализируемого компонента. Специфичность инфракрасных спектров поглощения различных газов обеспечивает совместно с использованием селективных приемников высокую чувствительность и избирательность метода. Он весьма универсален, так как позволяет определить концентрации многих паров и газов, например частиц азота, углекислого газа, проводить измерения в широких диапазонах концентраций, получить быстрое действие на уровне нескольких секунд, создать сравнительно простые и малогабаритные конструкции приборов (ИГТ-1, ИГТ-2).

Катарометрический (газоаналитический) течеискатель ТП-7102 фиксирует утечку в атмосферу пробных газов

(водорода, гелия) по изменению теплопроводности индикаторной среды. Он собран по схеме моста Уитсона, в два плеча которого включены два чувствительных элемента, расположенных в датчике течейскаателя. Один из них контролирует утечку, второй является элементом сравнения и окружается газовой средой неизменного состава.

При истечении газов из дефектов при высоких избыточных давлениях возникают ультразвуковые колебания, которые могут регистрироваться приборами. Ультразвуковые течейскаатели имеют относительно невысокую чувствительность и используются, например, для определения мест течи в магистральных газопроводах.

8.4. ВАКУУМНЫЕ МЕТОДЫ

Вакуумный метод течейскаания основан на регистрации падения вакуума в замкнутом объеме контролируемого изделия или на фиксации молекул пробного газа, появившихся в этом объеме. На чувствительность вакуумного метода сильно влияет степень очистки полости изделия от грязи, масел и т. п. Поверхность изделия перед контролем многократно промывают растворителями и протирают, в отдельных случаях шлифуют до блеска.

В зависимости от конструкции и конфигурации изделия применяют несколько принципиальных схем контроля (рис. 8.4). Наибольшее распространение получил контроль гелиевой камерой и вакуумными присосками.

В первом случае испытуемое изделие помещают в заполненную гелием камеру, вакуумируют до необходимого давления и фиксируют прибором появление ионов гелия внутри изделия при негерметичности последнего. Во втором случае на наружную поверхность изделия, заполненного гелием под некоторым избыточным давлением, накладывают вакуумную камеру, в полости которой создают вакуум (рис. 8.5). Появление в камере ионов гелия фиксируется с помощью гелиевого течейскаателя.

Выбор метода контроля зависит от класса герметичности изделия, устанавливаемого конструктором. Например, в атомной энергетике в зависимости от условий эксплуатации и возможностей ремонта все оборудование делят на пять классов герметичности (табл. 8.1). Каждому из классов герметичности соответствуют определенные методы испытания в зависимости от их чувствительности. К I классу относят ответственные изделия, надежность которых должна быть очень высока в силу специфических особенностей их эксплуатации.

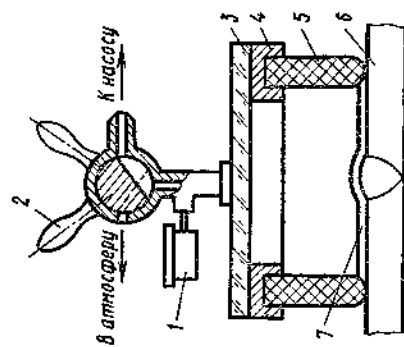


Рис. 8.5. Схема контроля герметичности с помощью вакуумной камеры:

1 — вакуумметр, 2 — трехходовой кран (в двух положениях), 3 — оргстекло, 4 — металлическая рамка, 5 — губчатая резина-уплотнитель, 6 — контролируемое сварное соединение, 7 — пленка пенообразующего вещества

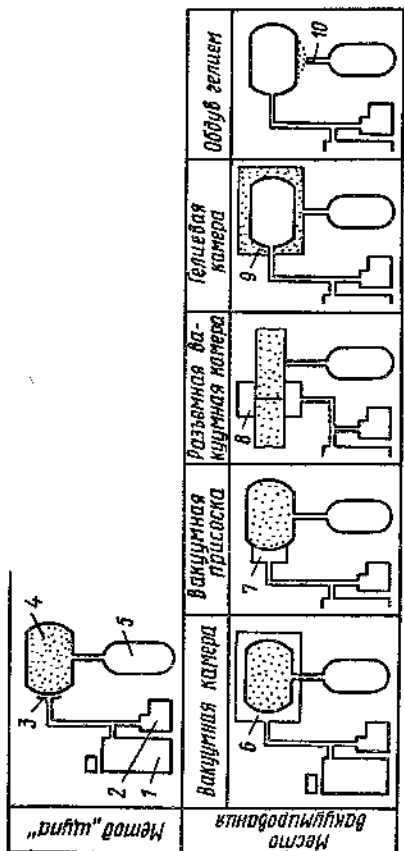


Рис. 8.4. Принципиальные схемы течения вакуумными методами:

1 — течеискатель, 2 — вспомогательная откачная система, 3 — цуп, 4 — контролируемое изделие, 5 — баллон с пробным веществом (газом), 6 — 8 — вакуумные камеры, присоски и разъемная камера соответственно, 9 — гелиевая камера, 10 — пистолет-обдуватель

8.1. Классы герметичности

Класс герметичности	Диапазон выявляемых напечаний (дефектов) по воздуху		Метод течения	Пробное вещество	Индикатор
	см ³ /год	м ³ · Па/с			
I	От 2 · 10 ⁻²	От 3,76 · 10 ⁻³	Гелиевая камера, вакуумная присоска Гелиевый шуп Люминесцентно-гидравлический Гидравлический с люминесцентным индикаторным покрытием Галонный шуп Цетной и люминесцентный капиллярный Керосиновая проба Пузырьковый Опрессовка воздухом	Гелий	Масс-спектрометр То же Течь и свечение
II	Свыше 2 · 10 ⁻¹	Свыше 3,75 · 10 ⁻² 7,51 · 10 ⁻¹		» Вода + пенетрант	Течь и свечение
III	Свыше 2 до 4	Свыше 3,75 · 10 ⁻¹ 7,51 · 10 ⁻¹		Вода + пенетрант	Течь и свечение на индикаторных ленте и массе
IV	Свыше 4 до 2 · 10 ³	Свыше 7,51 · 10 ⁻¹ 3,75 · 10 ⁻²		Фреоновоздушная смесь	Прибор
V	Свыше 2 · 10 ³	Свыше 3,75 · 10 ²		Пенетрант Керосин Воздух, азот То же	Пятна, свечение Пятна на меловом фоне Пузырьки »

Течеискание является весьма трудоемкой и длительной операцией, требующей высокой производственной культуры. Поэтому в настоящее время стремятся автоматизировать весь цикл таких испытаний. В некоторых отраслях промышленности уже созданы и применяются автоматизированные стенды, обеспечивающие высокую производительность и достоверность контроля.

В СССР наиболее широко применяются два вида автоматизированных установок — масс-спектрометрические и манометрические. Такие установки состоят из измерительного комплекса, включая течеискатель, программного блока, узла разбраковки, загрузочного устройства и др. Производительность, например, масс-спектрометрической автоматизированной установки УКГМ-2 доходит до 3000 мелких деталей в час. Манометрические установки более просты по конструкции. Их использование облегчается наличием в заводских условиях магистрали сжатого воздуха, возможностью применения недефицитной стандартной пневмоаппаратуры управления. Эти установки наиболее распространены в пищевой, автомобильной, машиностроительной промышленности.

Высокопроизводительные автоматизированные установки требуют создания новых методов и приборов для контроля герметичности изделий. Распространены лазерные газоаналитические методы, голографическая интерферометрия, детекторы электронного захвата, тонкопленочные полупроводниковые детекторы и др.

Контрольные вопросы

1. Перечислите основные методы контроля герметичности.
2. Сравните чувствительность методов между собой в зависимости от применяемого пробного вещества и индикатора.

9. МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

9.1. ОЦЕНКА СВАРИВАЕМОСТИ

Свариваемость является комплексной технологической характеристикой металла, отражающей его реакцию на процесс сварки и определяющей его относительную пригодность для выполнения сварных соединений, удовлетворяющих условиям последующей эксплуатации. Для количественной оценки свариваемости сравнивают свойства металла сварного шва со свойствами основного металла, которые принимаются за эталонные. Оценка свариваемости стали необходима в следую-

щих случаях: 1) для установления соответствия прочностных характеристик сварных соединений техническим условиям для данной марки стали; 2) при разработке новой технологии сварки; 3) новой марки стали для всесторонней оценки ее технологических свойств; 4) новых типов электродных покрытий и новых марок присадочных материалов. Свариваемость является относительной и сложной характеристикой, которая определяется применением комплекса различных проб и методов исследования.

Косвенный метод оценки свариваемости. Одним из приближенных способов является оценка свариваемости стали по ее химическому составу. Критерием в оценке свариваемости (сопротивляемости образованию холодных трещин) является так называемый эквивалент углерода. Экспериментами установлено, что стали, для которых эквивалент углерода не превышает 0,45 %, не обнаруживают склонности к образованию холодных трещин.

Прямые методы оценки свариваемости. К прямым методам оценки свариваемости стали относят такие методы, которые дают количественную оценку показателей прочности и пластичности сварных соединений из этой стали или качественную оценку ее по склонности к трещинообразованию в процессе сварки. В различных странах применяют самые разнообразные пробы (образцы) на свариваемость.

Тавровые образцы на статический изгиб имеют определенные размеры (мм): ширину — 31 и различную толщину — 6, 12 и 19. Катет контролируемого шва должен составлять половину толщины пластины. Тавровые образцы подвергают изгибу в специальном направляющем приспособлении. О пластических свойствах таврового соединения судят по углу загиба до момента появления трещины, по нагрузке при разрушении и характеру излома. Особенностью тавровой пробы является ее близость к реальным формам сварных соединений. Статическими испытаниями на изгиб тавровых образцов оценивают пластические свойства сварного соединения в целом.

Пробой на удар образцов с надрезом можно оценивать влияние термического воздействия сварки на основной металл. Образцы вырезают из пластин с наплавленными на них поперечными валиками. Размер образцов 60 × 10 × 10 мм. Образец размечают таким образом, чтобы его надрез касался своей вершиной зоны термического влияния. Для этого поперечный валик фрезеруют вдоль его оси дисковой фрезой шириной 2 мм на глубину зоны проплавления. Затем со стороны валика сострагивают образец так, чтобы

глубина надреза составила 2 мм от его поверхности. Строганием поверхности с противоположной надрезу стороны доводят образец до толщины 10 мм. Ударная проба выявляет критическую температуру, при которой вязкий вид разрушения сменяется хрупким.

Проба на статический изгиб образцов с надрезом, так же как и предыдущая, дает возможность оценивать влияние термического воздействия сварки на основной металл. Образец размером $60 \times 10 \times 10$ мм вырезают из пластины с наплавленным поперек валиком шва. Надрез делают в наплавленном металле так, чтобы его вершина касалась зоны термического влияния. Образцы испытывают на статический изгиб до разрушения. Пластичность оценивают по углу загиба и разрушающей нагрузке. По кривым зависимости нагрузки от угла загиба можно характеризовать разрушения различных типов надрезанных образцов, а также определять критическую температуру, соответствующую переходу от вязкого разрушения к хрупкому. С увеличением времени выдержки образца после сварки до начала испытания, а также с повышением температуры заметно увеличивается предельный угол загиба. Это свидетельствует об улучшении структуры в шве с течением времени.

Таким образом, испытания надрезанных образцов на удар и статический изгиб дают возможность оценивать относительную степень свариваемости стали различных марок; выявить влияние термического воздействия сварки на основной металл и установить условия и режимы сварки; определить критическую температуру перехода к разрушениям хрупкого вида.

Можно считать, что высоким значениям ударной вязкости и вязкости разрушения соответствует высокая пластичность при статическом испытании на изгиб тавровых и надрезанных стыковых образцов.

Одним из важных показателей свариваемости материала является его стойкость к образованию холодных и горячих трещин. В практике для оценки этого показателя применяют различные виды проб. Ниже рассмотрены наиболее простые из них и в то же время наиболее информативные.

Для оценки сопротивляемости к образованию холодных трещин изготавливают образцы (рис. 9.1), которые в дальнейшем испытывают на специальных машинах (рис. 9.2). Минимальное растягивающее напряжение от внешней нагрузки, при котором происходит образование трещин в околошовной зоне или в сварном шве после испытания в течение установленного периода времени (для стали 20 ч),

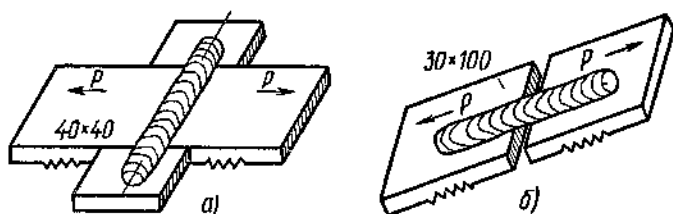


Рис. 9.1. Схема образцов для испытаний на холодные трещины:
а — поперек шва; б — вдоль шва

служит количественным показателем сопротивляемости материала образованию трещин.

Пробы на образование холодных трещин предусматривают сварку образцов, конструкция которых обеспечивает высокий уровень остаточных напряжений. Примером таких проб могут служить лихайская и крестовая пробы.

Лихайская проба заключается в сварке плоского образца, имеющего в центре разделку в виде щели (рис. 9.3). Необходимое условие испытания — сварка с непроваром корня шва. Высокий уровень напряжений обеспечивается жестким закреплением шва и концентратором в его корне. Трещины при испытании возникают в корне соединения или в металле шва, или в околошовной зоне в зависимости от формы разделки — прямой или косой соответственно. Уровень напряжения регулируется за счет различной длины прорезей на краях пластины. За количественный показатель стойкости к

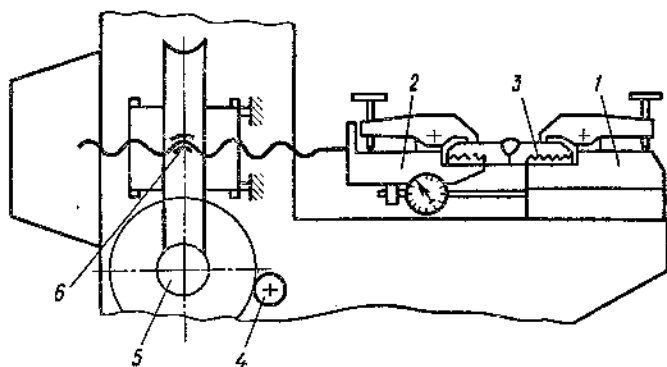


Рис. 9.2. Схема машины ЛТП-6 для испытаний на холодные трещины при сварке:

1, 2 — неподвижный и подвижный захваты, 3 — свариваемый образец,
4—6 — механический привод

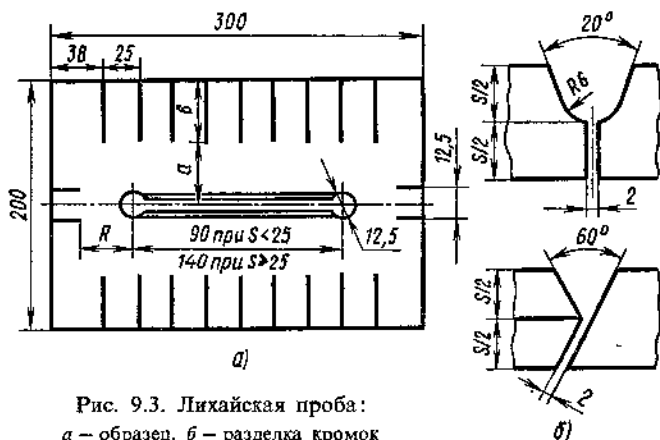


Рис. 9.3. Лихайская проба:
а — образец, б — разделка кромок

образованию холодных трещин принимают глубину прорезей b , при которых еще не образуется трещина.

Крестовая проба заключается в сварке двойного таврового образца (рис. 9.4) четырьмя последовательными угловыми швами. Каждый следующий шов укладывают после полного охлаждения предыдущего. По мере сварки каждого шва возрастает жесткость их закрепления, ускоряется отток теплоты и повышается общее насыщение сварного соединения водородом. Наиболее вероятно образование трещин в третьем шве и его зоне термического влияния. Через четверо суток после сварки из центральной части образца вырезают три поперечных темплета шириной по 25 мм, из которых изготовляют металлографические шлифы. Шлифы исследуют при 10-кратном увеличении на наличие трещин. При испытании

крестовой пробы получают качественную оценку металлов, относя их к стойким или к склонным к образованию трещин в зависимости от отсутствия или наличия трещин на шлифах. Иногда усложняют испытание, изменяя исходную температуру

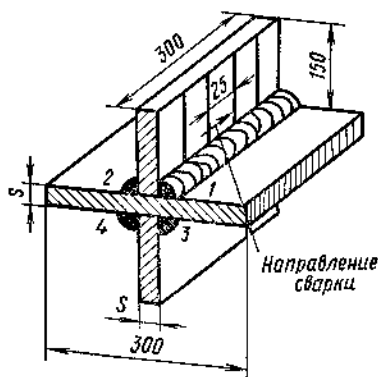


Рис. 9.4. Крестовая проба (1 — 4 — порядок сварки швов)

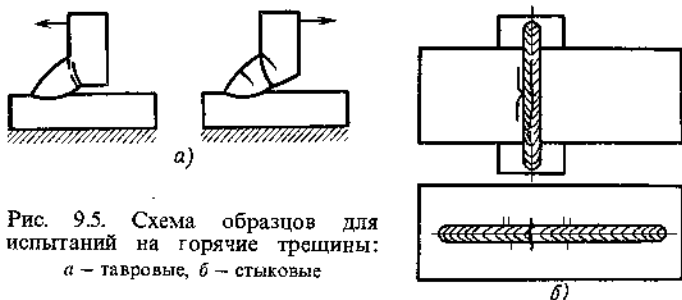


Рис. 9.5. Схема образцов для испытаний на горячие трещины:
а — тавровые, б — стыковые

образца охлаждением его углекислотой или подогревом. В этом случае за количественный показатель стойкости к образованию трещин принимают начальную температуру образца, при которой трещины не образуются. На образование холодных трещин испытывают перлитные, мартенситные, высокохромистые ферритные стали, ряд титановых, алюминиевых и некоторых других сплавов.

Для оценки сопротивляемости к образованию горячих трещин серию образцов (рис. 9.5) подвергают растяжению в процессе сварки на специальной испытательной машине (рис. 9.6). Минимальная скорость деформации, при которой образуются трещины в шве или в околошовной зоне, служит количественным показателем сопротивляемости металлов образованию горячих трещин. Помимо того, оценку сопротивляемости образованию горячих трещин можно произвести на специальных пробах. Две из них, наиболее простые, описаны ниже. Проба с набором образцов предусматривает

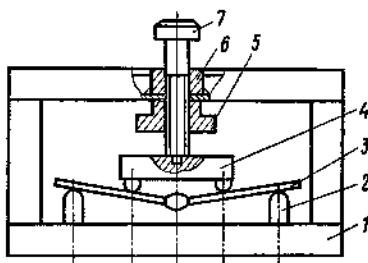


Рис. 9.6. Установка для испытаний стыковых образцов на горячие трещины:

1 — жесткая скоба, 2 — опоры, 3 — сварной образец, 4 — пуансон, 5 — фиксирующая прогиб образца гайка, 6 — направляющая втулка, 7 — шток

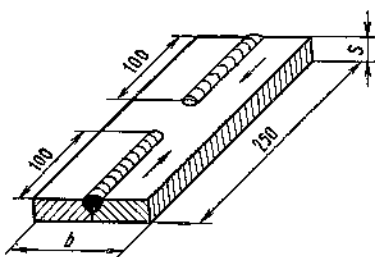


Рис. 9.7. Проба с набором образцов разной ширины b

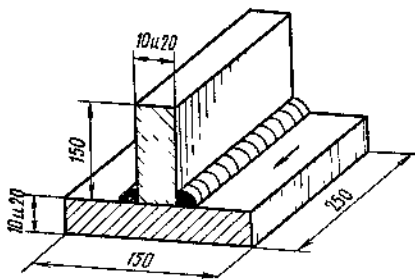


Рис. 9.8. Тавровая проба

их сварку различной ширины b (рис. 9.7), которая принимает значения 4, 6, 8, 12, 16 и 20 S , где S толщина испытываемого металла. Сварку начинают с образцов минимальной ширины и продолжают на образцах возрастающей ширины до тех пор, пока трещины в сварном шве перестанут образовываться. Необходимое условие работы пробы — полное проплавление перемычки в корне разделки. За количественный показатель стойкости к образованию горячих трещин принимают минимальную ширину образца, в котором не образуется трещина. Наличие трещины определяют визуально на поверхности шва и по его излому, где за горячую трещину принимают окисленные участки.

Второй достаточно удобной пробой является тавровая проба (рис. 9.8), которая выполняется следующим образом. Стенку таврового образца прикрепляют к полке только одной прихваткой в начале шва. Это позволяет стенке во время сварки легко поворачиваться особенно при наложении первого шва, что вызывает деформацию и, как следствие этого, образование трещин в корне шва. После наложения двух швов по обе стороны и их визуального осмотра полку с обратной стороны вдоль продольной оси между швами разрезают механическим способом. Разрезанные части полки отгибают для установки наличия трещин в изломе шва. Испытание тавровой пробы дает количественную оценку металлов — при отсутствии трещин их считают стойкими к образованию трещин, при наличии трещин — склонными к их образованию. На образование горячих трещин испытывают все без исключения металлы и сплавы.

9.2. МЕХАНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ

Механические испытания определяют прочность и надежность работы сварных соединений. Основные методы определения механических свойств сварного соединения и его отдельных зон устанавливает ГОСТ 6996—66. Он предусматривает стати-

ческие и ударные испытания при нормальных, а в некоторых случаях при пониженных или повышенных температурах. Для сварных соединений ответственных конструкций, изготовленных из высокопрочных материалов или предназначенных для работы в условиях отрицательных температур и вибрационных нагрузок, дополнительно проводят испытания на стойкость против хрупкого разрушения и на усталостную прочность. Механические испытания по характеру нагружения разделяют на статические, при которых усилие плавно возрастает или длительное время остается постоянным; динамические, при которых усилие возрастает практически мгновенно и действует непродолжительно; усталостные, при которых нагрузка многократно (от десятков и миллионов циклов) изменяется по величине и знаку.

Статические испытания. К статическим можно отнести испытания стыкового соединения на растяжение; наплавленного металла на растяжение; стыкового соединения на изгиб; на ползучесть; на определение твердости и т. д.

При испытании на растяжение определяют временное сопротивление (σ_b), предел текучести ($\sigma_{0,2}$), относительное удлинение (δ). Временное сопротивление (σ_b) сварного соединения определяют при растяжении образцов двух типов: образца для определения относительного значения σ_b шва в сравнении с основным металлом без снятия усиления шва (рис. 9.9); образца для определения абсолютного значения σ_b со снятым усилением и со специальной выточкой шва, предопределяющей место разрушения (рис. 9.10).

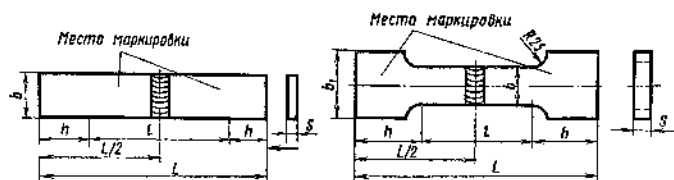


Рис. 9.9. Образцы для определения относительной прочности шва

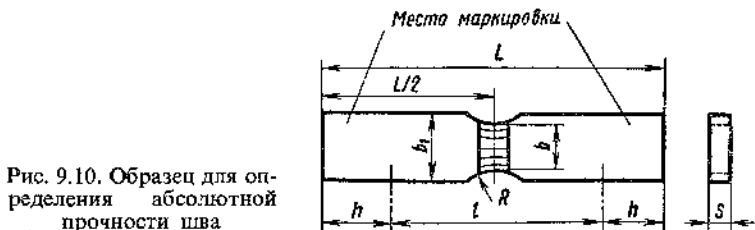


Рис. 9.10. Образец для определения абсолютной прочности шва

Если прочность сварного соединения меньше прочности основного металла, допускается применять плоские и круглые образцы одинакового сечения, включая их захватные части. При испытании швов стыковых соединений больших толщин (более 30 мм) применяют образцы, показанные на рис. 9.11. Длина захватной части может быть установлена в зависимости от конструкции испытательной машины, изменение других размеров образца недопустимо. Для испытаний участков сварного соединения и наплавленного металла применяют круглые образцы диаметром рабочей части 3—10 мм, вырезанные вдоль оси сварного шва в соответствующей зоне соединения из многослойной наплавки.

Временное сопротивление разрыву (σ_b) представляет собой напряжение, отвечающее наибольшей нагрузке, предшествующей разрушению образца.

Под условным пределом текучести ($\sigma_{0,2}$) понимают напряжение, при котором образец получает деформацию, равную 0,2% первоначальной расчетной длины.

Относительное удлинение (δ) образца определяется как отношение абсолютного остаточного удлинения к первоначальной расчетной длине образца.

Испытание на изгиб применяют для определения пластичности сварного соединения в целом. Пластичность стыкового соединения при изгибе определяется по углу загиба до образования первой трещины в любом месте образца. Схема испытаний на изгиб при продольном и поперечном расположениях шва показана на рис. 9.12. Формы образцов для

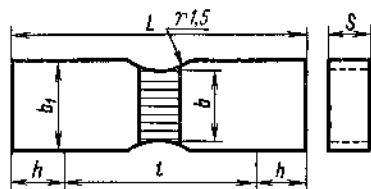


Рис. 9.11. Образец для испытания на растяжение при больших толщинах шва

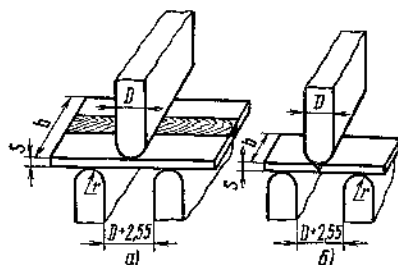


Рис. 9.12. Схема испытания на изгиб при расположениях шва: а — продольном, б — поперечном

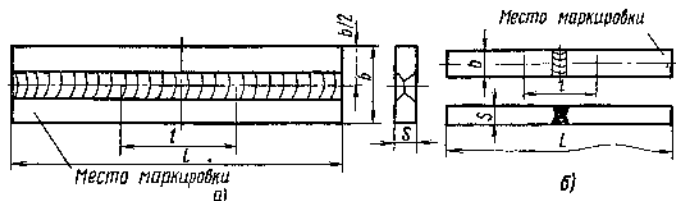


Рис. 9.13. Образцы для испытания на изгиб:

а — с продольным швом, б — с поперечным швом

испытания приведены на рис. 9.13. На практике часто вместо плоских образцов используют трубчатые. При испытании односторонних швов в растянутой зоне должен располагаться верхний слой металла, а при многослойной сварке — шов, заваренный последним. Для ответственных изделий считается удовлетворительным угол загиба $120-180^\circ$. При отсутствии трещин испытание заканчивается загибом образца до параллельности сторон.

Динамические испытания. К динамическим относят испытания на ударный изгиб; на усталость.

Испытания на ударный изгиб проводят для определения ударной вязкости при заданной температуре. Образцы для испытания на изгиб выбирают в соответствии с ГОСТ 6996—66 (рис. 9.14). В зависимости от назначения проводимого испытания надрез располагают на оси сварного шва, в зоне сплавления или в зоне термического влияния. После испытания исследуют структуру излома для определения дефектов сварного шва.

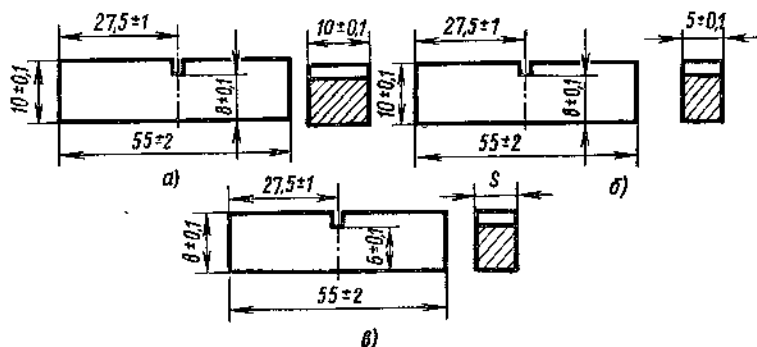


Рис. 9.14. Образцы для испытания на удар толщиной:

а — 10 мм и выше, б — 5–10 мм, в — 2–5 мм

Испытаниями на усталость (выносливость) определяют способность металла сопротивляться действию переменных нагрузок при изгибе, растяжении и кручении. Переменные нагрузки характеризуются амплитудой изменения напряжений и в зависимости от этого могут иметь симметричный, асимметричный и пульсирующий циклы. Испытания проводят на цилиндрических или плоских образцах специальной формы и размеров, вырезанных поперек сварного соединения, в условиях осевого нагружения. При испытаниях определяют предел выносливости; количественной оценкой усталостной прочности является число циклов, которой выдержал сварной образец до разрушения.

Помимо приведенных испытаний, предусмотренных ГОСТ 6996—66, иногда необходимо применять дополнительные испытания для получения других прочностных характеристик. Обычно при этом стремятся создать условия нагружения и работы образцов при испытании, идентичные тем, на которые рассчитана конструкция. Одним из примеров может служить испытание особых образцов, в которых тем или иным способом в рабочем сечении создается плоское напряженное поле, характеризующее работу металла в сосудах под давлением. Образцы представляют собой плоские или круглые стержни с захватами на концах и со специальными проточками в центральной части, которые обеспечивают плоскую схему напряжений при нагружении. Однако в настоящее время чаще применяют схему испытаний с разрушением основного металла или сварных соединений специальных сосудов нагружением их гидравлическим давлением. Критериями прочности в данном случае является максимальное давление, радиус кривизны при разрывах и утонение образца.

9.3. МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Металлографические исследования проводят для определения структуры сварного соединения. Исследуя структуру металла сварного соединения, можно установить правильность выбора режимов сварки, типа электродов, флюсов, присадочного металла и других факторов, определяющих качество сварного шва, а также выявить дефекты шва и установить причины их образования. Полный металлографический анализ сварного соединения должен состоять из исследования макро- и микроструктуры металла шва, зоны термического влияния и определения структуры основного металла.

Исследование макроструктуры сварного соединения. Макроструктурный анализ является предварительной оценкой качества

соединения, выполняемого тем или иным способом сварки. Макроструктура сварных соединений исследуется невооруженным глазом или при тридцатикратном увеличении на поверхности макрошлифов, вырезанных и подготовленных из этих соединений. Макроструктуру сварных соединений можно изучать и на изломах сварных образцов после механических испытаний. Макроисследованием можно выявить форму и размеры шва, его строение, наличие в соединении и основном металле различных дефектов: непроваров, трещин, шлаковых включений, газовых пор и т. п.

При исследовании макроструктуры сварных швов из контрольной сварной пластины или изделия вырезают темплеты для изготовления шлифа в плоскости поперечного сечения шва. Иногда для определения характера кристаллизации шва в сварочной ванне изготавливают шлиф по продольной оси шва. Размеры шлифа должны быть такими, чтобы поверхность его включала полное сечение сварного шва. Образцы для шлифов вырезают на расстоянии 20—30 мм от начала или конца шва. Исследуемую поверхность темплета из твердых металлов (стали) перед травлением выравнивают и шлифуют. Поверхность мягких материалов подготавливают опилованием, затем шлифованием на наждачной бумаге.

Для химического травления применяют растворы кислот, солей и щелочей. В результате травления макрошлифа должны быть четко выявлены границы между основным и наплавленным металлом, между зоной термического влияния и зоной, оставшейся без воздействия теплоты, между отдельными слоями при многослойной сварке. Травление крупных макрошлифов проводят в вытяжном шкафу нанесением реактива на поверхность шлифа, а мелких — погружением в раствор. Хорошие результаты по выявлению макроструктуры дает глубокое травление в кислотах, смесях кислот или кислот с хлорными солями. Из неорганических кислот наиболее универсальной является азотная. Для глубокого травления сварных швов из углеродистых сталей применяют 50 %-ный водный раствор азотной кислоты. Этот реактив применяют для сталей, содержащих никель. Для сталей, содержащих хром, следует применять 50 %-ный водный раствор соляной кислоты. Одним из лучших универсальных реактивов для травления различных сталей является реактив, состоящий из смеси азотной кислоты и хлорных солей.

Для выявления кристаллизационных слоев в низкоуглеродистых, низко- и среднелегированных сталях применяют травление в растворах серной, хромовой или пикриновой кислоты. Травление этими кислотами основано на избирательном раст-

ворении в них ферритной составляющей. При использовании серной кислоты готовят 20 %-ный водный раствор ее; травят при 80—100 °С в течение 10—12 ч.

Кроме реактивов для глубокого травления часто для выявления различных видов химической неоднородности применяют реактивы поверхностного травления, содержащие ионы меди. Омедненные реактивы четко дифференцируют участки, обогащенные серой и фосфором. Они обычно светлее других участков.

Для выявления в металле серы и фосфора применяют метод отпечатков, который заключается в следующем. На приготовленный макрошлиф накладывают и прижимают к нему бромосеребряную фотобумагу, предварительно выдержанную в течение 8—10 мин в 5 %-ном водном растворе серной кислоты. Через 3—5 мин бумагу осторожно снимают и фиксируют. Бумага в местах, соприкасающихся с сернистыми включениями, окрашивается в коричневый цвет. Вместо бумаги можно использовать фотопленку, что дает возможность размножить полученные отпечатки.

Способами отпечатков на фотобумаге можно выявить не только включения серы, фосфора и окислов железа в наплавленном металле, но и определить грубые дефекты шва — трещины и несправы. Картина глубоко протравленного шлифа может быть быстро воспроизведена на бумаге типографским способом. Для этого шлиф покрывают тонким слоем типографской краски с помощью резиновой пробки и протирают сухой тряпочкой для удаления краски с выпуклых мест. Затем влажный лист белой бумаги кладут на кусок резины, на бумагу кладут подготовленный шлиф и зажимают все в прессе.

Макроструктуру можно также рассматривать и на изломах сварного шва. Изломы сварных швов исследуют после механических и технологических испытаний образцов, а также после разрушения сварных деталей. По излому можно определить характер разрушения — пластическое или хрупкое, а также дефекты шва — поры, раковины, неметаллические включения, несправы и трещины. Волокнистый серый излом без блеска характеризует высокую пластичность и ударную вязкость, блестящий крупнозернистый излом характеризует хрупкий металл с пониженной ударной вязкостью. Светлые пятна (окисные пленки) в изломе также являются одним из дефектов, которые не выявляются практически ни одним из известных физических методов контроля.

Исследование микроструктуры сварных соединений. Исследование микроструктуры дает возможность более глубоко изу-

чить структуру сварного соединения, чем исследование макроструктуры. По микроструктуре сварного соединения можно установить: 1) структуру наплавленного металла, структуру, образовавшуюся в зоне термического влияния; 2) примерное содержание углерода в основном и наплавленном металле и в различных участках шва; 3) приблизительный режим сварки и скорость охлаждения металла шва и зоны термического влияния; 4) количество слоев сварного шва и дефекты шва и структуры.

Вырезку образцов для исследования микроструктуры сварных швов производят так же, как и при макроанализе. Размеры поверхности микрошлифа не должны превышать 20×20 мм. Исследование микроструктуры образцов производят чаще всего на оптических микроскопах. Исследуемая поверхность должна быть очень тщательно подготовлена — отполирована. Подготовка поверхности состоит из нескольких последовательных операций: обработки на плоскошлифовальном станке или вручную на наждачном камне, обработки шлифовальной бумагой с уменьшающимися размерами зерна и заключительной операции — полирования на сукне раствором окиси хрома или окиси алюминия.

Для выявления микроструктуры применяют неглубокое травление, в результате которого глубина протравленного слоя составляет не более 10 мкм. Принципы выявления микроструктуры химическим травлением те же, что для макроструктуры. Однако в связи с тем, что микроструктуру изучают на оптических микроскопах при увеличении $50-2000\times$ и на электронных микроскопах при увеличении до $100\,000\times$, глубина рельефа, получаемого при микротравлении, должна быть очень небольшой. Поэтому для микротравления используют малоактивные реактивы, позволяющие постепенно травить очень тонкие слои. Для микротравления низкоуглеродистых, углеродистых, низко- и среднелегированных сталей чаще всего используют слабый раствор кислот в спирте. Наиболее распространен 2–5%-ный раствор азотной кислоты в этиловом спирте.

Травление осуществляют следующим образом. Тщательно отполированную и обезжиренную спиртом поверхность образца погружают в реагент и выдерживают необходимое время. Продолжительность травления зависит в первую очередь от химического состава металла. При повышенном количестве легирующих примесей в металле ее обычно увеличивают. Большое значение имеет также структурное состояние металла. Троостит и троостосорбит вытравливаются интенсивнее, феррит и мартенсит — медленнее. Когда необходимо провести более

тщательное травление для изучения мельчайших составляющих структуры при больших увеличениях, применяют растворы пикриновой кислоты. При исследовании микроструктуры сварных швов алюминиевых сплавов в качестве реактива для травления используют 0,5 %-ный водный раствор плавиковой кислоты.

Для травления микрошлифов сварных швов нержавеющей сталей распространено электрическое травление; при этом микроструктура выявляется значительно равномернее, чем при обычном травлении. Электролитическое травление может быть применено также и для низко- и среднелегированных сталей, особенно когда качество поверхности шлифов должно быть очень высоким (для электронно-микроскопических исследований) и необходимо удалить следы наклепа в поверхностном слое.

Обычно изучение микрошлифа проводят в такой последовательности. После полирования его рассматривают под микроскопом при увеличении от 100 до 500 \times на предмет определения загрязненности шва газовыми порами, окисными пленками и на наличие в шве микротрещин. Неметаллические включения на белом фоне шлифа видны как темные пятна. Микротрещины проявляются в виде тонких черных извилистых кривых. После травления микрошлиф обследуют под микроскопом и определяют структуру сварного шва по всему сечению (вид и соотношение структурных составляющих, наличие и распределение карбидов, нитридов, сульфидов и окисных включений).

Измерение твердости. Для установления изменения структуры в металле шва и околошовной зоны, а также для оценки степени закалки зон сварного соединения и неравномерности механических свойств измеряют твердость сварного шва. Твердость обычно определяют на шлифах для металлографического анализа тремя способами: 1) вдавливанием стального закаленного шарика диаметром 1,568 мм или алмазного конуса с углом при вершине 120° (способ Роквелла); 2) вдавливанием четырехгранной алмазной пирамиды с квадратным основанием и углом между противоположными гранями 136° (способ Виккерса); 3) вдавливанием стандартного стального закаленного шарика определенного диаметра (способ Бринелля). Измерение твердости по сечению шва производят в двух направлениях: для стыковых швов по продольной оси шва от усиления к подварке и от центра шва к основному металлу.

9.4. ХИМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ИСПЫТАНИЯ НА КОРРОЗИОННУЮ СТОЙКОСТЬ

Химический анализ. Химический анализ служит для отбраковки материалов по составу, а также для установления причин появления дефектов в сварном соединении. При исследовании сварных соединений обычно производят химический анализ основного, присадочного (электродов и проволоки) и наплавленного металла шва.

При анализе металла шва необходимо выяснить, находится ли содержание углерода, кремния, марганца и легирующих элементов в пределах, которые рекомендуются для тех или иных режимов сварки. Кроме того, важно установить, что содержание вредных элементов (серы, фосфора и т. п.) в стали не превышает допустимых пределов. В некоторых случаях, особенно при разработке нового состава покрытия или технологии сварки, проводят также анализ шва на содержание азота, кислорода и водорода.

Пробы для химического анализа отбирают в виде стружки по ГОСТ 7122—81 с таким расчетом, чтобы в ней не было большого количества основного металла. Иногда стружку получают из образцов, предназначенных для механических испытаний. Масса стружки, необходимой для анализа, определяется количеством элементов, на которые проводится анализ. Для анализа на углерод достаточно 3—5 г стружки, для определения азота и кислорода 50—60 г, а для полного анализа 50 г стружки. Стружка должна быть обезжирена спиртом или эфиром. Содержание кислорода и азота определяется методом горячей экстракции, плавкой металла в вакууме в специальных установках. Если получаются сомнительные результаты по химическому анализу данной пробы, производят отбор еще не менее двух проб.

Когда отбор проб затруднен, химический состав сварных швов определяют спектральным анализом, позволяющим с высокой точностью установить количественный состав элементов, входящих в металл шва. При спектральном анализе на поверхности образца зажигают дугу. Пары металла, попадающие в дугу, дают свой, присущий им спектр, который разлагают на аналитические линии. Сравнивая эти линии с эталонными, находят количественный и качественный состав элементов в сплаве.

Одним из способов изучения структуры металлов является метод с применением радиоактивных изотопов. Чаще всего для изучения состава металла шва используют изотопы серы и фосфора. В шов радиоактивные изотопы вводят через

проволоку или основной металл. Из шва, содержащего радиоактивные изотопы, изготавливают шлифы, которые укладывают на фотопленку или фотобумагу. Отпечаток отображает характер распределения изотопов. Максимум потемнения пленки соответствует наибольшей концентрации изотопов. Зная характер распределения изотопов, можно судить о распределении соответствующего им элемента в структуре металла шва и выгорании этих элементов при переходе в шов.

Испытания на коррозию. Испытания на коррозию проводят для определения коррозионной стойкости сварного соединения или отдельных его зон при работе в различных средах. Различают испытания на общую (равномерную или неравномерную) и местную (межкристаллитную) коррозию.

Общая коррозия является результатом растворения металла в агрессивной среде. По своему характеру общая коррозия может быть равномерной, при которой с одинаковой скоростью разрушается основной металл и металл шва; неравномерной, при которой быстрее разрушается металл шва или же в определенных местах основной металл и металл по линии сплавления. Эта коррозия характерна для углеродистых и низколегированных сталей. Основные методы оценки коррозионной стойкости металла следующие (ГОСТ 13819—68): 1) весовой — взвешивание образцов до и после испытания и определение потерь в массе ($\text{г/м}^2 \cdot \text{год}$); 2) профилографический — измерение профиля; 3) электрохимический — измерение электродных потенциалов; 4) механические испытания на растяжение и изгиб.

При весовом методе испытания проводят следующим образом. Сваривают две пластины размером 50×200 мм, а затем разрезают на полосы шириной до 15 мм каждая. Образцы очищают от окалины, заусенцев и погружают в сосуд с кипящей азотной кислотой или в раствор серной и соляной кислот различной концентрации. По истечении определенного времени (6—48 ч в зависимости от материала и концентрации кислоты) образцы вынимают и взвешивают.

Профилографический метод заключается в том, что степень коррозии сварных соединений определяют по профилограммам, которые строятся для каждого образца на основании измерения профиля торцевой поверхности стрелочным индикатором до и после воздействия на металл агрессивной среды с последующим сравнением результатов измерения.

Электрохимический метод определения коррозионной стойкости заключается в определении разницы потенциалов между отдельными зонами сварного шва в той или иной коррозионной среде.

Метод механических испытаний на растяжение и изгиб заключается в сравнении прочностных и пластических свойств образцов до и после коррозионных испытаний.

Местная коррозия может развиваться в зоне термического влияния основного металла на некотором удалении от шва, по линии сплавления основного металла с металлом шва (так называемая ножевая коррозия) и в металле шва. Местная коррозия возникает в результате нагрева металла отдельных зон сварного шва до определенных температур. Этому виду коррозии подвержены аустенитные и аустенитно-ферритные стали. Существует несколько методов оценки местной коррозии, регламентированных ГОСТ 6032—75.

По методу А проводят кипячение образцов в растворе, состоящем из 110 г медного купороса, 55 мл серной кислоты и 1 л воды, в течение 24—72 ч. После кипячения образцы промывают и просушивают, а затем подвергают изгибу на 90°. Наличие сетки трещин в месте изгиба свидетельствует о склонности сварного соединения к местной коррозии.

По методу АМ производят кипячение в течение 24 ч в растворе, содержащем 160 г медного купороса, 100 мл серной кислоты и 1 л воды. В этот раствор добавляют медную стружку. Образцы также испытывают на изгиб под 90°.

При методе В применяют тот же раствор, что при методе А, но с добавкой в раствор 5 г цинковой пыли. Образцы кипятят 144 ч, а затем изгибают на 90°.

Используемый при методе Г раствор состоит из 10%-ного раствора азотной кислоты и 2%-ного раствора фтористого натрия. Образцы выдерживают в растворе при 80 °С в течение 1 ч, после чего меняют раствор и выдерживают еще 1 ч. После промывки образцы испытывают на изгиб под 90°.

По методу Д производят кипячение образцов в 65%-ном растворе азотной кислоты в три цикла по 48 ч. После каждого цикла раствор меняют. Коррозионная стойкость определяется по скорости коррозии в $г/(м^2 \cdot ч)$ за каждый цикл испытания.

В настоящее время для оценки местной межкристаллитной и ножевой коррозии производят макро- и микроисследование шлифов через определенные интервалы времени и фиксируют характер растрескивания.

Контрольные вопросы

1. В каких случаях производят оценку свариваемости металла?
2. Назовите существующие способы оценки свариваемости.
3. Перечислите виды механических испытаний.
4. Укажите отличительные особенности макро- и микроанализа.
5. С какой целью проводят химический анализ и коррозионные испытания?

10. ОРГАНИЗАЦИЯ КОНТРОЛЯ СВАРКИ

10.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ВИДОВ ТЕХНИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

Под контролем качества продукции принято понимать проверку соответствия показателей продукции установленным требованиям, которые могут быть зафиксированы в стандартах, чертежах, технических условиях, договорах о поставке, паспорте изделия и в других нормативных документах. В настоящее время на предприятиях применяют различные виды контроля качества, отличающиеся по методу исполнения, месту расположения в производственном процессе, охвату контролируемой продукции и по другим признакам. В зависимости от места выполнения контроля на том или ином этапе производства различают следующие его виды.

Входной контроль — контроль потребителем исходных основных и сварочных материалов, комплектующих изделий, поступающих к нему от других предприятий и участков. Входной контроль позволяет предупредить образование дефектов из-за ошибок поставщика, собрать объективную информацию о поступаемых материалах и сформулировать дополнительные требования к качеству исходных материалов.

Операционный контроль — это контроль технологического процесса сварки, выполняемый после завершения определенной операции (контроль подготовки под сварку, контроль сборки под сварку шва и т. п.). Наиболее прогрессивным видом операционного контроля является активный контроль, который осуществляется непосредственно в процессе изготовления продукции измерительными приборами, встроенными в технологическое оборудование. Приборы активного контроля непрерывно передают сведения о величине контролируемого параметра, используются в качестве датчиков для автоматического управления процессом изготовления продукции. Применение активного контроля позволяет значительно повысить качество продукции и исключить влияние субъективных факторов на результаты контроля. Примером активного контроля с обратной связью являются контактная сварка стыков труб, когда по значению тока, напряжения и осадки судят о качестве соединения; ультразвуковая сварка пластмасс и металлов, при которой регулируемым параметром является давление; автоматическая сварка под флюсом по скорости плавления проволоки и т. д.

Приемочный контроль — это контроль готового сварного соединения после завершения всех технологических

операций по его изготовлению. По результатам такого контроля принимается решение о пригодности конструкции к эксплуатации. Приемочный контроль является наиболее ответственной заключительной операцией всего процесса изготовления сварного соединения.

В зависимости от объемов проверки сварных швов входной, операционный и приемочный контроль может быть сплошным или выборочным. Контроль, при котором решение о качестве контролируемой продукции принимается по результатам 100% проверки выполненных швов, называют сплошным. Чаще всего его применяют при контроле конструкций ответственного назначения, работающих в сложных эксплуатационных условиях. Этот контроль эффективен для массовой однотипной продукции, когда автоматизированы наиболее ответственные его операции: поиск, регистрация и расшифровка дефектов. При ручном контроле значительное влияние на его результаты оказывают субъективные факторы, в частности утомляемость, внимательность, острота зрения и т. д. В некоторых случаях применение сплошного контроля экономически неэффективно (при очень большой протяженности сварных швов) или невозможно (при разрушающих испытаниях).

Часто на производстве используют выборочный контроль, при котором решение о качестве сварного соединения принимают по результатам проверки определенного объема выборки. В сварочном производстве пока применяют только жесткие планы контроля, когда объем выборки задается нормами в каком-то определенном проценте от объема партии сваренных изделий. От качества технологического процесса и размера партий такие нормы не зависят. Например, для некоторых судовых корпусных конструкций объем выборки по правилам контроля составляет: для первой категории швов — 20%, для второй — 5%, для третьей — 3% протяженности швов. Задание объема выборки в процентах не является статистически обоснованным решением. Кроме того, следует отметить, что выборку в сварочном производстве часто устанавливают «преднамеренно». В такой выборке участки контроля назначают с определенной тенденцией, приводящей к понижению или повышению вероятности отбора дефектных единиц. Например, согласно чертежам или указаниям ОТК просвечивают или прозвучивают все места пересечения швов или швы, сваренные в затрудненных условиях, и т. д.

Наиболее целесообразны в сварочном производстве статистические планы контроля по альтернативному или статистическому признаку. В первом случае объем выборки будет определяться значениями приемлемого и браковочного уровней

качества, а во втором случае — стабильностью контролируемого параметра (временного сопротивления, твердости, пластичности и т. д.). Выборочный контроль по альтернативному признаку целесообразно применять при неразрушаемых испытаниях, а по статистическому признаку — при разрушающих.

Для анализа результатов выборочного контроля применяют методы математической статистики, позволяющие на ограниченном количестве контрольных выборок судить с необходимой точностью о качестве партии изделий или о состоянии технологического процесса. Подобные методы контроля называют статистическими.

10.2. ЗАДАЧИ И СТРУКТУРА КОНТРОЛЬНЫХ СЛУЖБ

Организацией контроля качества продукции называют систему технических и административных мероприятий, направленных на обеспечение нормативного уровня качества. В настоящее время контрольные службы основное внимание обращают на приемочную функцию контроля.

Если считать основной задачей сварщиков непосредственное изготовление конструкций, а обязанности контролеров сводить к определению годности конструкций, то при таком положении наличие дефектов в швах рассматривается как нормальное явление — качество сварки определяет оператор-контролер, который зачастую не имеет возможности выявить все дефекты, не говоря об анализе этих дефектов. Таким образом, между контролерами и технологами не будет действенной активной обратной связи. Установление такой связи является важным резервом дальнейшего повышения качества и эффективности сварочных работ.

В связи с этим перед контрольными службами должны стоять задачи, выполнение которых будет способствовать выпуску высококачественной продукции:

1. Проведение входного контроля качества поступающего сырья, материалов, полуфабрикатов, комплектующих изделий; сбор информации о стабильности качества продукции предприятий поставщиков; оформление соответствующих рекламаций поставщикам.

2. Осуществление приемочного контроля во всех его разновидностях — контроль качества готовых изделий в соответствии с требованиями конструкторской документации и стандартов, клеймение принятой и забракованной продукции и соответствующее документальное ее оформление.

3. Постоянный контроль процесса изготовления продукции.
4. Выполнение ряда специальных контрольных операций (инспекционный контроль хранения сырья, контроль упаковки и консервации, контроль наличия маркировки).

5. Обеспечение строгого соблюдения нормативно-технической документации.

6. Содействие развитию добросовестного отношения к работе внедрением системы поощрения и доплаты.

Помимо того, первостепенными задачами контрольных служб являются организационно-исследовательские работы по управлению качеством продукции.

1. Статистический анализ дефектов, обнаруженных на различных стадиях производства.

2. Анализ причин брака и разработка мероприятий по его устранению.

3. Контроль своевременного выполнения намеченных мероприятий по повышению качества продукции.

Основные функции по реализации на предприятиях перчисленных выше задач возлагаются на отдел технического контроля (ОТК), являющийся самостоятельным структурным подразделением предприятия. Начальник ОТК подчиняется непосредственно руководителю предприятия. В состав ОТК входят цеховые бюро технического контроля (БТК), лаборатории испытания и физических методов контроля, группы инспекционного и входного контроля, техническое бюро. В настоящее время на крупных предприятиях организовываются самостоятельные подразделения по проведению физических методов контроля — отделы неразрушающих методов контроля (ОНМК). Входной контроль качества осуществляется специально выделенной группой контролеров, работающей в системе службы материально-технического снабжения. Эта группа производит отбор проб поступающих материалов, полуфабрикатов и комплектующих изделий, осуществляет необходимые осмотры и измерения, принимает участие в испытаниях продукции поставщиков для определения ее соответствия требованиям стандартов и технических условий.

БТК осуществляет контроль выпуска из цеха доброкачественной продукции и оформляет на принятую продукцию документы, удостоверяющие ее годность, выполняет инспекционный контроль соблюдения технологических процессов и проверку качества продукции на рабочих местах («летучий» контроль), а также контроль своевременности проверки оборудования и оснастки. Организационные формы контроля, применяемые БТК, могут быть различными и зависят от конкретного производства и его масштабов, вида продукции и

других факторов. В сварочном производстве наиболее распространенными видами организации контроля являются:

1. Скользящий контроль — это приемочный или операционный контроль продукции, осуществляемый специальным (дефектоскопическим) оборудованием, доставляемым к месту контроля. Такой контроль применяется для очень крупных конструкций, транспортировка которых затруднительна или невозможна (судовые корпусные конструкции, корпуса атомных реакторов, швы строительных конструкций и т. д.).

2. Для серийного и массового производства характерен стационарный контроль, проводимый на специально оборудованном в цехе контрольном пункте (контроль труб, клапанов и т. д.).

3. «Летучий» контроль — разновидность предупредительного контроля, в ходе которого контролер или оператор-дефектоскопист периодически осуществляет выборочный контроль качества нескольких изделий или участков, а также контролирует соблюдение рабочими требований технологического процесса.

4. Инспекционный контроль — выборочный контроль продукции или технологического процесса, осуществляемый после операционного или приемочного контроля специальной группой. В обязанности этой группы может входить комплексная проверка оборудования, оснастки, приспособлений, технологической дисциплины, а также проверка работы служб ОТК. День проведения проверки заранее не должен планироваться и доводиться до сведения исполнителей.

10.3. НОВЫЕ ФОРМЫ ОРГАНИЗАЦИИ КОНТРОЛЯ

Современный этап обеспечения выпуска качественной продукции характеризуется переходом от реализации отдельных разрозненных мероприятий к разработке и внедрению стройных систем управления качеством продукции на разных уровнях. Особенно активно в нашей стране и за рубежом идет процесс создания систем управления качеством продукции в масштабе предприятия (фирмы). Только в СССР функционирует несколько десятков таких систем управления и всевозможных их разновидностей.

Одной из первых созданных в нашей стране систем управления качеством является саратовская система бездефектной продукции. Идеологической основой системы является воспитание у каждого работника чувства личной ответственности за качество выполняемой работы. Практически это выражается в том, что непосредственный исполнитель несет полную от-

ветственность за качество ее выполнения. Большое значение в комплексе мероприятий, образующих саратовскую систему, придается различным формам стимулирования выпуска продукции высокого качества. Прежде всего в зависимости от качества продукции построена система премирования. Одним из основных измерителей качества принят процент продукции, сданной с первого предъявления.

Большого внимания заслуживают системы управления качеством, действующие на ЗИЛе, ВАЗе и других крупных предприятиях. Широко применяется комплексная система управления качеством продукции, действующая на предприятиях г. Львова и внедряемая в различных отраслях промышленности.

Все перечисленные выше системы базируются в первую очередь на применении статистического контроля качества продукции. Внедрение этих методов контроля качества вносит некоторую специфику в организацию служб ОТК. Статистический контроль в широком смысле понимания этого слова включает статистический анализ точности и стабильности технологических процессов, статистическое регулирование и статистический приемочный контроль. Обеспечение этого комплекса работ возможно усилиями всех служб предприятия, и в первую очередь главного инженера, главного конструктора и др. Информация, получаемая в процессе статистического контроля качества, должна непрерывно поступать в соответствующие отделы, накапливаться там, анализироваться и использоваться для принятия оперативных и обоснованных воздействий на производственный процесс.

Опыт передовых машиностроительных предприятий, успешно применяющих статистический контроль, свидетельствует о том, что служба статистического контроля должна подчиняться непосредственно главному инженеру и объединять работу групп статистического контроля в других службах завода. В составе ОТК должна быть обязательно создана группа статистического контроля, которая анализирует причины брака и дефектности и разрабатывает мероприятия по их устранению и предупреждению. Наличие такой группы дает возможность контролерам более активно участвовать в управлении качеством продукции.

10.4. СЛУЖБА КОНТРОЛЯ В МОНТАЖНЫХ УСЛОВИЯХ

На строительных площадках и трассах контроль качества производится полевыми испытательными лабораториями (ПИЛ). Эти лаборатории обычно прикомандированы к строительным

или монтажным управлениям на время строительства объекта. Административно лаборатория входит в состав центральной полевой испытательной лаборатории (ЦПИЛ) при сварочно-монтажном тресте. Часто в практике существует и такая форма, когда лаборатория контроля входит в состав строительной монтажно-сварочной лаборатории (СМСЛ). Существующую в трестах структуру контрольной службы нельзя считать удачной.

Наиболее целесообразно при сварочно-монтажных трестах иметь лабораторию или сектор физических методов контроля. Основными задачами этого подразделения должны быть наблюдения за правильным ведением технической документации, проверка работы операторов и оказание технической помощи лабораториям при управлениях.

Учитывая, что контрольные службы на монтажных площадках, как и на заводах, должны выполнять не только приемочную функцию, но в первую очередь предупреждать брак, необходимо в СМСЛ или тресте иметь бюро статистических методов контроля. Это бюро должно проводить сбор, обработку и анализ информации, устанавливать причины брака по результатам неразрушающего контроля и тем самым способствовать активному управлению качеством сварки.

В настоящее время служба статистического управления качеством сварки в строительстве внедрена в трестах «Белпромналадка» (Минск) и «Севказтехмонтаж». В первом случае управление качеством сварки и предупреждение появления дефектов выполняется за счет улучшения качества исходных и сварочных материалов. Во втором случае регулирование качества сварки осуществляется рациональной расстановкой сварщиков по рабочим объектам с учетом их работоспособности и фактической квалификации. Внедрение этой системы позволило снизить уровень брака в 2—4 раза. Для решения задач, которые поставлены перед службами контроля, им необходимо предоставлять соответствующие права. Например, в случае неблагоприятных результатов контроля начальник службы должен иметь право на остановку работ и отстранение от производства сварщика. Рабочим и ИТР, допустившим брак, снижать процент премии или снимать ее совсем.

Следует особо подчеркнуть, что строго продуманная организация контроля в условиях завода и монтажа дает исключительно большой эффект по снижению и предупреждению брака. Примером может служить централизованная система контроля в системе Минмонтажспецстроя БССР, которая обеспечивает увеличение производительности контроля в 10—15 раз по сравнению со службами, где нет такой централизации.

10.5. ТЕХНИЧЕСКАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ ПРИ КОНТРОЛЕ

Строгое и четкое ведение контрольно-технической документации — важнейшее условие повышения качества продукции. Документация по контролю качества сварки должна обеспечить соблюдение ГОСТов, четкую систему оценки качества, отбраковки негодной продукции, а также возможность оперативно и активного вмешательства в технологию. В настоящее время существует большое многообразие различных форм, извещений, заключений, журналов, протоколов и другой контрольно-технической документации. Обычно документы при контроле содержат следующие данные: тип изделия и способ его сварки; характеристику основных и сварочных материалов; результаты контроля; наличие исправлений; фамилию сварщика и контролера; допущенные отступления от заданного технологического процесса.

Имеющееся многообразие контрольной документации существенно затрудняет проведение статистического анализа и сравнение качества сварки по различным отраслям. Поэтому целесообразно ввести единые формы учета качества сварки. К ним относятся:

1. Форма КУ-1, в которой отражены условия проведения сварочных работ изделий с протяженными швами, а также занесены результаты радиационного и ультразвукового контроля.

2. Форма КСР-1, в которую должны заноситься результаты качества по способам сварки.

3. Форма КСР-2, анализ качества по методам контроля.

В зависимости от условий производства формы следует корректировать. Таким примером может служить форма КС, разработанная в тресте «Белпромналадка», в которой подробно объяснены и наглядно показаны все процедуры выполнения сварочных работ. Ее применение исключает необходимость журнала сварочных работ и специальных технических условий на сварку и термообработку изделия.

Проведение статистического анализа по указанным выше формам позволит выявить производственно-технологические операции, не обеспечивающие надлежащего качества. Ответственность за правильное и своевременное оформление контрольной документации возлагается на службу ОТК.

Контрольные вопросы

1. Перечислите существующие формы организации контрольных служб.

2. Какие виды организационного контроля применяют в массовом производстве?
3. Перечислите основные задачи службы технического контроля.
4. Назовите новые формы организации контрольных служб.

11. БЕЗОПАСНОСТЬ ТРУДА ПРИ КОНТРОЛЕ КАЧЕСТВА СВАРКИ

11.1. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ

К проведению работ по неразрушающему контролю допускают лиц, которые прошли обучение по утвержденной программе и успешно выдержали испытания по общим и специфическим вопросам безопасности труда. Если работы связаны с профессионально-вредными условиями, например с ионизирующими излучениями, то работники должны пройти медицинский осмотр и иметь положительное заключение о состоянии здоровья. Проверка состояния их здоровья должна проводиться ежегодно. При работах в труднодоступных местах и на высоте должны соблюдаться правила безопасности и инструкции, действующие в стране и на данном предприятии. В процессе проведения контроля должно быть обеспечено устойчивое положение контролируемых изделий, дефектоскопического оборудования и удобные условия работы для оператора. Для проведения контроля на высоте на рабочем месте должны быть сооружены мостки или леса, обеспечивающие доступ к любой точке контролируемого изделия. На высоте оператор-дефектоскопист должен работать в головном уборе и пользоваться предохранительным поясом. Помещения, в которых проводят контроль, должны соответствовать действующим нормам и правилам проектирования промышленных предприятий.

11.2. ПРАВИЛА ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ

Большинство средств неразрушающего контроля (дефектоскопы, установки, приборы, средства механизации и автоматизации) в процессе работы или полностью, или частично находятся под напряжением. Поэтому при их эксплуатации должны строго соблюдаться «Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей», «Правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей», утвержденные Госгортехнадзором СССР.

Работа с оборудованием, в котором используется напряжение свыше 1000 В, относится к группе наиболее опасных

работ. Это прежде всего обслуживание рентгеновских аппаратов, у которых на рентгеновскую трубку подается напряжение в 10—400 кВ и более. Работники, которые привлекаются к обслуживанию этих установок, должны пройти производственное обучение по обращению с ними в установленном порядке и после успешной сдачи экзаменов получить удостоверение с указанием определенной квалификации в соответствии с квалификационными группами персонала по технике безопасности.

Во всех выпускаемых дефектоскопических установках и приборах неизолированные токоведущие части при любом напряжении должны быть ограждены от случайного прикосновения. Неизолированные провода и электросхемы необходимо защищать корпусами. Корпуса установок и приборов должны быть обязательно заземлены. В рентгеновских аппаратах имеются цепи с напряжением более 1000 В, которое подается на рентгеновские трубки. При их смене, а также при профилактических осмотрах и ремонте аппаратов, в которых имеются электрические емкости, необходимо отключить ток и снять остаточный емкостный заряд, разрядив их на заземление. Перед пультами управления рентгеновских аппаратов должны быть уложены резиновые изолирующие коврики.

Вследствие неисправности электроустановок и повреждений изоляции токоведущих частей может возникнуть перегрев проводников и искрение, что является причиной загорания. Перед тушением электроустановок их необходимо отключить от электросети. Небольшие загорания могут быть ликвидированы с помощью углекислотных огнетушителей. Такими огнетушителями можно тушить загорания электроустановок, находящихся под напряжением, так как углекислота не проводит электрический ток. При проведении работ необходимо обеспечить пожарную безопасность в соответствии с «Типовыми правилами пожарной безопасности для промышленных предприятий», утвержденными Главным управлением пожарной охраны МВД СССР, и в соответствии с отраслевыми правилами пожарной безопасности.

11.3. ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ

При работе с ультразвуковыми дефектоскопами, приборами и установками должны соблюдаться все правила электробезопасности и строго выполняться требования, изложенные выше. Контроль внутри сосудов производится только дефектоскопами с напряжением питания 12 В. Перед каждым вклю-

чением дефектоскопа оператор должен убедиться в надежном заземлении прибора медным проводом сечением не менее 2,5 мм². Дефектоскопы необходимо подключать к малонагруженным электролиниям (осветительным сетям). При отсутствии такой возможности подключение дефектоскопа следует проводить через стабилизатор. При отсутствии на рабочем месте розеток подключение (и отключение) дефектоскопа к электрической сети должны производить дежурные электрики. Категорически запрещается работа операторов под съемными механизмами, на неустойчивых конструкциях и в местах, где возможно повреждение проводки электропитания дефектоскопов. Запрещается вскрывать дефектоскоп и ремонтировать его в процессе контроля. Принадлежности, используемые оператором, масленки, обтирочные материалы, ветошь должны храниться в металлических ящиках. Организация участков контроля должна соответствовать требованиям Санитарных норм проектирования промышленных предприятий (СН 245—71), утвержденным Госстроем СССР. Работы с применением эпоксидных смол должны выполняться в соответствии с «Санитарными правилами при работе с эпоксидными смолами» № 348—60, утвержденными Минздравом СССР.

Место, на котором производят контроль, должно быть удалено от сварочных постов и защищено от попадания лучистой энергии. На контролируемой конструкции во время проведения дефектоскопии не должны проводиться механические работы, вызывающие вибрацию. При контроле на открытом месте в дневное время или при сильном искусственном освещении необходимо принять меры к затемнению экрана дефектоскопа. Требования ИТР и операторов, проводящих ультразвуковой контроль, по созданию необходимых условий работы должны выполняться администрацией в обязательном порядке.

11.4. ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РАДИАЦИОННОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ

При проведении радиационной дефектоскопии должны быть приняты меры по защите от ионизирующего излучения. Действуя на живой организм, ионизирующее излучение вызывает особые химические и биологические процессы в клетках ткани, и если не создать соответствующей защиты, это может вызвать различные поражения организма. Требования безопасности при радиационной дефектоскопии обеспечиваются соблюде-

нием «Основных санитарных правил работы с радиоактивными веществами и источниками ионизирующих излучений» (ОСП—72) и «Норм радиационной безопасности» (НРБ—69).

В соответствии с НРБ—69 установлены предельно допустимые дозы и пределы дозы излучений. Предельно допустимой дозой (ПДД) называется годовой уровень облучения персонала, не вызывающий при равномерном накоплении дозы в течение 50 лет неблагоприятных изменений в состоянии здоровья самого облучаемого и его потомства.

Пределом дозы называют допустимый среднегодовой уровень облучения отдельных лиц из населения, контролируемый по усредненным дозам внешнего излучения, радиоактивными выбросами и радиоактивной загрязненностью объектами внешней среды. По действующим нормам и правилам установлены следующие категории облучаемых лиц: категория А — персонал, категория Б — отдельные лица из населения и категория В — население в целом.

К категории Б относятся лица, работающие в помещениях, смежных с теми, в которых работает персонал категории А, а также лица, находящиеся в пределах санитарно-защитной зоны предприятия или проживающие на территории наблюдаемых зон, расположенных вокруг промышленных предприятий. Для всего организма предельно допустимая доза облучения персонала категории А равна 5 бэр/год, предел дозы для лиц категории В — 0,5 бэр/год. Бэр (биологическим эквивалентом рентгена) называют такое количество энергии, поглощенное в 1 г ткани, при котором наблюдается эквивалентный биологический эффект, что и при поглощенной дозе излучения 1 рад рентгеновского и γ -излучений. Рад — внесистемная единица поглощенной энергии 100 эрг на 1 г любого вещества.

Среди лиц категории А выделены две группы: 1 — лица, условия труда которых таковы, что дозы облучения могут превышать 0,3 годовой ПДД; 2 — лица, условия труда которых таковы, что дозы облучения не могут превышать 0,3 ПДД. К последней группе относятся взрослые люди, работающие в пределах санитарно-защитной зоны, а также лица, периодически посещающие контролируемую зону. Для этих лиц индивидуальный дозиметрический контроль и специальное медицинское наблюдение не требуются в отличие от лиц, работающих в контролируемой зоне.

При возникновении аварий должны быть приняты все практические меры по снижению внешнего облучения и поступления радиоактивных веществ в организм человека. Для обеспечения высокой эффективности дезактивации стены помещений, предназначенных для хранения радиоактивных источни-

ков, зарядки и перезарядки гамма-установок, покрывают масляной краской или другим маслособирающим материалом. Полы этих помещений покрывают пластиком или линолеумом.

На предприятиях или строительных площадках, применяющих радиоактивные вещества, должна быть составлена и согласована с местными органами Санэпидемслужбы (СЭС) и Госпожарнадзора инструкция по ликвидации аварий и пожаров, связанных с аварийным облучением персонала и аварийным загрязнением внешней среды. Данная Инструкция должна быть обязательным документом для всех лиц, работающих с радиоактивными источниками. Необходимо помнить, что радиографические пленки на нитроцеллюлозной основе не самовоспламеняются, однако загораются от огня, выделяя удушающие и ядовитые газы. В помещениях, в которых проводят контроль, должна быть обязательно предусмотрена приточно-вытяжная вентиляция и дневное освещение.

Для защиты от ионизирующего излучения в местах проведения контроля необходимо предусматривать мероприятия по защите от облучения. Наиболее распространенным способом защиты от ионизирующего излучения является экранирование — ослабление излучения слоем тяжелого материала. С этой целью в помещениях тяжелыми металлами защищают стены, перекрытия полов, а также обеспечивают защиту дверей, дверных проемов, смотровых окон и т. д. Сами источники излучения — изотопы и рентгеновские трубки — помещают в специальные кожухи, а хранение и перезарядка радиоактивных веществ производится в хранилищах.

В качестве материала для защитных устройств применяют свинец, свинцовое стекло, вольфрам, барит, бетон, кирпич и др. При расчете толщины защитного слоя из какого-либо материала предварительно определяют необходимую толщину свинца для заданных условий работы, а затем находят эквивалентную толщину защитного слоя из данного материала. Защита должна обеспечить снижение дозы на рабочих местах до 2,8 мбэр/ч. В смежных помещениях доза облучения не должна превышать 0,28 мбэр/ч.

Зарядка и перезарядка источников γ -излучения должна осуществляться специализированной организацией. Допускается выполнение этих работ персоналом организации, осуществляющей радиографический контроль, по согласованию с органами СЭС и при наличии специально оборудованного помещения для перезарядки. При транспортировке радиоактивных источников должны соблюдаться требования «Правил безопасности при транспортировке радиоактивных веществ» (ПБТРВ—73

№ 1139—73). Транспортировка дефектоскопа должна осуществляться двумя лицами.

Дефектоскопы с источниками ионизирующего излучения должны храниться в специально оборудованном помещении — хранилище. Запрещается оставлять заряженные дефектоскопы после окончания работы в случайных помещениях. Порядок выдачи, хранение и сохранность дефектоскопов регламентируются заводскими инструкциями.

Кроме перечисленных выше мер по защите от излучения снижения предельно допустимых доз можно достичь сокращением времени пребывания в зоне действия ионизирующих излучений или увеличением расстояния между оператором и источником излучения.

Безопасность проведения работ по радиационной дефектоскопии в значительной мере зависит от правильной организации и своевременного контроля условий работы. С этой целью при работе с ионизирующим излучением проводят дозиметрический контроль. Дозиметрический контроль позволяет установить надежность защиты и дозу излучения, получаемую работниками дефектоскопических лабораторий. Величина и мощность доз излучения измеряется дозиметрами, радиометрами и т. д. По назначению эти приборы подразделяют на две группы: приборы для индивидуального дозиметрического контроля и приборы для измерения мощности доз излучения.

Приборы индивидуального контроля применяют для измерения суммарной дозы облучения, получаемой работником в течение рабочего дня или рабочей недели. В конце рабочего дня или недели измеряют дозу, накопленную индивидуальным дозиметром работника, и регистрируют ее в специальном журнале. На практике чаще всего применяют индивидуальные дозиметры типов КИД-2, ИФКУ-1, ДК-0,2 и др. Дозиметрический контроль помещений осуществляют приборами типа КУРА-1. Боксы, камеры и рабочие комнаты оборудуют сигнально-измерительными дистанционными приборами УСИТ-2, обеспечивающими сигнализацию о превышении предельно допустимых мощностей доз в контролируемой зоне.

11.5. ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ КАПИЛЛЯРНЫХ МЕТОДАХ КОНТРОЛЯ

При выполнении капиллярной дефектоскопии контролеры соприкасаются с токсичными веществами, которые могут поступать в организм через дыхательные пути и кожу и вызывать отрицательные последствия. Во избежание этого все работы

по контролю изделий цветным методом необходимо проводить в спецодежде: халате, головном уборе и медицинских резиновых перчатках. Для защиты рук от проявляющего лака их покрывают пастами, образующими на воздухе пленку. По окончании работы такие «биологические» перчатки смывают водой. Дефектоскопические жидкости не должны попадать на лицо и в глаза оператора, например, при нанесении их распылителем.

Рабочие места для контроля капиллярными методами должны быть оборудованы приточно-вытяжной вентиляцией и местными вытяжками не менее чем с 3-кратным обменом воздуха. На рабочем месте должны быть холодная и горячая вода и сжатый воздух. Контроль внутренней поверхности конструкций закрытого типа следует проводить при постоянной подаче свежего воздуха внутрь контролируемого объекта во избежание больших скоплений паров растворителей.

При люминесцентной дефектоскопии дополнительным источником вредного воздействия является ультрафиолетовое излучение, которое при поглощении кожей человека вызывает в ней биохимические и биофизические изменения. Кроме того, ультрафиолетовое излучение вызывает флуоресценцию глазных сред, что неблагоприятно отражается на здоровье оператора. Для защиты глаз от неиспользуемого ультрафиолетового излучения следует применять желтые светофильтры ЖС-3 и ЖС-18. С целью обеспечения электробезопасности корпуса ультрафиолетовых осветителей необходимо заземлять.

При проведении капиллярной дефектоскопии необходимо предусмотреть меры пожарной безопасности. Это связано с тем, что многие дефектоскопические материалы горючи, поэтому их загорание от искр, случайного огня должно быть исключено. С этой целью все горючие вещества необходимо хранить в специальных металлических шкафах или ящиках, а на рабочих местах должны быть средства огнетушения, в том числе углекислотные огнетушители. Определенную опасность в пожарном отношении и высокой токсичности представляют аэрозольные баллоны для капиллярной дефектоскопии, заполненные фреоном. Хотя этот газ сам по себе не ядовит, но при большой концентрации его в воздухе у оператора наблюдаются признаки удушья, а при контакте фреона с некоторыми нагретыми металлами образуются ядовитые газы. Дыхательные пути в таких случаях необходимо защищать респираторами или противогазами. Предельно допустимые концентрации вредных веществ приведены в «Санитарных нормах проектирования промышленных предприятий» (СН 245—71).

Прием пищи около места проведения контроля категорически запрещается. Руки перед приемом пищи и после окон-

чания работы следует мыть теплой водой с мылом. Применение для мытья рук керосина, бензина и других органических растворителей запрещается. В помещениях, где проводят капиллярную дефектоскопию, нельзя устанавливать электронагревательные приборы.

11.6. ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ ТЕЧЕИСКАНИЕМ

При испытаниях на герметичность особую важность представляют собой методы, связанные с созданием внутри контролируемого объекта избыточного давления. К таким методам относятся пневматические и гидравлические испытания. В процессе проведения испытаний необходимо руководствоваться «Правилами устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением», утвержденными Госгортехнадзором СССР. Согласно этим правилам предусмотрен следующий обязательный порядок испытаний: дефектоскопический контроль сварных и других соединений; гидравлическое или пневматическое испытание; после чего изделия могут быть подвергнуты другим видам испытаний, в том числе контролю герметичности. Если в процессе проведения дефектоскопии обнаружены дефекты, то их необходимо устранить. После этого проводят гидравлическое или пневматическое испытание (опрессовку). После проведения гидравлического или пневматического испытания и снижения давления до необходимого уровня изделие может быть подвергнуто контролю герметичности. При этом также должны соблюдаться требования указанных правил. В процессе контроля на герметичность с применением сжатого газа, так же как и при гидравлических и пневматических испытаниях, запрещается обстукивание изделия. Исправление неплотностей и другие доработки изделия следует проводить только после снижения в нем давления и устранения из него контролируемого или рабочего вещества.

При работе с гелиевыми или галоидными течеискателями в первую очередь необходимо произвести их заземление и проверить качество изоляции соединительных электрических кабелей. Заглушки на испытуемых элементах должны быть надежно закреплены и не иметь внешних дефектов. Недопустимо наличие на участке, где проводится контроль галоидными течеискателями, накаливаемых поверхностей и открытого пламени, так как в их присутствии фреон разлагается с образованием хлористого и фтористого водорода и фосгена. При проведении

контроля течискателями не допускаются сварочные работы на расстоянии менее 5 м от места контроля. Сразу после окончания испытания необходимо закрывать баллоны с газом.

Контрольные вопросы

1. Какие правила необходимо соблюдать при проведении магнитного и ультразвукового методов контроля?
2. Назовите основные способы защиты при радиационных методах контроля.
3. Каковы требования к рабочим местам при проведении капиллярной дефектоскопии?
4. Назовите порядок проведения гидравлических и пневматических испытаний.

СПОСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Акулов А. И., Бельчук Г. А., Демьянцевич В. П. Технология и оборудование сварки плавлением. М., 1977.

Гурвич А. К., Ермолов И. Н. Ультразвуковой контроль сварных швов. Киев, 1982.

Николаев Г. А., Куркин С. А., Винокуров В. А. Сварные конструкции. Прочность сварных соединений и деформации конструкций. М., 1982.

Румянцев С. В., Штань А. С., Гольцев В. А. Справочник по радиационным методам неразрушающего контроля. М., 1982.

Химченко Н. В., Бобров В. А. Неразрушающий контроль в химическом и нефтяном машиностроении. М., 1978.

Шебеко Л. П. Оборудование и технология автоматической и полуавтоматической сварки. М., 1981.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
1. Сварочные материалы и процессы, происходящие при сварке	5
1.1. Сварочные материалы	5
1.2. Металлургические процессы в сварочной ванне	10
1.3. Свариваемость сталей	15
1.4. Сварочные напряжения и деформации	17
2. Дефекты сварных соединений	26
2.1. Типы и виды дефектов	26
2.2. Влияние дефектов сварки на работоспособность конструкций	33
2.3. Способы исправления дефектов	36
3. Предварительный и текущий контроль	37
3.1. Контроль исходных материалов	37
3.2. Контроль оборудования и оснастки	39
3.3. Контроль технологии	40
3.4. Контроль квалификации сварщиков	41
3.5. Внешний осмотр	41
4. Радиационная дефектоскопия	44
4.1. Ионизирующие излучения	44
4.2. Физические основы радиационной дефектоскопии	50
4.3. Аппаратура и материалы	56
4.4. Технология контроля	71
4.5. Рентгенографический и флюорографический методы контроля	78
4.6. Автоматизация основных процессов радиографии	82
4.7. Современные методы радиационной дефектоскопии	89
5. Ультразвуковая дефектоскопия	96
5.1. Физические основы	96
5.2. Аппаратура	103
5.3. Технология контроля	107
5.4. Механизация и автоматизация ультразвукового контроля	126
6. Магнитная и вихрековая дефектоскопия	131
6.1. Физические основы магнитной дефектоскопии	131
6.2. Магнитопорошковый метод	133
6.3. Магнитографический метод	141
6.4. Вихрековая дефектоскопия	145
7. Капиллярная дефектоскопия	151
7.1. Классификация	151
7.2. Методика капиллярного контроля	153

8. Контроль течением	160
8.1. Классификация	160
8.2. Капиллярные методы	161
8.3. Компрессионные методы	162
8.4. Вакуумные методы	167
9. Методы испытаний сварных соединений	170
9.1. Оценка свариваемости	170
9.2. Механические испытания	176
9.3. Металлографический анализ	180
9.4. Химический анализ и испытания на коррозионную стойкость	185
10. Организация контроля сварки	188
10.1. Классификация видов технического контроля	188
10.2. Задачи и структура контрольных служб	190
10.3. Новые формы организации контроля	192
10.4. Служба контроля в монтажных условиях	193
10.5. Техническая документация при контроле	195
11. Безопасность труда при контроле качества сварки	196
11.1. Общие требования	196
11.2. Правила электробезопасности	196
11.3. Требования безопасности при ультразвуковой дефекто- скопии	197
11.4. Требования безопасности при радиационной дефекто- скопии	198
11.5. Требования безопасности при капиллярных методах контроля	201
11.6. Требования безопасности при испытаниях течением	203
Список рекомендуемой литературы	205

Николай Павлович Алешин,
Виктор Григорьевич Щербинский

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА сварочных работ

Заведующий редакцией Г. П. Стадниченко. Редактор Г. В. Садыков. Младшие редакторы Н. В. Захарова, О. В. Каткова. Художник В. М. Боровков. Художественный редактор В. П. Спирина. Технические редакторы З. В. Нуждина, Т. А. Новикова. Корректор Г. А. Четчикова

ИБ № 5754

Изд. № М-283. Сдано в набор 08.08.85. Подп. в печать 11.05.86. Т-19963. Формат 84 × 108¹/₃₂. Бум. тип. № 2. Гарнитура Таймс. Печать высокая. Объем 10,92 усл. печ. л. 11,13 усл. кр.-отт. 11,91 уч.-изд. л. Тираж 70 000 экз. Зак. № 35. Цена 25 коп.

Издательство «Высшая школа», 101430, Москва, ГСП-4, Неглинная ул., 29/14.

Ордена Октябрьской Революции, ордена Трудового Красного Знамени Ленинградское производственно-техническое объединение «Печатный Двор» им. А. М. Горького Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 197136, Ленинград, П-136, Чкаловский пр., 15.

25 коп.