

В.В.ОВЧИННИКОВ

ДЕФЕКТАЦИЯ СВАРНЫХ ШВОВ И КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

УЧЕБНИК

*Рекомендовано
Федеральным государственным автономным учреждением
«Федеральный институт развития образования»
в качестве учебника для использования
в учебном процессе образовательных учреждений,
реализующих программы НПО*

*Регистрационный номер рецензии 287
от 08 июля 2013 г. ФГАУ «ФИРО»*

3-е издание, стереотипное



Москва
Издательский центр «Академия»
2017

УДК 621.791.05(075.32)
ББК 34.441-7я722
О-355

Рецензент —
преподаватель ГБОУ СПО «Технологический колледж № 21», г. Москва
Н. Х. Валиева

Овчинников В.В.

О-355 Дефектация сварных швов и контроль качества сварных соединений : учебник для студ. учреждений сред. проф. образования / В.В.Овчинников. — 3-е изд., стер. — М. : Издательский центр «Академия», 2017. — 224 с.

ISBN 978-5-4468-4152-3

Учебник создан в соответствии с Федеральным государственным образовательным стандартом среднего профессионального образования по профессии «Сварщик (электросварочные и газосварочные работы)», ПМ.04 «Дефектация сварных швов и контроль качества сварных соединений».

Рассмотрены типичные дефекты сварных соединений. Описана международная кодировка дефектов в зависимости от их вида и места расположения в сварном соединении. Рассмотрено влияние дефектов на работоспособность сварных конструкций.

Изложены широко применяемые в промышленности разрушающие и неразрушающие методы обнаружения и идентификации дефектов (внутренних и поверхностных). Проиллюстрированы наиболее рациональные методы устранения дефектов сварки плавлением, электронно-лучевой и контактной сварки.

Для студентов учреждений среднего профессионального образования.

УДК 621.791.05(075.32)

ББК 34.441-7я722

*Оригинал-макет данного издания является собственностью
Издательского центра «Академия», и его воспроизведение любым способом
без согласия правообладателя запрещается*

ISBN 978-5-4468-4152-3

© Овчинников В. В., 2013
© Образовательно-издательский центр «Академия», 2013
© Оформление. Издательский центр «Академия», 2013

Уважаемый читатель!

Данный учебник является частью учебно-методического комплекта по профессии «Сварщик (электросварочные и газосварочные работы)».

Учебник предназначен для изучения профессионального модуля ПМ.04 «Дефектация сварных швов и контроль качества сварных соединений».

Учебно-методические комплекты нового поколения включают в себя традиционные и инновационные учебные материалы, позволяющие обеспечить изучение общеобразовательных и общепрофессиональных дисциплин и профессиональных модулей. Каждый комплект содержит учебники и учебные пособия, средства обучения и контроля, необходимые для освоения общих и профессиональных компетенций, в том числе и с учетом требований работодателя.

Учебные издания дополняются электронными образовательными ресурсами. Электронные ресурсы содержат теоретические и практические модули с интерактивными упражнениями и тренажерами, мультимедийные объекты, ссылки на дополнительные материалы и ресурсы в Интернете. В них включены терминологический словарь и электронный журнал, в котором фиксируются основные параметры учебного процесса: время работы, результат выполнения контрольных и практических заданий. Электронные ресурсы легко встраиваются в учебный процесс и могут быть адаптированы к различным учебным программам.

Современные технологические процессы изготовления продукции машиностроения в большинстве случаев сопровождаются использованием различных способов сварки. Совершенствование существующих или создание новых способов сварки только частично решает проблему повышения качества изготавливаемых конструкций, так как даже при хорошо отработанной технологии выполнения соединения возможно возникновение различного рода дефектов, приводящих к снижению их надежности и долговечности. Следовательно, для повышения качества изготавливаемых конструкций важное значение имеют 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 % от общей стоимости конструкции. Это объясняется, прежде всего, тем, что уровень механизации и автоматизации сварочных работ достаточно высок (35...40 %), а доля автоматизированного неразрушающего контроля незначительна (1...2 %).

В настоящее время особое внимание уделяется ускоренному внедрению 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: радиационная, ультразвуковая, магнитная и капиллярная дефектоскопия, а также испытания изделий на герметичность.

Следует отметить, что среди указанных методов контроля нет ни одного, который гарантировал бы выявление всех дефектов сварки: каждый из них имеет свои достоинства и недостатки. Например, радиационные методы контроля позволяют достаточно

уверенно обнаруживать объемные дефекты небольшого размера (0,1 мм и более) и значительно хуже — несплавления, трещины и стянутые непровары (35... 40 %). Ультразвуковой метод, наоборот, наиболее чувствителен к плоскостным дефектам и малоэффективен для обнаружения дефектов в виде пор размером 1 мм и менее.

Практика показывает, что правильная организация процессов контроля и правильный выбор того или иного метода либо сочетания методов контроля позволяют с высокой надежностью оценивать качество сварных соединений.

Повышение требований к качеству выпускаемой продукции обусловили необходимость подготовки специалистов, владеющих совокупностью знаний по технологии сварки, работе аппаратуры контроля и организации контрольных служб.

Данный учебник должен помочь обучающимся получить необходимые знания, освоить приемы выполнения контрольных операций, познакомиться с устройством и работой аппаратуры контроля. Особое внимание уделяется радиационным и ультразвуковым методам контроля, которые применяются в промышленности значительно чаще, чем другие методы.

ДЕФЕКТЫ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

1.1. СТРОЕНИЕ СВАРНОГО ШВА

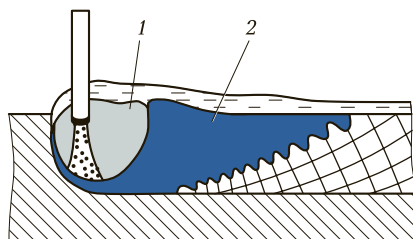
При сварке плавлением до жидкого состояния доводятся кромки соединяемых элементов — основной металл и вводимый дополнительный металл. При сварке без использования дополнительного металла расплавляются только кромки соединяемых элементов. Плавление происходит в зоне сварки — плавильном пространстве. Расплавленные металлы, сливаясь, образуют общую сварочную ванну, находящуюся в состоянии непрерывного движения и перемешивания. Границами такой ванны служат оплавленные участки основного металла и ранее образовавшегося сварного шва.

В процессе сварки источник теплоты перемещается вдоль соединяемых кромок, а вместе с ним движутся плавильное пространство и сварочная ванна. При сварке под флюсом сварочная ванна окружена оболочкой (пузырем) из расплавленного флюса-шлака, который полностью закрывает ореол сварочной дуги, делая его невидимым для глаз. При сварке с газовой защитой сварочная ванна окружена прозрачной оболочкой из газа, а при использовании покрытых электродов сварочная ванна защищена шлаком и газом. В обоих случаях ореол сварочной дуги хорошо виден. При электрошлаковой сварке и дуговой сварке под флюсом вертикальных швов сварочная ванна изолирована от окружающего воздуха слоем шлака, расположенным над ее поверхностью.

При дуговой сварке плавильное пространство можно условно разделить на два участка (рис. 1.1): головной — где происходит плавление основного и дополнительного металлов и хвостовой — где располагается сварочная ванна и начинается ее кристаллизация. При дуговой сварке форма сварочной ванны определяется ее длиной, шириной и толщиной, а также глубиной проплавления

Рис. 1.1. Строение плавильного пространства:

1 — головной участок; 2 — хвостовой участок



основного металла (рис. 1.2, а). Ограничивается сварочная ванна изотермической поверхностью, имеющей температуру плавления основного металла.

Объем сварочной ванны в зависимости от способа и режима сварки изменяется от 0,1 до 10 см³. В плане сварочная ванна имеет эллипсовидное вытянутое вдоль направления сварки очертание (рис. 1.2, б). Поперечное сечение сварочной ванны изменяется в широких пределах в зависимости от режима и условий сварки. Для дуговой сварки наиболее характерна форма провара, приближающаяся к полуокружности. При лучевых способах сварки форма сварочной ванны напоминает острый клин-кинжал.

Время пребывания металла сварочной ванны в жидком состоянии на различных ее участках неодинаковое. Средняя продолжительность существования сварочной ванны, с, определяется по формуле

$$t_{\text{св}} \approx L/v, \quad (1.1)$$

где L — длина ванны, мм; v — скорость перемещения источника нагрева, мм/с.

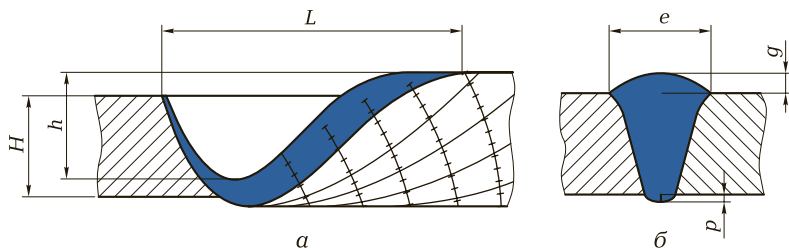


Рис. 1.2. Продольное (а) и поперечное (б) сечения сварочной ванны:

L — длина; h — глубина; H — толщина свариваемого металла; e — ширина; g — выпуклость с лицевой стороны; p — выпуклость со стороны проплава

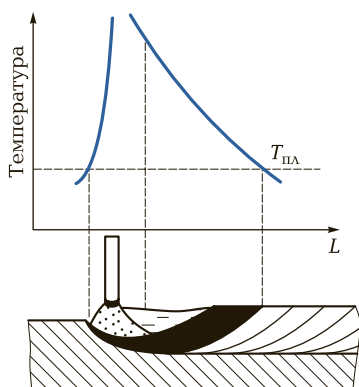


Рис. 1.3. Распределение температуры по длине сварочной ванны

При дуговой сварке температура по длине сварочной ванны распределяется неравномерно (рис. 1.3). В головной части ванны, где под воздействием источника теплоты происходит плавление металла и наиболее интенсивно протекает его взаимодействие со шлаком и газами, металл нагрет значительно выше температуры его плавления $T_{пл}$. В хвостовой части ванны температура приближается к температуре плавления основного металла.

Средняя температура сварочной ванны при сварке под флюсом конструкционных низкоуглеродистых сталей составляет около $1\ 800\ ^\circ\text{C}$, а максимальная температура достигает $2\ 300\ ^\circ\text{C}$.

Столб сварочной дуги, расположенный в головной части сварочной ванны, оказывает механическое воздействие — давление — на поверхность расплавленного основного металла. Это давление возникает в результате совместного воздействия упругого удара заряженных частиц о поверхность металла; давления газов, находящихся в дуговом промежутке, и дутья дуги, обусловленного электродинамическими усилиями. Такое направленное давление наблюдается только при несимметричной сварочной дуге, т. е. при дуге, горящей между электродами с малым и большим сечениями: в нашем случае между электродом, или сварочной проволокой, и основным металлом.

Давление приводит к вытеснению жидкого металла из-под основания сварочной дуги и погружению ее столба в толщу основного металла, что обуславливает увеличение глубины проплавления. Давление, оказываемое сварочной дугой на поверхность металла, пропорционально квадрату тока, протекающего в ней. Это давление можно повысить посредством увеличения концентрации теплоты от источника нагрева, например повышением плотности

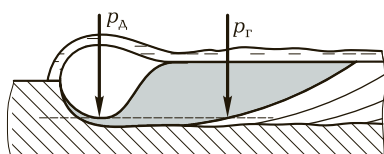
тока в электроде, применением флюса или тугоплавкого покрытия, образующего втулочку на конце электрода (при сварке электродами для глубокого провара). Очевидно, что чем больше давление, оказываемое сварочной дугой на поверхность расплавленного металла, тем больше глубина погружения ее столба в толщу металла. Для понижения давления сварочной дуги используют сварку наклонным электродом углом вперед, сварку несколькими дугами и другие приемы.

Жидкий металл, вытесненный из-под основания сварочной дуги действующими на поверхность сварочной ванны силами, по мере передвижения дуги отбрасывается в хвостовую часть плавильного пространства. При плотности тока в электроде до 15 А/мм^2 это перемещение невелико и проявляется в образовании не заполненного металлом углубления — кратера. При повышенных плотностях тока в электроде наблюдается достаточно заметное перемещение металла сварочной ванны вплоть до полного удаления жидкого металла из головного участка. Этим обуславливается различие уровней жидкого металла в головной и хвостовой частях плавильного пространства (рис. 1.4). Для поддержания такой разности уровней должно существовать равенство между давлением дуги p_d и гидростатическим давлением жидкого металла и шлака p_r . Если $p_d < p_r$, то металл и шлак заполняют образовавшееся углубление, что имеет место в конце процесса сварки. Если $p_d > p_r$, то нарушается нормальное формирование шва.

После перемещения расплавленного металла в головной части плавильного пространства остается углубление — канавка, поверхность которой покрыта тонкой пленкой жидкого металла, удерживаемой силами поверхностного натяжения. По мере передвижения сварочной дуги перемещающийся из последующего головного участка жидкий металл заполняет канавку. При этом происходят слияние поступившего металла с жидкой пленкой и дополнительное оплавление основного металла за счет теплоты, накопленной в перегретой сварочной ванне.

При удалении источника нагрева в хвостовой части плавильного пространства отвод теплоты в массу холодного металла начина-

Рис. 1.4. Расположение жидкого металла в головной и хвостовой частях сварочной ванны



ет преобладать над притоком теплоты и начинается затвердевание металла — кристаллизация сварочной ванны. В процессе затвердевания металла по границе расплавления образуются общие кристаллиты, обеспечивающие монолитность соединения.

При электрошлаковом процессе сварочная ванна в плане имеет преимущественно прямоугольное или близкое к прямоугольному очертание с постоянной шириной. Такая форма сварочной ванны определяется возвратно-поступательным перемещением электрода (электродов) и наличием над ее поверхностью значительного количества жидкого перегретого шлака. Объем сварочной ванны достигает в этом случае 80 см^3 и более, а форма ее поперечного сечения приближается к полукружности или полуэллипсу.

Переход металла сварочной ванны из жидкого состояния в твердое называется первичной кристаллизацией. Процесс первичной кристаллизации заканчивается образованием столбчатых кристаллитов. Структура металла шва, сформировавшаяся в результате первичной кристаллизации, также называется первичной.

При затвердевании металла в нем развиваются диффузионные процессы, стремящиеся выровнять состав различных участков образовавшихся кристаллитов. Однако из-за значительной скорости остывания металла и медленного протекания процессов диффузии в твердых растворах не происходит полного выравнивания состава металла шва. Это определяет наличие зональной ликвации, т. е. неравномерного распределения химических элементов по сечению металла шва, и внутридendirитной неоднородности, заключающейся в неравномерном распределении химических элементов в пределах отдельных кристаллитов. Характер и степень микроскопической неоднородности оказывают существенное влияние на стойкость металла шва к образованию трещин и на его механические свойства.

Преимущественно в сварных швах развивается внутридendirитная химическая неоднородность. Зональная ликвация проявляется значительно меньше: в виде небольшого обогащения серой и некоторыми другими элементами поверхности шва — при широкой форме провара и металла по оси шва — при узкой форме провара. Степени внутридendirитной неоднородности и зональной ликвации в значительной мере зависят от условий остывания (кристаллизации) металла шва и его химического состава.

Степень внутридendirитной химической неоднородности связана со скоростью остывания сварочной ванны сложной зависимостью. При этом изменение скорости остывания металла сварочной

ванны в пределах, характерных для кристаллизации реальных сварных швов, не влияет на степень зональной ликвации.

Значительное влияние на качество сварного соединения оказывают диффузионные процессы, протекающие в зоне сплавления. Здесь вследствие различной растворимости химических элементов в жидкой и твердой фазах химические составы пограничного участка основного металла и прилегающего к нему участка металла шва существенно различаются.

В ряде случаев наблюдается значительное различие химического состава по длине шва и на отдельных его участках, т. е. макроскопическая неоднородность шва. Это различие обычно обусловлено колебаниями режима сварки, изменениями состава сварочных материалов и другими технологическими причинами.

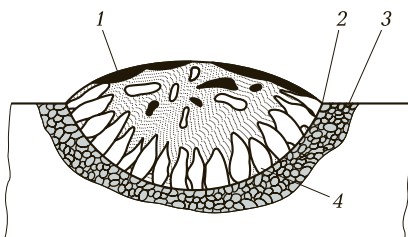
Наблюдаемая в металле сварных швов физическая неоднородность связана с возникновением так называемых вторичных (полигонизационных) границ, проходящих по участкам, где сосредоточены несовершенства кристаллической решетки металла. Физическая неоднородность оказывает заметное влияние на стойкость сварного шва к переходу в хрупкое состояние, к межкристаллитной коррозии и на другие свойства.

Различают первичную и вторичную кристаллизацию сварочной ванны. Переход металла сварочной ванны из жидкого состояния в твердое называется **первичной кристаллизацией**. Этот процесс начинается с частично оплавленных зерен основного или ранее наплавленного металла и продолжается по нормали к линии сплавления (рис. 1.5).

Первичная кристаллизация сварочной ванны при всех видах дуговой сварки начинается с частично оплавленных зерен основного металла или столбчатых кристаллитов предыдущего слоя (при многопроходной сварке), являющихся готовыми центрами кристаллизации. При этом видимая граница между металлами исчезает. Условная поверхность раздела между зернами основного ме-

Рис. 1.5. Схема кристаллизации металла шва:

1 — шлаковые включения; 2 — линия сплавления; 3 — зона термического влияния; 4 — столбчатые кристаллы металла шва



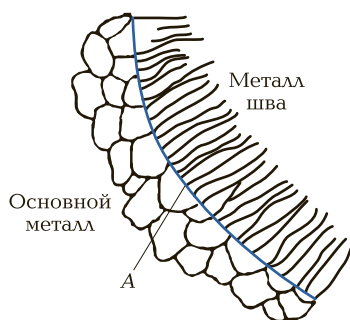


Рис. 1.6. Граница сплавления А

тала и кристаллитами шва называется границей шва, или границей сплавления А (рис. 1.6).

При сварке аустенитных сталей размеры столбчатых кристаллитов в большинстве случаев совпадают с размерами зерен основного металла. При сварке других металлов и сплавов эта закономерность выражена не столь четко.

Процесс первичной кристаллизации металла шва при электрошлаковой сварке не имеет принципиальных отличий от процесса первичной кристаллизации многослойных швов, полученных дуговой сваркой с небольшими перерывами между выполнением слоев. Только на примыкающих к ползунам участках металлической ванны кристаллиты растут перпендикулярно поверхности охлаждения, прорастая на 10...20 мм в глубину шва. Наличие дополнительных охлаждаемых поверхностей при сварке металлов толщиной до 30 мм обуславливает радиально-осевую направленность роста кристаллитов (рис. 1.7). При толщине свариваемых металлов свыше 50 мм кристаллизация основной части шва приобретает обычный характер, и только у ползунов наблюдается специфическая направленность роста кристаллитов.

Первичная кристаллизация металла сварочной ванны так же, как и кристаллизация слитков и отливок, носит прерывистый ха-

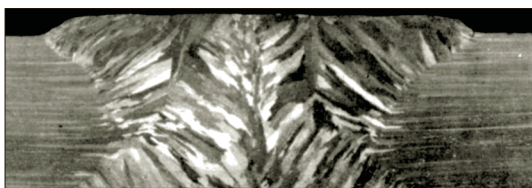


Рис. 1.7. Направленность роста кристаллитов при электрошлаковой сварке металлов толщиной до 30 мм

ракер. Швы, выполненные сваркой плавлением, имеют слоистое строение. Толщина кристаллизационного слоя при дуговой сварке обычно составляет десятые доли миллиметра. При электрошлаковой сварке кристаллизационный слой имеет бóльшую толщину и выявляется более четко.

Слоистое строение металла шва обусловлено совместным действием следующих факторов: выделение скрытой теплоты кристаллизации металла сварочной ванны, волнообразное поступление металла в хвостовую часть плавильного пространства, наблюдаемые в реальных условиях колебания режима сварки и др.

Прерывистость характера первичной кристаллизации сварочной ванны определяет еще один вид ликвации в металле шва — слоистую неоднородность. Кристаллизационный слой состоит из трех характерных участков, нижний из которых обогащен, а верхний — обеднен ликвирующими примесями по сравнению со средним участком.

Вторичная кристаллизация происходит после завершения первичной кристаллизации и характеризуется изменением кристаллической решетки и структуры металла шва. Здесь решающее влияние на характер превращений оказывает скорость охлаждения: чем больше скорость сварки и ниже температура окружающей среды, тем выше скорость охлаждения и вероятность образования внутренних напряжений и трещин.

В процессе кристаллизации металла шва могут возникать горячие трещины.

Горячими трещинами называются микро- и макроскопические трещины, проходящие по границам кристаллитов и вызывающие межкристаллитное разрушение.

Для предотвращения образования горячих трещин следует использовать сварочные материалы с повышенным содержанием марганца и минимальным содержанием серы и углерода; вводить в металл шва легирующие элементы (титан, алюминий, медь); выполнять сварку с предварительным подогревом и последующей термообработкой.

Холодные трещины, образующиеся при температуре ниже 300 °С вследствие возникновения в сварных соединениях значительных внутренних напряжений, проявляются по окончании сварки.

Для предупреждения образования холодных трещин рекомендуется применять сварочные материалы с минимальным содержанием фосфора, проводить сварку на оптимальных режимах; проковать шов после сварки.

Швы, выполненные сваркой плавлением, имеют слоистое строение. Столбчатые кристаллиты, отличающиеся сравнительно крупными размерами, легко различимы при изучении их макроструктуры. В зависимости от способа и режима сварки размеры столбчатых кристаллитов изменяются в достаточно широких пределах. Так, при дуговой сварке их поперечный размер обычно составляет 0,3...3,0 мм. Поскольку для электрошлаковой сварки характерны значительный объем сварочной ванны и длительное пребывание расплавленного металла при высоких температурах, поперечный размер столбчатых кристаллитов в этом случае составляет 3...7 мм.

Рост кристаллитов обычно происходит нормально к криволинейной поверхности раздела основного металла и металла сварочной ванны, а при многопроходной сварке — к границе раздела между металлом ранее закристаллизовавшегося слоя и металлом кристаллизующегося слоя.

При дуговой однослойной сварке столбчатые кристаллиты прорастают через кристаллизационные слои, не изменяя своего направления. При многопроходной сварке рост кристаллитов каждого последующего слоя начинается от частично оплавленных кристаллитов предыдущего слоя, причем направления роста кристаллитов отдельных слоев, как правило, не совпадают, так как конфигурация этих слоев различная.

Столбчатый кристаллит представляет собой группу неполногранных дендритов. У границы сплавления дендриты, как правило, имеют только стволы и малоразвитые ветви начального этапа кристаллизации сварочной ванны. По мере удаления от границы сплавления дендриты разветвляются, выбрасывая ветви второго и третьего этапов кристаллизации.

При электрошлаковой сварке в зависимости от ее режима, химического состава и толщины свариваемых металлов наблюдаются четыре типа макростроения металла шва.

Для первого типа макростроения металла шва характерно наличие трех участков. У границы сплавления и у ползунов располагается участок толстых столбчатых кристаллитов. Каждый такой кристаллит является колонией дендритов, имеющих стволы и слабовыраженные оси начального этапа кристаллизации сварочной ванны. На некотором расстоянии от границы сплавления толстые столбчатые кристаллиты переходят в более тонкие кристаллиты, представляющие собой колонии развитых дендритов, имеющих оси второго и третьего этапов кристаллизации.

Прорастая в глубь шва, тонкие кристаллиты доходят до участка равноосных кристаллитов, занимающего полосу шириной 0,5...

10,0 мм по оси шва. Равноосные кристаллиты имеют дендритное, значительно разветвленное строение.

Второй тип макростроения металла шва, наблюдаемый наиболее часто, характеризуется наличием только участков толстых и тонких столбчатых кристаллитов.

Для третьего типа макростроения металла шва характерно наличие только участка тонких столбчатых кристаллитов, прорастающих от границы сплавления до оси шва (аналогично строению швов при дуговой сварке).

Четвертый тип макростроения металла шва характеризуется наличием лишь участков толстых столбчатых кристаллитов.

При этом в любом случае металл участка толстых кристаллитов обладает более высокими однородностью и плотностью, чем металл других участков.

Для измельчения первичной столбчатой структуры и уменьшения микрохимической неоднородности металла шва принципиально можно использовать следующие методы: применение специальных элементов-модификаторов, возбуждение в сварочной ванне ультразвуковых или механических колебаний и увеличение скорости остывания сварочной ванны. Однако реализовать эти методы достаточно сложно, и поэтому они не находят широкого применения.

Швы, выполненные электроннолучевой и лазерной сваркой, также имеют литую структуру.

Первичная структура металлов и сплавов, претерпевающих при охлаждении аллотропические превращения (например, сплавов железа с углеродом), сохраняется до температуры аллотропического превращения. В сплавах на основе железа аллотропические превращения проявляются при переходе γ -железа в α -железо.

Переход металла шва из одного аллотропического состояния в другое, происходящий в твердом состоянии, называется вторичной кристаллизацией. Структура металла шва, возникающая в результате вторичной кристаллизации, называется вторичной структурой. Характер вторичной микроструктуры определяется химическим составом металла шва, термическим циклом и другими факторами.

На рис. 1.8 приведен термический цикл сварки. При сварке плавлением основной металл, примыкающий к сварному шву, подвергается нагреву до температуры 1 500 °С. Область основного металла, нагретую в диапазоне температур 450...1 500 °С, принято называть зоной термического влияния.

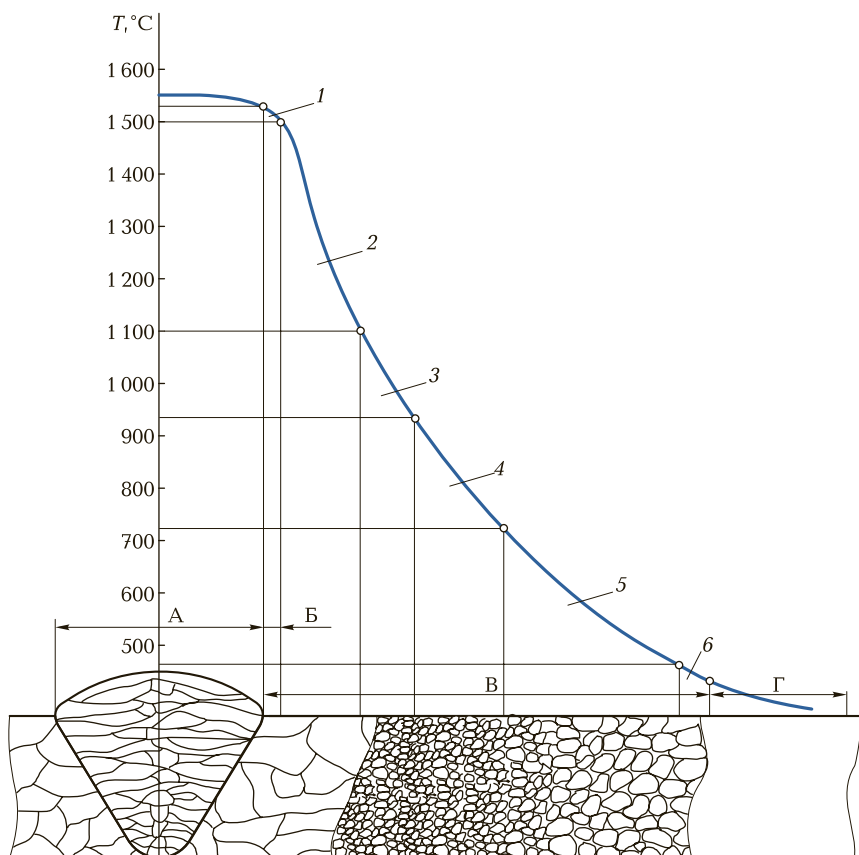


Рис. 1.8. Термический цикл сварки (зоны А...Г сварного соединения и участки 1...6 околошовной зоны):

А — зона наплавленного металла; Б — зона сплавления; В — зона термического влияния; Г — зона основного металла; 1 — неполное расплавление; 2 — перегрев; 3 — нормализация; 4 — неполная перекристаллизация; 5 — рекристаллизация; 6 — синеломкость; Т — температура металла

Зона термического влияния В включает в себя участки неполного расплавления 1, перегрева 2, нормализации 3, неполной перекристаллизации 4, рекристаллизации 5 и синеломкости 6.

Участок неполного расплавления 1 — переходный от расплавленного металла шва к основному. Здесь происходит сплавление кристаллитов металла шва с зернами основного металла.

Участок перегрева 2 — основной металл при температуре 1 100... 1 500 °С, имеющий крупнозернистое строение и пониженные механические характеристики.

Участок нормализации (перекристаллизации) 3 — основной металл при температуре 930...1100 °С, имеющий мелкозернистую структуру и наилучшие механические свойства.

Участок неполной перекристаллизации 4 — основной металл при температуре 720...930 °С, имеющий структуру в виде крупных зерен, по границам которых расположены мелкие зерна.

Участок рекристаллизации 5 — металл при температуре 450...700 °С. Здесь происходят рост зерен феррита (рекристаллизация) из их раздробленных частей, полученных при пластической деформации металла, и процесс старения, заключающийся в выделении нитридов и карбидов вокруг кристаллической решетки стали, что сопровождается повышением ее прочности и снижением пластичности.

Участок синеломкости 6 — металл при температуре 200...450 °С, имеющий пониженные пластические свойства.

Общая протяженность околошовной зоны при сварке плавлением в зависимости от толщины и марки стали составляет 2...30 мм. Для улучшения структуры и свойств зоны термического влияния основного металла и металла шва, выполненного газовой сваркой, производится горячая проковка шва.

Проковка — механическое воздействие молотком или кувалдой на металл шва как в горячем, так и в холодном состоянии.

1.2. НАПРЯЖЕНИЯ И ДЕФОРМАЦИИ ПРИ СВАРКЕ

При сварке плавлением из-за неравномерного нагрева сварной конструкции возникают напряжения и деформации.

Механическое напряжение представляет собой силу, отнесенную к площади поперечного сечения тела, к которому приложена эта сила:

$$\sigma = P/F, \quad (1.2)$$

Деформацией называется изменение размеров и формы тела под действием приложенных к нему сил.

При сварке металл, нагретый до высокой температуры газовым пламенем, начинает расширяться, но расположенные за нагретым металлом холодные участки детали препятствуют его расширению. Под влиянием этих процессов в детали возникают внутренние напряжения (рис. 1.9).

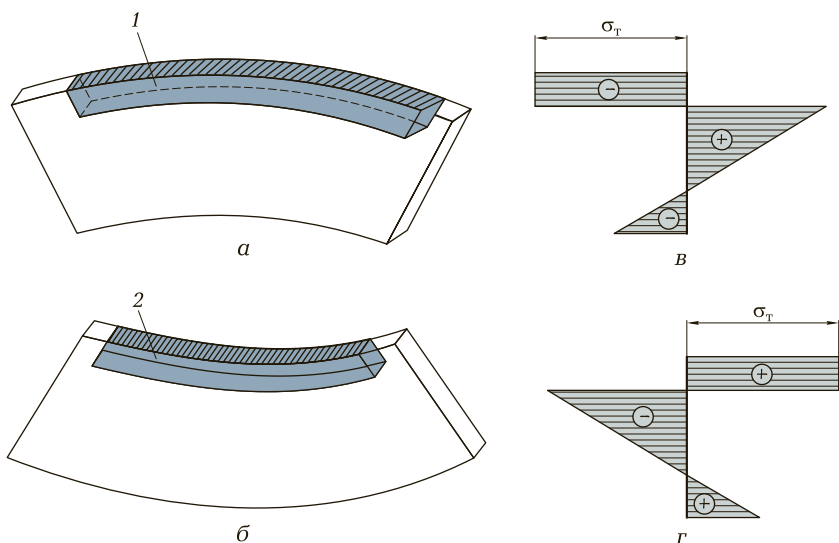


Рис. 1.9. Деформации и напряжения, возникающие при нагреве и охлаждении кромки образца:

а, в — деформации соответственно при нагреве и охлаждении верхней поверхности образца; *б, г* — распределение внутренних напряжений в сечениях, проведенных через осевую линию образцов соответственно при нагреве и охлаждении; *1* — нагретая зона; *2* — охлажденная поверхность; σ_T — предел текучести; «+» — растяжение; «-» — сжатие

Еще одной причиной возникновения напряжений и деформаций при сварке является усадка металла шва при переходе его из жидкого состояния в твердое.

Усадкой называется уменьшение объема металла при его остывании. Усадка металла шва вызывает продольные и поперечные деформации детали.

Степень деформации детали зависит от температуры нагрева и коэффициента линейного расширения металла. Чем выше коэффициент линейного расширения и температура нагрева, тем значительнее деформации. Очевидно, что конструкции из алюминиевых сплавов в наибольшей мере подвержены деформациям. Бесспорно и то, что при высокой тепловой мощности газового пламени вероятность возникновения деформаций конструкции больше.

Форма детали, ее размеры и положение сварочных швов также влияют на ее деформацию при сварке. Сложная форма детали, наличие большого числа несимметричных швов и высокая жесткость

конструкции определяют повышенные деформации и напряжения при сварке (рис. 1.10).

Остаточные напряжения, причиной появления которых является разница удельных объемов структур определенных участков сварного соединения, называются *структурными остаточными напряжениями*. В большинстве случаев они появляются совместно с температурными напряжениями. Например, при остывании легированных сталей образование мартенсита связано с резким увеличением их объема. Так как в этом случае объемные деформации происходят при низких температурах, т. е. когда металл находится в упругом состоянии, структурные превращения вызывают образование остаточных напряжений.

Напряжения, которые существуют в конструкции или элементе конструкции при отсутствии приложенных к ним поверхност-

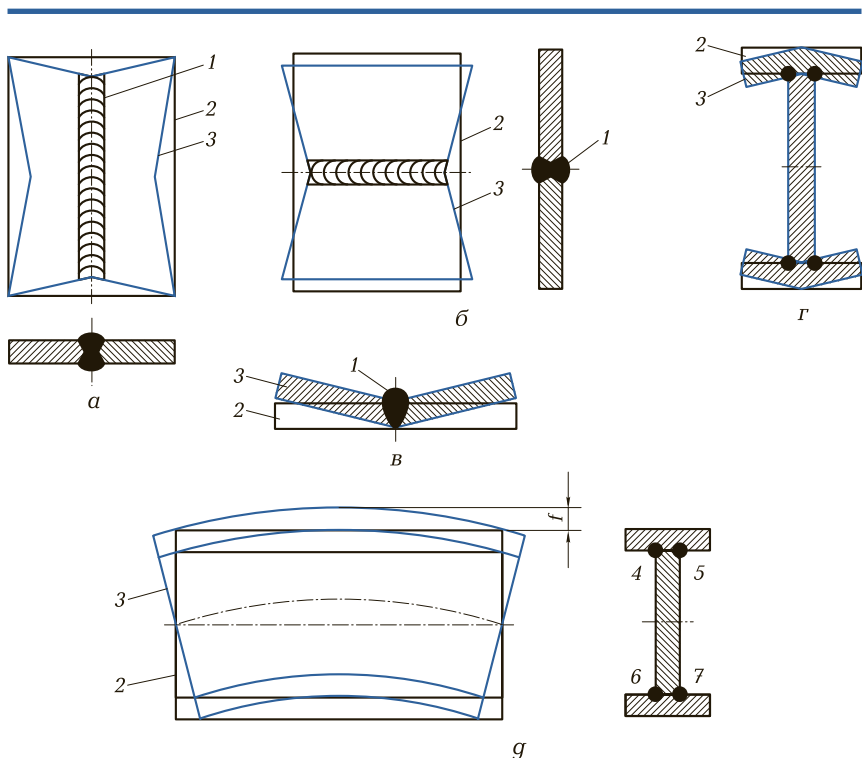


Рис. 1.10. Виды сварочных деформаций:

a, б — линейные; *в, г* — угловые; *г* — серповидная; *1* — сварной шов; *2, 3* — формы изделий соответственно до и после сварки; *4...7* — последовательность выполнения швов; *f* — стрела прогиба

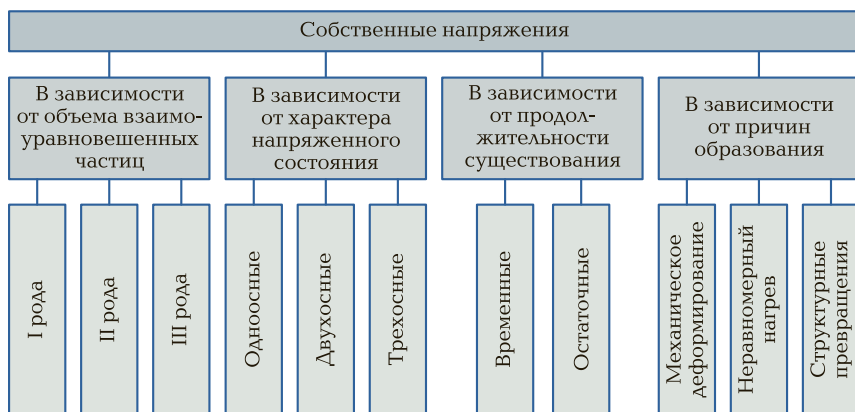


Рис. 1.11. Классификация собственных напряжений

ных или объемных сил, называются *собственными напряжениями* (рис. 1.11). Возникают собственные напряжения вследствие различных видов деформаций металла, например появляющихся в результате изменения температуры, структурных превращений или под действием внешних сил.

В зависимости от объема взаимоуравновешенных частиц тела различают собственные напряжения I рода — уравнивающиеся в макрообъемах (в сварном соединении, сварном шве), II рода — уравнивающиеся в пределах зерен металла и III рода — уравнивающиеся в пределах кристаллической решетки.

По продолжительности существования различают собственные напряжения временные, т.е. существующие только в процессе сварки, и остаточные — сохраняющиеся устойчиво в течение длительного периода после сварки.

Распределение остаточных напряжений в сварных соединениях весьма разнообразно и трудно поддается регламентации и четкой классификации. Более или менее стабильный характер собственные остаточные напряжения имеют вдоль швов, и в первую очередь вдоль стыковых (рис. 1.12). В сварных швах большинства сплавов наиболее опасные растягивающие остаточные напряжения достигают значений пределов их текучести, а иногда и превышает эти значения.

Деформации конструкций, вызванные сваркой, подразделяют на *общие* — характерные для сварной конструкции в целом, и *местные* — образующиеся в пределах одной, нескольких деталей или на части одной из деталей конструкции. Наблюдаемые в свар-

ных конструкциях общие и местные деформации вызываются необратимыми усадочными явлениями и пластическими деформациями, сопутствующими тепловому воздействию сварочной дуги, а также возникающими сварочными напряжениями. Деформации зависят от способа сварки, геометрических характеристик сечения, расположения сварного соединения в конструкции и техники его выполнения.

Различают деформации продольные и поперечные, изгиба, скручивания, потери устойчивости.

Продольные и поперечные деформации, образующиеся при выполнении всех типов швов и соединений, определяющиеся размерами свариваемых элементов по длине и ширине. Остаточные продольные деформации зависят от ширины и толщины свариваемых элементов, способа сварки, размеров швов и других факторов. Остаточные поперечные деформации в пластинах конечных размеров зависят от длины швов.

При выполнении стыковых соединений с зазором (рис. 1.13) в результате неравномерного нагрева по ширине свариваемые пластины изгибаются с раскрытием зазора. Остывание металла в зоне уже сваренного шва приводит к сближению и повороту пластин, стремящемуся закрыть зазор.

Деформации изгиба, появляющиеся при сварке листов, стержней и оболочек, являются следствием несимметричного располо-

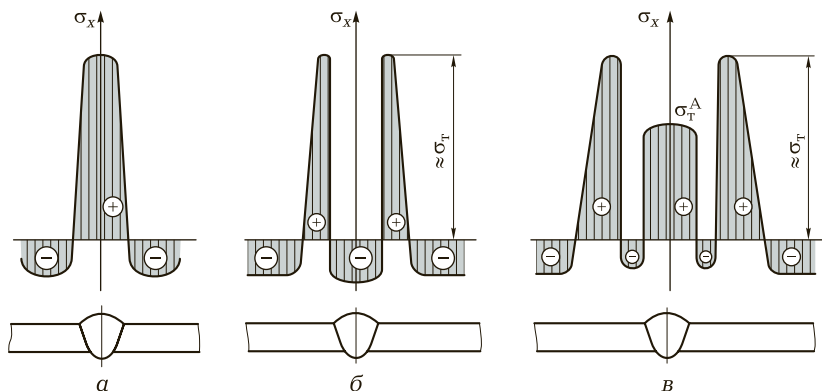


Рис. 1.12. Распределение собственных остаточных напряжений вдоль швов в поперечных сечениях сварных соединений различных материалов:

а — низкоуглеродистая сталь, титановые сплавы; *б* — среднелегированная сталь; *в* — среднелегированная сталь со швом, выполненным аустенитными электродами; σ_T — предел текучести свариваемого материала; σ_T^A — предел текучести аустенитной стали

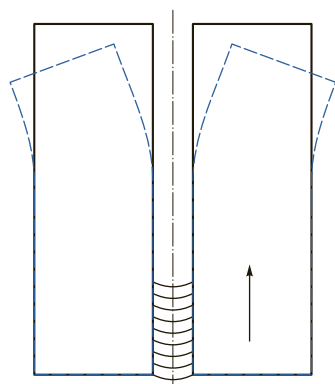


Рис. 1.13. Перемещение пластин, возникающее при сварке их встык с зазором

жения швов относительно центра тяжести сечения, одновременного выполнения симметрично расположенных швов или одновременного заполнения разделки кромок валиками сварного шва.

Неравномерные по толщине поперечные пластические деформации вызывают угловые перемещения свариваемых элементов (рис. 1.14).

Деформация полки таврового соединения, называемая грибовидностью, тем больше, чем больше толщина полки и катет сварного шва (рис. 1.15).

Характерными являются деформации при сварке балочных конструкций, например при выполнении продольного шва тавра (рис. 1.16). После окончания сварки в этом случае возникают укорочение балки и изгиб тавра.

Деформации скручивания образуются вследствие несимметричного расположения сварочных швов относительно центра изгиба стержней или неодновременного их наложения.

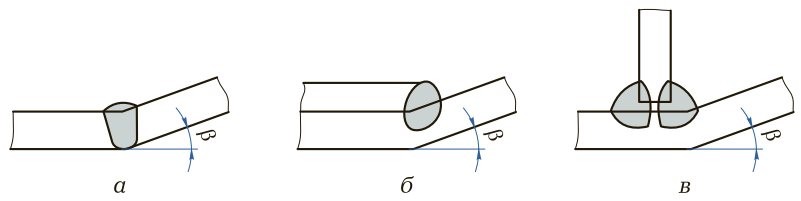
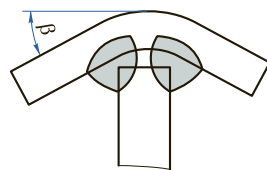


Рис. 1.14. Угловые перемещения, возникающие при выполнении сварных соединений:

а — стыкового; б — нахлесточного; в — таврового

Рис. 1.15. Грибовидность, возникающая при выполнении таврового соединения



Деформации *потери устойчивости* вызываются сжимающими напряжениями, образующимися в процессе выполнения сварных соединений или после остывания конструкции. Особенно значительны такие деформации при сварке тонколистовых конструкций.

В сварных конструкциях могут возникать не только общие, но и местные деформации в виде выпучин и волн. Длинные и узкие листы, сваренные встык, под действием угловых деформаций и собственной массы получают волнистость (рис. 1.17), размеры которой определяются углом β и толщиной свариваемых листов, характеризующей их массу. При приварке ребер к поясным листам возникают местные деформации — грибовидность. При этом кроме местных угловых деформаций возможно также образование выпучин и волнистости на поверхности листа.

Остаточные деформации, возникающие в результате перераспределения внутренних остаточных напряжений после сварки, называются *вторичными*. Перераспределение внутренних остаточных напряжений может произойти при первом нагружении сварной конструкции, а также при механической, термической или газопламенной обработке сварных изделий. Остаточные сварочные напряжения, перемещения и деформации могут существенно снизить прочность конструкции, исказить ее форму и размеры, ухудшить внешний вид, снизить технологическую прочность сварного соединения, что в результате приведет к возникновению горячих или холодных трещин. При определенных условиях возможно снижение статической прочности или потери устой-

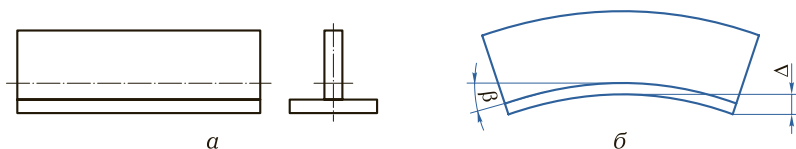


Рис. 1.16. Деформация тавровой балки при сварке:

a — балка до сварки; b — балка после сварки; β — угол прогиба; Δ — прогиб

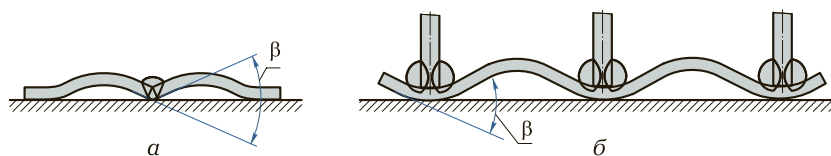


Рис. 1.17. Деформации, возникающие при сварке тонколистовых полотен (а) и приварке ребер к листу (б)

чивости сварной конструкции, что, в свою очередь, также может привести к ее разрушению. Для конструкций, работающих в агрессивной среде, при наличии растягивающих остаточных напряжений возникает вероятность появления коррозионного растрескивания или усиления коррозионных процессов.

На стадиях проектирования, изготовления и монтажа сварных конструкций необходимо принимать меры по уменьшению влияния сварочных напряжений и деформаций. Необходимо уменьшать объем наплавленного металла и тепловложение в сварной шов. Сварные швы следует располагать симметрично друг другу и по возможности не допускать их пересечения.

Ограничить деформации в сварных конструкциях можно и следующими технологическими приемами: выполнять сварку с закреплением изделий в стендах или специальных приспособлениях, использовать рациональную последовательность сварочных (сварка обратноступенчатым швом и др.) и сборочно-сварочных операций (уравновешивание деформаций нагружением элементов детали).

Необходимо создавать упругие или пластические деформации, обратные по знаку сварочным деформациям (обратный выгиб, предварительное растяжение элементов перед сваркой и др.). Эффективно использование усиленного охлаждения сварного соединения (медных подкладок, водяного охлаждения и др.) и пластического деформирования металла в зоне шва в процессе сварки (проковка, прокатка роликом, обжатие точек при контактной сварке и др.).

Лучше использовать способы сварки, обеспечивающие высокую концентрацию теплоты, а также применять двухстороннюю сварку и X-образную разделку кромок, уменьшать погонную энергию и площади поперечных сечений швов, стремиться располагать швы симметрично по отношению к центру тяжести изделия.

Напряжения можно снимать термической обработкой конструкции после сварки. Остаточные деформации можно устранять

механической правкой конструкции в холодном состоянии (изгибом, вальцовкой, растяжением, прокаткой роликами, проковкой и т. д.) и термической правкой ее посредством местного нагрева.

Для уменьшения деформаций необходимо правильно выбирать режим сварки. При сборке конструкции под сварку следует выдерживать постоянным зазор по всей длине кромок, накладывать минимальное число прихваток, соблюдать принятую технологию сварки и технику выполнения швов, использовать способы компенсации деформаций, основанные на определенной очередности наложения швов, а также способ обратных деформаций, заключающийся в придании детали перед сваркой изгиба в направлении, противоположном ожидаемой деформации. Уменьшение деформаций обеспечивает и жесткое закрепление свариваемых деталей в специальных приспособлениях — кондукторах.

Снизить влияние поперечной усадки при сварке можно выставлением неравномерного зазора, т. е. в начале сварного шва зазор выставляется уже, а в конце шва — шире. Необходимое расширение зазора определяется многими факторами: протяженностью свариваемого стыка, толщиной свариваемых деталей, скоростью сварки и т. п. Со временем к сварщику приходят опыт и умение правильно устанавливать требуемое расширение.

При сварке деталей большой толщины (более 6 мм) со скошенными кромками происходит подъем незакрепленных боковых краев деталей, т. е. возникает угловая деформация, поскольку разделка в лицевой части пластин имеет большую ширину, чем в корневой части, а следовательно, наплавленного металла, дающего большую усадку в лицевой части, больше.

Угловые деформации определяются следующими факторами:

- угловая деформация сварных стыковых соединений с односторонним скосом двух кромок возрастает с увеличением числа проходов при незакрепленных краях свариваемых деталей;
- максимальная угловая деформация наблюдается в стыковых соединениях с односторонним сварным швом и прямолинейным скосом кромки. Меньше угловая деформация в стыковых соединениях с односторонним сварным швом и криволинейным скосом кромки, а еще меньше — в стыковых соединениях с двухсторонним сварным швом и двумя симметричными прямолинейными скосами кромки. Меньше всех подвержены угловой деформации стыковые соединения с двухсторонним сварным швом и двумя симметричными криволинейными скосами кромки;
- угловую деформацию стыковых соединений с двумя симметричными скосами кромки (в том числе и с криволинейной раз-

делкой) можно значительно снизить за счет попеременного наложения слоев сварки на каждой из сторон;

- существенное влияние на угловые деформации оказывают продолжительность сварки и диаметр электрода;
- большая скорость нагрева кромок при прочих равных условиях приводит к уменьшению угловых деформаций.

Для предотвращения угловой деформации стыковое соединение со скосом кромок при сборке устанавливают с предварительным их расхождением, соответствующим предполагаемой деформации. В результате после сварки и проявления угловой деформации кромки свариваемых деталей оказываются в одной плоскости. Однако подобный способ предотвращения деформации свариваемых соединений не всегда применим, поэтому чаще используются различные фиксирующие приспособления.

При выполнении угловых и тавровых соединений часто происходит отклонение привариваемой детали в сторону, с которой производится сварка. Причем, как и в рассмотренных ранее случаях, эффект от усадки металла сварного шва тем больше, чем больше его размеры и чем большее число проходов производилось при выполнении этого соединения. Устраняют такую деформацию либо предварительным наклоном привариваемой детали, либо применением цепного прерывистого или шахматного прерывистого шва. Если характер производимых работ требует выполнения непрерывного шва, то незаваренные участки следует заваривать в аналогичной последовательности.

В общем случае усадку и деформацию, возникающие в результате сварки нетермообработываемых изделий, можно свести к минимуму применением следующих технических и технологических приемов:

- выполнять сборку свариваемых деталей без зазора в корне шва;
- использовать минимальное число проходов;
- уменьшать размеры сварных швов, удовлетворяя вместе с тем требования, которые ставятся при проектировании, изготовлении и эксплуатации сварного узла или конструкции;
- использовать минимально возможное число наплаваемых слоев, обеспечивающих выполнение требований, предъявляемых к свойствам сварных швов;
- манипулировать электродом и применять обратноступенчатое наложение наплаваемых слоев;
- выполнять сборку сварного узла с предварительным расхождением свариваемых деталей по плоскости;

- применять предварительное деформирование свариваемых кромок — выгибание свариваемого участка детали в направлении, противоположном наплавлению деформации (после сварки предварительно деформированный участок занимает положение, соответствующее заданному);
- применять временные усилители жесткости, предназначенные для временного увеличения стойкости сварного узла к деформации и удаляемые после завершения сварки и охлаждения узла;
- использовать сварочные кондукторы для сварки небольших узлов и конструкций (помимо устранения деформаций кондукторы способствуют ускорению процессов сборки и сварки).

Значительного снижения сварочных деформаций конструкций можно добиться с помощью широкого использования мощных прихваток, интенсивного манипулирования электродом, а также одновременного выполнения сварки на всех стыках вместо последовательной сварки секции за секцией.

Эффективно применение термообработки, включающей в себя предварительный подогрев и послесварочный отпуск. В некоторых случаях рекомендуется проковка шва.

При термомеханической правке производится равномерный нагрев детали по всему деформированному сечению с последующей правкой его внешней силой. Нагревается деталь газовыми горелками до температуры отжига (750... 800 °С).

В ряде случаев при выполнении правки (рихтовки) панели существует возможность значительного уменьшения объема работы за счет использования методов локального теплового воздействия на обработанный участок.

Как правило, в зоне деформации панельной детали металл растягивается. При этом деформация может быть упругой или пластичной. До определенной нагрузки металл «помнит» свою первоначальную форму и после снятия нагрузки возвращается в исходное состояние (упругая деформация).

После превышения предела упругости деформация металла становится необратимой. Общий объем металла в зоне деформации измениться не может, следовательно, толщина листа становится меньше, а его площадь — больше. Появившийся «лишний» металл необходимо удалить.

Вернуть растянутый участок в первоначальное состояние, т. е. как бы сжать его, приложив минимальную силу, можно правильным сочетанием нагрева и охлаждения. При этом необходимо учитывать следующие основные особенности способа тепловой рихтовки:

- во-первых, несмотря на то что с помощью теплового воздействия можно устранить любую деформацию, применимость тепловой правки при малой толщине панельных деталей ограничена, поскольку тонкий стальной лист быстро прогревается по всей площади, и возникающие при этом силы сжатия оказываются малыми;
- во-вторых, локальный нагрев стальных панельных деталей ограничивается температурами 600...650 °С, так как при более высокой температуре начинается обычная пластическая деформация их без возникновения каких-либо напряжений в металле.

Комбинация механической рихтовки и тепловой обжимки необходима, когда деформированная поверхность сильно растянута и имеется значительный «избыток» металла. В этом случае рекомендуется обычной рихтовкой «согнуть» избыток металла в один или несколько куполообразных выступов. Затем каждый купол правят отдельно посредством нагрева и при необходимости последующего резкого охлаждения. Таким образом удается устранить довольно большие деформации панельных элементов.

При термической правке локальным нагревом стремятся вызвать усадку деформированных участков конструкции, чтобы устранить нежелательные перемещения, возникшие после сварки. Например, изогнутые сварные тавровые балки (рис. 1.18, *а*) нагревают со стороны выпуклой растянутой стороны, а тонкие листы, потерявшие устойчивость (рис. 1.18, *б*), нагревают в зените хлопуна.

Создание дополнительных областей нагрева или охлаждения широко используется для перераспределения остаточных напряжений. Нагревая металл вблизи зоны с растягивающими напряжениями (рис. 1.19, *а*), вызывают расширение нагретого металла. Поскольку зона с растягивающими сварочными напряжениями, расположенная между зонами нагрева, остается при этом холодной и сопротивляется расширению соседних нагреваемых участ-

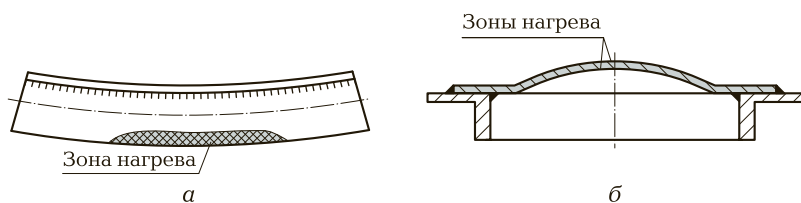


Рис. 1.18. Схемы расположения зон нагрева при термической правке изделий балочного типа (*а*) и листовых (*б*)

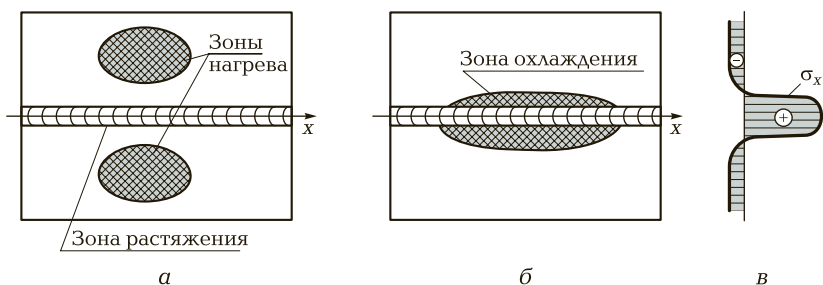


Рис. 1.19. Схемы расположения зон нагрева (а) и зоны охлаждения (б) при обработке соединений в целях уменьшения продольных растягивающих напряжений σ_x (в)

ков, в ней возникают дополнительные растягивающие напряжения, которые суммируются с остаточными напряжениями и вызывают пластические деформации металла. Если же зону остаточных растягивающих напряжений охлаждать (рис. 1.19, б), то она, сокращаясь и встречая при этом сопротивление со стороны соседних неохлажденных участков, будет испытывать дополнительные растягивающие напряжения и, как следствие, — пластические деформации растяжения (рис. 1.19, в).

1.3. ДЕФЕКТЫ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ СВАРКЕ ПЛАВЛЕНИЕМ

Дефектом называется несоответствие параметров и характеристик сварного шва или соединения требованиям нормативно-технической документации.

Дефекты сварных соединений классифицируют по различным признакам:

- по *месту расположения* различают дефекты шва, околошовной зоны и сварного соединения;
- по *стадии технологического процесса* — дефекты подготовки, сборки и сварочного процесса;
- по *допустимости* — допустимые и недопустимые;
- по *степени опасности эксплуатации* — малозначительные, значительные и критические;
- по *глубине залегания* — наружные (поверхностные) и внутреннее.

Согласно ГОСТ 7512—75 в зависимости от местонахождения различают наружные и внутренние дефекты. К наружным относятся дефекты формы сварного шва и вышедшие на поверхность швов поры, свищи, трещины и подрезы, а к внутренним — поры, твердые включения шлака или инородного металла, непровары и внутренние трещины разного рода. Однако подобное разделение дефектов весьма условное, так как многие наружные дефекты оказываются следствием существования, а зачастую и внешним проявлением внутренних дефектов.

В соответствии с причинами образования дефекты подразделяют на две группы. К первой группе относятся дефекты, появление которых связано с физико-химическими процессами, протекающими при формировании и кристаллизации сварочной ванны и остывании сварного соединения, т.е. кристаллизационные и холодные трещины, возникающие чаще всего соответственно в металле шва и околошовной зоне, поры, неметаллические включения и несплавления. К этой группе дефектов можно отнести также неблагоприятную структуру металла шва и сегрегацию примесей в шве. Ко второй группе относятся дефекты, появление которых обусловлено нарушением технологии сварки, т.е. непровары, подрезы, прожоги, несоблюдение заданных размеров шва и др. Однако и данная классификация условная, поскольку образование дефектов, относящихся ко второй группе, во многом связано с физико-химическими процессами, протекающими при сварке.

В зависимости от вида создаваемых полей напряженного состояния дефекты подразделяют на два класса. К первому классу относятся концентраторы (округлые в минимальном сечении и перпендикулярные разрушающей нагрузке) и эллипсоидальные полости разной остроты (сферические и вытянутые поры, неметаллические включения и трещины округлой формы). Второй класс объединяет концентраторы, трещины, подрезы, места перехода от основного металла к наплавленному и некоторые концентраторы конструктивного характера.

В обобщенном виде современная классификация, установленная ГОСТ 30242—97, представлена в табл. 1.1. Следует отметить, что приведенные в табл. 1.1 дефекты характерны для всех способов сварки плавлением.

В сварных соединениях возможно не только образование отдельных дефектов, представленных в табл. 1.1, но и их сочетание на одном участке соединения. Наиболее часто встречаются сочетания дефектов при сварке цветных металлов, особенно алюминиевых и титановых сплавов, а также сложнoleгированных сталей.

Таблица 1.1. Классификация дефектов сварных соединений в соответствии с ГОСТ 30242 – 97

Обозначение дефекта и его вида	Наименование дефекта
<i>Группа 1. Трещины</i>	
100	Трещина
1001	Микротрещина
101	Продольная трещина
1011	Продольная трещина в металле сварного шва
1012	Продольная трещина на границе сплавления
1013	Продольная трещина в зоне термического влияния
1014	Продольная трещина в основном металле
102	Поперечная трещина
1021	Поперечная трещина в металле сварного шва
1023	Поперечная трещина в зоне термического влияния
1024	Поперечная трещина в основном металле
103	Радиальные трещины
1031	Радиальные трещины в металле сварного шва
1033	Радиальные трещины в зоне термического влияния
1034	Радиальные трещины в основном металле
104	Трещина в кратере
1045	Продольная трещина в кратере
1046	Поперечная трещина в кратере
1047	Звездообразная трещина в кратере
105	Радиальные трещины
1051	Радиальные трещины в металле сварного шва
1053	Радиальные трещины в зоне термического влияния
1054	Радиальные трещины в основном металле
106	Разветвленные трещины

Продолжение табл. 1.1

Обозначение дефекта и его вида	Наименование дефекта
1061	Разветвленные трещины в металле сварного шва
1063	Разветвленные трещины в зоне термического влияния
1064	Разветвленные трещины в основном металле
<i>Группа 2. Полости</i>	
200	Полость
2011	Пора
2012	Равномерно распределенная пористость
2013	Скопление пор
2014	Цепочка пор
2015	Продолговатая полость
2016	Свищ
2017	Поверхностная пора
202	Усадочная раковина
2024	Кратер
<i>Группа 3. Твердые включения</i>	
300	Твердое включение
301	Шлаковое включение
3011	Линейные шлаковые включения
3012	Разобщенные шлаковые включения
3013	Прочие шлаковые включения
302	Флюсовое включение
3021	Линейные флюсовые включения
3022	Разобщенные флюсовые включения
3023	Прочие флюсовые включения
303	Оксидное включение

Продолжение табл. 1.1

Обозначение дефекта и его вида	Наименование дефекта
304	Металлическое включение
3041	Металлическое включение из вольфрама
3042	Металлическое включение из меди
3043	Металлическое включение из других металлов (кроме вольфрама и меди)
<i>Группа 4. Несплавления и непровары</i>	
401	Несплавление
4011	Несплавление по боковой стороне
4012	Несплавление между валиками
4013	Несплавление в корне сварного шва
402	Непровар (неполный провар)
<i>Группа 5. Нарушение формы шва</i>	
500	Нарушение формы шва
5011	Подрез непрерывный
5013	Усадочная канавка
502	Избыточная выпуклость стыкового шва
503	Избыточная выпуклость углового шва
504	Избыточная выпуклость проплава
5041	Местная избыточная выпуклость проплава
505	Неправильный профиль сварного шва
506	Наплыв
507	Линейное смещение кромок
508	Угловое смещение кромок
509	Натек
5091	Натек при горизонтальном положении сварки
5092	Натек при нижнем или потолочном положении сварки

Обозначение дефекта и его вида	Наименование дефекта
5093	Натек в угловом сварном шве
5094	Натекание в шве нахлесточного соединения
510	Прожог
511	Неполное заполнение разделки кромок
512	Чрезмерная асимметрия углового шва
513	Неравномерная ширина шва
514	Неровная поверхность шва
515	Вогнутость корня шва
516	Пористость в корне шва
517	Возобновление сварки
<i>Группа 6. Прочие дефекты</i>	
600	Прочие дефекты
601	Случайная дуга
602	Брызги металла
6021	Вольфрамовые брызги
603	Поверхностные задиры

Основные дефекты сварных соединений, выполненных методами сварки плавлением, представлены на рис. 1.20, а, б, а на рис. 1.20, в показаны виды коррозионного поражения сварных соединений при эксплуатации конструкций.

Трещины. Наиболее опасным недопустимым дефектом в сварных соединениях являются трещины. На острых краях трещин при соответствующих условиях может происходить резкое увеличение напряжений, способствующее их развитию, что приводит к полному разрушению конструкций.

Трещина — это дефект в виде разрыва в сварном шве и (или) прилегающих к нему зонах. Трещины относятся к самым серьезным дефектам сварных соединений и, как правило, подлежит устранению.

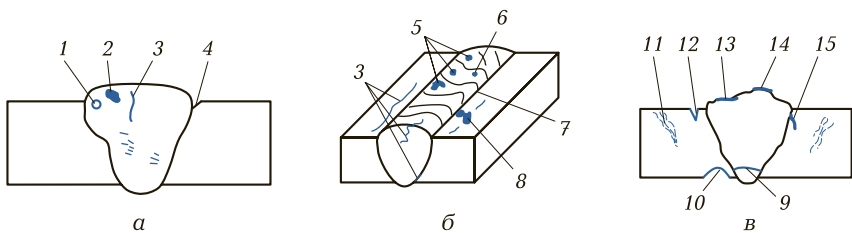


Рис. 1.20. Основные дефекты в сварных соединениях:

а — в сечении шва; *б* — на поверхности шва; *в* — виды коррозионных поражений при эксплуатации конструкций; 1 — пора; 2 — шлаковое включение; 3 — кристаллизационная трещина; 4 — подрез; 5 — грубочешуйчатая поверхность шва; 6 — поверхностная пора; 7 — цвета побежалости (окисление поверхности); 8 — разбрызгивание; 9 — гальваническая коррозия; 10 — эрозия поверхности; 11 — межкристаллитная коррозия; 12 — коррозия по кромке шва; 13 — питтинговая коррозия; 14 — скрытая коррозия; 15 — коррозионное растрескивание

Микротрещина — это трещина макроскопических размеров, которая обнаруживается физическими методами не менее чем при 50-кратном увеличении.

Продольные трещины (рис. 1.21), ориентированные параллельно оси сварного шва, могут возникать в металле шва, на границе сплавления, в зоне термического влияния и в основном металле. Конфигурация трещин в основном определяется формой линии сплавления основного металла и шва. Трещины появляются вследствие высокотемпературной хрупкости металла (горячие трещины) или его замедленного разрушения (холодные трещины).

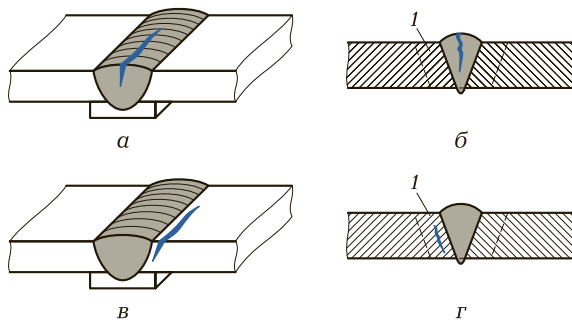


Рис. 1.21. Продольные трещины в металле сварного шва (*а, б*) и в зоне термического влияния (*в, г*):

1 — зона термического влияния

Горячие трещины представляют собой хрупкие межкристаллические разрушения металла шва или околошовной зоны, возникающие в нем в твердожидком состоянии в процессе кристаллизации и в твердом состоянии при высоких температурах (в сталях они образуются при температурах, превышающих 1 000 °С). Горячие трещины извилисты, в изломе они имеют темный цвет, сильно окислены и распространяются по границам зерен.

Согласно современным представлениям появление горячих трещин определяется наличием жидкой прослойки между зернами в процессе кристаллизации и влиянием деформации сжатия. В интервале температур между температурами плавления и полного затвердевания металла происходит миграция примесей и загрязнений в межзеренное пространство. Наличие между зернами жидкой фазы, примесей и загрязнений снижает деформационную способность шва и околошовной зоны. Неравномерность линейной и объемной усадок шва и основного металла при охлаждении приводит к возникновению внутренних напряжений, являющихся причиной появления микро- и макроскопических трещин как вдоль, так и поперек шва.

Причинами образования горячих трещин при сварке являются:

- большое количество вредных примесей (особенно серы и фосфора) в металле свариваемых деталей;
- наличие в металле шва элементов (хрома, молибдена, ванадия, вольфрама, титана), образующих химические соединения с низкой температурой затвердевания, нарушающих связь между зернами;
- жесткое закрепление свариваемых заготовок или повышенная жесткость сварного узла, затрудняющие перемещение заготовок при остывании.

Химический состав металла шва играет важную роль в образовании кристаллизационных трещин. Элементы, входящие в состав металла шва, по-разному влияют на его стойкость к образованию кристаллизационных трещин.

Вредной примесью является сера. Повышение ее содержания в металле шва резко снижает стойкость к образованию кристаллизационных трещин. Сера переходит в металл шва из основного металла и сварочных материалов. При использовании флюсов и электродных покрытий сера из сварочной ванны переходит в шлак.

Фосфор в основном также является вредной примесью. Наиболее опасен фосфор для швов с чисто аустенитной структурой. Фосфор также является причиной образования кристаллизацион-

ных трещин в сварных швах некоторых среднелегированных сталей. Вредное влияние фосфора усиливает углерод. В металл шва фосфор попадает из основного и сварочных материалов.

В большой степени способствует образованию трещин углерод. Применение сварочной проволоки и электродных стержней с низким содержанием углерода, а также уменьшение доли основного металла в металле шва позволяет снизить в нем содержание углерода, который попадает туда из основного и сварочных материалов. Содержание углерода определяется конструкцией стыка, степенью предварительного подогрева, содержанием в металле шва других элементов (особенно серы), формой шва.

Кремний особенно опасен в сварных швах из аустенитного хромоникелевого металла, а также способствует образованию трещин в швах из углеродистого металла. В шов кремний поступает из основного, сварочных материалов и в результате восстановления из флюса и электродного покрытия.

При сварке углеродистых и низколегированных сталей никель не оказывает отрицательного влияния, так как он переходит в сварной шов из основного и сварочного металлов. При сварке других сталей никель способствует образованию кристаллизационных трещин, так как при содержании свыше 1...2 % он усиливает вредное влияние серы.

Кислород снижает ударную вязкость шва при сварке углеродистых и низколегированных конструкционных сталей и пластичность аустенитных швов. Однако он повышает стойкость металла шва к образованию кристаллизационных трещин, вызываемых серой.

Марганец оказывает двойное влияние на образование кристаллизационных трещин: при небольшом содержании он повышает стойкость металла к возникновению трещин, а при значительном содержании (свыше 4 %) — способствует их возникновению. При сварке углеродистых, низколегированных и хромоникелевых аустенитных сталей марганец способствует предотвращению образования кристаллизационных трещин, уменьшая вредное влияние серы.

Таким образом, в целях повышения стойкости металла шва к образованию кристаллизационных трещин следует уменьшать в нем содержание вредных и увеличивать содержание полезных элементов.

Для борьбы с растягивающими напряжениями используются технологические меры, к которым относятся предварительный подогрев свариваемых изделий, рациональная последовательность

наложения сварных швов, выбор способов и режимов сварки, способствующих уменьшению напряжений, и следующие конструктивные меры: рациональное конструирование элементов и узлов сварной конструкции, уменьшение числа и рассредоточение сварных швов, устранение излишней жесткости узлов, выбор оптимальной формы разделки кромок.

Способствуя образованию мелкозернистой первичной структуры металла шва и изменяя характер первичной кристаллизации, можно повысить его стойкость к образованию кристаллизационных трещин. Повышение скорости сварки, снижение сварочного тока, увеличение числа слоев в шве приводит к увеличению скорости кристаллизации и образованию мелкозернистой структуры металла. Колебание электрода и металла сварочной ванны, применение ультразвука в процессе кристаллизации металла сварочной ванны также способствуют образованию мелкозернистой первичной структуры металла шва.

Одним из широко применяемых технологических приемов, направленных на повышение стойкости металла шва к образованию кристаллизационных трещин, является изменение формы провара (отношение ширины шва к глубине его проплавления). При ручной сварке покрытыми электродами и при электрошлаковой сварке коэффициент формы провара швов должен составлять 2,5...5,0, а при сварке под флюсом — 1...2.

Для предотвращения образования горячих трещин в околошовной зоне при сварке конструкционных сталей рекомендуется использовать способы и режимы ее выполнения, обеспечивающие минимальное выделение теплоты.

Холодные трещины представляют собой локальные меж- или транскристаллические разрушения сварных соединений, образующиеся в металле при остывании до относительно невысоких температур (как правило, ниже 200 °С). Холодные трещины в шве и переходной зоне могут располагаться под любым углом к шву. В изломе они светлые или бледных цветов побежалости.

В основном холодные трещины характерны для сварных соединений среднелегированных и высоколегированных сталей перлитного и мартенситного классов; в соединениях низколегированных ферритно-перлитных сталей и высоколегированных сталей аустенитного класса они встречаются реже. По сравнению с кристаллизационными холодные трещины имеют меньшую ширину. Располагаются они в металле шва и околошовной зоне, а иногда переходят из околошовной зоны в металл шва и обратно. Основными являются околошовные холодные трещины. Появлению холодных

трещин в шве способствует повышенное содержание в его металле углерода и водорода.

Холодные трещины могут появляться через несколько минут после сварки, а также через несколько часов и суток. Установлено, что появление холодных трещин обусловлено закалочными явлениями, сварочными напряжениями и напряжениями от внешних нагрузок.

Холодные трещины возникают преимущественно при дуговой сварке низколегированной стали большой толщины (чаще всего в переходной зоне) вследствие неправильной техники сварки или неправильного выбора присадочного металла.

Для предупреждения образования холодных трещин используют:

- прокаливание флюсов и электродов перед сваркой;
- предварительный подогрев свариваемых заготовок до температур 250... 450 °С;
- ведение процесса сварки в режиме с оптимальными параметрами;
- наложение швов в правильной последовательности;
- медленное охлаждение соединений после сварки;
- проведение непосредственно после сварки отжига для снятия остаточных напряжений.

Общими причинами появления горячих и холодных трещин в швах сварных соединений являются:

- излишне высокая жесткость соединений;
- недостаточная ширина сварного шва для данной толщины соединения;
- несоблюдение или неправильный выбор технологии сварки;
- наличие дефектов в сварном шве;
- неправильная подготовка соединения под сварку;
- неудовлетворительное качество или неправильный выбор типа электродов;
- использование сварочного тока повышенной силы, что может приводить к образованию крупнозернистых охрупченных участков структуры;
- высокое содержание углерода или легирующих элементов в основном металле, не учтенное при выборе технологии сварки.

Для предупреждения возникновения трещин в швах сварных соединений необходимо:

- оптимизировать форму металлоконструкции и технологию сварки в целях исключения применения соединений с высокой жесткостью;

- при сварке деталей значительной толщины увеличивать ширину шва и накладывать шов короткими участками (200... 250 мм);
- выбирать такую последовательность выполнения сварных швов, при которой концевые участки соединения, оставаясь максимально долго незаваренными, сохраняют наибольшую подвижность;
- обеспечивать сплошность сварных швов;
- в отдельных случаях осуществлять предварительный подогрев свариваемых деталей;
- производить сборку свариваемых деталей или узлов с зазорами, установленными стандартными требованиями на сварку заданного металла и соответствующей технологией. При необходимости для выравнивания зазора применять стягивающие сборочные приспособления;
- не превышать заданную силу сварочного тока;
- по возможности выполнять многопроходный сварной шов, так как отжиг предыдущих слоев такого шва уменьшает его хрупкость;
- подготовленную разделку кромок свариваемых деталей заполнять сразу после завершения сварки корня шва, поскольку воздействию напряжений обычно подвергается область корневого шва.

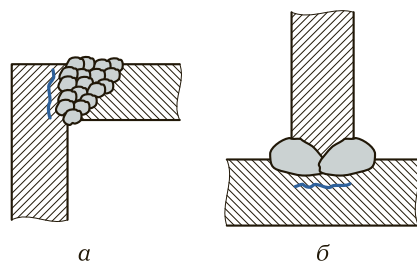
Продольные трещины в основном металле, смежном со сварным швом, образующиеся вследствие наличия больших напряжений, обусловленных усадкой металла сварного шва, являются скрытыми, т. е. не выходящими на поверхность (рис. 1.22). Скрытые трещины обычно проходят вдоль линии сплавления.

Для уменьшения вероятности образования скрытых трещин необходимо снижать сварочные напряжения, для чего следует:

- по возможности осуществлять многопроходную сварку;
- производить проковку каждого слоя наплавленного металла;
- отжигать готовый узел при температурах 590... 650 °С (продолжительность отжига определяется из расчета 1 ч на каждые 25 мм толщины основного металла);
- применять соответствующие технологические приемы;
- в процессе сварки обеспечивать неограниченную свободу перемещения для всех свариваемых частей;
- при сварке сталей, склонных к образованию горячих и холодных трещин, наплавливать высокопластичный промежуточный слой, если при этом не снижается требуемая прочность соединения.

В случае сварки тавровых соединений при толщине металла более 20 мм следует учитывать, что двухсторонний сварной шов вы-

Рис. 1.22. Скрытые трещины, вызванные сжатием основного металла углового (а) и таврового (б) соединений



зывает меньшие напряжения, чем односторонний. Также для двухстороннего шва без разделки кромок характерны меньшие напряжения в околошовной зоне, чем для аналогичного шва с разделкой кромок и полным проплавлением корня. Односторонний сварной шов с большим катетом следует заменять двухсторонним швом с меньшим катетом. Правильный выбор формы разделки кромок углового соединения является наиболее эффективной мерой предупреждения появления скрытых трещин.

Наплавка мягкой высокопластичной прослойки толщиной 5...10 мм и шириной на 15...25 мм больше, чем сварной шов, или наложение высокопластичных валиков на одну из поверхностей кромок позволяет в значительной мере снизить напряжения в околошовной зоне.

Поперечные трещины (рис. 1.23), ориентированные в направлении, перпендикулярном оси сварного шва, могут возникать в металле шва, в зоне термического влияния и в основном металле. Поперечная ориентация трещин связана с влиянием продольных составляющих сварочных напряжений. Причины образования поперечных трещин те же, что и продольных. Поперечные трещины также бывают горячими и холодными.

Радиальные трещины могут образовываться в металле сварного шва, в зоне термического влияния и в основном металле. Конфигурация радиальных трещин зависит от макроструктуры зон сварного соединения и характера внутренних напряжений в нем. Причины появления радиальных трещин те же, что и продольных.

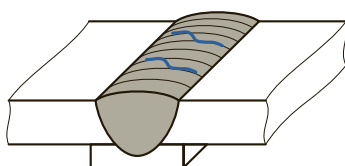


Рис. 1.23. Поперечные трещины в металле сварного шва

Трещина в кратере представляет собой углубление на поверхности сварного шва в месте отрыва сварочной дуги. Такие трещины могут быть продольными, поперечными и звездообразными. Их конфигурация определяется микроструктурой зон сварного соединения, а также характером термических, фазовых и механических напряжений.

Раздельные трещины сварного соединения представляют собой группу не связанных друг с другом трещин. Раздельные трещины могут возникать в металле сварного шва, зоне термического влияния и в основном металле. Их конфигурация зависит от микроструктуры зон сварного соединения и характера термических, фазовых, ликвационных и механических напряжений. Причины образования раздельных трещин те же, что и продольных.

Разветвленной трещиной сварного соединения называется трещина, имеющая ответвления в разных направлениях. Разветвленные трещины могут располагаться в металле сварного шва, зоне термического влияния и в основном металле. Их конфигурация определяется микроструктурой зон сварного соединения и характером термических, фазовых, ликвационных и механических напряжений. Причины появления разветвленных трещин те же, что и продольных.

Полости. Полость — это несплошность произвольной формы, заполненная газом.

Пора — это дефект сварного шва в виде полости округлой формы, заполненной газом. Размеры такой полости не превышают 2 мм.

Дефекты в виде пор часто встречаются в металле сварных швов. Будучи результатом химических реакций, протекающих в сварочной ванне, по своей сути и механизму образования поры аналогичны включениям, но в отличие от последних содержат газ, а не твердое вещество.

Причиной возникновения пор является наличие газов, не успевших выделиться из охлаждающегося металла вследствие уменьшения их растворимости, и газов, образовавшихся в результате химических реакций в расплавленном металле.

Образование пор при сварке стали вследствие выделения водорода и азота происходит из-за резкого снижения растворимости этих газов при затвердевании металла сварочной ванны. Поры вследствие наличия оксида углерода возникают при недостаточной раскисленности металла сварочной ванны.

При электрошлаковой сварке металл шва более стоек к порообразованию, чем при электродуговой сварке. Поры в этом случае

не выходят на поверхность, а располагаются по сечению шва без определенного порядка или скапливаются в отдельные группы.

Если пористость не является избыточной, то она, как правило, не оказывает существенного влияния на прочностные свойства сварных соединений.

Появление пор в металле сварного шва обуславливается:

- плохим качеством или неправильным подбором типа электродов;
- неправильным выбором технологического процесса сварки;
- малой продолжительностью существования сварочной ванны, вследствие чего газы не успевают выделиться из расплавленного металла;
- низким качеством основного и присадочного металлов;
- плохой очисткой кромок соединяемых деталей.

Высокая температура в зоне формирования сварного шва способствует увеличению количества газа, растворенного в расплавленном металле, и возникновению пор в металле шва.

Использование повышенной силы тока при сварке покрытыми электродами увеличивает выгорание раскисляющих элементов из покрытия электрода, что приводит к недостаточному количеству раскислителей в сварочной ванне и, как следствие, к формированию пор в металле шва.

Значительно снизить содержание пор и полостей в сварных швах, а в некоторых случаях даже избежать их образования позволяют следующие меры технологического характера:

- правильный выбор типа электродов;
- прокалка электродов перед сваркой;
- перемешивание жидкого металла сварочной ванны для увеличения продолжительности существования расплава;
- выполнение поперечных колебаний электрода в процессе сварки;
- применение рекомендуемой (не завышенной) силы сварочного тока.

При наличии сомнений в высоком качестве основного и присадочного металлов необходимо проверить их на наличие сегрегации и включений.

Равномерно распределенные поры (рис. 1.24) образуются при наличии ржавчины и масла на кромках свариваемых деталей, а также в случае использования влажного или крупного флюса.

Цепочка пор представляет собой группу пор в сварном шве, расположенных в линию, обычно параллельно оси шва, на расстоянии друг от друга менее утроенного максимального размера большей из них. Появление цепочки пор вызывается главным образом подсосом воздуха в зазор между кромками свариваемых деталей.

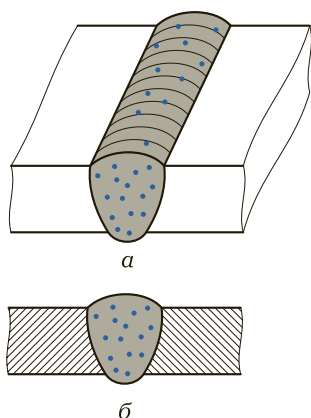


Рис. 1.24. Равномерно распределенные поры в сварном шве (а) и рентгенограмма такого шва (б)

Продолговатая полость представляет собой несплошность, расположенную вдоль оси сварного шва (рис. 1.25). Длина такой полости превышает ее высоту не менее чем в два раза. Данный дефект сварного шва обычно возникает в ослабленном стыке зон столбчатых кристаллитов, растущих навстречу друг другу от линии сплавления.

Свищ представляет собой воронкообразное углубление в сварном шве, образующееся в результате обильного выделения газа. Форма и положение свища зависят от режима кристаллизации сварочной ванны. Обычно свищи группируются в скопления и распределяются в виде «елочки».

Причины образования свищей следующие:

- чрезмерно большая амплитуда колебаний электрода;
- перегрев в процессе сварки основного металла, особенно тонколистового;
- повышенное содержание влаги в покрытии электрода.

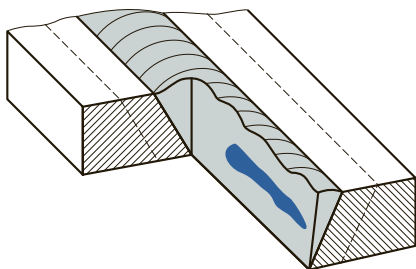
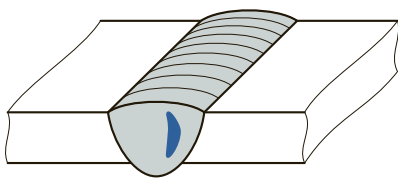


Рис. 1.25. Продолговатая полость в металле сварного шва (штриховыми линиями показаны границы зоны термического влияния)

Рис. 1.26. Усадочная раковина в металле сварного шва



Для предупреждения образований свищей необходимо:

- ограничивать амплитуду колебаний электрода значением, равным четырем его диаметрам;
- правильно выбирать силу сварочного тока и диаметр электрода, учитывая толщину свариваемого металла и тип сварного соединения;
- прокалывать электроды перед сваркой.

Поверхностная пора представляет собой несплошность, сформировавшуюся на поверхности сварного шва.

Усадочная раковина (рис. 1.26) представляет собой полость или впадину, образовавшуюся при усадке металла сварочной ванны в процессе его кристаллизации. Усадочные раковины, относящиеся к наиболее крупным сварочным дефектам, обычно перпендикулярны поверхности сварного шва.

Кратер представляет собой углубление, образующееся в конце валика вследствие объемной усадки металла сварного шва. Размеры кратера зависят от режима сварки. Кратеры снижают прочность сварных соединений.

Твердые включения. *Твердое включение* — это частица инородного вещества (металла или неметалла) в сварном шве. Твердые включения, имеющие хотя бы один острый угол, называются остроугольными.

Шлаковое включение представляет собой вкрапление шлака в металл сварного шва. В соответствии с конкретными условиями проведения сварки шлаковые включения могут быть линейными, разобщенными и др.

В процессе плавления электродного металла и последующей кристаллизации сварочной ванны происходят химические реакции между металлом, атмосферными газами, веществами из покрытия электрода и флюсом. Образующиеся при этом продукты реакций, имея меньшую плотность, чем расплавленный металл, всплывают на его поверхность, образуя шлак, если этому не препятствуют высокая вязкость расплава, быстрое охлаждение либо чрезмерно низкая температура в зоне формирования сварного шва.

При сварке покрытыми электродами некоторая часть шлака может образовываться под поверхностью расплавленного металла. Шлак также может быть увлечен в глубину сварочной ванны действием давления дуги, а кроме того, он может вытекать перед дугой и вытеснять оттуда расплавленный металл.

Крупные шлаковые включения и шлаковые включения, расположенные близко друг к другу, существенно снижают прочность сварного соединения. Такие включения необходимо устранять механическим путем с последующим наложением подварочного шва на дефектный участок. Удаления шлаковых включений малых размеров и одиночных включений, не влияющих на прочность сварного соединения, обычно не требуется.

Шлаковые включения так же, как и поры, ослабляют сечение шва, уменьшают его прочность и являются концентраторами напряжений. Располагаются шлаковые включения между отдельными слоями или внутри наплавленного металла и представляют собой заполненную шлаком несплошность. Образуются они вследствие неполного удаления шлака при многослойной сварке, использования некачественных электродов (попадания кусочков покрытия в сварочную ванну), наличия на свариваемых кромках грязи, окалины и ржавчины.

Шлаковые включения, попавшие в металл сварного шва под действием давления сварочной дуги или образовавшиеся в результате химических реакций, как правило, мелкие и имеют округлую форму. Подобные включения часто встречаются при сварке в потолочном положении.

Образование шлаковых включений можно предотвратить соответствующей подготовкой (перед сваркой каждого шва) кромок свариваемых деталей и ранее выполненных слоев. При этом особое внимание следует уделять предупреждению образования несплошностей, полное проплавление которых затруднено.

Выделение шлака из расплавленного металла сварочной ванны облегчается снижением его вязкости либо замедлением кристаллизации, например посредством предварительного подогрева и повышения погонной энергии.

Флюсовое включение представляет собой частицу флюса в металле сварного шва. В зависимости от условий сварки флюсовые включения могут быть линейными, разобщенными и др. Причины и способы предотвращения возникновения флюсовых включений такие же, как и шлаковых.

Оксидное включение представляет собой частицу оксида металла, попавшую в металл сварного шва в процессе его затвердевания.

Металлическое включение представляет собой частицу инородного металла (вольфрама, меди и др.) в металле сварного шва.

Несплавления и непровары. *Несплавление* — это отсутствие соединения между металлом сварного шва и основным металлом или между примыкающими друг к другу валиками сварного шва. Различают несплавления по скосу кромки и в корне сварного шва.

Причины образования несплавлений следующие:

- локальное недостижение температуры плавления основного металла или металла ранее наплавленных валиков;
- загрязнение кромок свариваемых деталей или их неправильная подготовка (например, заниженный угол скоса кромок);
- неполное растворение во флюсе оксидов и других посторонних веществ, находящихся на поверхностях основного металла или металла ранее наплавленных валиков;
- недостаточная сила сварочного тока;
- повышенная скорость сварки;
- блуждание сварочной дуги;
- плохая очистка поверхностей предыдущих слоев шва;
- затекание металла под сварочную дугу.

Для предотвращения несплавления не требуется расплавлять на большую глубину свариваемые кромки основного металла. Достаточно обеспечить перемешивание основного, электродного и присадочного металлов в сварочной ванне.

Для предупреждения несплавления необходимо:

- тщательно очищать поверхности свариваемых кромок от загрязнений;
- при глубокой узкой разделке кромок использовать электроды малого диаметра, которые могут достичь зоны притупления кромок;
- правильно выбирать силу сварочного тока;
- при сварке деталей большей толщины увеличивать силу сварочного тока, установленную для данного диаметра электрода;
- выполнять поперечные колебания электрода с амплитудой, достаточной для расплавления кромок;
- использовать присадочный и электродный металлы, хорошо смачивающие основной металл.

Непровар (рис. 1.27) — это дефект сварного соединения в виде несплавления вследствие неполного расплавления кромок или поверхностей ранее выполненных валиков сварного шва.

Непровар резко снижает механические показатели сварного соединения. Непровар глубиной 25 % от толщины основного металла при понижении температуры до -45°C снижает разрушаю-

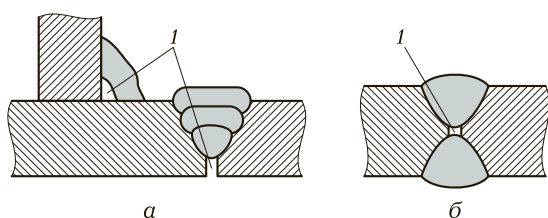


Рис. 1.27. Непровары корня углового и стыкового односторонних (а) и стыкового двухстороннего (б) сварных швов:

1 — непровары

щее напряжение сварного соединения в два раза. Еще более заметно отрицательное влияние непровара на пластичность соединения. Являясь концентратором напряжений, он может привести к образованию трещин. Непровар может образоваться в корне шва, в вершине угла (у угловых швов), а также по кромке.

Термин «непровар» характеризует несплавление, образовавшееся в корне сварного шва, по следующим причинам:

- недостаточная мощность сварочной дуги для проплавления основного металла;
- загрязненные поверхности свариваемых деталей;
- перегрев части сварочной ванны над зоной притупления кромок, сопровождающийся образованием слоя жидкого металла, препятствующего поступлению в эту зону тепловой энергии сварочной дуги.

При дуговой сварке сварочная дуга самопроизвольно устанавливается между электродом и поверхностью свариваемой детали. Остальные участки основного металла нагреваются главным образом за счет его теплопроводности. При большой толщине свариваемых деталей теплопроводность может не обеспечить передачу количества теплоты, необходимого для получения корневой части соединения.

Непровар приводит к разрушению сварного шва при воздействии на него растягивающих или изгибающих напряжений. Даже если эксплуатационные напряжения в конструкции не вызывают растяжения или изгиба в месте непровара сварочного шва, внутренние усадочные напряжения и последующая деформация свариваемых деталей в процессе сварки часто служат причинами появления трещин в сечении, где имеется непровар. Эти трещины могут распространяться при наложении последующих слоев сварного шва и даже приводить к растрескиванию металла по всей его толщине.

Нарушения формы шва. *Нарушение формы* — это отклонение формы наружных поверхностей сварного шва или геометрических параметров соединения от требуемых. Нарушения формы шва относятся к наружным дефектам сварных соединений.

Подрез зоны сплавления (рис. 1.28) представляет собой дефект в виде углубления по линии сплавления сварного шва с основным металлом. Подрез может носить непрерывный или прерывистый характер. Образование этого дефекта обусловлено:

- применением электрода неоправданно большого диаметра;
- завышенными значениями скорости сварки, силы тока и напряжения сварочной дуги;
- чрезмерной длиной сварочной дуги, создающей избыточное давление на границе твердый металл — сварочная ванна;
- неправильными манипуляциями электрода в процессе сварки;
- выполнением сварки в пространственном положении, для которого не предназначены используемые электроды.

В конструкциях, работающих при вибрационных нагрузках, подрез существенно снижает прочность сварного соединения. Если подрез расположен перпендикулярно направлению главных напряжений, он приводит к резкой их концентрации.

При сварке угловых швов подрезы возникают на вертикальной стенке вследствие смещения электрода в ее сторону.

При газовой сварке подрезы образуются вследствие завышенной мощности сварочной горелки, а при электрошлаковой — вследствие плохого охлаждения ползунов и повышенной продолжительности их остановки в конечном положении.

Разные типы электродов обладают неодинаковой способностью к образованию подрезов. Например, при использовании электродов, предназначенных для сварки на токе обратной полярности, увеличивается вероятность возникновения подрезов по сравне-

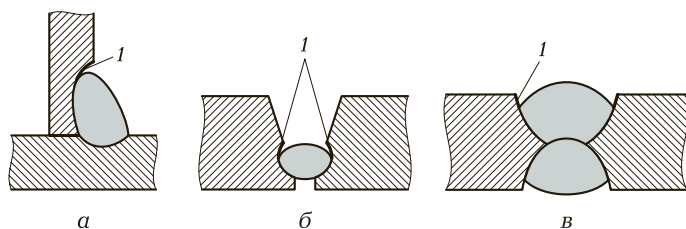


Рис. 1.28. Подрезы зоны сплавления в угловом (а) и стыковых одностороннем (б) и двухстороннем (в) сварных швах:

1 — подрезы

нию с применением электродов, предназначенных для сварки на токе прямой полярности. При этом для предупреждения образования подрезов в первом случае следует использовать специальные приемы, т. е. снижать скорость перемещения электрода вдоль свариваемых кромок и совершать им поперечные колебания, а во втором случае даже высококвалифицированные сварщики не всегда смогут предотвратить их появление.

Подрез относится к очень опасным дефектам, поэтому при его возникновении сварку данного соединения можно продолжать только приняв меры, исключающие появление таких дефектов. Подрезы, возникающие на поверхности сварных соединений, значительно снижают их прочность, и поэтому недопустимы.

Усадочная канавка представляет собой подрез со стороны корня одностороннего сварного шва, вызванный усадкой металла по границе сплавления. Усадка возрастает при чрезмерно большом скосе свариваемых кромок, когда увеличивается объем наплавленного металла.

Избыточная выпуклость стыкового и углового швов представляет собой дефект, возникающий при чрезмерном количестве присадочного металла, поступившего в шов, и вследствие нарушения режима сварки — занижения силы сварочного тока.

Избыточная выпуклость корня шва (рис. 1.29) представляет собой дефект в виде чрезмерного количества металла на обратной стороне стыкового соединения. Данный дефект, обычно образующийся вследствие неправильной формы детали или нарушения технологии сварки, может быть локальным или протяженным.

Неправильный профиль сварного шва (рис. 1.30) образуется при угле θ между поверхностью основного металла и плоскостью, касательной к поверхности сварного шва, менее установленного значения. Данный дефект, проявляющийся как резкий переход от

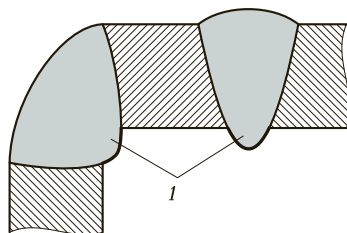
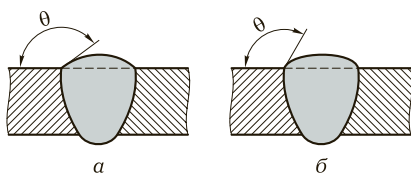


Рис. 1.29. Избыточные выпуклости корня шва углового и стыкового сварных соединений:

1 — избыточные выпуклости

Рис. 1.30. Правильный (а) и неправильный (б) профили сварного шва



шва к основному металлу, образуется при нарушении режима сварки или небрежной работе сварщика.

Наплыв представляет собой дефект в виде натека металла сварного шва на поверхность основного металла или ранее выполненного валика без сплавления с ним. Наплыв бывает местным в виде отдельных застывших капель, но может иметь и значительную протяженность вдоль шва.

Причинами возникновения напыла являются:

- чрезмерно высокие значения силы сварочного тока и напряжения при длинной сварочной дуге;
- большая скорость сварки;
- неправильное положение электрода;
- большой угол наклона свариваемых деталей при сварке на подъем и спуск.

В кольцевых швах напылы образуются при недостаточном или излишнем отклонении электрода от зенита.

Напылы могут сопровождаться скрытыми непроварами кромок, поэтому их следует срубить, а места их расположения подваривать.

Смещение кромок представляет собой неправильное положение свариваемых кромок относительно друг друга. Кромки смещаются в процессе сварки при отклонении технологического процесса (порядка сборки деталей при подготовке под сварку, способа их крепления и метода контроля сборки) от оптимального.

Прожо сварного шва представляет собой дефект в виде сквозного отверстия в шве, образовавшегося в результате вытекания части металла сварочной ванны. Причинами прожога являются недостаточное притупление свариваемых кромок, чрезмерный зазор между ними, завышенные ток и мощность пламени сварочных горелок, заниженная скорость сварки и плохое поджатие флюсовой подушки.

Прожоги являются недопустимыми дефектами. Места их расположения следует тщательно зачистить и заварить вновь.

Неполное заполнение разделки кромок (рис. 1.31) представляет собой дефект в виде продольной непрерывной или прерывистой

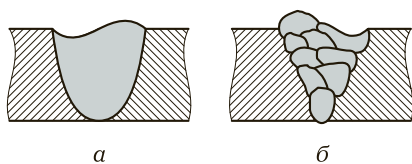


Рис. 1.31. Неполное заполнение разделки кромок однопроходного (а) и многопроходного (б) стыковых сварных швов

канавки на поверхности сварного шва, образовавшейся вследствие недостатка присадочного металла при сварке.

Чрезмерная асимметрия углового шва представляет собой дефект, возникающий вследствие существенного различия его катетов.

Неравномерная ширина шва представляет собой дефект в виде ее отклонения от установленного значения вдоль сварного шва. При ручной сварке данный дефект появляется вследствие неправильного ведения электрода, различного угла разделки по длине шва и неправильного режима сварки, а при автоматической — вследствие изменения скорости подачи электродной проволоки и скорости сварки. Значительные изменения ширины шва могут привести к образованию непроваров.

Неровная поверхность шва представляет собой дефект, связанный с его чешуйчатостью, т.е. наличием на поверхности сварного шва выпуклостей и впадин. Причины образования данного дефекта следующие:

- повышенная сила сварочного тока;
- неправильное манипулирование электродом;
- чрезмерно высокое или низкое напряжение дуги;
- низкое качество используемых электродов;
- неправильный выбор типа электродов;
- выполнение сварки в пространственном положении не предназначенными для этого электродами;
- неправильная подготовка деталей под сварку;
- колебания напряжения питающей сети;
- проскальзывание сварочной проволоки в подающих роликах;
- непостоянная скорость сварки;
- неправильный выбор угла наклона электрода.

Вогнутость корня шва представляет собой дефект в виде углубления на поверхности обратной стороны одностороннего сварного шва, образовавшегося вследствие его усадки. Данный дефект возникает при отклонении параметров сварочного процесса от номинальных значений.

Кратеры. Кратер — это углубление в металле сварочной ванны, образующееся вследствие резкого обрыва дуги в конце сварки, вы-

полняемой механизированным способом, или в конце участка, заваренного электродом при ручной сварке. Кратеры могут явиться очагами образования трещин. Кроме того, в месте расположения кратера шов имеет уменьшенное сечение. Следовательно, необходимо принимать меры по предупреждению появления кратеров. Прежде всего, следует использовать технологические выводные планки, а при их отсутствии в процессе ручной сварки кратер следует тщательно заварить, а сварочную дугу оборвать на уже заваренном участке шва. На основной металл кратер выводить не следует.

Прочие дефекты. К прочим относятся все дефекты сварки, которые нельзя включить в группы 1...5, приведенные в табл. 1.1.

Случайная дуга представляет собой дефект поверхности основного металла, образующийся вследствие возбуждения сварочной дуги при случайном контакте электрода с этой поверхностью и представляющий собой небольшие отбеленные точки, под поверхностью которых могут находиться трещины. Данный дефект следует исправить.

Брызги металла представляют собой дефект в виде затвердевших капель металла на поверхности сварного соединения.

Вольфрамовые брызги представляют собой частицы вольфрама, выброшенные из расплавленной зоны электрода на поверхность основного металла или затвердевшего металла сварного шва. Если частицы вольфрама остаются в металле шва, этот дефект называется вольфрамовыми включениями.

1.4. ВЛИЯНИЕ ДЕФЕКТОВ СВАРКИ НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ КОНСТРУКЦИЙ

При контроле качества сварных соединений и оценке годности их к эксплуатации необходимо знать степень влияния наружных и внутренних дефектов на прочностные характеристики конструкции. Изучение этого вопроса связано с серьезными трудностями как с практической, так и с теоретической точки зрения. В большинстве случаев степень влияния того или иного вида дефекта на работоспособность конструкций устанавливают экспериментально — посредством испытаний образцов с дефектами и без дефектов.

При сдаче конструкции в эксплуатацию, прежде всего, оценивают допустимость наружных дефектов, влияющих на ее работоспособность. Виды наружных дефектов и их допустимые размеры, как правило, указываемые в технических условиях на изготовление конструкции, зависят от условий ее эксплуатации.

Установлено, что чрезмерная выпуклость шва не снижает статическую прочность сварного узла и конструкции, однако значительно уменьшает их вибрационную прочность. Этот дефект и уменьшенный угол между поверхностью основного металла и плоскостью, касательной к поверхности сварного шва, существенно снижают предел выносливости сварного соединения. Таким образом, избыточная выпуклость шва может привести к потере всех преимуществ, обеспечиваемых оптимизацией технологического процесса сварки в целях повышения качества металла шва в сварных соединениях, работающих при вибрационных, динамических и повторно-статических нагрузках.

Опасными наружными дефектами являются подрезы. Их наличие не допускается в конструкциях, работающих при циклических нагрузках, но подрезы небольшой глубины, не превышающей 5 % от толщины основного металла, считаются приемлемыми в конструкциях, эксплуатирующихся в условиях статического нагружения.

Напльвы, резко изменяя очертания швов, образуют концентраторы напряжений и тем самым снижают предел выносливости конструкций. Напльвы, имеющие большую протяженность, считаются недопустимыми дефектами, так как они не только вызывают концентрацию напряжений, но и нередко сопровождаются непроварами. Небольшие местные напльвы, обусловленные случайными отклонениями сварочных режимов от заданных, можно считать допустимыми дефектами.

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

При статической нагрузке снижение прочности пластичных материалов (например, алюминиевых сплавов) прямо пропорционально глубине непровара. Для малопластичных и высокопрочных материалов, а также при динамической или вибрационной нагрузке указанная зависимость нарушается.

Поры и шлаковые включения, суммарная площадь сечений которых составляет 5... 10 % от площади сечения шва, мало влияют на статическую прочность сварного соединения. Для швов, имеющих значительную выпуклость, доля суммарной площади дефектов от площади шва в поперечном сечении составляет 10... 15 %, а для ряда конструкций (закладных деталей, стыков арматуры) в зависимости от местоположения этих дефектов — 10... 25 %.

Такие дефекты, как трещины, оксидные пленки и несплавления, являются недопустимыми.

Для окончательной оценки качества сварного соединения необходимо знать допустимые параметры внутренних дефектов, уста-

навливаемые на основе испытаний. Степень допустимости тех или иных дефектов в сварном изделии регламентируется техническими условиями на его изготовление, а для изделий общестроительного назначения — соответствующими нормами.

Несущие и ограждающие конструкции (СНиП 3.03.01 — 87).

В таких конструкциях недопустимо наличие:

- трещин всех видов и размеров, подрезов глубиной более 5 % от толщины свариваемого металла или более 1 мм;
- непроваров в корне шва, превышающих по высоте 5 % от толщины металла, или более 2 мм в соединениях, доступных для сварки с двух сторон, и в соединениях на подкладках при их максимальной длине, составляющей удвоенную длину оценочного участка;
- непроваров в корне шва в соединениях, доступных для сварки с одной стороны, и в соединениях без подкладок, превышающих по высоте 15 % от толщины свариваемого металла, или более 3 мм;
- удлиненных и сферических одиночных дефектов высотой более значений h , образующих цепочку и скопление высотой более $0,5h$, и длиной более длины оценочного участка l , а также удлиненных дефектов протяженностью более отношения S/h (табл. 1.2);
- непроваров, цепочек и скоплений пор, соседних по длине шва (при расстоянии между близлежащими концами менее 200 мм);
- дефектов, суммарные площади S которых в продольном сечении шва на оценочном участке превышают значения, приведенные в табл. 1.2.

При оценке дефектов за высоту h сферических пор и включений следует принимать диаметры их изображений на радиограммах, а за высоту удлиненных пор и включений — их ширину.

При проведении ультразвукового контроля исходя из возможностей аппаратуры следует руководствоваться данными, приведенными в табл. 1.3.

Таблица 1.2. Допустимые размеры одиночных дефектов сварных соединений при различной толщине свариваемых элементов

Толщина элементов, мм	h , мм	S , мм ²	l , мм
> 4... 8	0,8... 1,2	3... 6	15... 20
> 8... 12	1,6... 2,0	8... 10	20... 25
> 12... 16	2,4... 2,8	12... 14	25
> 16... 20	3,2... 3,6	16... 18	25

Таблица 1.3. Допустимые размеры дефектов сварных соединений, выявляемых при ультразвуковом контроле

Толщина элементов, мм	S , мм ²	S_f , мм ²	n	l , мм
> 6...10	5	7	1	20
> 10...20	5	7	2	25
> 20...30	5	7	3	30

Примечание. S и S_f — фиксируемые эквивалентные площади одиночного дефекта соответственно наименьшая поисковая и допустимая оценочная; n — допустимое число одиночных дефектов на оценочном участке длиной l .

Газораспределительные системы (СНиП 42-01 — 2002). В сварных швах газопроводов недопустимо наличие:

- непроваров по разделке шва;
- непроваров в корне шва глубиной более 10 % от толщины стенки трубы, а также непроваров с суммарной длиной в корне шва более 1/4 от периметра шва независимо от глубины;
- пор и других включений с размерами, превышающими допустимые значения дефектов в плане, установленные для класса 6 сварных соединений по ГОСТ 23055—78, на любом участке радиограммы длиной 100 мм и глубиной, превышающей 10 % от толщины стенки трубы.

Если длина дефектной части шва, выполненного электродуговой сваркой, составляет менее 25 % от длины периметра стыка, допускается исправление этого шва. В противном случае, а также в швах, выполненных газовой сваркой, исправления не допускаются.

Повторный ремонт и исправление дефектов подчеканкой запрещаются.

Магистральные трубопроводы (СНиП 111-42—80). В магистральных газо- и нефтепроводах недопустимо наличие:

- непроваров, цепочек и скоплений пор, удлинённых пор, шлаковых включений в корне шва глубиной более 10 % от толщины основного металла и длиной более 1/6 периметра стыка (цепочек и скоплений длиной более 30 мм на 500 мм шва);
- непроваров в стыках трубопроводов, образующихся при внутренней подварке;
- сферических пор глубиной более 20 % от толщины металла при расстоянии между ними более чем три толщины металла и глубиной более 15 % — при расстоянии, превышающем две его толщины. Размер пор не должен превышать 2,7 мм;

- непроваров и шлаковых включений длиной более 50 мм на 350 мм шва и глубиной, превышающей 10 % от толщины, и более 1 мм.

Тепловые сети (СНиП 3.05.03—85). В трубопроводах теплоснабжения, не подведомственных Ростехнадзору, недопустимо наличие:

- непроваров, вогнутости и превышения проплава в корне шва, выполненного электродуговой сваркой без подкладного кольца, высота (глубина) которых превышает 10 % от номинальной толщины стенки, а общая длина — 1/3 от внутреннего периметра соединения;
- пор и включений, размеры которых на любые 100 мм шва превышают максимально допустимые по ГОСТ 23055—78 для класса 7 сварных соединений.

Эти же требования относятся к наружным сетям водоснабжения и канализации (СНиП 3.05.04—85). На трубопроводах тепловых сетей, подведомственных Ростехнадзору, недопустимо наличие пор и включений, размеры которых превышают указанные в табл. 1.4.

Технологические трубопроводы (СНиП 3.05.05—84). Качество сварных соединений оценивается по результатам неразрушающего контроля (табл. 1.5 и 1.6). Сварные соединения бракуют при их ценке 2 балла или более — для трубопроводов высокого давления, 3 —

Таблица 1.4. Допустимые размеры пор и включений на трубопроводах тепловых сетей

Номинальная толщина стенки, мм	Размеры пор и включений, мм						Общая длина на любом участке шва длиной 100 мм
	отдельных		скоплений		цепочек		
	Ширина (диаметр)	Длина	Ширина (диаметр)	Длина	Ширина (диаметр)	Длина	
< 2	0,5	2	0,8	2	0,5	3	4
> 2... 3	0,6	2,5	1	2,5	0,6	4	6
> 3... 5	0,8	3,5	1,2	3,5	0,8	5	10
> 5... 8	1,2	4	2	4	1,2	6	15
> 8... 11	1,5	5	2,5	5	1,5	8	20
> 11... 14	2	5	3	5	2	8	20
> 14... 20	2,5	6	4	6	2,5	9	25

Таблица 1.5. Оценка качества сварных швов технологических трубопроводов по результатам неразрушающего контроля

Оценка, баллы	Дефекты и их высота (глубина), % от номинальной толщины стенки	Общая длина дефекта по периметру трубы
0	Непровар отсутствует. Вогнутость корня шва до 10 %, но не более 1,5 мм	До 1/8 периметра
	Превышение проплава корня шва до 10 %, но не более 3 мм	То же
1	Непровар по оси шва до 10 %, но не более 2 мм	До 1/4 периметра
	Непровар по оси шва до 5 %, но не более 1 мм	До 1/2 периметра
2	Непровар по оси шва до 10 %, но не более 3 мм	До 1/4 периметра
	Непровар по оси шва до 10 %, но не более 2 мм	До 1/2 периметра
	Непровар по оси шва до 5 %, но не более 1 мм	Не ограничивается
6	Трещины, несплавления между основным металлом и швом и между отдельными валиками шва, непровары по оси шва более 20 % и более 3 мм	Не зависит от длины

для трубопроводов категорий I и II; 5 — для трубопроводов категории III; 6 — для трубопроводов категории IV.

Сварные соединения, оцененные указанным или большим баллом, подлежат исправлению, после чего дополнительному контролю подвергаются удвоенное число стыков, выполненных сварщиком, допустившим брак.

Сварные соединения трубопроводов категорий III и IV, оцененные соответственно общими баллами 4 и 5, исправлению не подлежат, но при этом дополнительному контролю подвергается удвоенное число стыков, выполненных сварщиком. Если при дополнительном контроле хотя бы один стык будет забракован (а для трубопроводов категорий III и IV оценен соответственно баллами 4 и 5), контролю подвергается 100 % стыков, выполненных свар-

Таблица 1.6. Допустимые размеры включений в технологических трубопроводах

Оценка, баллы	Толщина стенки, мм	Включения (поры)		Скопления	Общая длина, мм, на любом участке шва длиной 100 мм
		Ширина (диаметр), мм	Толщина, мм	Длина, мм	
1	< 3	0,5	1	2	3
	> 3... 5	0,6	1,2	2,5	4
	> 5... 8	0,8	1,5	3	5
	> 8... 11	1	2	4	6
	> 11... 14	1,2	2,5	5	8
	> 14... 20	1,5	3	6	10
	> 20... 26	2	4	8	12
	> 26... 31	2,5	5	10	15
	> 34	3	6	10	20
2	< 3	0,6	2	3	6
	> 3... 5	0,8	2,5	4	8
	> 5... 8	1	3	5	10
	> 8... 11	1,2	3,5	6	12
	> 11... 14	1,5	5	8	15
	> 14... 20	2	6	10	20
	> 20... 26	2,5	8	12	25
	> 26... 34	2,5	8	12	30
	> 34... 45	3	10	15	30
	> 45	3,5	12	15	40
3	< 3	0,8	3	6	8
	> 3... 5	1	4	6	10
	> 5... 8	1,2	5	7	12
	> 8... 11	1,5	6	9	15

Оценка, баллы	Толщина стенки, мм	Включения (поры)		Скопления	Общая длина, мм, на любом участке шва длиной 100 мм
		Ширина (диаметр), мм	Толщина, мм	Длина, мм	
3	> 11... 14	2	8	12	20
	> 14... 20	2,5	10	15	25
	> 20... 26	3	12	20	30
	> 26... 34	3,5	12	20	35
	> 34... 45	4	15	25	40
	> 45	4,5	15	30	45
6	Независимо от толщины	Включения (поры) и скопления, размеры которых или общая протяженность превышают значения, установленные для оценки 3 балла			

Примечания: 1. При отсутствии включений участок сварного шва имеет оценку 1 балл.

2. Число отдельных включений, длина которых меньше значений, указанных в данной таблице, не должно на любом участке длиной 100 мм превышать: 10 — для оценки 1 балл; 12 — для оценки 2 балла и 15 — для оценки 3 балла.

3. Для сварных соединений протяженностью менее 100 мм значения из данной таблицы по общей длине включений следует пропорционально уменьшить.

4. Оценку участков на стыках трубопроводов высокого давления, в которых обнаружены скопления включений, следует увеличить на один балл.

5. Оценку участков, в которых обнаружены цепочки включений, следует увеличить на один балл.

Таблица 1.7. Допустимые размеры выборок после удаления дефектных участков шва

Глубина выборки, % от номинальной толщины стенки трубы	Общая протяженность, % от номинального наружного периметра соединения
<i>Для трубопроводов высокого давления ($p_y = 10 \dots 100$ МПа)</i>	
< 15	Не нормируется
> 15... 30	< 35
> 30... 50	< 20
> 50	< 15

Глубина выборки, % от номинальной толщины стенки трубы	Общая протяженность, % от номинального наружного периметра соединения
<i>Для трубопроводов категорий I...IV</i>	
< 25	Не нормируется
> 25... 50	< 50
> 50	< 25

щиком. Если при этом будет забракован хотя бы один стык, сварщика отстраняют от сварочных работ на трубопроводах.

Исправлению посредством местной выборки и последующей перепарки подлежат участки сварного шва, если размеры выборки не превышают допустимых (табл. 1.7). При превышении допустимых размеров выборки, а также в швах, выполненных газовой сваркой, стык следует удалить, а на его место вварить «катушку».

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие структурные зоны формируются в сварном соединении стали при сварке плавлением?
2. Какой фактор определяет ширину структурных зон в сварном соединении?
3. Что такое участок неполного расплавления сварного соединения?
4. Каковы температурные границы участка рекристаллизации сварного соединения стали при сварке плавлением?
5. Какие механические свойства ухудшаются на участке синеломкости?
6. Назовите наиболее распространенные виды наружных и внутренних дефектов сварных соединений.
7. Каковы причины возникновения напряжений и деформаций при сварке?
8. Какие способы уменьшения сварочных деформаций вы знаете?
9. Каковы основные причины образования наружных и внутренних дефектов сварных соединений?
10. Как дефекты влияют на работоспособность сварных конструкций?

ОРГАНИЗАЦИЯ И СИСТЕМА КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ ШВОВ

2.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ВИДОВ ТЕХНИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

К качеству сварных соединений предъявляются определенные требования, от выполнения которых зависят их пригодность к эксплуатации и гарантированный срок службы. Качество сварных соединений является комплексной характеристикой, включающей в себя совокупность показателей, с помощью которых оценивают их прочность, пластичность, коррозионную стойкость, износостойкость и другие свойства.

Нормативные значения этих показателей определяют требования к сварным соединениям, выполнение которых обеспечивается определенными конструктивными и технологическими характеристиками сварных швов. К конструктивным характеристикам относятся форма и геометрические параметры сварного шва, а к технологическим — уровень остаточных напряжений, размеры деформаций, размеры и число дефектов и т. п.

Контроль качества представляет собой проверку соответствия показателей качества установленным требованиям. В зависимости от требований, предъявляемых к сварным соединениям, и категории их ответственности устанавливается определенная система контроля качества продукции на предприятии. Основывается эта система на классификации видов технического контроля по отдельным признакам.

По стадиям технологического процесса различают контроль:

- входной (предупредительный);
- операционный (текущий);
- приемосдаточный.

Входной контроль включает в себя проверку основного и сварочных материалов (присадочной проволоки, флюсов, газов, электро-

дов), полуфабрикатов и комплектующих изделий, а также работоспособности сварочного оборудования и квалификации сварщиков.

Операционный контроль выполняют в соответствии с технологической документацией изготовителя и нормативной технической документацией. Текущий контроль должен быть достаточным для оценки качества выполняемых операций.

Приемосдаточный контроль осуществляется в целях отделения годной продукции от бракованной.

Контроль сварных конструкций выполняют после их обработки в целом или после механической обработки сварных швов (если эти виды обработки производятся).

Влияние дефектов зависит не только от их размеров, но и от формы. К наиболее опасным дефектам относятся трещины, непровары и подрезы. Менее опасными дефектами являются поры. Промежуточное положение занимают включения. Все перечисленные виды дефектов характеризуются определенными значениями коэффициента концентрации напряжений. Опасность дефектов возрастает в следующем порядке: продолговатые поры, свищи, цепочки или скопления пор, линейные шлаковые или флюсовые включения.

В первую очередь контролю подвергают сварные швы в месте их взаимного пересечения и на участках с признаками дефектов. Методы и объемы контроля сварных соединений в узлах повышенной жесткости, где увеличивается вероятность образования трещин, должны дополнительно указываться в проектной документации.

Контроль качества сварных соединений, характеризующихся повышенной склонностью к образованию холодных трещин, следует производить не ранее чем через двое суток после окончания сварочных работ.

2.2. ЗАДАЧИ ПРЕДУПРЕДИТЕЛЬНОГО КОНТРОЛЯ

Одним из важнейших условий повышения качества сварных соединений является постоянное улучшение системы контроля качества. В существующей системе контроля качества основное внимание уделяется выявлению дефектов в готовых сварных швах. Этим объясняется все еще значительный процент брака в сварных изделиях. Положение усугубляется еще и тем, что контроль качества физическими методами производится часто спустя продолжительное время после выполнения сварочных работ, что не по-

звolyает своевременно принимать меры по устранению причин брака. Бывают случаи, когда дефекты в сварных швах обнаруживаются при сдаче готового изделия, а иногда и в процессе его эксплуатации.

Контроль не обеспечит ожидаемых результатов, если он направлен на выявление дефектов только в уже выполненных швах или проводится спустя продолжительное время после выполнения сварочных работ. В этом случае невозможно принять меры для устранения причин появления брака.

Следовательно, основное внимание необходимо уделять предупредительному контролю, позволяющему на различных стадиях сварочного производства проверять основные и сварочные материалы, квалификацию сварщиков, сварочное оборудование, подготовку изделий под сварку, технологию сварки.

2.3. КОНТРОЛЬ ОСНОВНЫХ И СВАРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Высокое качество сварных изделий возможно только при условии обеспечения качества исходных основных и сварочных материалов.

Основным материалом для сварных соединений является металл. Перед сваркой проверяется наличие сертификатов на материал и его заводская маркировка, а для специальных сталей, кроме того, наличие и количество легирующих элементов.

В сертификате указываются марка и химический состав, номер плавки, масса и номер партии, результаты всех испытаний, выполненных в соответствии с действующим стандартом, номер стандарта на отправляемый металл, профиль и размер материала. Показатели механических свойств материала — пределы прочности, текучести, относительное удлинение и поперечное сужение, угол загиба, ударная вязкость, химический состав — должны соответствовать принятым стандартам и техническим условиям. Поступивший материал (листовой и профильный прокат, заготовки) также подвергают внешнему осмотру в целях выявления расслоений, трещин, недопустимых вмятин у закатов.

При отсутствии сертификата металл до определения его механических свойств, химического состава и испытания на свариваемость нельзя запускать в производство. Проведение такого контроля позволяет избежать получения некачественных сварных изделий, сэкономить трудозатраты на монтажные и сварочные

работы, а иногда даже сэкономить металл, так как в противном случае не исключена возможность применения его не по назначению.

Свариваемость металла можно определить несколькими методами. Прежде всего, свариваемость характеризуется механическими свойствами (испытание на разрыв, изгиб, ударную вязкость) и способностью металла без образования трещин и значительного изменения свойств выдержать быстрое охлаждение и усадку при этом, а также значительное тепловое расширение и быстрый нагрев до температуры плавления.

Свариваемость можно определить по содержанию некоторых химических элементов, влияющих на механические свойства металла, с помощью следующей формулы:

$$C_{\text{эКВ}} = C + Mn/20 + Ni/15 + (Cr + Mo + V)/10$$

где $C_{\text{эКВ}}$ — эквивалент углерода, %; Mn, Ni, Mo, V, C — содержание химических элементов в стали.

Для ручной дуговой, автоматической и полуавтоматической сварки эквивалент углерода не должен превышать 0,45 %.

Иногда для определения свариваемости применяют методы, имитирующие процесс сварки. Например, пластины основного металла подвергают термической обработке, воспроизводя изменения, которые металл претерпевает в процессе сварки.

Большое влияние на качество сварки оказывает качество сварочных материалов. Основным видом сварочных материалов при монтаже являются электроды для ручной сварки. На строительномонтажные площадки электроды поступают от их изготовителей. Каждая партия электродов должна иметь сертификат, в котором указываются их завод-изготовитель, дата изготовления, номер и масса партии, стандарт, диаметр, тип и марка электродов, механические свойства наплавленного металла и допустимое в нем содержание серы и фосфора, рекомендуемые режимы сварки и режим просушки электродов. Каждая пачка электродов имеет, кроме того, этикетку, которая в зависимости от способа упаковки наклеивается на нее снаружи или вкладывается внутрь. На этикетке указываются назначение электродов, их диаметр, марка и тип, рекомендуемые режимы сварки и сушки перед сваркой, завод-изготовитель, дата изготовления и номер партии.

Необходимо проверить соответствие поступивших электродов сертификату, выборочно проконтролировать их внешний вид. Покрытие электродов должно быть прочным (проверяется при изгибе и падении его на стальную плиту) и плотным, и при этом оно не

должно иметь пор, трещин, вздутий и комков неразмешанных компонентов.

Допустимы следующие дефекты поверхности покрытия:

- поры — не более трех на длине 100 мм, диаметром до 2 мм, глубиной до 0,5 толщины покрытия;
- шероховатость поверхности, продольные риски и отдельные задиры глубиной не более 1/4 от толщины покрытия;
- не более двух волосных трещин длиной до 12 мм каждая;
- не более трех местных вмятин глубиной до 0,5 от толщины покрытия и длиной до 12 мм каждая.

Для определения степени влажности покрытия электродами проверяемой партии заваривается несколько образцов.

При наличии недопустимых в электродах дефектов применять их запрещается. О поставке некачественных электродов необходимо сообщить заводу-изготовителю с просьбой выслать представителя для составления акта и главному по подчиненности в министерстве (ведомстве, главном управлении) институту по сварке. Главной институт по сварке совместно с заводом-изготовителем должны определить причины появления брака и разработать мероприятия по его предотвращению в дальнейшем.

На некачественные электроды специально созданной для их проверки комиссией, в состав которой должен входить представитель завода-изготовителя, составляется акт. В случае отказа завода от посылки своего представителя акт составляется без него.

В случае если применяемые электроды не обеспечивают стабильного горения сварочной дуги и равномерного плавления, а также если в сварных швах возникают трещины и поры, следует дополнительно проверить механические свойства наплавленного металла, технологические свойства электродов, а при необходимости выполнить металлографический анализ.

При отсутствии сертификата применять электроды разрешается только после их проверки. Проверке подлежат сварочные свойства электродов, механические свойства и химический состав наплавленного металла, механические свойства сварного соединения, а также прочность покрытия. Для электродов, обеспечивающих получение в шве аустенитной структуры наплавленного металла, кроме того, следует проверить наличие в нем ферритной фазы.

Однако проверка поступивших электродов (как и других сварочных материалов) не исчерпывает всех мероприятий предупредительного контроля.

Качество электродов во многом зависит от условий их хранения. После проверки вновь поступивших электродов сотрудник лаборатории, на которого возложен контроль за их хранением, устанавливает режимы хранения на складе и просушивания (если это требование установлено в паспорте на электроды), а затем периодически контролирует выполнение этих режимов работниками склада.

Одной из важнейших задач предупредительного контроля электродов является создание на центральных складах организаций и складах монтажных участков необходимых условий для складирования. Склады должны быть оборудованы стеллажами для хранения электродов по маркам и диаметрам, а также печами для сушки и прокаливания электродов, в которых должна поддерживаться необходимая температура. Причем эта температура должна быть постоянной не только в разные времена года, но и в течение суток, с учетом явления конденсации. В противном случае при ночном остывании нагретого за день помещения содержащаяся в нем влага сконденсируется в виде росы на пачках электродов и перейдет при негерметичной упаковке в покрытие.

Режимы сушки и прокаливания электродов устанавливаются в зависимости от типа покрытия и приводятся в их паспортах, а также в каталогах. Следует тщательно выдерживать эти рекомендуемые режимы, так как качество недосушенных и пересушенных электродов резко ухудшается. При этом и в первом, и во втором случае возникает опасность порообразования в швах, причинами которой являются влага и ухудшение защиты зоны сварочной дуги вследствие выгорания органических составляющих покрытия.

В зависимости от конкретных форм организации сварочных работ ответственность за создание необходимых условий для хранения и подготовки к применению электродов (а также других сварочных материалов) должна нести лаборатория по контролю, сварочная лаборатория или служба главного сварщика, а там, где нет указанных служб, — главный инженер организации.

Для сушки электродов можно использовать печь, показанную на рис. 2.1, в которую загружается 120 кг электродов. Кроме того, в ней прокаливаются флюс и проволока. Номинальная температура нагрева такой печи 400 °С, время достижения этой температуры — 1 ч, номинальная мощность — 20 кВт, размеры рабочего пространства — 490×655×830 мм, число термических нагревательных элементов (ТЭН) — 10.

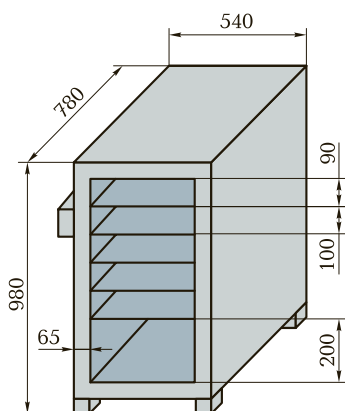


Рис. 2.1. Печь для сушки и прокаливания электродов и флюса

Имеются также переносные печи для прокалики электродов. Например, разработана печь с единовременной загрузкой до 30 кг электродов. Такая печь представляет собой цилиндрическую емкость, установленную на основании, в котором размещена вся электроаппаратура. В корпус печи вмонтирован терморегулятор, обеспечивающий регулирование температуры в пределах от 100 до 400 °С. Настройка на определенный режим прокаливания осуществляется с помощью градуированного диска. Мощность нагревательного элемента 3 кВт. Габаритные размеры печи 600 × 500 × 150 мм. Масса печи 53 кг.

Очень удобными являются передвижные склады, размещаемые в сборно-разборных домиках и предназначенные для хранения и подготовки к работе 1 т электродов на строительно-монтажной площадке в любых климатических условиях.

Представляет интерес передвижной универсальный склад с разовой загрузкой 3 т электродов, имеющий габаритные размеры 4 600 × 2 300 × 2 450 мм и массу 1 250 кг. Для транспортирования по строительно-монтажной площадке такой склад устанавливают на сани из труб диаметром 159 мм. Корпус склада двойной. Наружная облицовка выполнена из листового металла, внутренняя — из досок, а между ними проложен изоляционный слой из стекловаты. Склад оборудован двухъярусными стеллажами и печью для сушки и прокаливания электродов. На лицевой части стеллажей крепятся таблички с указанием марок и диаметров электродов.

Печь для сушки и прокаливания электродов изготовлена из листового проката. Между наружной и внутренней обшивкой проложена изоляция из стекловаты толщиной 60 мм. Нагревательные элементы выполнены из нихромовых спиралей диаметром 2...3 мм. Диа-

пазон рабочих температур от 15 до 400 °С. Максимальная разовая загрузка электродов 420 кг. Печь состоит из двух камер. В каждой камере имеется вентиляционное отверстие диаметром 15 мм, которое при необходимости закрывается заслонкой. Специальная система управления позволяет обеспечивать необходимые температуры и время выдержки электродов как в ручном, так и в автоматическом режиме. Точность поддержания необходимой температуры обеспечивается встроенными в цепь управления электроконтактными регуляторами и выдерживается в пределах ± 60 °С. Продолжительность работы нагревателей в автоматическом цикле устанавливается с помощью регулятора времени в пределах от 0 до 120 мин с точностью ± 20 с. Время выхода на режим максимальной температуры 11...13 мин.

Электроды в печи прокаливаются в пеналах специальной конструкции. Для подвешивания пеналов к потолку обеих камер на всю глубину печи приварены шесть кронштейнов, однако в случае необходимости электроды можно прокалывать и россыпью.

Существенное влияние на качество сварки также оказывает проволока, используемая при механизированной сварке и как присадка при газовой сварке. Проволока поставляется в бухтах, снабженных металлическими бирками, на которых указано ее обозначение по стандарту, номер плавки и завод-изготовитель. Также на бирке завод-изготовитель и его отдел технического контроля ставят свой клейма. Каждая партия проволоки должна иметь сертификат, в котором указываются ее марка и диаметр, химический состав, номер плавки, стандарт, масса партии и название завода-изготовителя.

После контроля наличия сертификата и бирок следует проверить поверхность проволоки. В небольших партиях следует проверять каждую бухту, в больших — выборочно. На поверхности проволоки не должно быть оксидов, загрязнений, краски и масла. На проволоке из высоколегированной стали не должно быть следов графитовой смазки.

Для удаления поверхностных дефектов проволоки применяются механические и химические способы. Загрязнения, ржавчину, окалину удаляют с помощью специальных станков различных конструкций (рис. 2.2). Такие станки выполняют две функции: с их помощью производят очистку проволоки и одновременную намотку ее в кассету автоматов или полуавтоматов. В качестве материалов для очистки проволоки применяют наждачные круги, напильники, сварочный флюс и войлок.

В представленном на рис. 2.2 станке используется следующий способ очистки проволоки. Очистное устройство представляет со-

бой вращающийся в горизонтальной плоскости полый вал, в котором просверлено шесть отверстий. В эти отверстия вставлены «сухари», которые также имеют по одному отверстию. При вращении вала под действием центробежных сил «сухари» стремятся вылететь из отверстий вала. Вставленная в отверстие «сухаря» проволока удерживает его. «Сухарь», вращаясь с валом, очищает проволоку.

При отсутствии сертификата проволока должна подвергаться тщательной проверке. Прежде всего, следует произвести химический анализ, для чего из партии одной плавки нужно отобрать 3 % от общего числа бухт, но не менее двух. Стружку для анализа проволоки берут с двух концов каждой бухты. После определения таким образом марки проволоки заваривают несколько образцов для выявления ее технологических свойств. Целесообразно также определить механические свойства металла, наплавленного проволокой. На каждую проверку составляется акт, который подписывается всеми членами организованной для этого комиссии. Без составления акта выполняемая проверка недействительна. Только после определения назначения проволоки и получения положительных результатов проверки комиссия дает разрешение на ее применение. Проволока на складах должна храниться в условиях, исключающих ржавление и загрязнение ее поверхности.

Предупредительный контроль порошковой проволоки имеет некоторые отличительные особенности. При хранении свыше шести месяцев такую проволоку обязательно следует прокалить и испытать ее технологические свойства посредством сварки таврового образца. В случае отсутствия сертификата на порошковую проволоку в первую очередь производится химический анализ

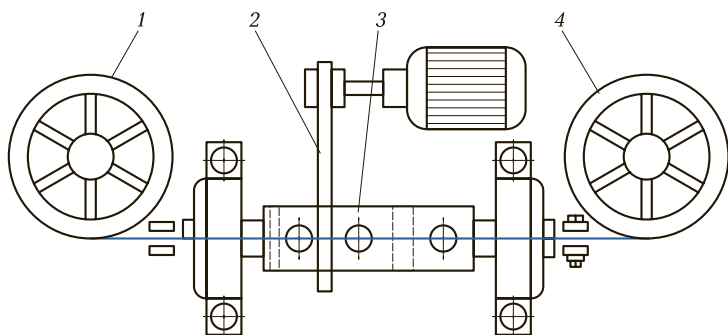


Рис. 2.2. Схема станка для очистки сварочной проволоки:

1 — барабан для намотки очищенной проволоки; 2 — ременная передача; 3 — очистное устройство; 4 — бухта с неочищенной проволокой

наплавленного металла, а затем проверка механических и технологических свойств. При наличии ржавчины на металлической оболочке следует выполнить проверку технологических свойств проволоки. Порошковая проволока хорошо поглощает влагу, поэтому при ее хранении должно быть исключено наличие влаги.

На качество сварных соединений существенное влияние оказывает качество флюса. Как и другие сварочные материалы, поступивший на объект флюс должен иметь сертификат. Флюс хорошо поглощает влагу, поэтому, прежде всего, его следует проверить на содержание влаги. Наиболее простым способом контроля, при котором проверяются и другие показатели флюса (например, его гранулометрический состав и загрязненность), является сварка образцов. Качество флюса считается удовлетворительным, если в процессе сварки сварочная дуга горит устойчиво, шов не имеет трещин, пор и свищей, а шлак легко отделяется. При неудовлетворительных результатах такого контроля проверяют гранулометрический состав, влажность, плотность и загрязненность флюса.

Более точным и сложным способом определения влажности флюса является сушка его пробы массой в 100 г при температуре 300 °С. Взвешивая пробу через определенные промежутки времени, просушивание прекращают, когда результаты предпоследнего и последнего взвешиваний одинаковые. Количество влаги во флюсе определяется разностью результатов, полученных при первом и последнем взвешивании. Флюс считается качественным, если влажность его не превышает 0,1 %. Гранулометрический состав проверяют, просеивая флюс через сито с размерами ячеек, равными максимальным и минимальным размерам зерен флюса.

После выполнения проверки флюса сваривают тавровый образец и исследуют наплавленный металл на содержание углерода и серы (проба берется из верхнего слоя шва). В случае неудовлетворительного результата этого исследования проверяемая партия флюса забраковывается или подвергается повторной прокалке с последующей пере проверкой всех показателей.

Храниться флюс должен на складах в условиях, исключающих насыщение его влагой, и оборудованных печами для сушки. Проверка условий хранения флюса, как и электродов, является важнейшей задачей предупредительного контроля.

В качестве защитных газов в основном используют углекислый газ и аргон, которые поставляются в баллонах и должны иметь сертификат завода-поставщика с указанием стандарта, названия газа, процентного содержания примесей в нем, влажности и даты выпу-

ска. При наличии сертификата качество защитных газов проверяется только при появлении недопустимых дефектов, обнаруженных при сварке образцов перед применением газа на производстве.

В связи со значительным содержанием влаги в углекислом газе необходимо принимать меры по ее удалению из баллонов. Производится это в два приема. После получения баллонов сначала их следует поставить основанием вверх и ненадолго отвернуть вентиль, через который и будет стекать влага. Затем углекислый газ очищают в процессе сварки с помощью специального осушителя, через который пропускается газ перед поступлением в горелку.

Осушитель заполняется силикагелем. После насыщения силикагеля влагой его сушат посредством нагрева до температуры 180... 200 °С. Нагрев полностью восстанавливает свойства силикагеля.

2.4. КОНТРОЛЬ КВАЛИФИКАЦИИ СВАРЩИКОВ

Качество сварных соединений, особенно при ручных способах сварки, во многом определяется квалификацией сварщиков. Поэтому необходимо уделять серьезное внимание контролю квалификации сварщиков, начиная со стадии их обучения.

В настоящее время обучение сварщиков осуществляется двумя основными способами: в специализированных центрах профессиональной подготовки и учебных комбинатах предприятий.

Для реализации качественной подготовки сварщиков в специализированных центрах подготовки разрабатываются программы обучения, которые включают в себя теоретическую подготовку и практическое обучение для получения основных навыков данной профессии.

Теоретическая подготовка включает в себя изучение теоретических основ сварки, ознакомление с характеристиками источников питания сварочной дуги, марками сварочных электродов, защитных газов и т.д. Подробно рассматриваются схемы сварочных горелок для газовой сварки и дуговой сварки в защитных газах, схемы баллонов для хранения газов, редукторов, смесителей и т.д.

Практическое обучение охватывает объем навыков, необходимых сварщику для выполнения работ в соответствии с присваиваемым разрядом по тарифно-квалификационному справочнику.

При поступлении сварщика на предприятие проводится контроль его навыков по сварке тех деталей и материалов, которые он будет сваривать в соответствии с технологическим процессом. По результатам проведенного контроля сварщик может быть допущен к выполнению работ или же ему требуется дополнительное обуче-

ние на рабочем месте. Дополнительное обучение осуществляется, как правило, опытными сварщиками.

Контроль квалификации сварщиков должен позволять оценить индивидуальные способности и возможности каждого сварщика. В контрольной или сварочной лаборатории, обслуживающей конкретную организацию, на каждого сварщика, допущенного к самостоятельной работе, должен заводиться формуляр, содержащий все необходимые данные, по которым можно судить о его квалификации. Причем целесообразно иметь формуляры двух категорий: на обычных рядовых сварщиков и на сварщиков высокой квалификации. Формуляры на рядовых сварщиков должны иметься в каждом строительно-монтажном управлении, а формуляры на сварщиков высокой квалификации — в главных управлениях. Это позволит избежать ошибок при направлении сварщиков различных организаций на пусковые объекты, когда организация, ответственная за ввод объекта, не в состоянии выполнить сварочные работы собственными силами.

Формуляр сварщика высокой квалификации помимо обычных сведений о рабочем (фамилия, имя, отчество, год рождения, домашний адрес, наименование строительно-монтажной организации, квалификационный разряд, номер клейма, общий стаж работы по профессии) должен содержать следующие данные:

- способы и пространственное положение сварки, к которым он допущен;
- свариваемые материалы, по которым он специализируется (наименование, толщина, пространственное положение и способ сварки применительно к материалу);
- основные свариваемые изделия (трубопроводы из легированной, углеродистой стали, цветных металлов, металлоконструкции, технологическое оборудование), на изготовлении которых специализируется сварщик, стаж работы на определенном изделии;
- наименования объектов, на которых работал сварщик (конкретное наименование объекта), наименования свариваемых изделий (трубопроводы, металлоконструкции и т. п.) с указанием названия материала и времени выполнения работ (год, данные о качестве сварки применительно к конкретным изделиям, число просвеченных снимков, испытанных образцов, в том числе забракованных);
- число просвеченных за год снимков на изделиях, сваренных данным сварщиком, и результаты контроля (с указанием числа годных и забракованных снимков за каждый год отдельно применительно к конкретным изделиям).

Периодически по мере необходимости формуляр дополняется. При этом указываются должности и фамилии сотрудников, сделавших дополнения.

В настоящее время в химическом и нефтехимическом производстве стали применяться установки со сверхвысокими параметрами давления и температуры, что предъявляет самые жесткие требования к качеству сварных соединений.

Указанные факты оправдывают введение в дополнение к существующим общероссийским требованиям к квалификации сварщиков дополнительных ведомственных требований, в частности к подготовке электросварщиков ручной сварки высокой квалификации для строительно-монтажных организаций.

Подготовка производится только в строительно-монтажном управлении без отрыва или с отрывом от производства из числа сварщиков 5-го и 6-го разрядов, достигших наиболее высоких показателей по качеству при выполнении ответственных сварочных работ. Подготовка состоит из теоретического и практического обучения. Практическое обучение осуществляется под руководством инструкторов из числа сварщиков высокой квалификации. Продолжительность обучения устанавливается индивидуально в каждом случае в зависимости от степени подготовки сварщиков к выполнению ответственных сварочных работ. Для аттестации сварщиков в строительно-монтажном управлении приказом по тресту создается специальная комиссия.

Особой проверке подвергается квалификация сварщиков, занятых на объектах, подведомственных Ростехнадзору. К аттестации на право выполнения работ на указанных объектах допускаются сварщики в возрасте не моложе 18 лет, имеющие свидетельство об окончании специализированного профессионально-технического училища или курсов по сварке, проработавшие по этой специальности не менее шести месяцев, а при работе на автоматах, полуавтоматах и контактных машинах — не менее трех месяцев.

Перед аттестацией сварщики должны пройти специальную теоретическую и практическую подготовку, учитывающую специфику выполнения работ, к которым они готовятся. Подготовка должна проводиться по специальным программам, утвержденным соответствующим ведомством.

Аттестация сварщиков проводится постоянно действующими в организациях комиссиями. Повторная аттестация проводится периодически, но не реже одного раза в 12 месяцев, а также при перерыве в работе по специальности свыше шести месяцев и перед допуском к работе после временного отстранения сварщика за

нарушение технологии и низкое качество сварки. Дополнительная аттестация должна также проводиться при переходе сварщика на новые для него способы сварки или виды работ и при сварке изделий из новых материалов или при существенном изменении технологии сварки.

2.5. КОНТРОЛЬ ПОДГОТОВКИ ИЗДЕЛИЙ ПОД СВАРКУ, СВАРОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ

Подготовка изделий под сварку оказывает существенное влияние на качество выполняемого сварного соединения. Основными этапами проверки являются контроль чистоты поверхности, геометрических размеров разделки шва и качества прихваток.

Недопустимо наличие в разделке шва и на прилегающей к ней поверхности масла, грязи, ржавчины, окалины, а также наличие грязи и мусора на участках изделия, подвергаемых после сборки кантовке, поскольку при кантовке загрязнения могут попасть в разделку шва.

При проверке разделки шва под сварку основными контролируемыми размерами являются:

- зазор между кромками, притупление и угол раскрытия разделки (для стыковых швов);
- ширина нахлестки и зазор между листами (для нахлесточных соединений);
- угол и зазор между свариваемыми деталями, притупление и угол скоса кромок (для тавровых соединений);
- зазор между свариваемыми деталями и угол между ними (для угловых соединений).

От качества подготовки и геометрических размеров разделки шва в значительной степени зависят качество сварного соединения и производительность сварочных работ.

В результате завышения угла скоса кромок происходит перерасход электродного материала, а также возрастают деформации и коробления свариваемых элементов, поскольку увеличиваются зона интенсивного разогрева и влияние усадки наплавленного металла вследствие увеличения его объема.

Уменьшенный угол скоса затрудняет надежное проплавление вершины угла разделки и приводит к непровару в корне шва.

Увеличение размера притупления кромок приводит к непровару, а его уменьшение — к прожогам.

Отклонение размера зазора от нормального происходит вследствие неточной сборки, смещения и коробления деталей под действием термических и усадочных напряжений наплавленного металла ранее заваренных швов и неточной разделки кромок. Уменьшение зазора обычно приводит к непровару, а чрезмерное его увеличение — к прожогам.

Учитывая влияние геометрических размеров разделки шва на качество сварного соединения, их следует проверять с помощью специального инструмента — шаблона ШС-2 для проверки размеров разделки и сварного шва, выполненного электродуговой сваркой при толщине металла 4...26 мм. Набор таких шаблонов обеспечивает возможность контроля наиболее распространенных типов сварных соединений.

Набор шаблонов представляет собой 22 стальные пластины, расположенные на осях между двумя щеками. На каждой из осей закреплено по 11 пластин, которые с двух сторон поджимаются плоскими пружинами. У торцов кромки каждой пластины указан порядковый номер расположения ее в наборе. Пластины 1 и 2 (рис. 2.3) предназначены для проверки углов разделки кромок, а пластина 3 — для измерения притупления кромки. Остальные пластины набора предназначены для проверки ширины и усиления шва. На своих кромках они имеют вырезки-шаблоны, на каждом из которых указаны его ширина и высота, соответствующие ширине и усилению сварного шва.

Шаблоны применяются следующим образом. Для проверки угла разделки кромок (рис. 2.3, а) пластины 1 и 2 плотно приставляют к обеим плоскостям замеряемого элемента, образующим проверяемый угол. Притупление кромки (рис. 2.3, б) проверяют по рискам, нанесенным с интервалом 1 мм на пластине 3. Для проверки зазора f между кромками (рис. 2.3, в) пластины складывают таким образом, чтобы их суммарная толщина равнялась размеру зазора, соответствующего заданным требованиям. Каждый шаблон набора имеет толщину, 0,5-кратную значениям зазоров, предусмотренных ГОСТ 5264—69.

При проверке качества прихваток следует обращать внимание на их чистоту и высоту. Загрязненные с неудаленным шлаком прихватки могут привести к образованию шлаковых включений в металле шва, а прихватки большой высоты — к непровару.

Качество сборки соединения под сварку во многом зависит от метода обработки кромок. Наилучшие результаты дает механическая обработка (строжка, фрезеровка, токарная обработка), следовательно, внедрение переносных приспособлений и станков для

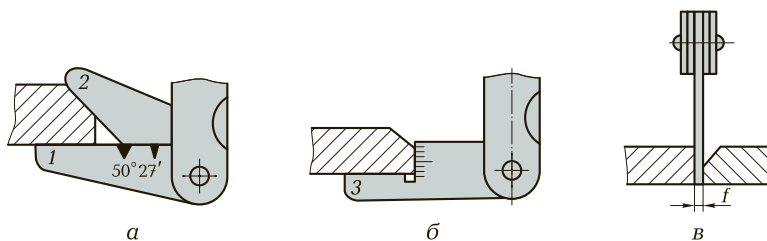


Рис. 2.3. Применение шаблонов марки ШС-2:

a — проверка угла разделки кромок; *б* — проверка притупления; *в* — проверка зазора; 1...3 — номера пластин; *f* — зазор между кромками

механической обработки кромок позволит значительно повысить качество подготовки разделки швов. Необходимо шире развернуть внедрение на монтаже плазменной резки вместо широко применяемой в настоящее время ручной кислородной резки, обеспечивающей низкое качество кромок. Предпосылки для этого имеются. Созданы передвижные установки плазменной резки специально для монтажных условий, а также разработан способ плазменной резки с использованием воздуха, что значительно расширяет возможности этого высококачественного и высокопроизводительного способа подготовки кромок.

Замена ручных металлических щеток пневмо- или электрошлифовальными машинами с абразивными кругами позволяет получить чистые кромки без ржавчины, окалина и грязи. Подготовка кромок, сборку изделий под сварку, наложение прихваток, зачистку подготовленного сварного соединения в соответствии с существующими техническими условиями легче выполнять в условиях цеха, чем на монтажной площадке, поэтому перенесение заготовительных операций с монтажной площадки в цеха, мастерские или на базы позволяет значительно улучшить качество подготовки изделий под сварку.

Проверка качества подготовки изделий под сварку является массовой операцией предупредительного контроля, поэтому проводить ее должны, в первую очередь, линейные специалисты, сварщики и бригадиры-сборщики. Наиболее эффективен этот метод предупредительного контроля при наличии сварочных участков и специальных служб предупредительного контроля. Работники сварочных или обычных контрольных лабораторий не в состоянии обеспечить 100%-ный контроль качества сборки, т.е. в их обязанности входит систематический выборочный контроль каче-

ства сборки. На особо ответственных конструкциях этот вид контроля должен быть 100%-ным.

Качество сварочного оборудования является одним из элементов, влияющих на качество сварного соединения. Этот вид контроля целесообразно разбить на два этапа. На первом этапе контролируется выбор необходимого оборудования, а на втором — состояние уже выбранного сварочного и вспомогательного оборудования.

При выборе оборудования следует руководствоваться, прежде всего, требованиями получения качественного сварного соединения. Для источников питания сварочной дуги следует рассмотреть технические данные (род тока, пределы его регулирования, напряжение и т. п.) с позиции получения качественных сварных соединений, а для автоматов и полуавтоматов — возможность их применения вообще, а в частности — возможность получения надежной защиты сварочной дуги в условиях строительно-монтажной площадки. Для выполнения термической обработки предпочтительна аппаратура, обеспечивающая автоматический контроль ее режимов.

Выбранное сварочное оборудование должно обеспечивать высокое качество работы. Например, работники строительно-монтажных организаций все больше убеждаются в преимуществах передвижных установок для сварки, термообработки и резки. Такие установки не только мобильны, но и имеют более длительный срок службы, что особенно важно в данном случае, а также смонтированную на них аппаратуру лучшего качества по сравнению с оборудованием, устанавливаемым стационарно на рабочих местах.

Немаловажное значение для обеспечения хорошего качества сварочных работ имеет возможность дистанционного управления сварочным током с рабочего места сварщика. На монтажной площадке рабочее место сварщика иногда находится за несколько десятков метров от источника питания и на значительной высоте над нулевой отметкой. В таких условиях сварщики почти никогда не меняют режим сварки при увеличении или уменьшении зазора, угла разделки кромок и колебаниях напряжения в сети, что, естественно, сказывается на качестве работ. Применение дистанционного управления сварочным током позволяет устранить этот недостаток.

Важным этапом предупредительного контроля является поддержание в заданных пределах состояния, технического уровня и надежности сварочного оборудования. Необходимо соблюдать график технического обслуживания оборудования и выполнять соответствующие инструкции по его эксплуатации.

Проверка технологии сварки также является важным звеном в системе предупредительного контроля. Производиться она должна шире, чем это подразумевает понятие «технология сварки», так как на данном этапе контролируются собственно технология сварки, сварочные материалы, оборудование, инструмент сварщика и его квалификация.

При проверке технологии сварки в зависимости от выбранного метода сварки контролируется целый ряд показателей:

- марка и диаметр электрода, приемы работы (при ручной сварке);
- скорость сварки, марка и диаметр присадочной проволоки (при механизированной сварке);
- марка флюса и вид защитных газов, род сварочного тока, его значение, напряжение и полярность (при сварке на постоянном токе);
- вылет электрода, число валиков в сварном шве и порядок их наложения, режимы термической обработки.

Проверка технологии сварки начинается со сварки контрольных образцов (катушек для трубопроводов и пластин для металлоконструкций и оборудования). При этом проверяются правильность рекомендованных режимов и механические свойства сварного соединения. В случае необходимости проверяются показатели наплавленного металла, а также проводятся коррозионные и металлографические исследования металла сварного соединения. Непосредственно в процессе сварки проверяются элементы ее технологии.

Контроль сварочных материалов заключается в проверке правильности их хранения на рабочих местах. Для хранения электродов рекомендуются специальные термоизоляционные пеналы, защищающие их от насыщения влагой. В пенал загружается 5 кг электродов. Рукоятка и крюк позволяют крепить пенал к монтажному поясу сварщика или подвешивать его на рабочем месте.

Важное значение имеет проверка состояния инструмента сварщика и сварочного оборудования. Прежде всего, источники питания сварочной дуги должны быть оборудованы приборами для контроля сварочного тока и напряжения на дуге и обеспечивать параметры режима сварки, предусмотренные технологией. Длина сварочного провода не должна превышать максимально допустимое значение, а также он не должен иметь скруток (отрезки проводов должны соединяться специальными муфтами или соединителями). Присоединение обратного провода цепи к свариваемому изделию выполняется с помощью специальной клеммы заземления. Обязательно проверяется наличие на рабочем месте щетки, зубила, шаблона для проверки размеров разделки шва и клейма.

В случае применения механизированных способов сварки следует проверять состояние сварочного и вспомогательного оборудования. Наиболее часто дефекты сварки появляются вследствие износа роликов, подающих проволоку в сварочную дугу (создается неравномерная подача проволоки), засорения подающих рукавов в шланговых полуавтоматах, износа и забрызгивания токоподводящих мундштуков, образования люфтов в кинематической цепи механизмов перемещения автоматов, а также механизмов-манипуляторов и вращателей (создается неравномерная скорость сварки).

Контроль квалификации сварщиков заключается в проверке соответствия их навыков и умений выполняемой работе и в проверке образцов, заваренных сварщиками в процессе выполнения производственных заданий.

2.6. СТАТИСТИЧЕСКИЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ

Существующая в настоящее время форма организации контроля сварочных работ позволяет получить заключение о качестве сварного соединения по принципу «годен» или «не годен». Оформляемый при этом документ не содержит подробных данных о дефектности шва и оценке его качества. Следовательно, по нему нельзя обоснованно и качественно провести анализ результатов контроля в целях выявления причин брака и предупреждения появления его в дальнейшей работе, т. е. в настоящее время действует приемочный, или пассивный, контроль. Однако для сварных соединений необходимо внедрять активный контроль, обеспечивающий обратную связь контролеров с технологами.

Переход к активному контролю обеспечивает статистический метод, позволяющий усовершенствовать систему контроля и его организацию, а также значительно повысить эффективность, достоверность и экономичность применяемых методов контроля.

При статистическом методе все свариваемые стыки классифицируются в статистические однородные группы, называемые базовыми партиями. Базовая партия включает в себя стыки, имеющие сходные конструктивные, технологические и эксплуатационные признаки (диаметр трубопровода, типоразмер металлоконструкций, способ и условия сварки, присадочный материал, квалификация сборщиков и сварщиков, степень ответственности соединений, характер производства или тип организации — монтажное управление, передвижная механизированная колонна, завод, способ контроля, квалификация контролеров, время выполнения работ).

Затем вводятся единые показатели качества сварки для базовых партий, устанавливаются единые формы и системы сбора, учета и анализа информации, приводится расчет базовых показателей, производится статистический анализ качества и корректировка технологических процессов.

Сбор, учет и обработка информации производятся по единой схеме предупредительного контроля качества сварки (рис. 2.4). Для базовых партий введены показатели качества — средний и максимально допустимый уровни брака.

Перед внедрением статистического контроля производятся анализ качества сварочных работ на объектах, дефектограмм, доминирующих причин брака и накопление информации по каждой производственной серии, называемое историей качества. На основании истории качества рассчитываются средний и максимально допустимый уровни брака, которые принимаются за базовые для очередного производственного цикла на данных объектах, и при прогнозе качества рассматриваются в качестве расчетного планового уровня для будущего периода деятельности организации.

По базовым показателям строится карта-диаграмма предупредительного контроля (рис. 2.5), на которой параллельно оси абсцисс проводятся линии среднего и максимально допустимого уровня брака. Нанося значения выборки в виде точек на карту, определяют уровень качества, а следовательно, состояние технологического процесса для данной базовой партии. Точки, находящиеся внутри указанных границ, определяют удовлетворительный уровень качества и состояние технологического процесса. Точки, вы-

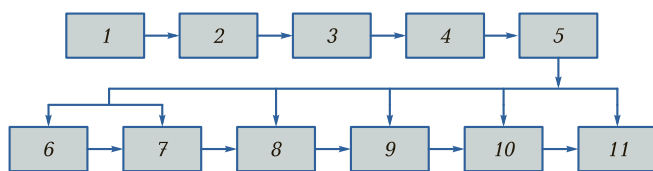


Рис. 2.4. Типовая структурная схема предупредительного контроля качества сварки:

1 — контроль готовности объекта к сварке; 2 — контроль подготовительно-сборочных операций; 3 — контроль технологических операций при сварке; 4 — контроль детали неразрушающими методами; 5 — статистический анализ процесса и качества сварки; 6 — расчет среднего уровня брака; 7 — расчет допустимого отклонения качества сварки от нормы; 8 — корректировка процесса сварки; 9 — еженедельные и месячные сводки по качеству выпускаемой конструкции; 10 — разработка мероприятий по улучшению качества; 11 — выпуск информационных писем по анализу качества

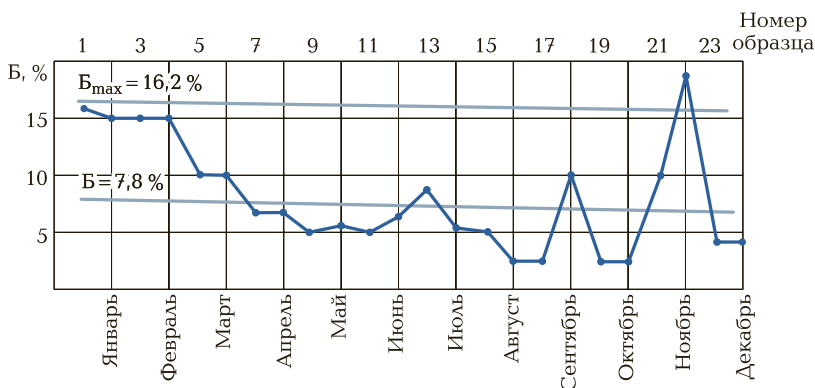


Рис. 2.5. Карта-диаграмма предупредительного контроля качества сварки: Б — средний уровень брака; Б_{max} — максимально допустимый уровень брака

шедшие за верхнюю границу, характеризуют неудовлетворительное качество сварки, т.е. здесь требуется определение причин брака и корректировка технологического процесса.

Система статистического предупредительного контроля, обеспечившая переход от пассивного контроля к активному управлению качеством сварочных работ, позволяет планировать и прогнозировать их качество, а также использовать базовые показатели для экономического и морального стимулирования высокого качества выполнения этих работ как отдельными исполнителями, так и организациями.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие виды контроля включает в себя система контроля качества сварных швов?
2. Какие испытания включает в себя проверка квалификации сварщика?
3. Каким образом проводится контроль основных и сварочных материалов?
4. Какие приспособления используются при контроле подготовки изделий под сварку?
5. Каким образом осуществляется контроль сварочного оборудования и технологии сварки?
6. К каким видам контроля относится статистический контроль?
7. Что понимается под историей качества?

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА БЕЗ РАЗРУШЕНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

3.1. ВИЗУАЛЬНЫЙ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОНТРОЛЬ

Визуальный и измерительный контроль выполняют на следующих стадиях изготовления сварных конструкций:

- входной контроль;
- изготовление деталей и элементов сварных узлов;
- подготовка деталей и элементов сварных узлов к сборке и сварке;
- сборка деталей и элементов сварных узлов под сварку;
- сварка;
- контроль швов и готовых сварных соединений;
- исправление дефектных сварных соединений.

Визуальный и измерительный контроль материалов, предназначенных для изготовления деталей и элементов сварных узлов, производят в целях выявления поверхностных трещин, расслоений, закатов, забоин, рисок, раковин и других дефектов.

Освещенность контролируемых поверхностей для создания оптимального контраста с фоном в зоне контроля должна быть достаточной для надежного выявления дефектов, но не менее 500 лк. При более низкой освещенности необходимо применять дополнительный переносной источник света, т.е. использовать комбинированное освещение. При визуальном контроле необходимо обеспечить достаточный угол обзора: поверхность следует осматривать под углом более 30° (рис. 3.1) с расстояния, не превышающего 600 мм.

Визуальный и измерительный контроль деталей и элементов сварных узлов выполняют в целях установления соответствия качества их изготовления требованиям производственно-технологической и нормативной технической документации, а также техническим условиям. Визуальный и измерительный контроль при сборке

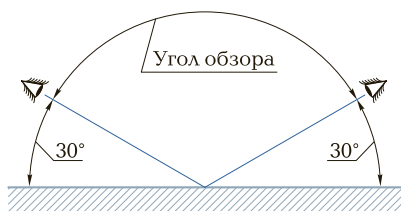


Рис. 3.1. Схема обеспечения визуального контроля

деталей и элементов сварных узлов осуществляют для выявления зазоров и смещений кромок собранных деталей и элементов.

При визуальном и измерительном контроле используют:

- лупы, в том числе измерительные;
- металлические измерительные линейки;
- поверочные лекальные угольники;
- штангенциркули, штангенрейсмасы и штангенглубиномеры;
- щупы;
- угломеры с нониусом;
- индикаторные толщиномеры;
- микрометры;
- микрометрические и индикаторные нутромеры;
- калибры;
- эндоскопы;
- шаблоны, в том числе специальные и универсальные (например, типа УШС), радиусные, резьбовые и др.;
- поверочные плиты;
- плоскопараллельные концевые меры длины с набором специальных принадлежностей;
- штриховые меры длины (стальные измерительные линейки и рулетки).

Для измерения формы разделки кромок и зазоров в стыке собранных под сварку деталей и элементов сварных узлов разрешается применять шаблоны разных типов.

Если в рабочих чертежах не предусмотрены иные требования, то погрешность измерений при измерительном контроле должна ограничиваться следующими значениями:

<i>Диапазон значений измеряемой величины, мм</i>	<i>Погрешность измерений, мм, не более</i>
Менее 0,5	0,1
0,5 ... 1,0	0,2
1,0 ... 1,5	0,3
1,5 ... 2,5	0,4

2,5... 4,0.....	0,5
4,0... 6,0.....	0,6
6,0... 10,0.....	0,8
Более 10,0.....	1,0

Параметры шероховатости зачищенных для выполнения контроля поверхностей деталей, сварных соединений, а также кромок деталей и сборочных единиц, подготовленных под сварку, должны составлять $Ra \leq 12,5$ мкм, а $Rz \leq 80$ мкм.

Измерительный контроль при подготовке деталей под сборку осуществляется для проверки:

- геометрических параметров разделки кромок — угла их скоса и притупления (при этом скос внутренней кромки, выполняемый для улучшения условий выявления непровара в корне шва при радиографическом контроле, измерению не подлежит);
- размеров (диаметра, длины, угла выхода резца) расточки концов труб по внутреннему диаметру;
- размеров подкладных пластин (колец) и расплавляемых вставок;
- перпендикулярности торцов цилиндрических деталей их образующим;
- минимальной толщины стенки цилиндрической детали после расточки по внутреннему диаметру;
- размеров отверстий под штуцер (патрубок) в трубе;
- толщины и ширины подкладки в замковом соединении;
- ширины зоны механической зачистки поверхностей деталей и места разъема остающейся подкладной пластины (кольца).

Геометрические параметры кромок, контролируемые измерением при подготовке деталей под сборку, представлены на рис. 3.2.

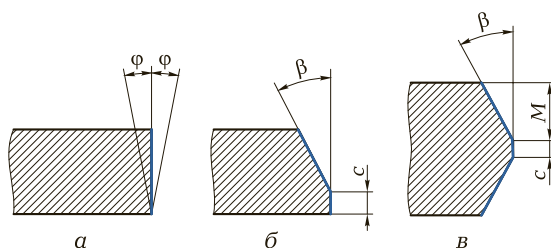


Рис. 3.2. Геометрические параметры кромок, контролируемые измерением при подготовке деталей под сборку:

a — кромки без скоса; $б, в$ — кромки с одно- и двухсторонним скосом; ϕ — угол отклонения кромки от перпендикулярного положения; β, M — угол и глубина скоса кромки; c — притупление кромки

Расширенный перечень контролируемых геометрических параметров, средства и условия выполнения измерений при подготовке деталей под сборку приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1. Контролируемые геометрические параметры, средства и условия выполнения измерений при подготовке деталей под сварку

Контролируемый параметр	Условное обозначение параметра	Средства и условия выполнения измерений
Угол отклонения кромки от перпендикулярного положения (рис. 3.2, <i>a</i>)	φ	Угломер или универсальный шаблон. Измерение в одной точке
Угол скоса кромки (рис. 3.2, <i>б, в</i>)	β	То же
Притупление кромки (см. рис. 3.2, <i>б, в</i>)	<i>c</i>	Штангенциркуль. Измерения в двух взаимно-перпендикулярных плоскостях не менее чем в трех точках по длине стыка листов
Глубина скоса кромки (см. рис. 3.2, <i>в</i>)	<i>M</i>	Размер справочный, измерению не подлежит
Ширина подкладки в замковом соединении	<i>B</i>	Штангенциркуль, линейка. Измерения не менее чем в трех точках по длине стыка
Толщина подкладки в замковом соединении	S_3	То же
Угол скоса поверхности соединяемого элемента	ψ	Угломер или универсальный шаблон. Измерение в одной точке
Отклонение торца разделки (трубы) от перпендикуляра к образующей трубы	<i>f</i>	Угольник и щуп (отвес и линейка или щуп). Измерения не менее чем в трех плоскостях в зоне максимального смещения
Высота присадочного выступа	h_b	Штангенциркуль. Измерения в двух взаимно-перпендикулярных плоскостях в четырех точках

Продолжение табл. 3.1

Контролируемый параметр	Условное обозначение параметра	Средства и условия выполнения измерений
Длина расточки (раздачи) труб по внутреннему диаметру	L_p	Штангенциркуль. Измерения в двух взаимно-перпендикулярных плоскостях в четырех точках
Угол выхода резца (калибра)	γ	Шаблон или универсальный угломер. Измерение в одной точке
Диаметр расточки	D_p	Штангенциркуль. Измерения в двух взаимно-перпендикулярных плоскостях в четырех точках
Номинальная толщина стенки в месте расточки	S_p	Штангенциркуль. Измерения не менее чем в трех равноудаленных точках
Ширина подкладной пластины	$B_{п}$	Штангенциркуль. Измерения не менее чем в трех точках вдоль пластины
Толщина подкладной пластины	$S_{п}$	То же
Ширина подкладного кольца	B_k	Штангенциркуль. Измерения не менее чем в трех точках по периметру кольца
Толщина подкладного кольца	S_k	То же
Притупление подкладного кольца	c_k	»
Диаметр расплавляемого кольца (вставки)	$D_k (D_{вс})$	Штангенциркуль. Измерения в двух взаимно-перпендикулярных плоскостях в четырех точках
Толщина расплавляемого кольца (вставки)	A	Штангенциркуль. Измерения не менее чем в трех равноудаленных точках по периметру кольца

Контролируемый параметр	Условное обозначение параметра	Средства и условия выполнения измерений
Ширина расплавляемого кольца (вставки)	$B_k (B_{вс})$	Штангенциркуль. Измерения не менее чем в трех равноудаленных точках по периметру кольца
Диаметр отверстия в корпусе (трубе)	d	Штангенциркуль. Измерения в двух взаимно-перпендикулярных плоскостях в четырех точках
Параметр шероховатости очищенной поверхности	$Ra (Rz)$	Профилограф-профилометр, образцы сравнения шероховатости

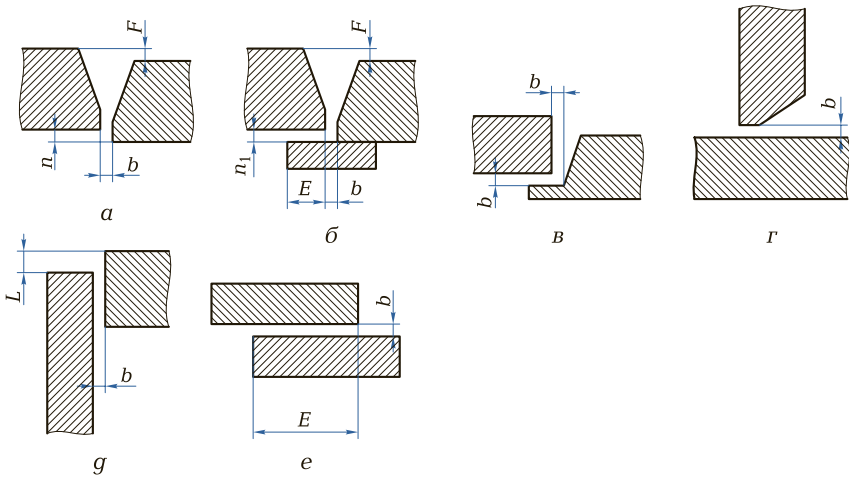


Рис. 3.3. Размеры, контролируемые при сборке под сварку соединений разных типов:

a — стыкового; *б* — стыкового с остающейся подкладной пластиной (кольцом); *в* — стыкового замкового; *г* — таврового; *г* — углового; *е* — нахлесточного; *b* — зазор; *F*, *n* — смещения кромок деталей соответственно с лицевой и обратной стороны соединения; *n*₁ — зазор между подкладной пластиной (кольцом) и обратной поверхностью детали; *E* — ширина области перекрытия деталей в нахлесточном соединении; *L* — смещение привариваемой детали в угловом соединении

Измерительный контроль соединений разных типов, собранных под сварку (рис. 3.3), включает в себя проверку:

- размеров прихваточных швов временных технологических креплений;
- расстояний между технологическими креплениями и кромкой детали и между самими креплениями;
- зазоров в стык, в том числе между деталью и подкладной пластиной (кольцом);
- смещений кромок собранных деталей;
- перекрытия деталей в нахлесточном соединении;
- размеров (длина, высота) прихваток и их расположения по длине (периметру) соединения (если размеры заданы в технической документации);
- зазора в замке расплавляемой проволочной вставки;
- несоосности штуцера и отверстия в корпусе (трубе);
- отклонений осей в угловых соединениях труб;
- размеров узла, собранного под сварку.

Контролируемые геометрические параметры, средства и условия выполнения измерений при сборке деталей под сварку приведены в табл. 3.2.

Таблица 3.2. Контролируемые геометрические параметры, средства и условия выполнения измерений при сборке деталей под сварку

Контролируемый параметр	Условное обозначение параметра	Средства и условия выполнения измерений
Зазор в соединении (рис. 3.3, <i>a...e</i>)	b	Щуп или универсальный шаблон
Специальный зазор	b_1	Щуп
Смещение кромок деталей с обратной стороны соединения (см. рис. 3.3, <i>a</i>)	l	Линейка и щуп
Смещение кромок деталей с лицевой стороны соединения (см. рис. 3.3, <i>a, б</i>)	F	То же
Зазор между подкладной пластиной (кольцом) и обратной поверхностью детали (см. рис. 3.3, <i>б</i>)	n_1	Универсальный или специальный шаблон. Измерения не менее чем в трех точках по длине (периметру) соединения

Контролируемый параметр	Условное обозначение параметра	Средства и условия выполнения измерений
Смещение привариваемой детали в угловом соединении (см. рис. 3.3, <i>g</i>)	L	Штангенциркуль или линейка. Измерение не менее чем в трех точках по длине соединения
Ширина области перекрытия деталей в нахлесточном соединении (см. рис. 3.3, <i>б, е</i>)	E	Линейка. Измерение не менее чем в двух точках по длине соединения
Смещение проволоочной вставки относительно обратной стороны детали	L_1	Штангенциркуль, шаблон или щуп. Измерение выполняется после сборки деталей
Зазор в замке расплавляемого кольца (вставки) (см. рис. 3.3, <i>в</i>)	b	Универсальный шаблон или щуп. Измерение выполняется после сборки деталей
Расстояние от приваренного элемента крепления до скоса кромки	C	Линейка. Измерению подлежит каждый элемент крепления
Катет углового шва	K	Линейка, щуп, штангенциркуль, шаблон. Измерению подлежит каждый шов
Длина прихватки	$l_{\text{п}}$	Линейка и штангенциркуль. Измеряется каждая прихватка
Высота прихватки	$h_{\text{п}}$	Штангенциркуль. Измеряется каждая прихватка
Расстояние между прихватками	$L_{\text{п}}$	Линейка. Измерение выполняется, если расстояние между прихватками установлено в технической документации
Глубина проникновения штуцера во внутреннюю полость	C_1	Специальный шаблон

Визуальному и измерительному контролю на стадиях подготовки и сборки деталей под сварку подлежат не менее 20 % деталей и соединений. При выявлении отклонений от требований рабочих чертежей и (или) производственно-технологической документации, которые могут привести к снижению качества сварных соединений, объем выборочного контроля для группы однотипных деталей (соединений) следует увеличить вдвое. Если при повторном контроле также выявляются отклонения, далее выполняется полный контроль. Забракованные детали подлежат исправлению. Собранные под сварку соединения деталей, забракованные при контроле, подлежат разборке и последующей повторной сборке после устранения причин, вызвавших их первоначальную некачественную сборку.

Визуальный контроль удаления металла, подвергнутого тепловому воздействию при раскрое термической резкой (газовой, воздушно-дуговой, газодюзовой, плазменной и др.), проводится для каждой детали. На кромках деталей не должно быть следов резки (для деталей из низкоуглеродистых, марганцовистых и кремнемарганцовистых сталей) и следов разметки (кернения), выполненной на лицевой поверхности деталей после резки.

Измерительный контроль зазора и смещения кромок в соединениях следует выполнять в нескольких точках вдоль шва, удаленных друг от друга не более чем на 1 м, но не менее чем в трех равноудаленных точках. Оценка возможного смещения кромок n (см. рис. 3.3, *a*) с обратной стороны соединения при отсутствии доступа к ней следует проводить по их смещению F с лицевой стороны соединения.

Визуальному контролю подлежат все прихватки в соединении, а измерительному — прихватки, размеры которых вызывают сомнение по результатам визуального контроля.

Смещение осей цилиндрических деталей, собранных под сварку, измеряется в двух-трех плоскостях (в зоне их максимального отклонения, выявленного при визуальном контроле) на расстоянии 200 мм от центра соединения.

Послойный визуальный контроль в процессе сварки многослойных швов выполняется в целях выявления недопустимых поверхностных дефектов (трещин, пор, включений, прожогов, свищей, усадочных раковин, несплавлений, наплывов) в каждом слое (валике) шва. Выявленные при контроле дефекты подлежат исправлению перед началом сварки последующего слоя (валика) шва.

Визуальный и измерительный контроль сварных соединений выполняют в целях подтверждения их соответствия требованиям производственной и нормативной технической документации.

Визуальный и измерительный контроль исправления дефектных участков сварных соединений выполняют для подтверждения полноты удаления дефекта, проверки соответствия формы и размеров выборки дефектного участка и качества шва при заполнении выборки требованиям производственно-технологической и нормативной технической документации.

Визуальный и измерительный контроль сварных соединений, подлежащих термической обработке, производят до и после ее выполнения. Если контролируемый узел подлежит полной термической обработке (нормализации или закалке с последующим отпуском), то контроль выполняют по ее завершении.

Визуальный и измерительный контроль сварных соединений, подлежащих механической обработке с удалением выпуклости сварного шва, производят до и после соответствующих операций.

С поверхности сварных соединений перед измерительным контролем удаляют влагу, шлак, брызги металла, ржавчину и другие загрязнения, препятствующие проведению контроля. Измерения выполняют после визуального контроля.

Измерения деталей, подготовленных под сварку, производят до их сборки.

При визуальном и измерительном контроле сварных соединений контролируемая зона должна включать в себя поверхность металла шва и примыкающие к нему участки основного металла по обе стороны от шва шириной не менее:

- 5 мм — для стыковых соединений, выполненных дуговой и контактной сваркой оплавлением деталей толщиной до 5 мм включительно;
- толщины деталей (5...20 мм) — для стыковых соединений, полученных дуговой и электронно-лучевой сваркой, а также контактной сваркой оплавлением;
- 20 мм — для стыковых соединений, выполненных дуговой и контактной сваркой оплавлением при толщине деталей более 20 мм, а также стыковых и угловых соединений, полученных газовой сваркой, независимо от толщины деталей и при ремонте дефектных участков в сварных соединениях;
- 5 мм — для угловых, тавровых, торцевых и нахлесточных сварных соединений, выполненных дуговой сваркой, независимо от толщины деталей;
- 50 мм — для сварных соединений, выполненных электрошлаковой сваркой, независимо от толщины деталей.

Дефекты, выявленные при визуальном и измерительном контроле, должны устраняться до выполнения следующей технологической

операции или приемки объекта. Дефекты необходимо исправлять в соответствии с требованиями производственно-технологической документации. Если обнаруженные дефекты не препятствуют дальнейшему применению других видов (методов) неразрушающего контроля, то их можно устранить по завершении контроля.

У готового сварного соединения визуально контролируют:

- наличие (отсутствие) поверхностных дефектов;
- качество очистки металла после удаления временных технологических креплений;
- качество очистки поверхности сварного шва и прилегающих участков основного металла для обеспечения возможности последующего контроля неразрушающими методами, если таковой предусмотрен;
- наличие маркировки (клейма) шва и правильность ее выполнения.

У готового сварного соединения измерительному контролю подлежат:

- размеры поверхностных дефектов (пор, включений и др.), выявленных при визуальном контроле;
- высота и ширина шва, а также вогнутость и выпуклость обратной стороны шва в случае доступности этой стороны для контроля;
- глубина впадин между валиками шва;
- глубина и длина подрезов зоны сплавления;
- катет углового шва (в тавровом соединении).

Геометрические параметры сварных швов и их дефектов представлены на рис. 3.4. Расширенный перечень контролируемых параметров, средства и условия выполнения измерений приведены в табл. 3.3.

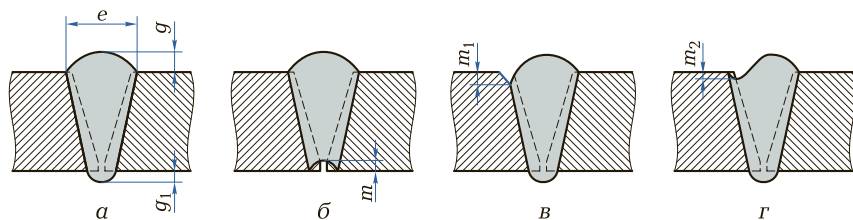


Рис. 3.4. Геометрические параметры (а) сварных швов и их дефектов (б ... г), подлежащие измерительному контролю:

e — ширина шва; g , g_1 — выпуклости соответственно лицевой и обратной стороны шва; m — вогнутость корня шва; m_1 — глубина подреза зоны сплавления; m_2 — глубина впадины

Таблица 3.3. Геометрические параметры сварных швов и их дефектов, средства и условия выполнения измерений

Контролируемый параметр	Условное обозначение параметра	Средства и условия выполнения измерений
Ширина шва (рис. 3.4, а)	e	Штангенциркуль или универсальный шаблон
Выпуклость лицевой стороны шва	g	То же
Выпуклость обратной стороны шва	g_1	»
Вогнутость корня шва (рис. 3.4, б)	m	Штангенциркуль, в том числе модернизированный. Измерения в двух-трех точках в зоне максимального значения
Глубина подреза зоны сплавления (рис. 3.4, в)	m_1	Штангенциркуль, в том числе модернизированный. Приспособление для измерения глубины подрезов
Катет углового шва	K	Штангенциркуль или шаблон
Глубина впадины (рис. 3.4, г)	m_2	Штангенциркуль, в том числе модернизированный. Измерения не менее чем в четырех точках по длине шва
Глубина впадин между валиками	Δ	То же
Размеры (диаметр, длина, ширина) одиночных несплошностей	d_g, l_g, b_g	Измерительная лупа. Измерению подлежит каждая несплошность

Измерительный контроль геометрических параметров сварного соединения (размеров элементов сварных швов, взаимного расположения осей или поверхностей деталей, глубины впадин между валиками швов, выпуклостей и вогнутостей корня односторонних швов и т.д.) следует производить на участках, указанных в рабочих чертежах, а также в местах, где соответствие указанных показателей допустимым значениям вызывает сомнение по результатам визуального контроля.

При контроле стыковых сварных соединений труб с наружным диаметром до 89 мм включительно, если число однотипных соединений в конструкции более 50, допускается измерение размеров шва у 10...20 % этих соединений в одной-двух плоскостях при условии, что при визуальном контроле, которому подвергались все соединения, не возникло предположений о возможном отклонении размеров шва (ширины, выпуклости) от допустимых значений.

Измерение глубины впадин между валиками шва, если валики отличаются друг от друга по высоте, выполняют относительно того из них, который имеет меньшую высоту.

Выпуклость (вогнутость) стыкового шва оценивается по его максимальной высоте (глубине) по отношению к лицевой поверхности деталей. В случае если уровни поверхностей деталей одинаковой толщины в сварном соединении не совпадают, измерения производятся относительно той поверхности, которая расположена выше (рис. 3.5, а).

Если несовпадение уровней лицевых поверхностей деталей связано с их разной толщиной, то оценку выпуклости (вогнутости) поверхности шва выполняют относительно линии, соединяющей края этой поверхности в одном сечении (рис. 3.5, б).

Выпуклость (вогнутость) углового и стыкового швов определяется универсальными или специальными шаблонами (рис. 3.6, 3.7).

Выпуклость (вогнутость) шва с обратной стороны оценивается по максимальной высоте (глубине) поверхности шва относительно поверхности деталей (рис. 3.8).

Отклонение от перпендикулярности наружной поверхности (оси) штуцера по отношению к корпусу (трубе) определяется в двух взаимно-перпендикулярных сечениях. Измерения следует выполнять на участках, угловые и линейные размеры которых вызывают сомнение по результатам визуального контроля.

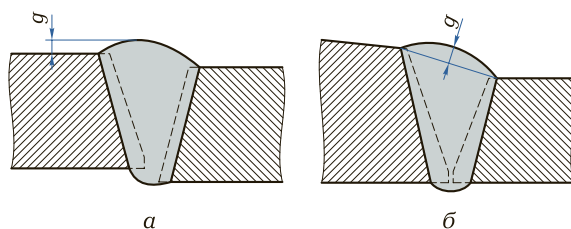


Рис. 3.5. Измерение выпуклости g стыкового шва при разных уровнях лицевых поверхностей деталей, обусловленных их смещением при сборке соединения под сварку (а) и неодинаковой толщиной (б)

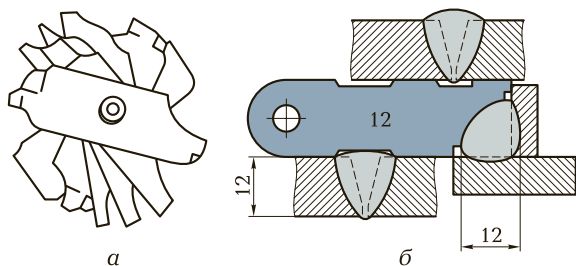


Рис. 3.6. Универсальный шаблон для контроля угловых швов (а) и использование специального шаблона для контроля сварных швов (б)

При ремонте дефектных участков необходимо контролировать визуально:

- полноту удаления дефекта, выявленного при визуальном контроле и другими методами неразрушающего контроля;
- размеры выборки дефектного участка;
- форму разделки кромок в зоне выборки;
- чистоту поверхности выборки и прилегающих к ней поверхностей (отсутствие визуально наблюдаемых загрязнений, пыли, продуктов коррозии, масла и т. п.);

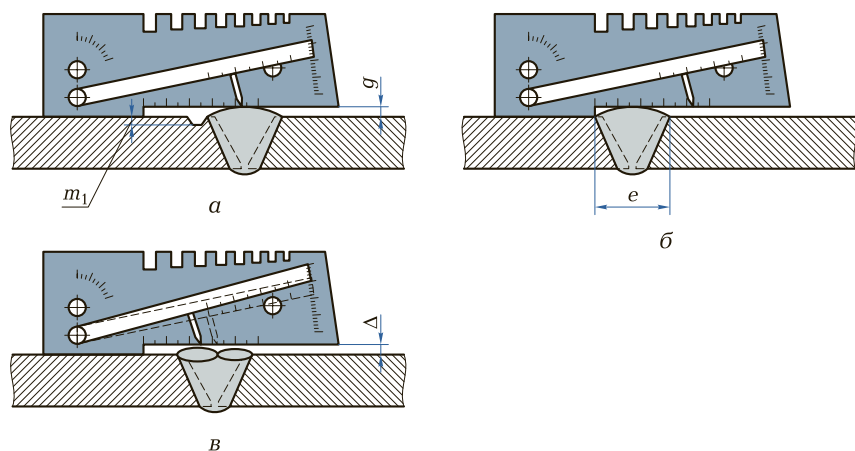


Рис. 3.7. Использование шаблона типа УШС для измерения геометрических параметров сварного шва:

а — выпуклости шва g и глубины подреза m_1 зоны сплавления; б — ширины шва e ; в — глубины впадины Δ между валиками

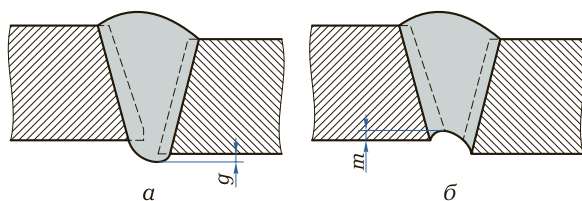


Рис. 3.8. Измерение выпуклости g (а) и вогнутости m (б) с обратной стороны шва

- ширину зоны очистки (механическим способом) поверхностей металла, прилегающих к кромкам выборки;
- наличие дефектов (трещин, пор, включений, скоплений пор и включений, свищей, прожогов, наплывов, усадочных раковин, подрезов, непроваров, брызг расплавленного металла и др.) на поверхности ремонтного шва и на прилегающих к выборке участках металла.

При ремонте дефектных участков в материале и сварных соединениях контролировать измерением необходимо:

- размеры выборки дефектного участка;
- геометрические параметры разделки кромок выборки (угла скоса, толщины металлической перемычки при исправлении трещин и т.п.);
- ширину зоны очистки (механическим способом) участков металла, прилегающих к кромкам выборки;
- размеры дефектов на поверхности ремонтного шва и прилегающих к нему участках металла, выявленных при визуальном контроле;
- шероховатость поверхностей выборки и прилегающих участков металла в зоне их зачистки (перед выполнением ремонтного шва), а также поверхностей металла перед проведением следующего контроля неразрушающими методами.

Методы предотвращения образования дефектов формы шва.

Во многих случаях, как показывает практика, глубину проплавления можно существенно увеличить, не изменяя режим сварки, за счет введения в металл поверхностно-активных компонентов. Особенно просто это осуществить при сварке в окислительной среде или при использовании окислительных флюсов и электродных покрытий. В случае если введение кислорода нежелательно или недопустимо, можно использовать другие дополнительные компоненты (например, редкоземельные элементы Se и Te).

При сварке тонколистового металла в окислительной среде, если возникает опасность образования прожогов, в сварочную ванну вводят компоненты, обладающие повышенным химическим сродством с кислородом. Это приводит к снижению содержания свободного кислорода в металле, а следовательно, влияние кислорода на поверхностное натяжение расплава стали уменьшается.

Снижением поверхностного натяжения расплавленного металла или его межфазного натяжения на границе со шлаком можно добиться уменьшения выпуклости шва и получить плавный переход от основного металла к наплавленному, что исключит образование концентраторов напряжений в сварном соединении.

Заметно снизить межфазное натяжение можно посредством введения в шлак оксидов железа и марганца. Кроме того, если в шлаке содержится мало FeO и MnO , межфазное натяжение на границе расплавленного металла и шлака можно регулировать изменением полярности сварочного тока: при сварочном токе прямой полярности межфазное натяжение будет выше, чем при сварочном токе обратной полярности.

Анализ причин образования подрезов при сварке позволяет сделать вывод о том, что уменьшить вероятность возникновения этих дефектов можно снижением поверхностного натяжения расплавленного металла сварочной ванны или увеличением продолжительности ее существования за счет предварительного подогрева свариваемых деталей или повышения силы тока шунтирования при введении в шлак дополнительного неплавящегося вещества.

Поскольку образование подрезов связано с растеканием расплава по поверхности твердого металла, их появление обуславливают также гидродинамические условия в сварочной ванне. Следовательно, воздействие на дугу магнитных полей различных видов с помощью комбинированного электрода позволит предотвратить возникновение подрезов.

Улучшить условия для растекания расплавленного металла можно удалением оксидных пленок с кромок основного металла или созданием определенного рельефа кромок.

Скорость растекания металла увеличивается при снижении вязкости металла и шлака, а также при повышении их температуры и введении в них компонентов, снижающих вязкость. Этим достигается высокая вероятность исключения подрезов. Однако необходимо учитывать влияние этих компонентов на поверхностное натяжение металла и помнить о том, что чрезмерное снижение вязкости шлака может нарушить его защитную функцию.

3.2. РАДИОГРАФИЧЕСКАЯ ДЕФЕКТОСКОПИЯ

3.2.1. Физические основы радиографической дефектоскопии

Выявление внутренних дефектов основано на способности рентгеновских лучей и гамма-излучения проникать через различные материалы и поглощаться в них в разной степени в зависимости от толщины и вида материала, а также энергии излучения.

Для обнаружения внутренних дефектов в сварных швах по одну сторону контролируемого сварного соединения 3 (рис. 3.9, а) устанавливают источник 1 излучения — рентгеновскую трубку или радиоактивный изотоп, а по другую — детектор 4, регистрирующий излучение, прошедшее через дефект 2. В качестве детектора могут использоваться рентгеновская пленка, электронно-оптический преобразователь, ксерорадиографическая пластина, фотобумага и т. д. Излучение от источника, проходя через сварное соединение, на дефектном и бездефектном его участках будет поглощаться по-разному и поступать в детектор с неодинаковой интенсивностью.

При прохождении через дефектные участки, содержащие газ или неметаллические включения, излучение ослабляется меньше, чем в сплошном металле. Разность интенсивностей излучения регистрируется детектором. Например, на уровне дефектного участка, где интенсивность I прошедшего излучения наибольшая (рис. 3.9, б), рентгеновская пленка, используемая в качестве детектора, потемнеет сильнее.

Применение рентгеновской пленки лежит в основе радиографического метода дефектоскопии — наиболее распространенного из всех известных методов радиационного контроля. Однако

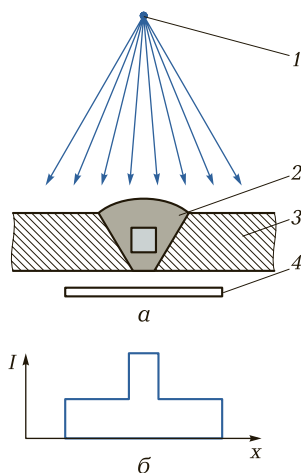


Рис. 3.9. Схема просвечивания сварного соединения (а) и распределение интенсивности излучения I , прошедшего через него (б):

1 — источник излучения; 2 — дефект; 3 — контролируемое соединение; 4 — детектор

не всегда и не при любых условиях с помощью пленки можно обнаружить все возможные дефекты, находящиеся внутри просвечиваемого объекта. Существуют минимальные размеры выявляемых дефектов, характеризующие предельную чувствительность данного метода.

В радиографии различают два вида чувствительности. В соответствии с ГОСТ 7512—82 *абсолютная чувствительность* определяется минимальным размером выявляемого дефекта, или эталона чувствительности в направлении просвечивания. *Относительная чувствительность* характеризуется отношением минимального размера ΔS выявляемого дефекта в направлении просвечивания к толщине S контролируемого соединения и выражается в процентах:

$$W = (\Delta S/S)100.$$

Чувствительность радиографического метода контроля зависит от энергии первичного и рассеянного излучений, плотности и толщины просвечиваемого материала, формы и места расположения дефекта, а также от фокусного расстояния, размера и фокусного пятна рентгеновской трубки и типа рентгеновской пленки.

Ввиду сложности процесса ослабления энергии рентгеновских лучей и γ -излучения при их прохождении через контролируемый металл и многообразия факторов, от которых зависит чувствительность данного метода контроля, учесть одновременное воздействие всех факторов не представляется возможным. Следовательно, целесообразно оценить влияние на чувствительность радиографического метода выявления дефектов каждого из этих факторов.

Энергия излучения. Влияние энергии рентгеновских лучей и γ -излучения на относительную чувствительность радиографического метода иллюстрируют зависимости, приведенные на рис. 3.10, из которых видно, что чувствительность при контроле стали одинаковой толщины тем выше, чем меньше энергия излучения.

Рассеянное первичное излучение по сравнению с нерассеянным снижает качество снимка (контрастность, четкость изображения) и чувствительность данного метода дефектоскопии. При отсутствии рассеяния изображение дефекта на пленке имеет четкие границы (рис. 3.11, а). Однако почти всегда имеется рассеяние излучения, размывающее границы изображения (рис. 3.11, б), вследствие чего дефекты малого размера становятся трудноразличимыми и часто не могут быть выявлены вообще. При этом всегда рассеяние излучения в толстом слое материала сильнее, чем в тонком (рис. 3.11, в). Следовательно, чувствительность радиографического

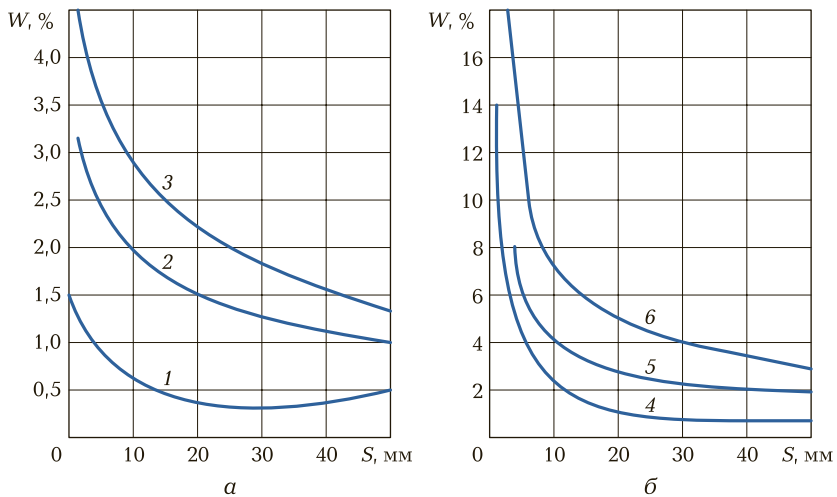


Рис. 3.10. Зависимости относительной чувствительности W радиографического метода контроля от толщины S стали при разных напряжениях U на рентгеновской трубке аппарата РУП-150-10 и толщине регистрирующей пленки РТ-1 $S_n = 750$ мм (а) и при разных энергиях E γ -излучения радиоактивных изотопов и толщине пленки $S_n = 500$ мм (б):

1, 2, 3 — соответственно $U = 80; 120$ и 140 кВ; 4 — $E = 0,3$ МэВ (^{192}Ir); 5 — $E = 0,5$ МэВ (^{137}Cs); 6 — $E = 1,17$ МэВ (^{60}Co)

метода значительно снижается при увеличении толщины просвечиваемого материала.

Полностью устранить рассеяние излучения нельзя, но его можно уменьшить применением специальных фильтров, представляю-

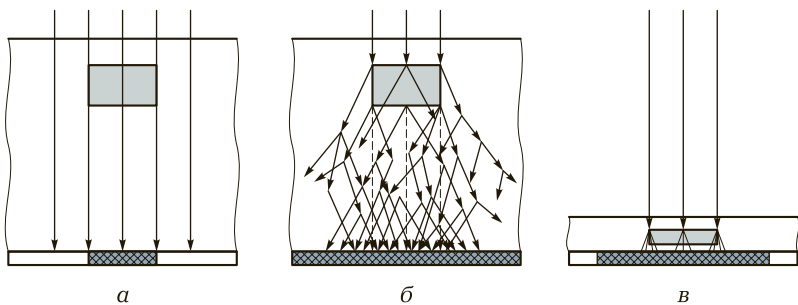


Рис. 3.11. Схемы формирования изображений на пленке дефектов при отсутствии рассеяния излучения в толстых деталях (а) и при наличии рассеяния в толстых (б) и тонких (в) деталях

щих собой тонкий слой (0,025 мм) оловянной или свинцовой (0,075...0,150 мм) фольги. Такие фильтры устанавливают либо между источником излучения и контролируемым объектом, либо между пленкой и объектом. Рассеяние также можно уменьшить, сократив площадь облучаемой поверхности, что достигается с помощью диафрагмы, помещаемой у источника излучения, или свинцовой маски с отверстием, устанавливаемой над просвечиваемым объектом. Рассеяние снижается и при увеличении расстояния от контролируемого объекта до пленки.

Толщина материала. Рассмотрим влияние толщины контролируемого материала на чувствительность радиографического метода.

При контроле материалов толщиной до 3 мм «мягкие» составляющие излучения ослабляются незначительно, что способствует снижению четкости изображения дефекта и чувствительности метода.

С увеличением толщины материала убывает эффективный коэффициент ослабления излучения. «Мягкие» составляющие излучения ослабляются сильнее, чем «жесткие», и в последующие слои поступает излучение, частично отфильтрованное в предыдущих слоях. По мере прохождения через вещество излучение становится все более «жестким», и одновременно с этим замедляется убывание эффективного коэффициента ослабления — он приближается к постоянному значению. Снижение чувствительности данного метода при сравнительно большой толщине материала обусловлено рассеянием излучения, и в конечном счете именно этот эффект ограничивает его применимость значениями толщины материалов 100...150 мм.

Формы дефектов и их ориентация в шве. Дефекты (непровары), имеющие прямолинейные грани, ориентированные параллельно направлению распространения излучения, выявляются более четко вследствие высокой резкости изображения их границ (рис. 3.12, а) в отличие от дефектов шаровой формы, таких как поры (рис. 3.12, б) цилиндрической (шлаковые включения) или какой-либо другой формы (рис. 3.12, в). Действительно, непровар имеет постоянную высоту в направлении распространения излучения, тогда как высота других дефектов изменяется в этом направлении, а следовательно, оптическая плотность изображения таких дефектов равномерно снижается от максимума, определяемого их поперечными размерами, до оптической плотности всего поля пленки. Вследствие такого эффекта изображение становится нерезким, и контрастность снимка, воспринимаемая глазом, значительно ухудшается.

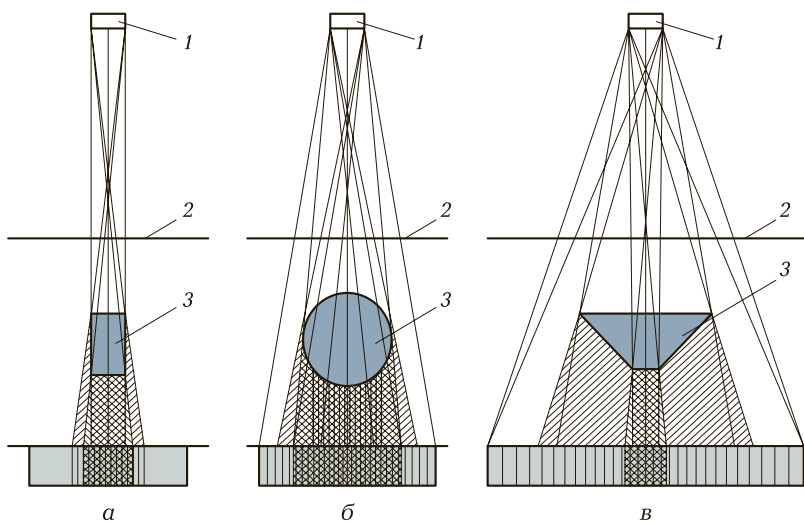


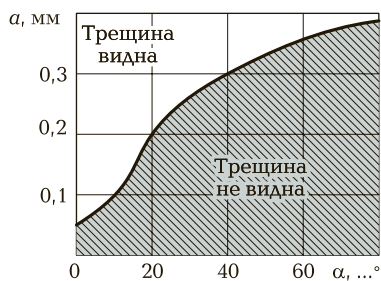
Рис. 3.12. Схемы формирования изображений на пленке дефектов, имеющих сечения прямоугольной (а), круглой (б) и трапециевидальной (в) формы:

1 — источник излучения; 2 — усиливающий экран; 3 — дефект

Наилучшие возможности для выявления дефекта реализуются при прохождении излучения вдоль этого дефекта, т. е. когда угол α (рис. 3.13) равен нулю. Если дефект располагается под некоторым углом к направлению распространения излучения, то оно проходит не всю его высоту, а только определенную ее часть. Чувствительность просвечивания при этом зависит от ширины a дефекта.

На практике часто встречаются дефекты, которые при довольно большой высоте имеют незначительную ширину. В этом случае проекция дефекта не будет видна на пленке из-за малой разницы оптических плотностей изображений дефектного и бездефектного участков. К подобным дефектам относятся, например, трещи-

Рис. 3.13. Зависимость возможности выявления трещины шириной a и длиной 6 мм от угла α ее отклонения от направления распространения излучения



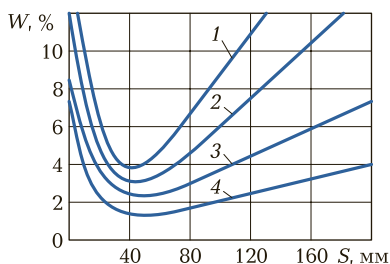


Рис. 3.14. Влияние толщины S просвечиваемой стали и фокусного расстояния F рентгеновской трубки [материал анода — ^{60}Co] на относительную чувствительность W рентгенографического метода:

1 — $F = 150$ мм; 2 — $F = 300$ мм; 3 — $F = 600$ мм; 4 — $F = 1000$ мм

ны, непровары и несплавления кромок. Вероятность их выявления очень мала (35... 40 %). Расслоения в прокатанных листах, расположенные параллельно их поверхности, просвечиванием, как правило, не выявляются. Плохо обнаруживаются несплавления по катетам швов в тавровых, угловых и нахлесточных соединениях.

Фокусное расстояние. При уменьшении фокусного расстояния рентгеновской трубки (рис. 3.14) излучение, как и при уменьшении энергии, ставится более «мягким», вследствие чего повышается чувствительность данного метода контроля дефектов. Следует отметить, что продолжительность просвечивания t связана с фокусным расстоянием F следующим соотношением:

$$t/t_0 = (F/F_0)^2,$$

где t_0 — продолжительность просвечивания при фокусном расстоянии F_0 .

Согласно этому соотношению при увеличении фокусного расстояния существенно возрастает продолжительность просвечивания, т. е. чем меньше фокусное расстояние, тем более четкий рельеф дефекта наблюдается на снимке, меньше область полутени и выше чувствительность метода.

Применение металлических усиливающих экранов, уменьшающих воздействие вторичного излучения, источником которого является сам контролируемый материал, также обеспечивает некоторое повышение чувствительности метода. Рассеянное вторичное излучение снижает резкость и контрастность изображения объекта.

Тип рентгеновской пленки. В зависимости от типа пленки, определяемого размером зерен ее структуры, чувствительность радиографического метода контроля при прочих равных условиях (энергия излучения, вид и толщина материала) может изменяться от 0,5 (РТ-5) до 3 % (РТ-2). Пленки, обеспечивающие повышенную чувствительность этого метода, имеют мелкозернистую структуру и требуют более продолжительного экспонирования.

3.2.2. Технология радиографического контроля

Радиографический контроль применяется для выявления в сварных соединениях трещин, непроваров, пор, включений шлаковых, вольфрамовых, оксидных и других, прожогов, подрезов, а также для оценки выпуклости и вогнутости корня шва, недоступного для внешнего осмотра.

С помощью радиографического контроля нельзя выявить:

- любые несплошности и включения, имеющие размеры (в направлении просвечивания) менее чувствительности контроля;
- непровары и трещины, плоскость раскрытия которых не совпадает с направлением просвечивания;
- любые несплошности и включения, если их изображения на снимках совпадают с изображениями посторонних деталей, острых углов или резких перепадов толщины просвечиваемого соединения.

Помимо рентгеновского излучения для контроля качества сварных швов используют γ - и β -излучения, причем каждый из видов излучения имеет свою область применения. В частности, рентгенографию, обладающую наибольшей чувствительностью, используют преимущественно в цеховых условиях и реже — в полевых (только когда к чувствительности контроля качества сварных соединений предъявляются наиболее высокие требования). Гаммаграфия доминирует при контроле качества сварных соединений, расположенных в труднодоступных местах, в полевых и монтажных условиях. Бетатронную радиографию применяют преимущественно в цеховых условиях для выявления дефектов сварных соединений большой толщины.

При радиографическом контроле сварных соединений необходимо соблюдать определенную последовательность выполнения основных операций:

- 1) выбрать источник излучения, рентгеновскую пленку, схему и режимы просвечивания;
- 2) подготовить контролируемый объект к просвечиванию;
- 3) просветить объект;
- 4) выполнить фотообработку и расшифровать снимки;
- 5) оформить результаты контроля.

Выбор источника излучения. Источник излучения выбирают исходя из технической целесообразности и экономической эффективности его использования с учетом следующих основных факторов: заданные чувствительность и производительность кон-

троля, плотность и толщина материала контролируемого объекта и его конфигурация.

Выбор рентгеновской пленки. Пленку выбирают в соответствии с требуемыми производительностью и чувствительностью контроля и с учетом толщины и плотности материала просвечиваемого объекта.

Пленку РТ-1 применяют для контроля сварных соединений преимущественно большой толщины, так как она обладает высокими контрастностью и чувствительностью к излучению.

Универсальную экранную пленку РТ-2 используют при просвечивании сварных соединений разной толщины.

Для контроля соединений из алюминиевых сплавов и черных металлов небольшой толщины можно применять высококонтрастную пленку РТ-3 и РТ-4.

При дефектоскопии ответственных соединений используют пленку РТ-5, которая обладает высокой контрастностью и позволяет выявлять мелкие дефекты. Однако она имеет наименьшую чувствительность к излучению, что приводит к увеличению продолжительности экспонирования при контроле.

Ориентировочный выбор рентгеновской пленки целесообразно производить по специальным номограммам.

Выбор схемы и режимов просвечивания. Радиографический контроль стыковых, нахлесточных, угловых и тавровых свар-

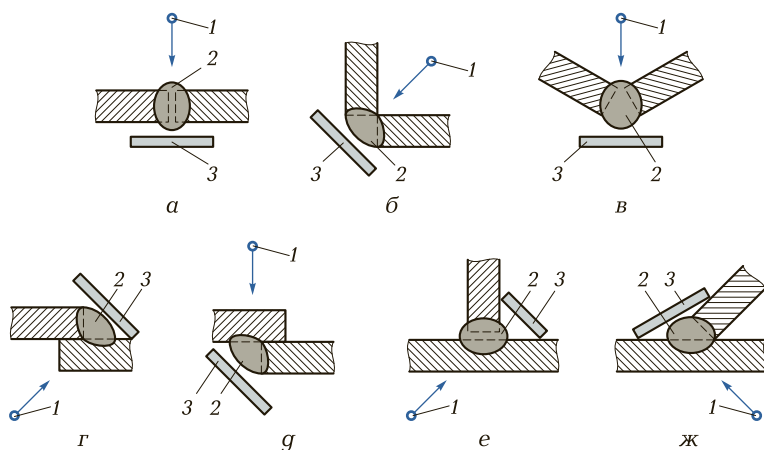


Рис. 3.15. Схемы радиографического контроля стыкового (а), угловых (б, в), нахлесточных (г, г) и тавровых (е, ж) сварных соединений:

1 — источник излучения; 2 — контролируемый участок; 3 — кассета с пленкой

ных соединений следует выполнять согласно схемам, представленным на рис. 3.15. Если привариваемая стенка имеет ширину, недостаточную для размещения пленки, то при контроле тавровых соединений можно направлять излучение по образующей стенки.

При контроле сварных соединений цилиндрических и сферических полых узлов (рис. 3.16) следует отдавать предпочтение схемам просвечивания через одну стенку. При этом рекомендуется осуществлять просвечивание с помощью источника излучения, расположенного внутри контролируемого узла в соответствии со следующими схемами:

- рис. 3.16, *а* (панорамное просвечивание) — для узлов диаметром до 2 м независимо от объема контроля и диаметром 2 м и более при 100%-ном контроле;
- рис. 3.16, *б* — при 100%-ном и выборочном контроле, если применение схемы, представленной на рис. 3.16, *а*, невозможно;
- рис. 3.16, *в* — при выборочном контроле узлов диаметром 2 м и более;
- рис. 3.16, *г, г* — для узлов с внутренним диаметром 10 м и более, если использование схем, приведенных на рис. 3.16, *а...в*, невозможно.

При контроле сварных соединений, выполняемом через две стенки, схемы, показанные на рис. 3.16, *е...з*, рекомендуются для

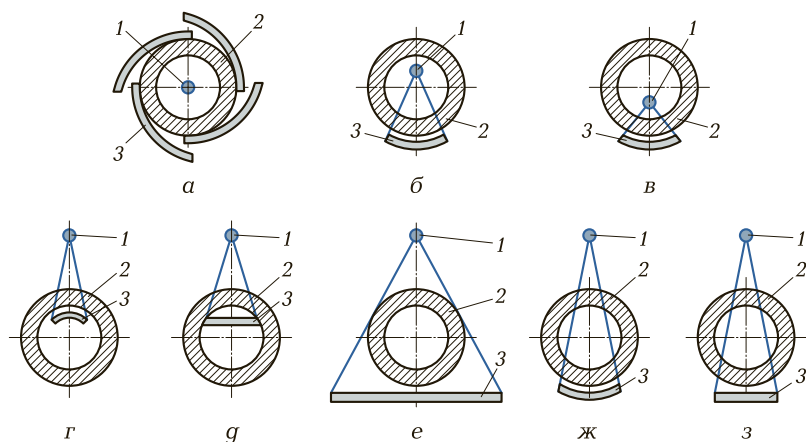


Рис. 3.16. Схемы (*а...з*) радиографического контроля сварных соединений цилиндрических и сферических полых узлов:

1 — источник излучения; 2 — контролируемый участок; 3 — кассета с пленкой

просвечивания цилиндрических и сферических полых узлов диаметром до 100 мм.

При контроле стыковых сварных соединений по схемам, показанным на рис. 3.16, *a...g*, направление распространения излучения должно совпадать с плоскостью контролируемого соединения, а при контроле по этим схемам угловых сварных швов труб, штуцеров и других деталей угол между направлением распространения излучения и плоскостью сварного соединения не должен превышать 45° .

При контроле сварных соединений по схемам, представленным на рис. 3.16, *e...z*, направление распространения излучения следует выбирать таким образом, чтобы изображения противоположащих участков сварного шва на снимке не накладывались друг на друга. При этом угол между направлением распространения излучения и плоскостью сварного шва должен составлять $0...45^\circ$.

При выборе схемы просвечивания и направления распространения излучения необходимо учитывать следующее:

- расстояние от контролируемого сварного соединения до рентгеновской пленки должно быть минимально возможным, но не более 150 мм;
- угол между направлением распространения излучения и нормалью к рентгеновской пленке должен составлять $0...45^\circ$;
- непровары и трещины могут быть выявлены лишь в том случае, если угол между плоскостью их раскрытия и направлением просвечивания составляет $0...10^\circ$, а их ширина — не менее 0,05 мм.

Длина снимков должна обеспечивать перекрытие изображений смежных участков сварных соединений не менее чем на 20 % от длины контролируемого участка, не превышающего 100 мм, и не менее чем на 20 мм при длине контролируемого участка более 100 мм.

Для того чтобы снимки стыковых и нахлесточных соединений обеспечивали получение изображений сварного шва, эталонов чувствительности, маркировочных знаков и околошовных зон, их ширина должна составлять: не менее 5 мм при толщине свариваемого металла $S < 5$ мм; не менее S при $S = 5...20$ мм; не менее 20 мм при $S > 20$ мм. Для тавровых и угловых соединений ширина снимков указывается в технической документации на их контроль или приемку.

После выбора схемы просвечивания устанавливают фокусное расстояние. При его увеличении несколько повышается чувствительность метода, но возрастает (пропорционально квадрату расстояния) продолжительность просвечивания. Фокусное расстоя-

ние, выбираемое в соответствии со схемой просвечивания, толщиной материала и размерами активной части источника излучения (фокусного пятна), обычно составляет 300...750 мм.

Продолжительность экспонирования и длина контролируемого участка должны обеспечивать:

- оптическую плотность изображений контролируемого участка шва, околошовной зоны и эталонов чувствительности 1,5...3,0;
- оптическую плотность изображения любого участка сварного шва на пленке не менее 0,4...0,6 от оптической плотности изображения эталона чувствительности в зависимости от коэффициента контрастности пленки, но не менее 1,5;
- искажение размеров изображений дефектов на краях пленки по сравнению с центром, не превышающее 10 %, — для прямолинейных участков деталей и 25 % — для криволинейных.

Экспозиция рентгеновского излучения определяется как произведение силы тока рентгеновской трубки и времени облучения, а экспозиция γ -излучения — как произведение активности источника излучения, выраженной в γ -эквиваленте радия, и времени облучения.

Продолжительность просвечивания сварных соединений подбирают по номограммам, составленным для разных типов пленки, видов источников излучения и их фокусных расстояний, а уточняют с помощью пробных снимков.

Подготовка контролируемого объекта к просвечиванию. Перед контролем сварное соединение следует тщательно осмотреть и при необходимости очистить от шлака и других загрязнений. Наружные дефекты необходимо удалить, так как их изображение на снимках может затемнить изображение внутренних дефектов. Сварное соединение разбивается на участки контроля, которые маркируются, чтобы после просвечивания можно было точно указать расположение выявленных внутренних дефектов. Кассеты и помещаемые в них рентгеновские пленки маркируются в том же порядке, что и соответствующие участки контроля. Заряженную кассету укрепляют на сварном соединении, эталон чувствительности устанавливают со стороны источника излучения, а если его невозможно установить таким образом, например при просвечивании труб через две стенки, разрешается располагать эталон со стороны детектора (кассеты с пленкой).

Просвечивание сварного соединения. После выполнения перечисленных операций и обеспечения безопасных условий работы приступают к просвечиванию сварного соединения. При этом источник излучения устанавливают таким образом, чтобы во время

просвечивания он не мог вибрировать или смещаться, иначе изображение на пленке окажется размытым. По окончании просвечивания кассеты с пленкой снимают и экспонированную пленку подвергают фотообработке.

Фотообработка снимков. Процесс фотообработки пленки включает в себя следующие операции: проявление, промежуточную промывку, фиксирование изображения, промывку в непроточной воде, окончательную промывку и сушку пленки.

Сначала пленку обрабатывают в проявителе. При проявлении происходит восстановление металлического серебра из кристаллов его бромида. Продолжительность процесса проявления указана на упаковках пленки и проявителя.

Затем пленку ополаскивают в кювете с водой. Такая промежуточная промывка предотвращает попадание проявителя в фиксирующий раствор. В фиксаже растворяются непроявленные зерна бромида серебра, а восстановленное металлическое серебро не претерпевает изменений.

Далее пленку промывают сначала в непроточной воде (для последующего извлечения и сбора серебра), а затем в ванне с проточной водой в течение 20...30 мин (для удаления оставшихся после фиксирования химических реактивов).

По завершении промывки пленку сушат в течение 3...4 ч при температуре, не превышающей 35 °С.

Расшифровка снимков. Задача расшифровщика снимков заключается в выявлении дефектов, а также в установлении их видов и размеров.

Для измерения изображений дефектов размером до 1,5 мм рекомендуется применять измерительную лупу (ГОСТ 25706—83), а для дефектов размером более 1,5 мм — прозрачную измерительную линейку. При расшифровке снимков необходимо отличить дефекты, вызванные плохим качеством пленки или неправильной фотообработкой, от дефектов контролируемого материала. В сомнительных случаях материал подвергают повторному просвечиванию.

К снимкам радиографического контроля, допущенным к расшифровке, предъявляются следующие требования (ГОСТ 7512—82):

- отсутствие пятен, полос, загрязнений и повреждений эмульсионного слоя, затрудняющих расшифровку;
- наличие изображений ограничительных меток, маркировочных знаков и эталонов чувствительности.

Для определения относительной чувствительности радиографического метода контроля используют специальные эталоны.

Эталон представляет собой пластину с идеальными дефектами, контуры которых резко очерчены. На границах дефектов эталона толщина просвечиваемого материала изменяется резко, а в реальном металле изменение толщины на границе дефект — бездефектная зона происходит постепенно. Кроме того, реальные дефекты часто рассредоточены и имеют неправильные очертания. Вследствие этого поры и шлаковые включения, диаметры которых соответственно равны глубине канавки и диаметру проволоки эталона, могут быть не выявлены, несмотря на четкую видимость изображений искусственных дефектов.

В практике радиационной дефектоскопии применяются несколько типов эталонов чувствительности (рис. 3.17).

В Российской Федерации в соответствии с ГОСТ 7512—82 наиболее часто используются проволоочные и канавочные эталоны четырех типоразмеров. Проволоочный эталон (рис. 3.17, а) представляет собой пластиковый чехол с пятью проволоками разного диаметра. При этом диаметры рядом расположенных проволок различаются в 1,25 раза. На канавочном эталоне (рис. 3.17, б) имеются четыре канавки. Глубина соседних канавок различается в 1,39 раза. Эталоны этих типов имеют одинаковую чувствительность. Их выбор определяется условиями работы и удобством применения.

Материал эталона должен быть таким же, как и материал контролируемого сварного соединения. Маркируются эталоны свинцовыми буквами и цифрами. Буквы обозначают материал, из которого изготовлен эталон, а цифры — его номер.

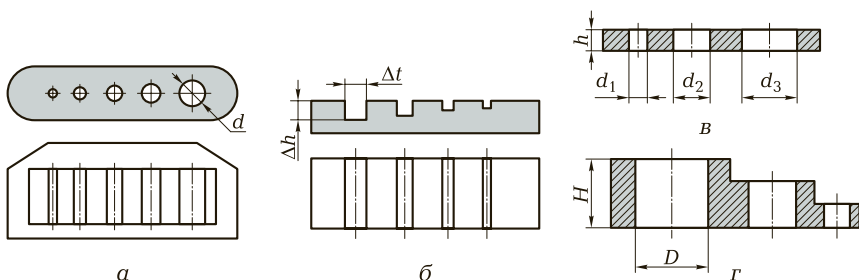


Рис. 3.17. Конструкции эталонов чувствительности разных типов, применяемых в радиационной дефектоскопии:

а — проволоочного; б — канавочного; в — пластинчатого с отверстиями; $г$ — ступенчатого с отверстиями; h, H — толщины эталонов; d — диаметр проволоки, $d = 0,05...4,0$ мм; $d_1...d_3, D$ — диаметры отверстий, $d_1 = h, d_2 = 2h, d_3 = 3h, D = H; \Delta h, \Delta t$ — глубина и ширина канавки, $\Delta h = \Delta t = 0,1...7,0$ мм

При документальном оформлении результатов расшифровки снимков определенные по ним размеры дефектов следует округлить до ближайших значений из ряда 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0 мм или, если определенный по снимку размер превышает 3,0 мм, до ближайшего целого числа миллиметров.

Оформление результатов контроля. Заключение о качестве сварного соединения должно соответствовать техническим условиям на его изготовление и приемку.

Для сокращенной записи наименований дефектов должны использоваться условные обозначения, приведенные в табл. 3.4.

Таблица 3.4. Условные обозначения дефектов					
Виды дефектов	Условное обозначение		Группы дефектов	Условное обозначение	
	Русское	Латинское		Русское	Латинское
Трещины	Т	Е	Трещины вдоль шва (продольные)	Тв	Еа
			Трещины поперек шва (поперечные)	Тп	Еб
			Трещины разветвленные	Тр	Ес
Непровары	Н	D	Непровары в корне	Нк	Da
			Непровары между валиками	Нв	Db
			Непровары по разделке	Нр	Dc
Поры	П	А	Отдельные поры	П	Aa
			Цепочки	ЦП	Ab
			Скопления	СП	Ac
Шлаковые включения	Ш	В	Отдельные включения	Ш	Va
			Цепочки	ЦШ	Vb
			Скопления	СШ	Vc

Виды дефектов	Условное обозначение		Группы дефектов	Условное обозначение	
	Русское	Латинское		Русское	Латинское
Вольфрамовые включения	В	С	Отдельные включения	В	Са
			Цепочки	ЦВ	Сб
			Скопления	СВ	Сс
Оксидные включения	О	О	—	—	—
Вогнутость корня шва	Вгк	Fa	—	—	—
Избыточная выпуклость корня шва	Впк	Fb	—	—	—
Подрез зоны сплавления	Пдр	Fc	—	—	—
Смещение кромок	Скр	Fd	—	—	—

По характеру распределения дефекты объединяются в следующие группы: отдельные дефекты, цепочки и скопления.

Цепочка — это не менее трех расположенных на одной линии дефектов, расстояние между которыми не превышает утроенного их размера.

Скопление — это не менее трех кучно расположенных дефектов, расстояние между которыми не превышает утроенного их размера.

Размер дефекта — это наибольший линейный размер его изображения на снимке в миллиметрах.

При наличии группы дефектов одного вида, но разных размеров указывают либо средний, либо преобладающий размер дефекта в группе, а также общее число дефектов.

При сокращенной записи дефектов после условного обозначения указывают их размеры в миллиметрах:

- для сферических пор, шлаковых и вольфрамовых включений — диаметр;
- для удлинённых пор, шлаковых и вольфрамовых включений — ширину и длину (через знак умножения);

- для цепочек и скоплений пор, оксидных включений, непроваров и трещин — длину.

Изображения пор на рентгенограммах могут быть весьма разнообразными, но обычно они выглядят как темные окружности и нерегулярные точки, причем последние часто сгруппированы в скопления.

Темные несимметричные пятна с неровными краями, расположенные в пределах сварного шва или вдоль его валика, свидетельствуют о наличии включений шлака.

Непровар в корне сварного шва имеет вид прямой темной линии с ровными краями, расположенной по центру шва.

Несплавление металла сварного шва с основным металлом на рентгенограмме обычно проявляется в виде темной линии или нескольких линий, ориентированных вдоль шва.

Изображение на рентгенограмме вогнутости корня шва аналогично изображению его непровара, но с размытыми краями и большой ширины.

Усадочная канавка в корне шва имеет вид темной, смещенной от центра шва непрямолинейной полосы с неравномерной оптической плотностью.

Подрез имеет вид темной непрямолинейной полосы, проходящей вдоль края сварного шва.

Смещение кромок свариваемых деталей проявляется в виде изображения с заметным различием оптической плотности по ширине сварного шва.

Местная вогнутость, или уменьшение толщины стыкового шва, на снимке выглядит темнее основного металла, и чем больше отклонение от номинальной толщины шва, тем темнее по сравнению с основным металлом дефектный участок.

Избыточная выпуклость сварного шва выглядит на снимке как более светлая область. Для подтверждения того, что выявлен дефект именно этого типа, достаточно визуально осмотреть сварной шов.

На рентгенограмме сварного шва отображаются только те трещины, плоскость раскрытия которых совпадает с направлением просвечивания. Трещина на снимке проявляется в виде линии с изломами, зачастую очень тонкой и прерывистой. Иногда о наличии трещин свидетельствуют «хвосты» на порах и включениях.

Вольфрамовые включения имеют вид более светлых бесформенных точек.

Оксидные включения, характерные для алюминиевых сплавов, образуются на поверхности сварного шва при дуговой сварке в за-

щитном газе и проявляются в виде небольших более темных бесформенных пятен.

Прожог на снимке отображается в виде темного пятна небольшого размера, окруженного светлым ореолом.

3.2.3. Аппаратура для рентгеновского контроля

Для получения и использования рентгеновского излучения применяют рентгеновские аппараты.

Основными элементами конструкции рентгеновского аппарата являются рентгеновская трубка в защитном кожухе, высоковольтный генератор и пульт управления. Высоковольтный генератор состоит из высоковольтного трансформатора, трансформатора накала трубки и выпрямителя. Пульт управления обычно содержит автотрансформатор, регулятор напряжения и силы тока, измерительные приборы, сигнальную систему и систему управления.

В практике радиационной дефектоскопии широко распространены рентгеновские аппараты с постоянной нагрузкой (подразделяемые на аппараты-моноблоки и аппараты кабельного типа) и импульсные (табл. 3.5).

Таблица 3.5. Характеристики рентгеновских аппаратов

Марка аппарата	Напряжение на трубке, кВ	Сила тока трубки, мА	Размеры фокусного пятна, мм	Масса аппарата, кг	Толщина просвечиваемой стали, мм
<i>Аппараты-моноблоки</i>					
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
РУП-160-10П	50 ... 160	10	1,3×4,0	60	40
<i>Аппараты кабельного типа</i>					
РУП-100-10	10 ... 100	10	1×1	200	30
РУП-150-10 (2 трубки)	35 ... 100	10	5*	670	45
		2	0,3*		

Марка аппарата	Напряжение на трубке, кВ	Сила тока трубки, мА	Размеры фокусного пятна, мм	Масса аппарата, кг	Толщина про-свечиваемой стали, мм
РУП-150-300-10 (3 трубки)	35... 300	10	4×4	1 000	70
		10	5*		
		2	0,3*		
РУП-150/300-01 (4 трубки)	35... 300	2	0,3*	800	70
		10	4×4		
<i>Импульсные аппараты</i>					
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

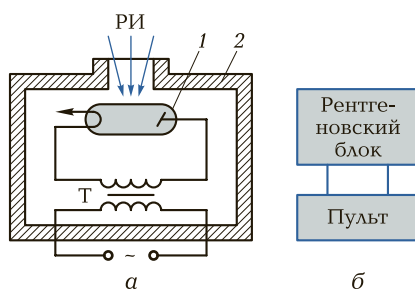
* Диаметр фокусного пятна, мм.

Аппарат-моноблок, у которого рентгеновская трубка и высоковольтный трансформатор смонтированы в единое устройство — блок-трансформатор, заполняют маслом или газом. Основное требование к таким аппаратам — минимальные габаритные размеры и масса. Для достижения этого поступаются таким важным показателем процесса контроля, как длительность непрерывной работы. В аппаратах-моноблоках (рис. 3.18) обычно применяется наиболее простая схема контроля — полуволновая безвентильная, в которой выпрямителем служит сама рентгеновская трубка. На трубку подается ток непосредственно от трансформатора высокого напряжения. Трубка пропускает ток только в одном направлении в течение первого полупериода, а во втором полупериоде запирается, работая как выпрямитель. Применение подобной схемы сокращает срок службы трубки.

Выпускается типовой ряд аппаратов-моноблоков, снабженных унифицированными пультами управления. Это портативные ап-

Рис. 3.18. Принципиальная (а) и структурная (б) схемы рентгеновского аппарата-моноблока:

1 — рентгеновская трубка; 2 — кожух;
 Т — трансформатор; РИ — рентгеновское излучение



параты, предназначенные для работы в полевых и монтажных условиях (РУП-120-5, РАП-160-6П), и стационарные высоковольтные аппараты (РУП-400-5).

Аппараты-моноблоки преимущественно используются, когда требуется обеспечить работу излучателя на большом расстоянии (до 30 м и более) от пульта управления, а также его маневренность. Характерным примером здесь может служить аппарат РАП-160-6П, предназначенный для контроля магистральных трубопроводов, который создает панорамное поле облучения, позволяя контролировать кольцевые стыки труб за одну операцию просвечивания при размещении его внутри трубы.

Аппараты кабельного типа включают в себя самостоятельное генераторное устройство, рентгеновскую трубку и пульт управления. В таких аппаратах, как правило, используется схема удвоения напряжения с двумя выпрямителями (рис. 3.19). В течение полупе-

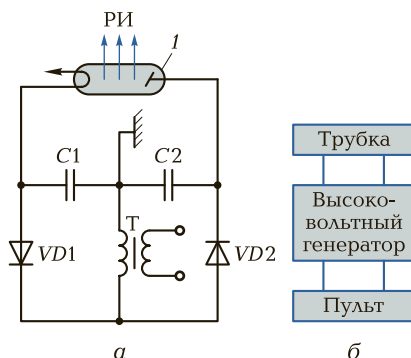


Рис. 3.19. Принципиальная (а) и структурная (б) схемы рентгеновского аппарата кабельного типа:

1 — рентгеновская трубка; РИ — рентгеновское излучение; VD1, VD2 — выпрямители; C1, C2 — конденсаторы; Т — трансформатор

риода с отрицательным напряжением конденсаторы $C1$ и $C2$ заряжаются через выпрямители $VD1$ и $VD2$ до амплитудного значения, а с наступлением положительного полупериода они оказываются включенными последовательно с вторичной обмоткой трансформатора, и напряжение на аноде трубки повышается в два раза. Выход рентгеновского излучения происходит в течение положительного полупериода.

Аппараты кабельного типа, обычно выпускаемые передвижными, используются в цеховых и лабораторных условиях. К аппаратам этого типа относится, например, рентгеновская установка РУП-100-10, рентгеновская трубка которой снабжена легким (массой 6 кг) защитным кожухом. Малая масса блока излучения и возможность установки высоковольтного генератора и пульта управления на значительном расстоянии (до 10 м) от рентгеновской трубки позволяют применять данный аппарат для контроля труднодоступных участков сварных соединений.

Импульсные аппараты конструктивно состоят из двух блоков — рентгеновского и блока управления. Конденсатор блока управления заряжается через выпрямитель от трансформатора и с помощью электронного ключа разряжается на повышающий трансформатор в цепи трубки.

Под действием импульса высокого напряжения в рентгеновской трубке с холодным катодом возникает ток автоэлектронной эмиссии. Вследствие этого катод разогревается, и с его поверхности испускаются электроны, образуя облако плазмы, которое движется к аноду трубки с постоянной скоростью. В результате высокое напряжение (250...300 кВ) на вторичной обмотке высоковольтного трансформатора оказывается приложенным между передним фронтом движущейся плазмы и анодом рентгеновской трубки, что приводит к росту силы анодного тока, а следовательно, к генерации рентгеновского излучения.

Анодом двухэлектродной трубки служит массивный вольфрамовый стержень с наконечником в форме конуса (с углом при вершине 30°), а катодом — вольфрамовый цилиндр с заостренной торцевой кромкой. В начальный период работы рентгеновской трубки эмиссия электронов начинается не со всей торцевой поверхности катода, а только из точки с наибольшей напряженностью электрического поля, поэтому интенсивность излучения распределяется неравномерно.

С ростом числа включений трубки изменяется микроструктура катода и сглаживаются особо острые зубцы на его поверхности. Вследствие этого увеличивается начальное напряжение авто-

электронной эмиссии, что приводит к возрастанию нестабильности интенсивности и спектрального состава рентгеновского излучения от включения к включению.

Импульсные трубки имеют большую мгновенную мощность, но длительность генерируемых ими импульсов очень мала (2... 100 нс), а достигаемая частота их повторения не превышает 50 Гц.

Следует отметить, что небольшие габаритные размеры и малая масса импульсных аппаратов обусловили их широкое применение в промышленности, но главным образом они используются при контроле магистральных трубопроводов, судостроительных конструкций и монтаже для проверки сварных соединений толщиной до 30 мм.

Основными недостатками импульсных рентгеновских аппаратов являются малый срок службы трубки и более низкая чувствительность, чем у ранее рассмотренных аппаратов. К их достоинствам относятся малая масса, портативность и возможность работы от низковольтных (12 В) источников питания.

3.3. УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ДЕФЕКТОСКОПИЯ

3.3.1. Физические основы ультразвуковой дефектоскопии

Ультразвуковые колебания — это механические колебания упругой среды с частотой, находящейся за порогом слышимости человеческого уха, т. е. превышающей 20 кГц. Для ультразвукового контроля применяют колебания частотой 0,5... 25 МГц.

В качестве излучателей и приемников ультразвука, называемых пьезопреобразователями, используются пластины из пьезоэлектрического материала — керамики или кварца. При подаче на пьезопластину электрического напряжения вследствие возникновения обратного пьезоэлектрического эффекта изменяется ее толщина. Если к пьезопластине приложено знакопеременное напряжение, то она колеблется в такт с этими изменениями, создавая в окружающей среде упругие колебания. При этом пьезопластина действует как излучатель (рис. 3.20, а). И наоборот, если пьезоэлектрическая пластина воспринимает импульс давления (отраженную ультразвуковую волну), то на ее обкладках вследствие возникновения прямого пьезоэлектрического эффекта появляется электрический заряд, который можно измерить. В этом

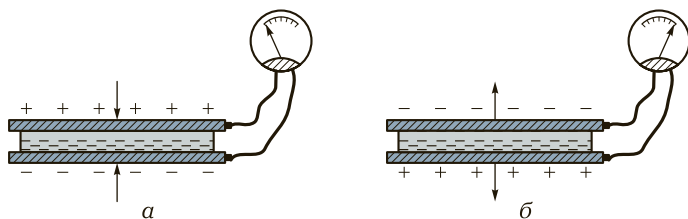


Рис. 3.20. Схемы, поясняющие принцип действия пьезопластины в качестве излучателя (а) и приемника (б) ультразвука (стрелками показаны направления действия возникающей при этом силы)

случае пьезопластина действует как приемник (рис. 3.20, б). Для подвода и снятия напряжения на противоположные поверхности пьезопластины нанесены серебряные электроды.

Процесс распространения ультразвука в пространстве является волновым. Граница, отделяющая колеблющиеся частицы среды от частиц, еще не начавших колебаться, называется фронтом волны. Упругие волны характеризуются скоростью распространения c , длиной λ и частотой f . Под длиной волны понимают расстояние между ближайшими частицами среды, которые колеблются одинаковым образом (в одинаковой фазе). Число волн, проходящих через данную точку пространства в каждую секунду, определяет частоту ультразвука. Длина волны связана со скоростью ее распространения и частотой колебаний соотношением $\lambda = c/f$.

В зависимости от направления колебаний частиц среды различают несколько типов волн. Когда частицы колеблются вдоль направления распространения волн, волны (рис. 3.21, а) называются продольными (волнами сжатия), а когда перпендикулярно направлению распространения волн (рис. 3.21, б) — поперечными (волнами сдвига).

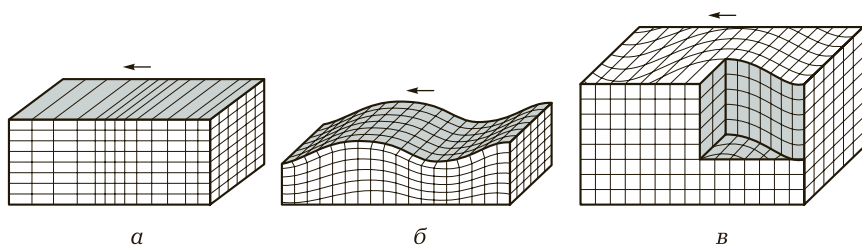


Рис. 3.21. Схематическое изображение продольной (а), поперечной (б) и поверхностной (в) волн (стрелками показаны направления распространения волн)

Поперечные волны могут возникать лишь в среде, обладающей сопротивлением сдвигу. Следовательно, в жидкой и газообразной средах образуются только продольные волны, а в твердой среде могут возникать как продольные, так и поперечные волны. Скорость распространения поперечной волны в металлах составляет примерно 0,55 от скорости продольной волны.

Вдоль свободной поверхности твердого тела могут распространяться поверхностные волны — волны Релея (рис. 3.21, в), которые являются комбинацией поперечных и продольных волн. Плоскость поляризации поверхностных волн, т. е. плоскость, в которой колеблются частицы среды, перпендикулярна поверхности. Глубина распространения поверхностных волн в твердом теле примерно равна их длине, а скорость распространения составляет 0,9 от скорости поперечных волн (табл. 3.6).

В плакирующих слоях биметаллов, толщина которых соизмерима с длиной волны, распространяются нормальные волны (волны Лэмба), которые заполняют всю толщину пластины. В плакирующих слоях биметаллических листов могут распространяться поверхностные волны с горизонтальной поляризацией (волны Лява).

Рассмотрим процесс прохождения в среде короткого (зондирующего) импульса ультразвуковых колебаний. Пьезоэлемент в виде круглого диска служит одновременно излучателем и приемником ультразвука. При излучении пьезоэлементом импульса ультразвуковых колебаний в среде возникает ультразвуковое поле, которое имеет пространственные границы и определенное распределение звукового давления внутри пучка.

Таблица 3.6. Скорость распространения ультразвуковых волн в различных средах

Среда	Скорость распространения волн, м/с		
	продольных	поперечных	поверхностных
Воздух	335	—	—
Трансформаторное масло	1 400	—	—
Органическое стекло	2 670	1 300	1 050
Вода	1 490	—	—
Низкоуглеродистая сталь	5 850	3 230	3 000
Титан и его сплавы	6 000	3 500	2 790
Алюминий и его сплавы	6 260	3 080	2 800

Вблизи от излучателя, в области, называемой ближней зоной, ультразвуковой пучок почти не расходится и имеет цилиндрическую форму. В дальней зоне начинается постепенное расхождение ультразвуковой волны, и пучок приобретает форму усеченного конуса. Распределение энергии в поперечном сечении этого конуса неравномерное: максимальная интенсивность излучения соответствует оси пучка, а минимальная — периферии конуса.

Распределение интенсивности излучения в дальней зоне, представленное в виде графика в полярных координатах, называется диаграммой направленности ультразвукового поля.

При распространении ультразвуковых волн от источника интенсивность излучения падает. Это обусловлено не только расхождением пучка в объеме конуса, но и затуханием колебаний. По оси пучка ультразвуковые колебания затухают по экспоненциальному закону:

$$A = A_0 e^{-\delta r},$$

где A — амплитуда колебаний на расстоянии r от излучателя; A_0 — амплитуда зондирующего импульса; δ — коэффициент затухания.

В металлах коэффициент затухания зависит в основном от соотношения между средним размером D зерен и длиной волны λ ультразвука. Если $\lambda > 10D$, то затухание малое и можно контролировать сварные соединения деталей толщиной до 10 мм. Если зерна металла соизмеримы с длиной волны или их размеры превосходят λ , то ультразвуковой контроль осуществлять весьма затруднительно или даже невозможно из-за значительного затухания ультразвука. Это относится к сварным соединениям литых деталей, швам, выполненным электрошлаковой сваркой без термообработки, и швам аустенитных (коррозионно-стойких) сталей.

Важной характеристикой среды, в которой распространяются ультразвуковые колебания, является ее акустическое сопротивление

$$z = \rho c,$$

где ρ — плотность среды.

При прохождении ультразвука из одной среды в другую происходит отражение части энергии волны от границы раздела сред. Коэффициенты отражения R и прохождения T ультразвука зависят от соотношения акустических сопротивлений двух сред. Чем существеннее отличаются друг от друга акустические сопротивления z_1 и z_2 , тем больше R , поэтому, чтобы увеличить коэффициент прохождения ультразвука, на поверхность контролируемого свар-

ного соединения наносят контактную жидкость (воду, масло, глицерин и др.), акустическое сопротивление которой значительно больше, чем у металла соединения и у материала призмы пьезопреобразователя. При наличии воздушного зазора между преобразователем и поверхностью соединения ультразвук практически не проходит в металл.

Если размеры дефекта меньше поперечных размеров пучка и соизмеримы с длиной волны, то возникает дифракция (явление огибания волной препятствия) и доля энергии, отраженной дефектом, уменьшается. Наличие дифракции ультразвуковых волн обуславливает плохое выявление округлых дефектов небольших размеров (пор).

Углы падения θ ультразвука, при которых исчезают те или иные типы волн в процессе его преломления и отражения, называются критическими. По мере увеличения угла θ , начиная с некоторого значения $\theta_{кр1}$, называемого первым критическим углом, исчезает преломленная продольная волна. При дальнейшем увеличении угла θ наступает момент, когда исчезает и поперечная волна, что соответствует второму критическому углу $\theta_{кр2}$. При углах падения, меньших, чем второй критический угол, и больших, чем первый, во второй среде возникает лишь поперечная волна.

Для системы оргстекло—сталь первые и вторые расчетные критические углы соответственно составляют 27° и 56° . Отмеченное свойство имеет важное практическое значение. В частности, если разместить излучатель на призме из оргстекла и выбрать угол θ в пределах $30 \dots 55^\circ$, то в сварном соединении из стали будет распространяться только поперечная волна, что существенно упростит дешифровку результатов контроля.

Ультразвуковая дефектоскопия основана на свойстве ультразвуковых волн направленно распространяться в средах и отражаться от их границ или нарушений сплошности (дефектов), обладающих другим акустическим сопротивлением. В практике контроля качества сварных соединений используют в основном эхо-импульсный метод (или метод эхо-локации), который заключается в «прозвучивании» сварного соединения короткими импульсами 1 ультразвука и регистрации эхо-сигналов 2 (рис. 3.22, а, б) и 3 (см. рис. 3.22, б), отраженных соответственно от нижней поверхности детали и дефекта к приемнику. Признаком наличия дефекта в сварном соединении служит появление эхо-сигнала 3 на экране дефектоскопа.

В некоторых случаях ультразвуковой контроль целесообразно осуществлять теньвым методом (рис. 3.22, в). При его использова-

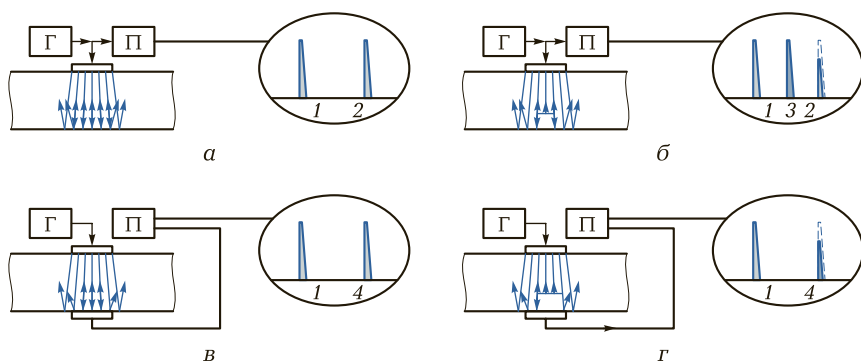


Рис. 3.22. Схемы прохождения коротких ультразвуковых импульсов при эхо-импульсном (а, б) и теновом (в, г) методах контроля сварных соединений:

а, в — при отсутствии дефекта; б, г — при наличии дефекта; 1 — короткий импульс ультразвука; 2, 3 — эхо-сигналы; 4 — сигнал с уменьшенной амплитудой; Г — генератор зондирующих импульсов; П — приемник

нии признаком наличия дефекта служит уменьшение амплитуды сигнала 4 (рис. 3.22, г), прошедшего от излучателя к приемнику. Теневой метод позволяет применять не только импульсное, но и непрерывное излучение.

К основным достоинствам ультразвуковой дефектоскопии относятся высокая чувствительность метода, мобильность аппаратуры, оперативность в получении результатов, низкая стоимость контроля и отсутствие радиационной опасности. Этот метод широко распространен в промышленности для выявления таких дефектов, как трещины, непровары, шлаковые и другие включения в сварных швах толщиной 1...2 800 мм. Например, в химическом, энергетическом машиностроении, судостроении и в других отраслях промышленности ультразвуковая дефектоскопия является основным методом неразрушающего контроля ответственных швов как при их изготовлении, так и в процессе эксплуатации сварных конструкций.

3.3.2. Технология ультразвукового контроля

На практике для оценки размеров и типа выявленного дефекта используются только те его характеристики, которые легко может измерить в любых условиях каждый оператор и выразить в про-

стой числовой форме. Для оценки качества сварных швов обычно определяются следующие характеристики дефектов:

- амплитуда эхо-сигнала, пропорциональная площади проекции отражающей поверхности дефекта на плоскость, перпендикулярную оси ультразвукового пучка;
- условная протяженность, определяемая длиной зоны перемещения преобразователя вдоль шва, в пределах которой фиксируется эхо-сигнал от выявленного дефекта;
- условная высота, равная разности значений глубин залегания дефекта, измеряемых в крайних положениях наклонного преобразователя при перемещении его перпендикулярно оси шва (крайними являются те положения преобразователя, которые соответствуют появлению и исчезновению эхо-сигнала от дефекта на развертке дефектоскопа);
- число дефектов, приходящихся на единицу длины шва;
- координаты дефекта по сечению и длине шва.

Местоположение дефекта в сварном шве определяется следующими тремя координатами: H — глубина залегания дефекта, отсчитываемая по нормали к поверхности; X — расстояние от центра пучка излучателя до дефекта вдоль поверхности сварного соединения; L — расстояние вдоль оси шва от какой-либо выбранной точки отсчета до дефекта.

Глубиномерное устройство дефектоскопа измеряет интервал времени Δt между следованиями зондирующего импульса и эхо-сигнала от дефекта. Так как скорости распространения ультразвуковых колебаний в металле и призме, а также углы ввода ультразвука обычно известны, то по значению Δt можно определить H и X .

В ультразвуковой дефектоскопии амплитуду эхо-сигнала от дефекта измеряют посредством его сравнения с каким-либо опорным сигналом, имеющим известные значение и форму и поступившим в тот же преобразователь от отражателя. Если вид обнаруженного дефекта известен заранее, то наиболее правильно сравнить эхо-сигнал от дефекта с сигналом от искусственного отражателя, форма которого наиболее близка к форме дефекта. Однако чаще всего невозможно достаточно уверенно распознать вид дефекта. Кроме того, его размер должен выражаться через какую-либо стандартизованную величину, воспроизводимую при любых измерениях, поэтому в целях унификации измерения амплитуды эхо-сигнала было введено понятие эквивалентной площади (или эквивалентного диаметра) дефекта.

Эквивалентная площадь дефекта считается равной площади искусственного отражателя (дна плоскодонного отверстия), рас-

положенного на той же глубине, что и дефект, и обеспечивающего получение эхо-сигнала такой же амплитуды. Аналогично определяют эквивалентный диаметр. Общепринято, что при измерении эквивалентного размера дефекта по совмещенной схеме наклонным преобразователем ось плоскодонного отверстия совпадает с акустической осью пучка, а при измерении его раздельно-совмещенным преобразователем (РС-преобразователем) ось отверстия перпендикулярна плоскости дна.

Существуют два способа измерения эквивалентного размера дефектов: с помощью тест-образцов и с помощью специальных акустических диаграмм, полученных экспериментально или на основе расчетов. Первый способ состоит в том, что эхо-сигнал от дефекта последовательно сравнивается с сигналами от плоскодонных отверстий разных размеров, изготовленных в тест-образце на той же глубине, на которой расположен дефект. Тест-образец представляет собой копию контролируемого сварного соединения. Все операции по измерению эквивалентного размера дефекта сводятся к нахождению отверстия, от которого исходит эхо-сигнал, равный эхо-сигналу от дефекта.

К основным достоинствам данного способа относятся его простота и доступность. Его недостаток — необходимость изготовления большого числа образцов с широким набором плоскодонных отражателей, отличающихся друг от друга диаметром и глубиной расположения. Кроме того, качество поверхности и акустические свойства тест-образца должны полностью соответствовать аналогичным характеристикам контролируемого сварного соединения.

Второй способ измерения эквивалентного размера дефекта базируется на использовании специальных акустических диаграмм, связывающих для данного преобразователя между собой амплитуду эхо-сигнала, эквивалентный размер плоскодонного отражателя и расстояние до него. По оси ординат такой диаграммы откладывается относительная амплитуда эхо-сигнала, представляющая собой отрицательную величину, выраженную в децибелах, а по оси абсцисс — глубина залегания дефекта. Выбор угла наклона координатной сетки определяется затуханием ультразвука в сварном соединении. Данная диаграмма обеспечивает хорошо отработанный универсальный способ решения всех практических задач измерения эквивалентных размеров дефектов и настройки чувствительности дефектоскопа. Для удобства практического ее использования разработаны и применяются линейки разной конструкции со шкалами, нанесенными в соответствии с акустическими диаграммами.

В практике ультразвукового контроля распространен также способ оценки дефектов на поверхности сварного соединения посредством измерения их условных размеров. Суть этого способа состоит в том, что при перемещении преобразователя по поверхности детали вдоль дефекта измеряются расстояния между его положениями, в которых при заданном уровне чувствительности дефектоскопа эхо-импульс от дефекта исчезает с экрана.

Схема измерения условной высоты ΔH и условной протяженности ΔL дефекта наклонным преобразователем изображена на рис. 3.23.

Условные размеры превышают действительные размеры дефекта вследствие того, что ультразвуковой пучок имеет значительное расхождение, увеличивающееся с расстоянием от излучателя. Следовательно, значения ΔL и ΔH зависят от расстояния удаления излучателя от дефекта.

Определение условной высоты небольших по сравнению с пьезоэлементом дефектов, связанное со значительными измерительными погрешностями, фактически не дает новой информации о размерах дефекта. Однако условную высоту целесообразно измерять всегда дополнительно к амплитуде, чтобы не пропустить какой-либо крупный плоскостной дефект (трещину) с низкой отражательной способностью.

При контроле сварных соединений преобразователи устанавливают по обе стороны сечения и дополнительно измеряют разницу во времени поступления сигналов, дифрагировавших на концах трещины, в каждый преобразователь. Этот метод позволяет также определить наклон трещины в вертикальной плоскости, но он очень трудоемкий и требует высокой квалификации операторов.

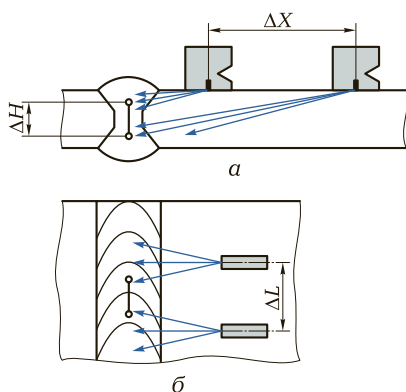


Рис. 3.23. Схемы измерения условной высоты ΔH (а) и условной протяженности ΔL (б) дефекта:

ΔX — расстояние между излучателем и дефектом

Глубину трещин, выходящих на поверхность, оценивают по времени распространения поверхностной волны между излучателем и приемником. При использовании временных методов глубина трещины определяется разницей во времени поступлений сигнала, вызванного поверхностной волной, в каждый РС-преобразователь.

Выполнение контроля при произвольном уровне чувствительности дефектоскопа может привести к регистрации эхо-сигналов от мелких неопасных дефектов и структурных неоднородностей либо к пропуску опасных дефектов, поэтому дефекты следует выявлять при 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 плоскодонное отверстие или другой отражатель. Эквивалентная площадь отражателя регламентируется соответствующим нормативным документом. Выбор типа отражателя осуществляется в соответствии с его отражательными свойствами, технологичностью и воспроизводимостью характеристик при изготовлении.

На практике используются следующие эталонные отражатели: боковой цилиндрический, угловой, сегментный и в виде плоскодонного отверстия, которые относительно легко изготавливаются, имеют простую форму и, что самое главное, эхо-сигналы от этих отражателей пропорциональны их площадям.

По форме дефекты сварных швов подразделяются на две группы: объемные с округлыми краями и плоскостные с острыми краями, которые являются концентраторами значительных напряжений. Плоскостные дефекты существенно более опасны при эксплуатации сварных конструкций, чем объемные, поэтому любой метод дефектоскопии должен обеспечивать распознавание типа дефекта. При ультразвуковом контроле для этого необходимо проанализировать несколько информативных признаков с учетом того, что плоскостные дефекты отражают ультразвук направленно, т. е. преимущественно в каком-либо одном направлении, а объемные — приблизительно равномерно по всем направлениям.

Наиболее достоверные результаты определения типа дефектов получают в случае измерения коэффициента его формы K_{ϕ} . Согласно определению коэффициент

$$K_{\phi} = A_0/A_3,$$

где A_0 , A_3 — амплитуды сигналов, соответственно отраженного от дефекта обратно к преобразователю и дважды зеркально отра-

женного (от дефекта и внутренней поверхности сварного соединения ко второму преобразователю, включенному по схеме «тандем»).

Установлено, что с вероятностью 0,95 у плоскостных дефектов (трещин, непроваров) $K_{\phi} < 1$, а у объемных (пор, включений) $K_{\phi} > 1$. В сварных швах небольшой толщины K_{ϕ} измеряют, располагая преобразователи под углом друг к другу.

Перспективным методом определения типа дефекта является ультразвуковая спектрометрия, основанная на исследовании спектров эхо-сигналов, отраженных от дефектов разных типов при варьировании частоты ультразвуковых колебаний зондирующих импульсов.

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 частотный спектр носит монотонный характер, а у плоскостных — гребенчатый с периодическими максимумами и минимумами.

Способы контроля. Используемая методика ультразвукового контроля должна обеспечивать выявление любых недопустимых дефектов по всему сечению сварного шва и околошовной зоны. Выбор типа преобразователя, параметров и схемы контроля шва определяется особенностями конструкции сварного соединения и базируется на вероятностно-статистических характеристиках распределения дефектов по сечению шва, по типам дефектов и их ориентации относительно оси шва. В свою очередь, эти характеристики определяются типоразмером сварного шва и технологией сварки.

Анализ распределения дефектов, встречающихся в разных зонах сечения шва, позволяет выделить те зоны, которые нуждаются в наиболее тщательном контроле, а также выработать рекомендации по изменению конструкции соединения в целях 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 «прозвучивание» прямым лучом, прямым и однократно отраженным лучом, многократно отраженным лучом, по слоям (все эти способы основаны на совмещенной схеме включения преобразователя в дефектоскоп), а также эхо-зеркальный метод «тандем», зеркально-теневой и теневой методы.

При «прозвучивании» стыковых сварных швов *прямым лучом* (рис. 3.24, а) преобразователь перемещают в околошовной зоне между валиком шва и точкой, удаленной от оси шва на расстояние

$$X_2 = 2\delta \operatorname{tg} \alpha + e/2,$$

где δ , e — соответственно толщина и ширина шва.

Данный способ контроля наиболее помехоустойчив: при его использовании наблюдается минимум ложных эхо-сигналов от каких-либо элементов конструкции в зоне соединения (приварных косынок, штуцеров и др.). Это единственный способ, пригодный для «прозвучивания» швов толщиной 3,5... 10,0 мм, выполненных односторонней сваркой с проплавлением, в которых дефекты находятся в основном в корне шва.

Недостатком этого способа контроля является наличие «мертвой зоны», вызванное тем, что преобразователь упирается в валик шва. Для ее уменьшения верхнюю часть шва целесообразно «прозвучивать» с помощью преобразователей, имеющих большие углы ввода ультразвука.

Контроль *прямым и однократно отраженным лучом* (рис. 3.24, б) осуществляется при перемещении преобразователя в околошовной зоне. Этот способ позволяет выполнять контроль с одной стороны сварного соединения. Преобразователь перемещают до линии, отстоящей от оси шва на расстояние X_2 , определяемое по приведенной ранее формуле.

Контроль *многократно отраженным лучом* (рис. 3.24, в) сопровождается большим числом ложных сигналов от валика шва и является наименее помехоустойчивым. Возможность его применения ограничивается случаями, когда отсутствует доступ непосредственно к шву, например в стыковом соединении, с обеих сторон закрытом приварными накладками.

Контроль *по слоям* (рис. 3.24, г) обеспечивает наибольшую достоверность результатов, но его рекомендуется применять при толщине швов не менее 40 мм. «Прозвучивание» по слоям осуществляется любым из рассмотренных ранее способов, а эхо-сигналы от дефектов, расположенных в разных слоях сварного соединения, фиксируются только на определенном участке развертки.

Эхо-зеркальный метод контроля «тандем» (рис. 3.24, г) заключается в одновременном «прозвучивании» шва двумя преобразователями, расположенными с одной стороны шва друг за другом и синхронно перемещающимися в разные стороны относительно

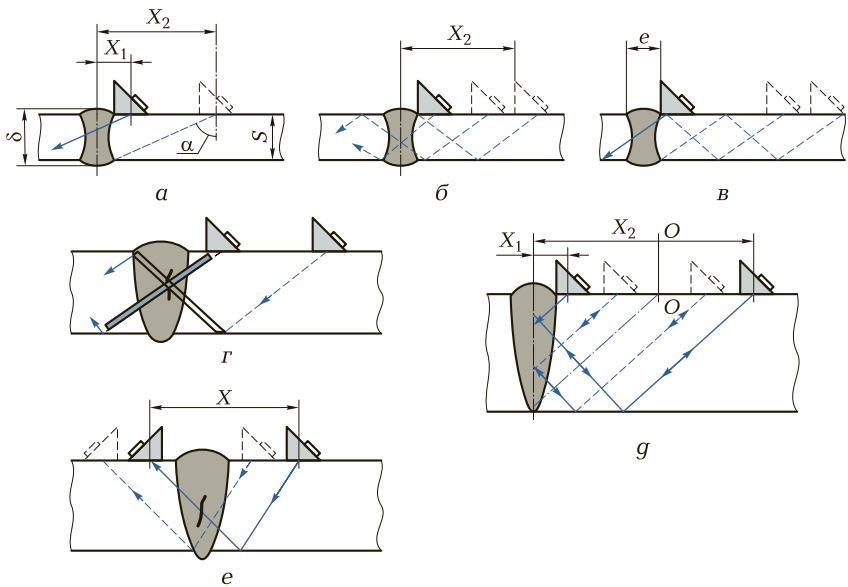


Рис. 3.24. Схемы «прозвучивания» стыковых сварных швов:

a — прямым лучом; *б* — прямым и однократно отраженным лучом; *в* — многократно отраженным лучом; *г* — по слоям; *г* — эхо-зеркальным методом «тандем»; *е* — зеркально-теневым методом; X — расстояние между преобразователями; X_1, X_2 — расстояния от оси шва до осей преобразователей в их крайних положениях; e — ширина шва; S — толщина металла; α — угол между осью излучателя и поверхностью контролируемой детали; δ — толщина шва; $O-O$ — плоскость, разделяющая зоны перемещения преобразователей

плоскости $O-O$. При таком перемещении преобразователей сумма расстояний X_1 и X_2 , а также время поступления в приемник сигналов, зеркально отраженных от дефектов и обратной стороны сварного соединения, постоянные для данной толщины шва. Это облегчает контроль, так как эхо-сигнал от любого дефекта находится на фиксированном участке развертки, где можно установить метку (строб-импульс) и обеспечить звуковую индикацию дефекта.

Преобразователи могут включаться по раздельной или раздельно-совмещенной схеме. В последнем случае дополнительно регистрируются эхо-сигналы, отраженные обратно к каждому преобразователю.

Зеркально-теневой (рис. 3.24, *e*) и *теневой* методы рекомендуются только для выявления относительно грубых дефектов. «Прозвучивание» здесь осуществляется двумя преобразователями, включенными по раздельной схеме. Преобразователи установле-

ны по обе стороны шва навстречу друг другу и закреплены с помощью какого-либо приспособления (расстояние между ними равно X). О наличии дефекта судят по отсутствию сигнала в стробимпульсе. Данный способ перспективен для контроля швов, выполненных сваркой трением и контактной сваркой давлением.

Особенности контроля. Сварные швы контролируются с одной (при толщине основного металла до 50 мм) или с обеих сторон соединения. Контроль выполняется после внешнего осмотра и устранения выявленных при этом недопустимых поверхностных дефектов. Непосредственно перед контролем подготовленную поверхность околошовной зоны тщательно протирают ветошью и покрывают слоем контактного смазочного материала. Наиболее целесообразно использовать для этого минеральные масла (автомобильные, компрессорные масла и др.).

Поиск дефектов в шве производится при несколько завышенной чувствительности дефектоскопа посредством продольно-поперечного перемещения преобразователя 4 по всей контролируемой зоне сначала с одной стороны шва, а затем с другой (рис. 3.25). Шаг продольного перемещения преобразователя должен составлять не более половины диаметра пьезоэлемента. В процессе перемещения наклонный преобразователь необходимо непрерывно поворачивать вокруг его оси на $\pm 15^\circ$ для обнаружения дефектов с разной ориентацией. Контакт преобразователя с поверхностью контролируемого сварного соединения обеспечивается легким нажатием на него рукой.

При появлении эхо-сигналов от дефекта на рабочем участке развертки зону перемещения преобразователя сокращают и производят измерение информативных характеристик: координат, амплитуды эхо-сигнала, условной высоты и протяженности дефекта, коэффициента его формы K_ϕ и числа дефектов на стандартном участке шва.

Нормы оценки качества сварных соединений разных типов составляются с учетом информации, получаемой при ультразвуко-

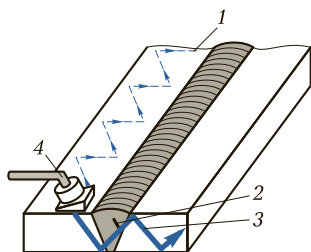


Рис. 3.25. Схема ультразвуковой диагностики сварного шва при наличии в нем трещины:

1 — траектория преобразователя; 2 — трещина; 3 — звуковая волна; 4 — преобразователь

вом контроле, на основе норм Ростехнадзора, требований СНиП и других действующих нормативных документов, определяющих их качество. Ультразвуковой контроль швов при сварке из углеродистых и низколегированных сталей малой толщины (до 15 мм) наиболее эффективен при использовании преобразователей с большими углами призмы ($\beta = 53 \dots 56^\circ$, частота сигнала $f = 5$ МГц).

В МГТУ им. Н. Э. Баумана разработан наклонный РС-преобразователь типа РСМП — с повышенным отношением сигнал/помеха, обеспечивающий уверенное выявление круглых дефектов размером 0,7 мм и более.

При толщине стали 15...30 мм швы, выполненные односторонней сваркой, контролируют прямым и однократно отраженным лучом с использованием одного преобразователя. Наиболее эффективен в этом случае стандартный преобразователь ($\beta = 50^\circ$, $f = 2,5$ МГц). Если возникает ложный эхо-сигнал от провисания шва, то в целях повышения надежности и помехоустойчивости контроль целесообразно производить раздельно в корневой и остальной части шва. При этом верхнюю часть шва предпочтительно контролировать преобразователем с $\beta = 40^\circ$.

Односторонние сварные швы листовых конструкций без подварки корня, как правило, имеют весьма низкое качество. При сварке образуется провисание шва значительных размеров (3...5 мм). Контроль корневой зоны таких швов возможен только после удаления всех неровностей поверхности шлифовальной машинкой.

При толщине стали 30...200 мм швы, выполненные двухсторонней или односторонней с подваркой корня сваркой, контролируют наклонными преобразователями с $\beta = 30$ и 40° на частотах 1,8 и 2,5 МГц. Статистика контроля показывает, что в этих швах распределение дефектов по видам следующее: 65...70 % — шлаковые включения, 10 % — поры и 20...25 % — плоскостные дефекты (из них 5...7 % — трещины).

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

Сварные швы при толщине стали более 200 мм необходимо контролировать на пониженных частотах (1,0...1,25 МГц) и, что особенно важно, после термообработки, если она предусмотрена технологией. Благодаря термообработке измельчается зерно и возрастает степень однородности структуры, что уменьшает затухание ультразвука в шве и околошовной зоне и повышает достовер-

ность контроля. Так, например, при контроле швов после термообработки число выявленных дефектов увеличивается на 20...25%. Контроль до термообработки необязателен.

Весьма специфической задачей ультразвукового контроля сварных соединений является обнаружение поперечных трещин. Такие трещины возникают при грубых нарушениях сварочной технологии в сталях, склонных к трещинообразованию. Поперечные трещины располагаются в литом металле и в зоне термического влияния. Наиболее часто они появляются в корневой зоне швов, выполненных двухсторонней сваркой без подогрева. Поверхность поперечных трещин имеет малую шероховатость, и отражение ультразвука от них носит в основном зеркальный характер, что затрудняет их обнаружение.

Схема «прозвучивания» поперечных трещин одним преобразователем (рис. 3.26, а) самая простая, но и наименее надежная. Применяется она для контроля швов при небольшой (до 20 мм) толщине основного металла.

Значительно более высокая чувствительность контроля достигается при использовании схемы с двумя преобразователями, расположенными под углом к шву (рис. 3.26, б). Такое их размещение способствует регистрации максимального по амплитуде зеркально отраженного сигнала.

Для контроля швов, полученных при сварке металла большой толщины, применяют эхо-зеркальный метод «тандем» с размещением преобразователей на лицевой поверхности по обе стороны шва.

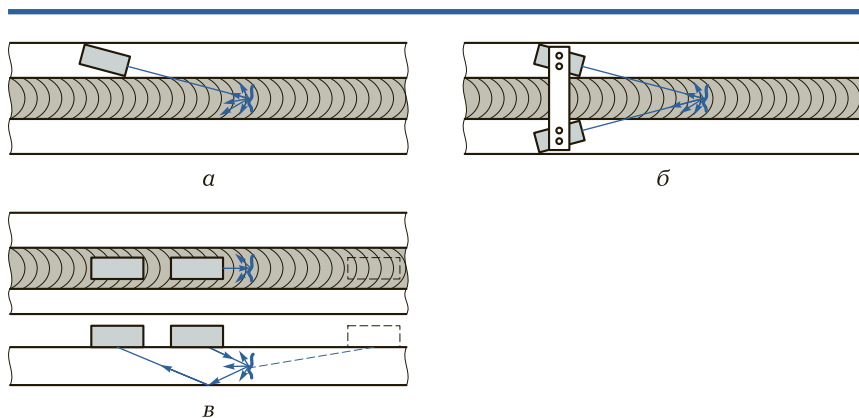


Рис. 3.26. Схемы «прозвучивания» поперечных трещин:

а — одним преобразователем; *б* — двумя преобразователями; *в* — одним или двумя преобразователями при снятом валике лицевой поверхности шва

Приведенные схемы позволяют осуществлять контроль без снятия валика лицевой поверхности шва (что является их преимуществом), но требуют использования специальных приспособлений для крепления преобразователей. Следует отметить, что сравнительная эффективность применения той или иной схемы еще не установлена, поэтому на практике очень часто контроль швов производят одним или двумя преобразователями (рис. 3.26, в), размещенными в одной плоскости, после снятия валика.

Ультразвук широко используется для контроля стыковых швов различных конструкций. Способ «прозвучивания» выбирают в соответствии с конфигурацией конструкции. Так, швы звеньев корабельных цепей контролируют по схеме «тандем» при размещении преобразователей с одной стороны шва симметрично оси звена. Стержни арматуры железобетонных конструкций имеют периодический профиль, что существенно усложняет контроль швов арматуры эхо-импульсным методом, так как в этом случае резко ухудшается акустический контакт и повышается уровень ложных сигналов, поэтому швы арматуры контролируют теневым методом. О наличии и размерах дефекта судят по уменьшению амплитуды отраженного от него эхо-сигнала: степень ослабления амплитуды эхо-сигнала пропорциональна площади дефекта.

Наиболее эффективный контроль обеспечивается при вводе ультразвуковых колебаний через основной металл, что позволяет выявить все виды дефектов швов при минимальном уровне ложных сигналов.

Ложные сигналы возникают при отражении ультразвука от грубых неровностей валика шва, а в случае угловых соединений — от угла элемента конструкции. Ложные сигналы отличают от сигналов дефекта, разделяя их по времени поступления в преобразователь.

Для выявления непроваров в угловых и тавровых соединениях при наличии свободного доступа к ним со стороны вертикального листа применяют прямые или раздельно-совмещенные преобразователи. Иногда для контроля тавровых соединений используют двоянные наклонные преобразователи.

Примером применения РС-преобразователей для выявления дефектов в тавровом соединении служит схема контроля шва (между стержнем и пластиной) закладной детали, приведенная на рис. 3.27. Подобные детали широко применяются в строительстве.

В МГТУ им. Н.Э.Баумана разработана методика контроля закладных деталей. В этой методике, внедренной в производство на

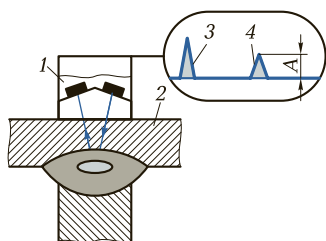


Рис. 3.27. Схема контроля шва закладной детали:

1 — устройство для фиксации РС-преобразователей; 2 — закладная деталь; 3 — падающий сигнал; 4 — сигнал, отраженный от дефекта; А — амплитуда отраженного сигнала

заводах железобетонных конструкций, контроль основан на использовании специального устройства для фиксации РС-преобразователей на детали.

Контроль нахлесточных соединений осуществляется зеркально-теневым методом. В этом случае при отсутствии дефекта ультразвук беспрепятственно проходит от излучателя к приемнику, и на экране электронно-лучевой трубки (ЭЛТ) появляется сигнал. Если в соединении имеется дефект, то этот сигнал резко ослабляется или исчезает совсем. Для выполнения такого контроля необходимы специальные приспособления, закрепляющие преобразователи на определенном расстоянии друг от друга, зависящем от толщины соединенных деталей.

Ультразвуковые методы получают все более широкое распространение при контроле швов, выполненных контактной сваркой. Однако основные дефекты этих швов — оксидные пленки — выявляются ультразвуком плохо, поскольку имеют весьма малую ширину раскрытия (0,5...3,0 мкм) и гладкую поверхность, т.е. ультразвук от них практически не отражается. В случаях когда оксидным пленкам сопутствуют включения или непровары, имеющие большую ширину раскрытия, основные дефекты швов, выполняемых контактной сваркой, ультразвуком обнаруживаются.

В контактных стыках рельсов эти дефекты швов надежно выявляются эхо-импульсным методом с одним преобразователем.

Наилучшие результаты контроля контактных стыков труб котлоагрегатов тепловых электростанций обеспечиваются при использовании эхо-зеркального метода.

Качество сварных точек контролируется зеркально-теневым методом. Признаком непровара между листами (детальями) в этом случае служит поступление донного сигнала от первого листа в приемный преобразователь. Размеры сварной точки можно определить, измерив расстояние между границами перемещения преобразователя по поверхности листа.

Недостатком зеркально-теневого метода контроля является невозможность выявления окисленного непровара, который почти полностью пропускает ультразвук в нижний лист. Этот недостаток устраняется при выполнении контроля эхо-импульсным методом по совмещенной схеме непосредственно в процессе сварки. Вследствие различия акустических сопротивлений жидкого и твердого металлов ультразвук при образовании расплавленного ядра между листами отражается от него. По промежутку времени от момента появления эхо-сигнала, свидетельствующего о начале формирования ядра, до выключения сварочного тока можно оценить размеры ядра.

Недостатками эхо-импульсного метода контроля являются его довольно сложная аппаратурная реализация и наличие проблем при создании ультразвукового контакта вблизи сварочного электрода.

Наиболее перспективен теневой метод «прозвучивания» сварных соединений, при котором излучающий и приемный преобразователи встраиваются в электроды сварочной машины. При сжатии сварочных листов электродами излучаются непрерывные ультразвуковые колебания. В процессе расплавления металла ультразвук сильно поглощается в нем и амплитуда прошедшего сигнала уменьшается, а после застывания металла амплитуда сигнала возрастает. По перепаду амплитуд сигнала судят о качестве сплавления листов. При таком контроле наиболее эффективно применение поперечных волн, так как они не проходят через жидкий металл, и в этом случае перепад амплитуд, определяющий точность метода, наибольший.

До сих пор рассматривались методы контроля сварных швов в соединениях из углеродистых и низколегированных сталей. Однако с каждым годом в производстве расширяется использование алюминиевых и медных сплавов, высоколегированных сталей и других конструкционных материалов, ультразвуковой контроль которых имеет свои особенности.

Для алюминиевых сплавов характерно слабое затухание ультразвука, что позволяет контролировать их обычными методами.

Контроль соединений из высоколегированных сталей и медных сплавов весьма затруднен, поскольку сварные швы этих металлов отличаются крупнозернистой упругоанизотропной структурой, в которой ультразвуковой сигнал значительно ослабляется и создает ложные сигналы отражения от границ зерен. При контроле таких швов приходится в 2—3 раза снижать частоту ультразвуковых колебаний, что ограничивает возможность выявления малых дефек-

тов. Однако в ряде случаев и эта мера не обеспечивает положительных результатов, и ультразвуковой контроль обычным дефектоскопом осуществить невозможно. В настоящее время разрабатываются специальные дефектоскопы для контроля крупнозернистых материалов. Выполняемый с их помощью контроль будет основан на статистическом анализе полезных сигналов от дефекта и ложных — от структуры.

Дефектоскопия соединений трубопроводов. Рассмотрим ультразвуковой контроль сварных стыков трубопроводов с толщиной стенки более 8 мм. Такой контроль осуществляется в результате плавкого возвратно-поступательного движения призматического искателя по поверхности трубы, прилегающей к сварному шву. При «прозвучивании» соединения необходимо все время следить за тем, чтобы искатель был направлен перпендикулярно шву. Смещение искателя по окружности трубы допускается не более 2...4 мм. Размер зоны перемещения искателя вдоль трубы, которая должна обеспечивать контроль всего сечения шва, выбирается в зависимости от толщины стенок трубы и формы разделки шва. Сварной кольцевой шов трубопровода контролируется последовательно с двух сторон по ходу и против хода рабочей среды, а швы на стыке трубы с литой арматурой — только со стороны трубы. Стыки между литыми деталями подвергаются ультразвуковому контролю на наличие поперечных трещин.

Нижняя часть сварного шва трубопровода контролируется прямым лучом или, если это невозможно, двукратно отраженным лучом, а верхняя часть шва «прозвучивается» однократно отраженным лучом. Трубопроводы с толщиной стенки до 40 мм контролируются за один прием, т.е. верхняя и нижняя части шва проверяются за одно движение искателя, а трубопроводы с толщиной стенки более 40 мм — в два приема: сначала проверяется корневая часть шва прямым лучом, а затем верхняя часть шва — однократно отраженным лучом.

При ультразвуковом контроле сварных швов трубопроводов необходимо учитывать особенности формирования их корневого слоя и обратного валика. При сварке в нижнем положении металл обратного валика шва провисает внутрь трубы, а при сварке в потолочном положении металл проседает.

Обнаружение поперечных трещин производится перемещением искателя вдоль шва непосредственно по поверхности наплавленного металла. Усиление шва в этом случае необходимо полностью снимать абразивным кругом заподлицо с основным металлом. Для контроля используются призматические искатели с углом

наклона призмы 50° — при толщине стенок труб 8... 15 мм и с углом наклона 40° — при толщине стенок более 15 мм. Рабочая поверхность искателя притирается на наждачной бумаге, наложенной на контролируемую трубу. В процессе притирки перемещение искателя должно производиться параллельно оси трубы.

Ультразвуковой контроль сварных соединений трубопроводов диаметром 25... 100 мм с толщиной стенки 3... 8 мм производится на рабочей частоте 5 МГц специальными искателями, обеспечивающими возможность контроля корневой части шва прямым лучом. Рабочая поверхность искателя должна иметь радиус скругления, равный радиусу контролируемой трубы. Такие искатели должны иметь угол наклона призмы $53... 55^\circ$, а при толщине стенки трубопровода 3... 4 мм — только 55° .

Ошибки в оценке качества соединения в этом случае могут возникать по нескольким причинам. Это, прежде всего, смещение кромок (шов ошибочно бракуется), которое определяется по появлению сигнала с одной стороны шва (рис. 3.28, искатель в положении 3) при условии, что с другой его стороны в диаметрально противоположной точке (искатель в положении 2) также будет появляться сигнал. При этом в положениях 1 и 4 сигналы отсутствуют.

Наличие забоин, клейм, задиров вблизи сварного шва может привести к появлению ложных сигналов или пропуску дефектов в результате нарушения ультразвукового контакта.

Из-за ошибок, связанных с характером и отражающей способностью поверхностей дефектов, может быть пропущен непровар пологой формы.

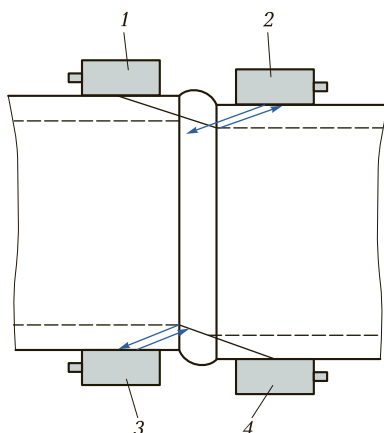


Рис. 3.28. Схема определения смещения кромок стыкуемых труб:
1... 4 — положения искателей

Качество сварных швов трубопроводов с толщиной стенки 3...8 мм оценивается по амплитуде отраженного сигнала и пробегу отраженного сигнала по линии условной развертки (по условной высоте дефекта).

Сварной шов бракуется в следующих случаях:

- если амплитуда эхо-сигнала от дефекта равна или больше амплитуды эхо-сигнала, отраженного от соответствующей зарубки на эталонном образце (при толщине стенки труб до 5 мм используется зарубка с площадью вертикальной грани $1,6 \text{ мм}^2$, а при большей толщине — с площадью 2 мм^2);
- если импульс эхо-сигнала от дефекта равен или больше импульса от соответствующей зарубки на эталонном образце.

Сварные швы трубопроводов считаются годными при отсутствии дефектов и значениях амплитуды эхо-сигнала и условной высоты менее указанных ранее.

Сварные стыки трубопроводов с толщиной стенки больше 8 мм бракуются в следующих случаях:

- если в них обнаруживают любые дефекты, расположенные в сечении шва, амплитуда эхо-сигнала которых равна или больше амплитуды эхо-сигнала от эталонного отражателя, соответствующего чувствительности оценки;
- если дефекты, дающие эхо-сигнал, пробег которого по экрану дефектоскопа больше или равен пробегу эхо-сигнала от зарубки, соответствующей чувствительности оценки при толщине стенки до 20 мм;
- если дефекты имеют высоту 3 мм и более, что соответствует условной высоте, измеряемой по шкале продольных волн глубиномера, 10 мм при толщине стенки трубы более 20 мм;
- при наличии протяженных дефектов в корне шва, условная длина которых превышает 30 мм — для технологических трубопроводов и 10 % от периметра шва — для других трубопроводов;
- если общая условная протяженность дефектов в корне шва превышает 20 % от его периметра;
- если в шве имеются дефекты с признаками трещин.

Оценка качества при контроле корневой части шва производится по сопоставлению амплитуды эхо-сигнала и времени пробега сигнала на экране дефектоскопа с амплитудой эхо-сигнала и временем пробега сигнала от искусственного дефекта в виде канавки высотой 15 % от толщины стенки, но не более 2 мм. Дефект считается недопустимым, если время пробега сигнала или его амплитуда превышает время пробега или амплитуду сигнала от контрольного отражателя.

Контроль угловых соединений. При контроле угловых швов тавровых и крестовых соединений ультразвуковой луч вводят в шов через основной металл стенки, так как в этом случае выявляются все дефекты (рис. 3.29). При отсутствии доступа к стенке или небольших ее размерах, не обеспечивающих необходимые пределы перемещения искателей, для выявления непровара в корне шва можно проводить контроль с наружной поверхности полки. При этом угол ввода ультразвуковых волн должен обеспечивать направление луча, приблизительно перпендикулярное сечению, в котором площадь дефекта ожидается максимальной.

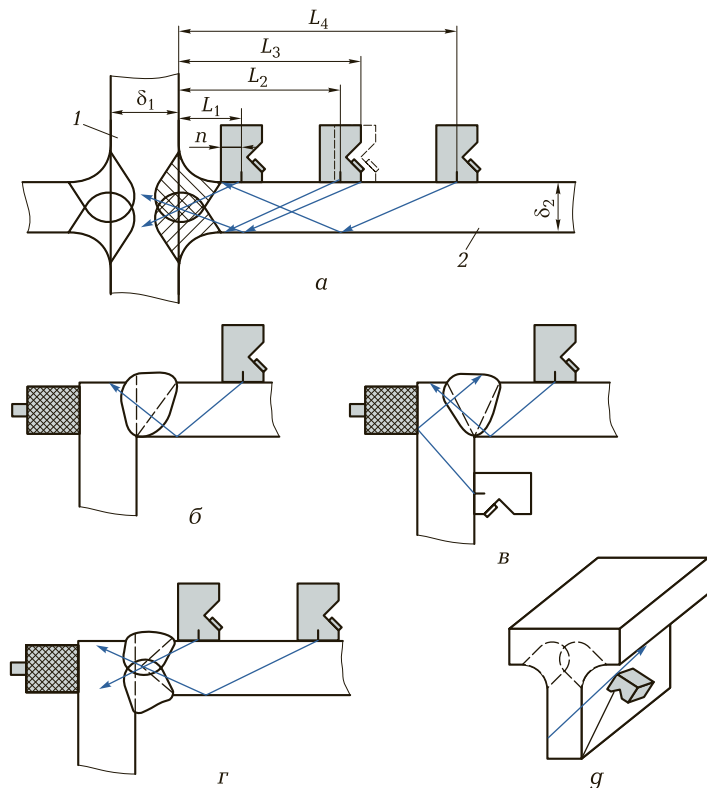


Рис. 3.29. Схемы «прозвучивания» угловых швов соединений различных типов:

a — крестового с К-образной разделкой кромок; *б* — углового со скосом одной кромки; *в* — углового со скосом двух кромок; *г* — углового с двумя скосами одной кромки; *г* — таврового при выявлении поперечных трещин; 1 — полка; 2 — стенка; δ_1 , δ_2 — толщины металла; $L_1 \dots L_4$ — расстояния от полки до центра искателя; n — половина ширины искателя

Контроль угловых швов таврового соединения с К-образной разделкой, в которых требуется полный провар корня шва, начинают с поиска непровара в корне шва прямым или однократно отраженным лучом. При отсутствии непровара в корне шва проверяют остальные его части: нижнюю часть — прямым лучом, а верхнюю — однократно отраженным.

Тавровые соединения с К-образной разделкой при наличии технологического непровара корня шва шириной до 4 мм контролируют с внешней стороны полки безэталонным способом. После определения ширины технологического непровара производится контроль всего сечения шва наклонными искателями за два прохода прямым и однократно или двукратно отраженным лучами.

Угловые швы таврового соединения с У-образной разделкой и подваркой корня шва и при отсутствии подварки (в этом случае допустимая высота непровара не должна превышать 3 мм) «прозвучивают» с плоскости приваренного листа.

Контроль нахлесточных соединений. Швы сварных соединений внахлестку «прозвучивают» со стороны основного листа однократно отраженным лучом и искателем, включенным по совмещенной схеме (рис. 3.30, а, б). При этом обеспечивается выявление

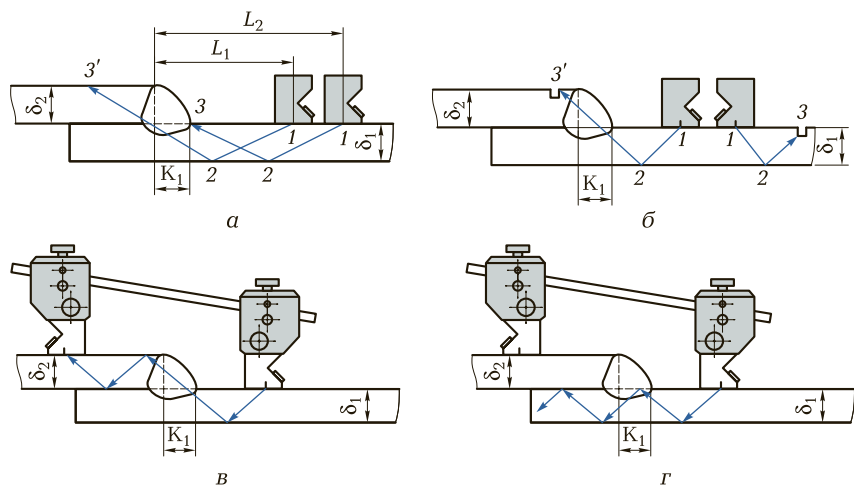


Рис. 3.30. Схемы контроля нахлесточных соединений однократно отраженным лучом по совмещенной схеме (а, б) и теньвым методом с включением двух искателей по раздельной схеме (в, г):

1...3 — точки преломления ультразвукового луча; δ_1, δ_2 — толщины металла; L_1, L_2 — расстояния от центра искателя до кромки верхнего листа; K_1 — катет шва

ние трещин, непроваров вертикальной кромки и корня шва, а также одиночных включений и их скоплений. При выполнении контроля искателем, включенным по совмещенной схеме, обнаружение непроваров горизонтальной кромки не гарантируется. Объясняется это тем, что ультразвуковой луч, попадая на горизонтальный плоский дефект, отражается под тем же углом и не возвращается на искатель.

Горизонтальные непровары выявляются зеркально-теневым методом при включении искателей по раздельной схеме (рис. 3.30, *в, г*). Уровень прошедшего сигнала в этом случае устанавливается по тест-образцу без дефектов. Чтобы обеспечить «прозвучивание» всего сечения наплавленного металла, необходимо перемещать искатели примерно на длину, соответствующую размеру горизонтального катета шва.

3.3.3. Аппаратура для ультразвукового контроля

Аппаратура, предназначенная для ультразвукового контроля, включает в себя преобразователь с пьезоэлементом, излучающим и принимающим ультразвуковые колебания, электронный блок (собственно дефектоскоп) и различные вспомогательные устройства.

Преобразователи. Различают три основных типа ультразвуковых преобразователей:

- прямые (рис. 3.31, *а*) — излучающие в сварное соединение продольные волны перпендикулярно контактной поверхности (поверхности ввода ультразвуковых колебаний);
- наклонные, или призматические (рис. 3.31, *б*), — излучающие в металл поперечные волны под углом к поверхности ввода;
- раздельно-совмещенные (рис. 3.31, *в*) — обеспечивающие поступление в металл продольных волн под углом $80...85^\circ$ к поверхности ввода.

Основным элементом этих преобразователей является пьезоэлемент в виде диска или прямоугольной пластины толщиной, равной половине длины волны излучаемых ультразвуковых колебаний.

С рабочей стороны прямых преобразователей на пьезопластине 4 имеется защитное доньшко (протектор) 5, предохраняющее ее от механических повреждений. С противоположной стороны к пьезопластине приклеен демпфер 2 из материала, хорошо поглощающего ультразвук. Демпфер снижает длительность колебания

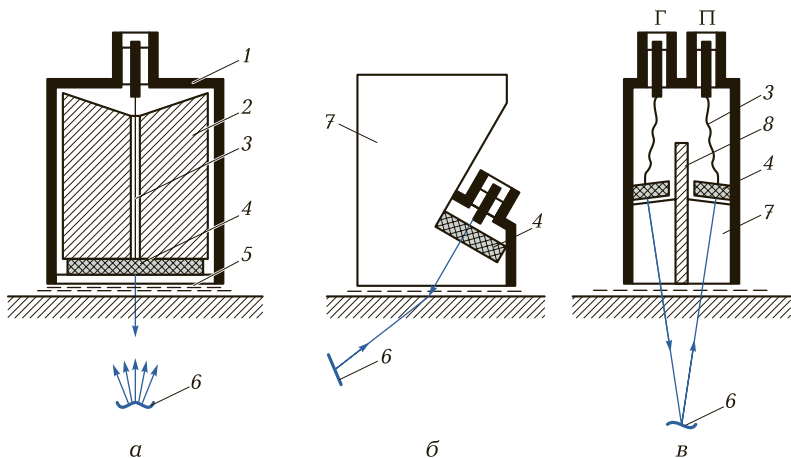


Рис. 3.31. Ультразвуковые преобразователи разных типов:

a — прямой; *б* — наклонный призматический; *в* — раздельно-совмещенный; 1 — корпус; 2 — демпфер; 3 — токоподвод; 4 — пьезопластина; 5 — защитное доннышко; 6 — дефект; 7 — призма; 8 — акустический экран; Г — генератор зондирующих импульсов; П — приемник

пьезопластины, т.е. способствует получению коротких зондирующих импульсов. Прямой преобразователь размещен в стальном корпусе 1.

В наклонных и раздельно-совмещенных преобразователях пьезопластина приклеена к призме 7 из оргстекла, полистирола или других материалов, в которых ультразвук распространяется с небольшой скоростью, что позволяет при относительно малых углах падения поперечных волн вводить их в контролируемый металл под большими углами (до 90°). Сильное затухание ультразвука в призме обеспечивает быстрое гашение ультразвуковых колебаний, отраженных от границы контролируемого металла.

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

В раздельно-совмещенных преобразователях одна пьезопластина подключена к генератору электрических колебаний и служит излучателем ультразвуковых колебаний, а другая — к приемнику. Между ними установлен акустический экран 8.

В зависимости от толщины слоя контактной жидкости между защитным доннышком и сварным соединением различают преобразователи:

- контактные — с толщиной слоя жидкости, существенно меньшей длины волны ультразвука;
- щелевые — с толщиной слоя жидкости, соизмеримой с длиной волны ультразвука;
- иммерсионные — с контактным слоем значительной толщины.

Выбор типа преобразователя по способу создания акустического контакта зависит от качества поверхности контролируемого сварного соединения. Например, для контроля соединений с грубой поверхностью (допустим, после пескоструйной обработки) целесообразно использовать щелевой преобразователь.

Эффективно также применение преобразователей с протектором, выполненным из эластичного материала, например полиуретана, или в виде гидравлической подушки с резиновой оболочкой (иммерсионной лекальной ванны), обеспечивающей надежный акустический контакт.

Электронный блок. Дефектоскоп — это электронный блок, предназначенный для генерирования зондирующих импульсов высокочастотного напряжения, усиления и преобразования эхосигналов, отраженных от дефекта, а также для наглядного отображения амплитудно-временных характеристик эхосигналов на экране электронно-лучевой трубки (ЭЛТ).

Для контроля сварных швов применяют отечественные дефектоскопы марок УД-11ПУ, УД-10П и др. Принцип действия дефектоскопа УД-11ПУ состоит в следующем. От синхронизатора тактовые импульсы поступают на генератор зондирующих импульсов и запускают его. При поступлении запускающего импульса в контуре, состоящем из катушки индуктивности, пьезопластины, разрядного и накопительного конденсаторов, возникают кратковременные свободные колебания радиодиапазона — зондирующие импульсы, которые возбуждают в пьезопластине ультразвуковые колебания соответствующей частоты. Одновременно тактовые импульсы с синхронизатора подаются и на генератор развертки ЭЛТ. При «прозвучивании» металла разной толщины (например, стали толщиной до 5 000 мм) скорость развертки может регулироваться.

Отраженные от дефекта импульсы упругих колебаний попадают на пьезопластину и преобразуются в ней в электрические сигналы, которые затем усиливаются в усилителе, и подаются на экран ЭЛТ.

Горизонтальная развертка ЭЛТ является временной. Расстояние по развертке от зондирующего импульса до принятого сигнала пропорционально времени прохождения импульса от пьезопла-

стины до дефекта и обратно. Таким образом, зная скорость ультразвука и направление распространения потока излучения, можно определить координаты дефекта или толщину сварного соединения измерением этого времени с помощью подвижной метки (строб-импульса) глубиномера. При этом погрешность измерения координат не превышает 2 мм.

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

Вспомогательные устройства. В дефектоскопе предусмотрен переключатель, с помощью которого усилитель можно подключать непосредственно к генератору радиоимпульсов (при работе по совмещенной схеме, когда преобразователь выполняет функции излучателя и приемника ультразвуковых колебаний) или отключать от него (раздельная схема).

В дефектоскопе имеется также автоматический сигнализатор, предназначенный для звуковой или световой индикации дефектов. Сигнализатор срабатывает, если сигнал попадает в область метки (строб-импульса). В зависимости от задач выполняемого контроля ширину строб-импульса можно регулировать в определенных пределах, не превышающих ширину шва.

Некоторые дефектоскопы содержат дополнительные блоки, существенно упрощающие работу оператора и расширяющие возможности ультразвукового контроля. Например, блок временной регулировки чувствительности (ВРЧ) обеспечивает получение одинаковой амплитуды эхо-сигналов от дефектов одинакового размера, залегающих на разной глубине. С помощью ВРЧ можно существенно повысить достоверность обнаружения дефектов и точность их измерения.

Применяющиеся в настоящее время микропроцессорные дефектоскопы позволяют производить обработку нескольких параметров отраженного сигнала, что повышает информативность контроля.

К вспомогательным приспособлениям дефектоскопов относятся координатные линейки и шаблоны, упрощающие нахождение координат дефектов при любой форме поверхностей сварного соединения, планшеты (АРД-диаграммы) для определения размеров дефекта по амплитуде эхо-сигнала, ограничители перемещения преобразователей, необходимые при контроле угловых сварных швов, и др.

3.4. МАГНИТНАЯ ДЕФЕКТОСКОПИЯ

3.4.1. Физические основы магнитной дефектоскопии

Магнитные методы контроля основаны на обнаружении магнитных потоков рассеяния, возникающих при наличии дефектов в намагниченных сварных соединениях из ферромагнитных материалов. Магнитный поток Φ , проходящий через поверхность, расположенную перпендикулярно силовым линиям однородного магнитного поля, равен произведению магнитной индукции B на площадь этой поверхности.

Способность металла намагничиваться характеризуют абсолютной магнитной проницаемостью. Отношение абсолютной магнитной проницаемости материала к магнитной постоянной называется относительной магнитной проницаемостью и обозначается μ . Эта безразмерная величина показывает, во сколько раз напряженность результирующего поля в намагниченной среде больше напряженности поля, создаваемого током той же силы в вакууме.

В зависимости от значения μ все металлы подразделяются на три группы:

- диамагнитные (медь, цинк, серебро и др.), у которых μ на несколько миллионных или тысячных долей меньше единицы;
- парамагнитные (марганец, платина, алюминий и др.), у которых μ на несколько миллионных или тысячных долей больше единицы;
- ферромагнитные (железо, никель, кобальт и гадолиний, а также некоторые сплавы металлов), у которых μ достигает десятков тысяч.

Магнитные методы контроля могут использоваться только для деталей, выполненных из ферромагнитных материалов. Ферромагнитные свойства металлов обусловлены наличием внутренних молекулярных токов, создаваемых в основном за счет вращения электронов вокруг собственной оси. В пределах малых объемов ($10^{-8} \dots 10^{-3} \text{ см}^3$) элементарных областей (так называемых доменов), магнитные поля молекулярных токов образуют результирующее поле домена.

Если внешнее магнитное поле отсутствует, то магнитные поля доменов, направленные произвольно, компенсируют друг друга. Суммарное поле доменов в этом случае равно нулю, и деталь оказывается размагниченной (рис. 3.32, а). Если на металл действует

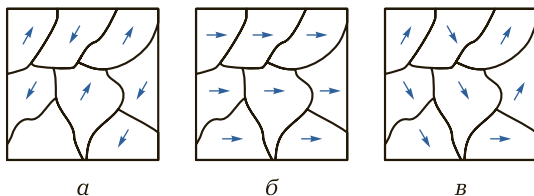


Рис. 3.32. Ориентация доменов в ферромагнитных материалах:

а — размагниченном; *б* — намагниченном до индукции насыщения; *в* — с остаточной намагниченностью

внешнее магнитное поле, то под его влиянием поля отдельных доменов устанавливаются по направлению внешнего поля одновременно с изменением границ между доменами. В результате образуется общее магнитное поле доменов, и металл оказывается намагниченным (рис. 3.32, б). При намагничивании магнитное поле доменов в контролируемом металле накладывается на внешнее магнитное поле.

Магнитный поток, распространяясь по сварному соединению и встречая на своем пути дефект, огибает его, так как магнитная проницаемость дефекта значительно (примерно в 1 000 раз) ниже магнитной проницаемости основного металла. Вследствие этого часть силовых линий магнитного поля вытесняется дефектом на поверхность, и образуется местный магнитный поток рассеяния (рис. 3.33). Дефекты, которые вызывают возмущение в распределении силовых линий магнитного поля без образования местного потока рассеяния, невозможно обнаружить методами магнитной дефектоскопии.

Возмущение магнитного потока тем сильнее, чем большее препятствие представляет собой дефект. Так если дефект расположен вдоль направления силовых линий, то возмущение магнитного потока невелико, в то время как аналогичный дефект, расположен-

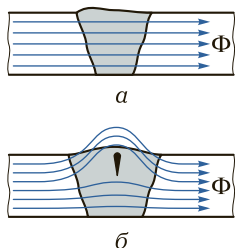


Рис. 3.33. Распределение магнитного потока Φ по сечениям сварных швов без дефектов (*а*) и с дефектом (*б*)

ный перпендикулярно или наклонно по отношению к направлению магнитного потока, создает значительный поток рассеяния.

В зависимости от способа регистрации магнитного потока рассеяния различают следующие магнитные методы контроля: магнитопорошковый, магнитографический, феррозондовый и магнитоуполупроводниковый. Для дефектоскопии сварных швов применяются в основном первые три метода, в которых магнитные потоки рассеяния выявляются соответственно с помощью магнитного порошка, регистрируются на магнитную пленку и обнаруживаются феррозондовым преобразователем.

3.4.2. Магнитопорошковый метод

Магнитопорошковый метод контроля заключается в том, что на поверхность намагниченного сварного соединения наносят ферромагнитный порошок в виде суспензии, содержащей также керосин, масло и мыльный раствор («мокрый» метод), или в виде аэрозоля («сухой» метод). Под действием втягивающей силы магнитных полей рассеяния частицы порошка перемещаются по поверхности соединения и скапливаются в виде валиков над дефектами. Форма этих скоплений соответствует очертаниям выявляемых дефектов.

Методика контроля. Магнитопорошковый метод контроля включает в себя следующие операции (ГОСТ 21105—85):

- 1) подготовка поверхностей к контролю;
- 2) подготовка суспензии, заключающаяся в интенсивном перемешивании магнитного порошка с транспортирующей жидкостью;
- 3) намагничивание контролируемого сварного соединения;
- 4) нанесение порошка на поверхность контролируемого соединения;
- 5) осмотр поверхности контролируемого соединения и выявление участков, покрытых порошком;
- 6) размагничивание соединения.

Данный метод характеризуется высокой чувствительностью к тонким и мелким трещинам, простотой выполнения, оперативностью и наглядностью результатов. Его широко используют для контроля продольных сварных швов конструкций, выполненных из магнитных материалов, и в частности для выявления трещин и узких (стянутых) непроваров в стыковых швах трубопроводов, полученных дуговыми способами. Для повышения чувствительности контроля часть сварного шва, выступающего над лицевой поверхностью соединения, перед испытанием целесообразно удалить.

Чувствительность метода. Чувствительность данного метода зависит от ряда факторов: размера частиц ферромагнитного порошка и способа его нанесения («сухой» или «мокрый»), напряженности приложенного намагничивающего поля, рода тока (переменный или постоянный), формы, размеров и глубины залегания дефектов, их ориентации относительно поверхности сварного соединения и направления намагничивания, состояния и формы поверхности, а также от способа намагничивания.

Ферромагнитный порошок должен иметь частицы размером 5...10 мкм. Для выявления глубоких дефектов применяют более крупный магнитный порошок. Для приготовления магнитных суспензий используют магнитный порошок с мелкими частицами. Кроме того, для достижения максимальной подвижности частицы магнитного порошка должны иметь правильную форму. Дополнительную подвижность частицы приобретают при наличии на них пигментного покрытия с низким коэффициентом трения.

Род тока намагничивания и способ нанесения ферромагнитного порошка, существенно не влияют на обнаружение поверхностных дефектов, но при этом они заметно сказываются на диагностике подповерхностных дефектов. Преимущество использования в этом методе постоянного тока обусловлено тем, что он создает магнитное поле, глубоко проникающее в металл. Однако сварные соединения из металла толщиной 20 мм не следует намагничивать постоянным током, так как их невозможно размагнитить после контроля.

При использовании для намагничивания переменного тока под влиянием скин-эффекта возрастают плотности тока и магнитного потока у поверхности сварного соединения, что способствует лучшему выявлению только поверхностных дефектов.

Преимущество использования «сухого» способа нанесения для обнаружения подповерхностных дефектов объясняется тем, что для перемещения ферромагнитной частицы в вязкой суспензии требуется большая сила воздействия магнитного потока, чем для перемещения той же частицы в воздухе.

С увеличением напряженности приложенного намагничивающего поля (до достижения индукции насыщения) возрастает чувствительность данного метода контроля.

При контроле магнитными методами наиболее уверенно выявляются плоскостные дефекты (трещины, непровары и несплавления), ориентированные под углом 20...90° к направлению магнитного потока. Дефекты округлой формы (поры, шлаковые включения и раковины) не могут создать достаточного потока рассеяния

и, как правило, при магнитном контроле обнаруживаются плохо. Практикой установлено, что магнитопорошковым методом выявляются поверхностные и подповерхностные (на глубине не более 2 мм) трещины шириной более 1 мкм, глубиной более 50 мкм и длиной не менее 0,5 мм.

Возможно также обнаружение относительно крупных дефектов (непроваров, пор, шлаковых включений и др.) с площадью сечения более 2 мм², находящихся на глубине 5...6 мм от поверхности шва. С увеличением глубины залегания дефектов уменьшается скорость образования скоплений магнитного порошка, что затрудняет их обнаружение и определение типа.

Чувствительность контроля в значительной мере зависит от качества поверхности, на которую наносится суспензия или порошок. Оптимальная шероховатость поверхности сварных соединений, подвергаемых магнитопорошковому контролю, соответствует параметру Ra 2,5...1,25 мкм. На такой поверхности обеспечивается наивысшая чувствительность метода. Увеличение шероховатости поверхности приводит к снижению чувствительности контроля. Так если после обработки поверхность контролируемого соединения приобретает шероховатость Ra 3,2...2,5 мкм, то контроль в тех режимах, которые обеспечивают выявление тонких дефектов (толщиной 1 мкм), затрудняется вследствие появления фона от магнитного порошка, что требует уменьшения напряженности намагничивающего поля, а следовательно, снижает чувствительность контроля.

Шлифованные поверхности (с шероховатостью Ra 0,32 мкм и более) из-за наличия на них бликов трудно осматривать и разбраковывать, особенно при прямом освещении лампами накаливания. Контрольный осмотр шлифованных поверхностей желательно производить в рассеянном свете или после покрытия их очень тонким (толщиной не более 15 мкм) снимающим блеск слоем краски, например нитрозмалью НЦ-25.

Если на поверхности контролируемого сварного соединения имеются резкие переходы (например, подрезы) или микронеровности, то ферромагнитный порошок скапливается не над дефектами, а на участках, содержащих такие переходы и углубления. Следовательно, в этом случае нельзя однозначно судить о наличии внутренних дефектов.

Способы намагничивания. Магнитный контроль производится либо в приложенном магнитном поле, либо при остаточной намагниченности. Первый способ применяют для обнаружения подповерхностных дефектов, расположенных на глубине более

10 мкм, а также когда сварное соединение выполнено из магнитомягкого материала (например, из стали) или имеет сложную форму и мощность дефектоскопа не позволяет намагнитить все это соединение вследствие его больших размеров. При этом контроль в приложенном магнитном поле не всегда обладает более высокой чувствительностью, чем контроль при остаточной намагниченности.

Если контроль осуществляют при остаточной намагниченности, то соединение предварительно намагничивают, а после снятия магнитного поля на его поверхность наносят ферромагнитную суспензию или порошок. Поскольку такой контроль возможен только при довольно большой остаточной намагниченности, его используют для проверки соединений из магнитотвердых материалов с коэрцитивной силой $H_c > 800$ А/м. Соединение, выполненное из материала с $H_c < 800$ А/м, проверять при остаточной намагниченности нельзя, так как над дефектом образуется слабое магнитное поле. Этот способ обладает следующими преимуществами: позволяет устанавливать соединение в любое требуемое положение для обеспечения хорошего освещения поверхности и возможности ее осмотра невооруженным глазом, а также для уменьшения вероятности прижога листовых деталей и контакта с головками дефектоскопа, так как для остаточного намагничивания ток пропускают по соединению кратковременно (в течение 0,1...0,5 с) с перерывами между включениями 1...2 с.

В практике магнитного контроля используют следующие способы намагничивания сварных соединений: комбинированный, циркулярный и полюсный. Комбинированное намагничивание производят только в приложенном магнитном поле, а циркулярное и полюсное — как в приложенном магнитном поле, так и при остаточной намагниченности.

При *комбинированном намагничивании* одновременно применяют два (или несколько) магнитных полей. Например, намагничивание трубы осуществляют, используя соленоид и пропуская ток через проводник, проходящий внутри этой трубы. Два намагничивающих поля складываются таким образом, чтобы силовые линии результирующего магнитного поля имели форму спирали. Результирующее поле проходит через все части объекта под различными углами, что повышает выявляемость дефектов, ориентированных в разных направлениях.

Циркулярное намагничивание применяют для обнаружения продольных дефектов (трещин, непроваров или вытянутых шлаковых включений). Выполняется такое намагничивание посредством

пропускания тока по контролируемой детали или через проводник, помещенный в имеющееся в этой детали отверстие. Циркулярное намагничивание наиболее эффективно при контроле цилиндрических деталей. Силу тока, A , пропускаемого по детали цилиндрической формы для ее намагничивания, рассчитывают по формуле

$$I_{\text{ц}} = \pi DH,$$

где D — диаметр детали, см; H — напряженность магнитного поля, А/см.

При выборе значения H необходимо учитывать следующее: если точка P' начальной намагниченности (рис. 3.34) оказывается правее точки P максимальной относительной магнитной проницаемости, уменьшение площади поперечного сечения металла вследствие наличия дефекта вызовет увеличение магнитной индукции, а также может привести к возрастанию магнитной проницаемости и, как следствие, к уменьшению потока рассеяния. В результате дефект может оказаться не выявленным.

Наилучшие условия для обнаружения дефектов создаются в области спада кривой $\mu = f(H)$ (точка P'). При больших напряженностях поля H разница между потоками рассеяния над дефектами и в окружающей среде уменьшается, что затрудняет выявление дефектов. Для возможности обнаружения большинства поверхностных дефектов в сварных соединениях из конструкционных сталей оптимальная напряженность магнитного поля на поверхности соединения в том случае, если контроль осуществляется при остаточной намагниченности, должна составлять 80 ... 160 А/см.

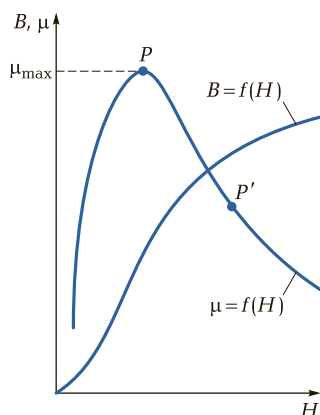


Рис. 3.34. Зависимости магнитной индукции B и относительной магнитной проницаемости μ от напряженности магнитного поля H для ферромагнитного материала:

P, P' — точки, соответствующие начальной намагниченности металла и области наилучшего обнаружения дефектов

Силу тока, A , необходимую для циркулярного намагничивания пластины, определяют по формуле

$$I_{\text{ц}} = 2(b + S)/H,$$

где b и S — соответственно ширина и толщина пластины.

Полюсное намагничивание подразделяют на продольное, поперечное и нормальное. При продольном намагничивании направление намагничивающего поля совпадает с направлением оси сварного шва. Продольное намагничивание, осуществляемое с помощью электромагнитов, постоянных магнитов или соленоидов, используют для выявления поперечных дефектов, расположенных под углом не менее 20° к продольной оси шва. При поперечном намагничивании направление вектора напряженности магнитного поля перпендикулярно продольной оси шва. Нормальное намагничивание является частным случаем продольного и поперечного намагничиваний.

Чувствительность магнитного метода контроля, осуществляемого при продольной остаточной намагниченности, существенно зависит от скорости снятия намагничивающего поля. При быстром уменьшении напряженности поля дефекты обнаруживаются уверенно, а при медленном ослаблении поля с той же исходной напряженностью дефекты не выявляются или выявляются слабо, т.е. продолжительность снижения силы тока от максимального значения до нуля не должна превышать 5 мкс.

Аппаратура и материалы. Дефектоскопы, предназначенные для осуществления магнитопорошкового метода контроля, включают в себя источник тока, устройство для подвода тока к детали, блок полюсного намагничивания (соленоиды, электромагниты), устройство для нанесения на контролируемое сварное соединение порошка или суспензии и измеритель тока (или напряженности поля). В дефектоскопах чаще всего используют циркулярный способ намагничивания, пропуская переменный ток по детали (или через стержень), и продольное намагничивание постоянным током. Для магнитопорошкового контроля обычно применяют дефектоскопы трех видов: стационарные универсальные и специализированные — передвижные и переносные.

Стационарные универсальные дефектоскопы широко используются при крупносерийном производстве разнотипных деталей. С их помощью можно контролировать детали (или партии деталей) разной конфигурации с производительностью от десятков до сотен штук в час.

В стационарных универсальных дефектоскопах можно производить намагничивание всеми известными способами (продоль-

ным, циркулярным, комбинированным). Успешно применяются несколько моделей стационарных дефектоскопов: УМДЭ-2500, ХМД-10П, МД-5 и другие, отличающиеся друг от друга родом намагничивающего тока и мощностью и предназначенные для контроля деталей разных размеров.

Из специализированных передвижных и переносных дефектоскопов серийно выпускаются модели ПМД-70 и МД-50П. Переносной магнитный дефектоскоп ПМД-70 используется для контроля сварных швов в полевых условиях. В нем реализованы полюсной продольный и циркулярный способы намагничивания. Передвижной дефектоскоп МД-50П предназначен для контроля крупногабаритных массивных конструкций, выполняемого по частям.

В качестве материала для приготовления ферромагнитных порошков в основном используют оксиды железа мелкого помола (с размером частиц 5... 20 мкм), иногда — чистую железную окалину, получаемую при ковке и прокатке, а также стальные опилки, образующиеся при шлифовании стальных изделий. Для лучшего выявления дефектов конструкций применяют цветные ферромагнитные порошки (красный, серебристый и др.), получаемые окрашиванием темных порошков или отжигом их по специальной технологии.

Для приготовления магнитных суспензий чаще всего используются масляно-керосиновые смеси (с соотношением масла и керосина 1:1), на 1 л которых приходится 50... 60 г ферромагнитного порошка. Могут применяться и водные суспензии, например мыльно-водная, в которой на 1 л воды приходится 5... 6 г мыла, 1 г жидкого стекла и 25... 30 г магнитного порошка.

3.4.3. Магнитографический метод

Суть магнитографического метода контроля заключается в намагничивании проверяемого участка сварного шва и околшовной зоны с одновременной записью магнитного поля на магнитную пленку (рис. 3.35) и последующем считывании полученной информации с помощью специальных устройств дефектоскопов.

Методика контроля. Магнитографический контроль включает в себя следующие операции (ГОСТ 25225—82):

- осмотр и подготовка поверхности контролируемого сварного соединения. При этом с поверхности швов должны быть удалены остатки шлака, брызги расплавленного металла, загрязнения и т.д.;

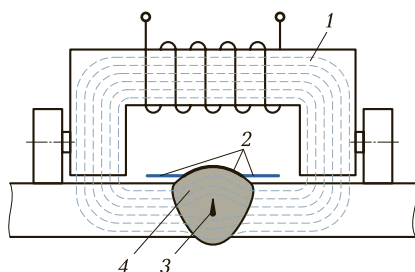


Рис. 3.35. Схема магнитографического контроля:

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

- наложение на шов отрезка предварительно размагниченной магнитной пленки. Прижим пленки к шву сварного соединения производится специальной эластичной «подушкой». При контроле кольцевых швов труб, сосудов и других сварных конструкций магнитную пленку прижимают к поверхности шва (по всему периметру) эластичным резиновым поясом;
- намагничивание контролируемого соединения при оптимальных режимах в соответствии с типом намагничивающего устройства, толщиной сварного шва и его магнитными свойствами;
- расшифровка результатов контроля (установка магнитной пленки в считывающее устройство дефектоскопа и выявление по сигналам на его экране дефектов).

Магнитографический метод применяется в основном для контроля стыковых швов, выполненных сваркой плавлением (главным образом, швов магистральных трубопроводов). С помощью этого метода можно контролировать сварные узлы и конструкции толщиной до 25 мм.

Чувствительность метода. Относительная чувствительность W магнитографического метода контроля определяется как отношение минимального вертикального размера (глубины) ΔS обнаруживаемого дефекта к толщине S основного металла контролируемого соединения и выражается в процентах.

Чувствительность данного метода контроля зависит от размеров, формы, глубины и ориентации дефектов сварных швов, геометрических параметров их поверхности, технических характеристик считывающей головки дефектоскопа и типа магнитной пленки. Магнитографией наиболее уверенно выявляются плоскостные дефекты (трещины, непровары и несплавления), а также протяженные дефекты в виде цепочек шлаковых включений, преимущественно ориентированных перпендикулярно направлению маг-

нитного потока. Значительно хуже обнаруживаются округлые дефекты (поры и отдельные шлаковые включения).

Практикой установлено, что магнитографическим методом уверенно выявляются внутренние плоскостные дефекты, когда их вертикальный размер составляет 8...10 % от толщины сварного шва. Максимальная чувствительность контроля по отношению к указанным видам дефектов достигает 5 %. Округлые внутренние дефекты обнаруживаются, когда их размер по высоте составляет не менее 20 % от толщины металла.

Чувствительность магнитографического метода к поверхностным дефектам примерно такая же или несколько ниже, чем магнитопорошкового метода. При этом чем глубже расположен дефект от поверхности сварного соединения, на которую помещают магнитную пленку, тем хуже он выявляется. Современная аппаратура позволяет обнаруживать дефекты с вертикальными размерами, составляющими 10...15 % от толщины металла, при глубине залегания до 25 мм.

На чувствительность магнитографического метода существенно влияют высота и форма сварного шва, а также состояние его поверхности. Для лучшей выявляемости дефектов сварку следует выполнять таким образом, чтобы выпуклость шва не превышала 25 % от толщины основного металла, а переход от наплавленного металла к плоскости был плавным. При этом необходимо, чтобы высота неровностей на поверхности шва составляла не более 30 % от его выпуклости и в то же время не превышала 1 мм. При контроле швов с шероховатой поверхностью следует производить их зачистку. Не допускается контроль данным методом сварных швов со смещением кромок стыкуемых деталей, а наилучшие результаты этот метод обеспечивает 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 пленки.

Схемы намагничивания. При магнитографическом контроле сварные узлы и конструкции намагничивают с помощью специальных электромагнитов, реже применяют циркулярное намагничивание. Для обнаружения внутренних дефектов намагничивание производят постоянным током, а для выявления поверхностных и подповерхностных дефектов — переменным.

Аппаратура и материалы. Считывание результатов контроля с магнитной пленки осуществляется магнитографическими дефектоскопами. Дефектоскоп имеет электродвигатель, приводящий во

вращение барабан с несколькими магнитными головками. Головки перемещаются поперек магнитной пленки. Электрические сигналы с головки поступают в усилитель, а затем подаются на ЭЛТ.

Промышленность выпускает дефектоскопы с двумя видами индикации: импульсной и видеоиндикацией. При импульсной индикации на экране ЭЛТ возникают импульсы, амплитуда которых определяет размеры дефектов в вертикальном направлении, а при видеоиндикации магнитный рельеф полей рассеяния от дефектов переносится на экран ЭЛТ в виде телевизионных изображений магнитограмм отдельных участков шва.

В комплект дефектоскопа входит намагничивающее устройство, состоящее из П-образного магнитомягкого сердечника (магнитопровода) и обмотки. Для обеспечения перемещения намагничивающего устройства вдоль шва его выполняют с удлиненными полюсами, опирающимися на четыре немагнитных ролика. Опорные ролики создают между поверхностью контролируемого сварного соединения и полюсами намагничивающего устройства постоянный воздушный зазор (2...3 мм), позволяющий электромагниту свободно перемещаться вдоль шва.

Выпускается несколько типоразмеров передвижных намагничивающих устройств (ПНУ-М1, ПНУ-М2, УНУ), предназначенных для намагничивания сварных стыков труб диаметром 150...1 200 мм и плоских сварных соединений толщиной до 16 мм. Для магнитографического контроля сварных швов труб большого диаметра (до 1 420 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 НВУ-1.

Все указанные намагничивающие устройства работают на постоянном токе. В заводских условиях источниками питания служат выпрямители, а в полевых — часто используют переносную автономную станцию СПГ1-1 или СПА-1.

Для записи магнитных полей при магнитографическом контроле применяют магнитную пленку на триацетатной или лавсановой основе, изготавливаемую посредством нанесения на нее мельчайших частиц ферромагнитного материала. В настоящее время серийно выпускают пленки МК-1 (на триацетатной основе) и МК-2 (на лавсановой основе) шириной 35 мм. Пленка МК-2 обладает лучшими физико-механическими свойствами, чем пленка МК-1, и может использоваться при температурах окружающего воздуха от -70 до $+70$ °С, тогда как пленка МК-1 при температурах ниже -30 °С теряет эластичность.

3.5. ВИХРЕТОКОВАЯ ДЕФЕКТОСКОПИЯ

Физические основы метода вихретоковой дефектоскопии можно пояснить следующим образом. Если установить рядом две катушки индуктивности $L1$ и $L2$ (например, трансформаторы без сердечников) и по катушке $L1$ (рис. 3.36) пропустить ток, то при изменении силы тока в ней или взаимного расположения катушек в катушке $L2$ будет наводиться электродвижущая сила.

При вихретоковой дефектоскопии функцию одной из катушек индуктивности выполняет металлическая пластина 1 , в которой наводятся вихревые токи 2 (рис. 3.37), текущие в поверхностном слое металла со стороны катушки. Плотность и распределение вихревых токов в металле зависят от его геометрических и электрофизических параметров.

Если в схеме, изображенной на рис. 3.37, металлическую пластину заменить сварным соединением, содержащим дефекты, то увеличится сопротивление поверхностного слоя, что приведет к ослаблению вихревых токов, которое регистрируется катушкой-датчиком.

Методика контроля. Процесс контроля методом вихретоковой дефектоскопии (рис. 3.38) включает в себя выполнение следующих основных операций:

- внешний осмотр сварного соединения и устранение наружных дефектов, препятствующих проведению контроля;

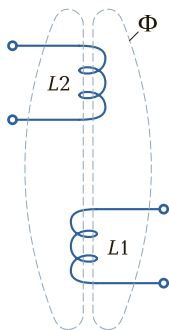


Рис. 3.36. Схема из двух взаимосвязанных катушек индуктивности $L1$ и $L2$:

Φ — магнитный поток

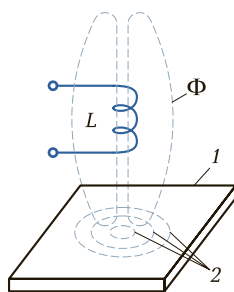


Рис. 3.37. Схема образования вихревых токов в металлической пластине:

1 — металлическая пластина; 2 — вихревые токи; L — катушка индуктивности; Φ — магнитный поток

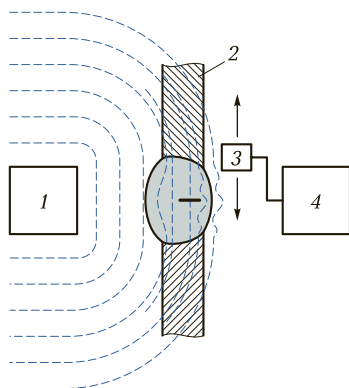


Рис. 3.38. Схема контроля сварного соединения методом вихретоковой дефектоскопии (стрелками показаны направления перемещения датчика):

1 — ползущая система; 2 — сварное соединение; 3 — датчик; 4 — регистрирующий прибор

- установка ползущей системы 1 на контролируемое сварное соединение 2 и пропускание тока через катушку возбуждения;
- сканирование поверхности сварного соединения датчиком 3 и регистрация сигнала прибором 4;
- расшифровка результатов контроля и оценка качества соединения.

Вихретоковая дефектоскопия используется для контроля точечной сварки алюминиевых сплавов. При наличии литого ядра электропроводность сплавов марок Д16 и АМг в его зоне уменьшается на 10...15% по сравнению с электропроводностью основного металла. Электропроводность сплавов В95, АМг6 и других может уменьшаться на 15...30%. При наличии дефектов типа слипания или непровара электропроводности литого ядра и основного металла примерно одинаковые.

Метод вихревой дефектоскопии пока не нашел широкого применения при контроле сварных швов, так как электропроводность отдельных зон шва и околошовной зоны значительно изменяется, что создает сильные помехи при выявлении дефектов сварки.

Чувствительность метода. На чувствительность метода вихретоковой дефектоскопии значительное влияние оказывает зазор между датчиком и поверхностью контролируемого объекта, а также их взаимное расположение, форма и размеры. С увеличением зазора чувствительность метода резко снижается. Допустимый максимальный зазор составляет 2 мм. Структурная неоднородность сварного соединения также существенно снижает чувствительность данного метода.

Этот метод позволяет обнаруживать поверхностные и подповерхностные трещины высотой 0,1 ... 0,2 мм и протяженностью более 1 мм, расположенные на глубине до 1 мм.

Вихретоковая дефектоскопия может использоваться для измерения толщины гальванических, лакокрасочных и теплоизоляционных покрытий, стенок труб, пустотелых деталей и тонколистовых конструкций при одностороннем доступе к ним, а также диаметров прутков и проволоки. Однако в ряде случаев практическое применение этого метода затрудняется неоднородностью свойств материалов соединения и отклонением размеров деталей от заданных даже в пределах допусков.

Классификация полезадающих систем. Полезадающие системы, или вихретоковые преобразователи (ВТП), подразделяются на наружные проходные — в которых катушка с током охватывает контролируемое сварное соединение (рис. 3.39, а), внутренние проходные — в которых катушку вводят в соединение (рис. 3.39, б), и

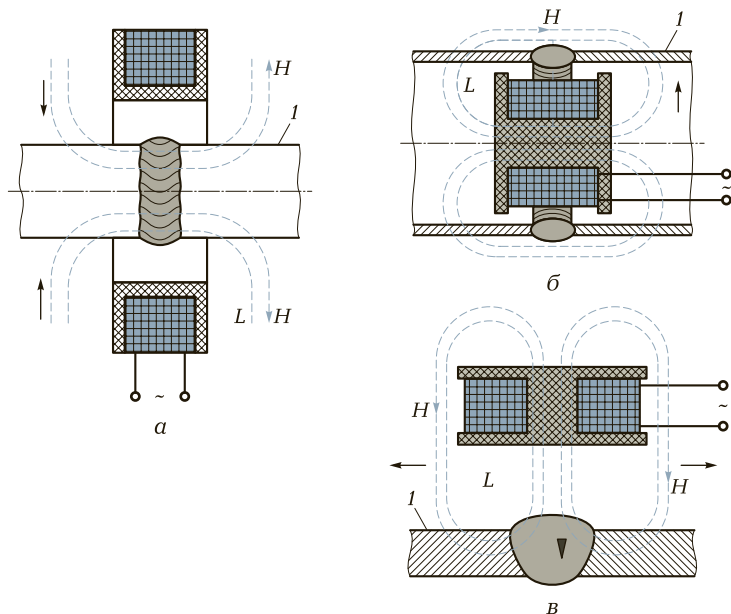


Рис. 3.39. Схемы наружной проходной (а), внутренней проходной (б) и накладной (в) полезадающих систем электромагнитного контроля (стрелками показаны направления распространения электромагнитных волн):

1 — сварное соединение; L — катушка индуктивности; H — вектор напряженности магнитного поля

накладные — в которых катушку устанавливают на соединение торцом (рис. 3.39, в). В ВТП первых двух типов электромагнитная волна от поездающей системы распространяется в направлении контролируемого соединения, а в ВТП третьего типа — вдоль его поверхности.

Измерительные катушки (датчики) выполняются отдельно от поездающих (генераторных) и размещаются вблизи от поверхности сварного соединения.

Наружные проходные ВТП используют для контроля линейно-протяженных объектов и мелких деталей.

С помощью внутренних проходных ВТП контролируют внутреннюю поверхность труб и отверстий в различных деталях.

Накладные ВТП применяют в основном для контроля качества объектов с плоскими поверхностями и объектов сложной формы, а также в тех случаях, когда требуется уменьшить зону контроля и обеспечить высокую чувствительность. Накладные преобразователи выполняются с ферромагнитным сердечником или без него. Такой сердечник (обычно ферритовый) повышает абсолютную чувствительность преобразователя и уменьшает зону контроля за счет локализации магнитного потока.

Дефектоскопы с проходными преобразователями. Для автоматизированного высокоскоростного бесконтактного контроля качества эффективно использование дефектоскопов 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 нескольких тысяч мелких деталей в час. Производительность контроля труб и прутков ограничивается инерционностью устройств транспортирования 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 разных диаметров и глубин в трубах и прутках, продольных рисок на проволоке и т. д. Реальный порог чувствительности дефектоскопа зависит от уровня помех, связанных с вариацией параметров объекта (например, от шероховатости поверхности). Порог чувствительности дефектоскопа с проходным преобразователем обычно определяется глубиной

узкого длинного продольного дефекта, выраженной в процентах от поперечного размера (диаметра) объекта.

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

Дефектоскоп ИПП-1М предназначен для выявления в условиях поточного производства поверхностных дефектов в прутках с круглым и шестигранным профилями диаметром 4...47 мм, выполненных из ферромагнитных и неферромагнитных металлов и сплавов. Глубина залегания порогового дефекта для него составляет 1...2 % от диаметра, но не менее 0,1 мм, а длина — 2 мм.

Дефектоскоп ИДП-1 используется для обнаружения в прутках диаметром 1...5 мм из неферромагнитных и ферромагнитных металлов и сплавов поверхностных дефектов: трещин, волосовин, раковин и т. п. Глубина залегания порогового дефекта для него составляет 0,05 мм.

Качество ферромагнитных сварных труб диаметром до 60 мм контролируют с помощью дефектоскопа ЭЗТМ. Проходной преобразователь, выполненный в виде трехвитковой трансформаторной системы, обеспечивает надежную работу такого дефектоскопа в условиях высоких температур даже при наличии окалины и масел. С его помощью выявляют непровары в сварном шве, и его применение позволяет исключить гидроиспытания.

Для контроля качества протяженных сварных конструкций с широким диапазоном типоразмеров и видов материалов разработан универсальный дефектоскоп ВД-30П.

Из зарубежных моделей данного типа наиболее эффективны дефектоскопы, разработанные в Институте Ферстера (Германия). В нашей стране их используют для контроля труб, прутков и проволоки преимущественно из ферромагнитных, а также из неферромагнитных материалов.

Дефектоскопы с накладными преобразователями. Для контроля линейно-протяженных объектов с круглым сечением (прутков, труб) применяют сканирующие дефектоскопы с вращающимися вокруг объекта накладными преобразователями: ВД-40Н, -41Н и -43Н. Эти дефектоскопы предназначены для обнаружения поверхностных дефектов в сварных соединениях из ферромагнитных и слабомагнитных сталей, а также из цветных металлов и сплавов.

Для контроля плоских сварных соединений и соединений, имеющих малую кривизну поверхности, разработан ряд переносных малогабаритных дефектоскопов с преобразователями, вращающимися в плоскости, параллельной поверхности объекта. Дефектоскоп ЭДМ-65 используется для выявления поверхностных дефектов в зачищенных сварных швах из алюминиевых сплавов.

Сканирующие дефектоскопы, имеющие головку сравнительно большого диаметра, трудно применять для контроля сварных соединений сложной конфигурации. В этих случаях обычно используются переносные и малогабаритные дефектоскопы с преобразователями малого диаметра, работающими в статическом режиме.

Наиболее распространены дефектоскопы серии ДНМ и ВД-20НСТ. Дефектоскопы серии ДНМ (ДНМ-15, -500, -2000) предназначены для контроля качества поверхности сварных соединений из алюминиевых и жаропрочных сплавов, а ВД-20НСТ позволяет обнаруживать поверхностные дефекты в ферромагнитных и неферромагнитных материалах. Для контроля мелких деталей (в основном деталей подшипников) разработаны дефектоскопы СК-27-МДШ5, -31, -39, МДР-1, -2 и -3 отраслевого назначения.

Из зарубежных дефектоскопов данного типа распространены различные модификации серий «Циркограф» и «Дефектометр», разработанные в Институте Ферстера. Дефектоскопы серии «Циркограф» с вращающимися накладными преобразователями снабжены сменными сканирующими головками, позволяющими контролировать качество объектов диаметром 2...120 мм. Для контроля коротких деталей и узлов, имеющих поверхность вращения сложной формы, к ним подключается гребенка с плавающими преобразователями, закрепленная в специальных державках. Дефектоскопы серии «Циркограф», предназначенные для контроля внутренней поверхности труб, имеют внутренние вращающиеся преобразователи, которые можно устанавливать в стационарном или переносном (в виде ручной дрели) устройстве.

3.6. КАПИЛЛЯРНАЯ ДЕФЕКТОСКОПИЯ

3.6.1. Физические основы капиллярной дефектоскопии

Капиллярные методы контроля предназначены для обнаружения нарушений сплошности в поверхностных слоях сварных соединений. В большинстве случаев согласно техническим требова-

ниям выявлению подлежат настолько малые дефекты сварных соединений, которые заметить при визуальном осмотре почти невозможно. Применение оптических приборов, например лупы или микроскопа, не позволяет обнаруживать поверхностные дефекты вследствие недостаточной контрастности их изображений на фоне металла и малого поля зрения, обеспечиваемого при большом увеличении.

Методы капиллярной дефектоскопии позволяют выявлять разного рода трещины, свищи, микропоры и другие дефекты, выходящие на поверхность, за счет повышения контрастности индикаторного рисунка, образующегося на дефектах на фоне поверхности контролируемого объекта.

Изменить соотношение оптической плотности изображения дефекта и фона можно двумя способами. Первый способ повышения контрастности изображения заключается в полировании поверхности контролируемого сварного соединения с последующим травлением ее в растворах кислот. 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 нерентабельно полировать поверхность сварного соединения и особенно шва. К тому же данный способ неприменим при контроле прецизионных полированных деталей и неметаллических материалов. Травление приемлемо только при контроле локальных участков поверхности металла, если имеется подозрение на наличие дефектов.

Второй способ повышения контрастности изображения основан на изменении светоотдачи дефектов заполнением их со стороны поверхности специальными свето- и цветоконтрастными индикаторными проникающими жидкостями — пенетрантами. Если в состав пенетранта входят люминофоры — вещества, испускающие свет под действием ультрафиолетового излучения, то такие жидкости называются люминесцентными, а метод контроля — люминесцентной дефектоскопией (ЛД). Если же основой пенетранта являются красители, видимые при дневном свете, то метод контроля называется цветной дефектоскопией (ЦД). Красители при ЦД используют ярко-красного цвета.

Контроль, осуществляемый методами капиллярной дефектоскопии, заключается в следующем. Поверхность контролируемой детали очищают от пыли, лакокрасочных покрытий, органических и других загрязнений, обезжиривают и сушат. На подготовленную поверхность наносят слой пенетранта и выдерживают некоторое

время, чтобы жидкость проникла в открытую полость дефекта (рис. 3.40, *а*). Затем жидкость удаляют с поверхности (рис. 3.40, *б*), но при этом часть ее остается в полости дефекта.

Для повышения выявляемости дефектов на поверхность детали наносится специальный проявитель (рис. 3.40, *в*) в виде быстро-сохнущей суспензии (например, из каолина или коллодия) либо лаковое покрытие. Проявляющий материал (обычно белого цвета) вытягивает пенетрант из полости дефекта, что приводит к образованию на проявителе индикаторного следа, полностью повторяющего конфигурацию дефекта в плане, но имеющего большие размеры. Такие следы легко различимы даже без использования оптических средств. Степень увеличения размеров индикаторного следа зависит от глубины расположения дефекта, т.е. от объема пенетранта, заполнившего дефект, и промежутка времени, прошедшего с момента нанесения проявляющего слоя.

Физической основой методов капиллярной дефектоскопии служит явление капиллярной активности — способность жидкости втягиваться в мельчайшие сквозные отверстия и открытые с одной стороны каналы.

При попадании жидкости в капиллярный канал ее поверхность искривляется, образуя так называемый мениск. Силы поверхностного натяжения стремятся уменьшить свободную границу мениска, и в капилляре начинает действовать дополнительная сила, приводящая к всасыванию смачивающей жидкости. Глубина, на которую жидкость проникает в капилляр, прямо пропорциональна коэффициенту ее поверхностного натяжения и обратно пропор-

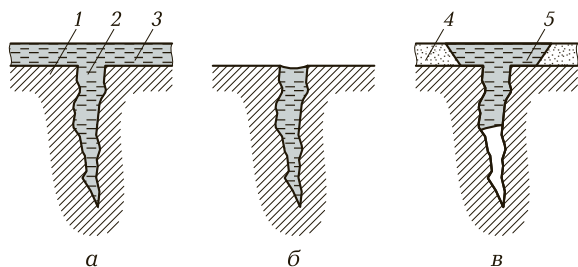


Рис. 3.40. Стадии контроля поверхности детали капиллярным методом с применением проявителя:

а — полость трещины заполняется проникающей жидкостью — пенетрантом; *б* — жидкость удаляется с поверхности детали; *в* — наносится проявитель, трещина выявляется; 1 — деталь; 2 — полость трещины; 3 — проникающая жидкость; 4 — проявитель; 5 — индикаторный след трещины

циональна радиусу капилляра. Иными словами, чем меньше радиус капилляра (дефекта) и лучше смачиваемость материала, тем быстрее и на большую глубину жидкость проникает в капилляр.

3.6.2. Методика капиллярной дефектоскопии

Процесс контроля качества сварного соединения капиллярными методами складывается из следующих технологических операций: подготовка объекта к контролю, обработка его дефектоскопическими материалами, выявление дефектов и заключительная очистка объекта по окончании процесса.

Подготовка объекта к контролю. Подготовка заключается в удалении всевозможных загрязнений и лакокрасочных покрытий, обезжиривании и сушке контролируемой поверхности.

Для очистки поверхности применяется комбинация различных способов механической обработки (шлифования, полирования, шабрения и др.) с последующей промывкой и протиркой ее легколетучими жидкими растворителями (скипидаром, ацетоном, бензином, спиртом и др.). Выбранный способ очистки должен обеспечивать удаление загрязнений из полости дефекта без внесения в нее новых загрязнений.

Сварные швы и околошовные зоны обрабатывают абразивным кругом, а затем наждачной бумагой разной зернистости. Такая механическая обработка позволяет удалить все неровности и сгладить выпуклость шва. Однако в процессе очистки абразивная и металлическая пыль заполняет полости дефектов, а тонкий слой пластически деформированного металла закрывает их. Следовательно, после механической обработки для вскрытия полостей дефектов поверхность шва необходимо протравить раствором кислоты или щелочи (для алюминиевых сплавов).

Следует отметить, что от качества очистки поверхности сварного соединения существенно зависит чувствительность контроля.

В настоящее время помимо традиционных способов очистки используется весьма перспективная ультразвуковая очистка, при которой сварное соединение погружается в ванну с жидким растворителем и обрабатывается мощным потоком ультразвуковым излучением, а также анодно-ультразвуковая очистка, при которой детали, помещенные в ванну с травильным составом, одновременно обрабатываются ультразвуком и электрическим током.

Способы очистки и необходимая чистота контролируемых поверхностей определяются техническими требованиями к качеству сварного соединения.

Обработка контролируемого объекта дефектоскопическими материалами. Обработка сварных соединений дефектоскопическими материалами заключается в заполнении полостей дефектов индикаторной жидкостью, удалении ее избытка и нанесении проявителя.

В состав пенетрантов на водной основе входят люминофоры или красители, а также ингибиторы — вещества, тормозящие окислительные процессы. Такие пенетранты наиболее технологичны, безопасны для здоровья операторов и не воспламеняются, а также легко удаляются с поверхности простым смывом. Однако это последнее свойство пенетрантов обуславливает и их основной недостаток: при смыве удаляется и часть жидкости из полостей дефектов, что снижает чувствительность контроля, поэтому пенетранты на водной основе применяют ограниченно.

Наиболее широко распространены пенетранты на основе различных органических жидкостей (керосина, скипидара, бензола, уайт-спирита и др.), которые требуют осторожности в обращении, но обеспечивают высокую чувствительность метода при выявлении дефектов.

Пенетрант целесообразно наносить с помощью пульверизатора или мягкой кисти, а продолжительность его выдержки независимо от размеров дефектов не должна превышать 5 мин.

Выявление дефектов. Различают пять способов выявления дефектов сварных соединений с использованием капиллярной дефектоскопии.

Порошковый («сухой») способ основан на использовании проявителя в виде сухого белого сорбента (каолина, мела и др.), поглощающего индикаторный пенетрант.

«Мокрый» способ связан с применением проявителя в виде концентрированной суспензии, приготовленной из белого порошка, размешанного (диспергированного) в летучем растворителе (керосине, бензоле и др.), воде или их смесях.

При выявлении дефекта с помощью слоя краски или лака используют проявитель, состоящий из пигментированного или бесцветного быстросохнущего раствора (например, коллодия), поглощающего (сорбирующего) индикаторный пенетрант.

Пленочный проявитель представляет собой бесцветную или белую индикаторную ленту с проявляющим слоем, поглощающим индикаторный пенетрант и легко отделяющимся вместе с индика-

торным слоем дефекта от контролируемой поверхности. Такой проявитель технологичен, позволяет получать дефектограмму, анализировать ее отдельно от сварного соединения и сохранять как объективный документ контроля.

Существуют также два варианта самопроявляющего способа. В беспорошковом варианте самопроявляющего способа выявления дефектов сварное соединение погружают в индикаторную жидкость, в состав которой входят органический люминофор и летучий растворитель. После извлечения соединения из этой жидкости растворитель быстро испаряется, а кристаллы люминофора оседают на краях дефекта. Эти кристаллы люминесцируют под воздействием ультрафиолетового излучения. Для устранения фонового свечения все соединение обрабатывают в специальном растворе ингибитора, гасящем люминесценцию на поверхности, но почти не влияющем на люминофор, проникший в капиллярные полости дефектов.

В другом варианте самопроявляющего способа выявления дефектов контролируемый объект после очистки и пропитки нагревают, исключая тем самым проявление. При нагревании специальная индикаторная жидкость выходит из полости дефекта, затвердевает и образует индикаторный след, люминесцирующий под воздействием ультрафиолетового излучения.

В люминесцентной дефектоскопии применяются все указанные способы выявления дефектов. Широко распространено проявление дефектов с помощью порошка или суспензии в силу простоты процесса и доступности материалов, но при этом оно и наименее эффективно. Однако чаще всего в ЛД используются пленочный и самопроявляющий способы выявления дефектов.

В цветовой дефектоскопии применяют в основном порошкообразные сорбенты в виде суспензий и белые проявляющие лаки, причем лаковые проявители обеспечивают более высокую чувствительность метода.

В зависимости от размеров выявляемых дефектов ГОСТ 18442—73 устанавливает четыре условных уровня чувствительности капиллярных методов контроля (табл. 3.7).

Для оценки условного уровня чувствительности используют тест-образцы с естественными или искусственными дефектами. Обычно тест-образцы содержат трещины, образовавшиеся при неправильном выборе режима шлифования.

Контролируемую поверхность со слоем проявителя сушат в потоке теплого воздуха, а затем дважды (через 5 и 20 мин после нанесения проявителя) производят ее осмотр, причем в случае ис-

Таблица 3.7. Условные уровни чувствительности капиллярных методов контроля

Условный уровень чувствительности	Размеры дефектов, мкм		
	Ширина	Глубина	Длина
I	Менее 1	Менее 10	Менее 0,1
II	1 ... 10	10 ... 100	0,1 ... 1
III	10 ... 100	100 ... 1 000	1 ... 10
IV	Более 100	Более 1 000	Более 10

пользования ЛД — при освещении объекта ультрафиолетовым излучением, а в случае использования ЦД — при электрическом освещении или дневном свете. При этом освещенность на рабочем участке должна составлять не менее 500 лк.

Осмотр выполняют невооруженным глазом, а при необходимости применяют лупы, обеспечивающие малое увеличение (в 1,5—2 раза) и большое поле зрения. Обнаруженный индикаторный след изучают с помощью оптических приборов.

Рисунок индикаторных следов и топография их расположения позволяют довольно уверенно судить о виде дефектов.

Трещины любого происхождения, волосовины, заковы, неслитины, непровары, неспаи и оксидные пленки имеют вид четких (иногда прерывистых), окрашенных или люминесцирующих линий разной конфигурации.

Растрескивание металла и межкристаллитная коррозия на участках поверхности соединения крупнозернистых сплавов проявляются в виде группы отдельных коротких линий или их сетки.

О межкристаллитной коррозии мелкозернистых сплавов свидетельствуют пятна или размытые полосы.

Поры, язвенная коррозия, отдельные очаги межкристаллитной коррозии, выкрашивание материала и эрозионное повреждение поверхности соединения выявляются как отдельные точки или звездочки.

Индикаторный рисунок на поверхности сварного соединения может образовываться также различными допустимыми ее повреждениями или загрязнениями. В процессе выполнения контроля по дополнительным признакам необходимо отличать эти лжедефекты от истинных дефектов. Отбраковка сварных соединений производится в тех случаях, когда число и размеры выявленных при капиллярной дефектоскопии штрихов, линий и то-

чек больше допустимых значений, установленных техническими условиями.

Заключительная очистка. По завершении контроля поверхности сварного соединения в целях очистки от проявителя протирают растворителями, промывают или очищают другими способами.

Аппаратура. Промышленностью выпускаются переносные и стационарные дефектоскопы различных типов. Среди них следует выделить переносной аэрозольный комплект КД-40ЛЦ, предназначенный для контроля сварных соединений в полевых, цеховых и лабораторных условиях цветным, люминесцентным и люминесцентно-цветным методами. Комплект включает в себя ультрафиолетовый облучатель КД-33Л и разборные аэрозольные баллоны, которые можно многократно заряжать дефектоскопическими материалами на зарядном стенде, также входящем в комплект. Все баллоны объединены в три набора. Один из наборов содержит баллоны, подогреваемые электрическим током, что позволяет производить контроль при отрицательных температурах окружающей среды (до -40°C).

Для цветовой дефектоскопии при небольшом объеме работ используются переносные дефектоскопы ДМК-4 и ДАК-2Ц. Первый из них выполнен в виде чемодана с гнездами и секциями для размещения контрольных принадлежностей: емкостей с расходными растворителями, краской и жидкостью, пеналов с кистями и луп. Дефектоскоп ДМК-4 массой 7 кг имеет небольшие габаритные размеры ($430 \times 250 \times 200$ мм).

При контроле сварных соединений или узлов на стендах в цехах и лабораториях широко применяются стационарные дефектоскопы, позволяющие механизировать и автоматизировать ряд операций. Такие дефектоскопы снабжены рольгангами, транспортерами для подачи контролируемых объектов, распылительными камерами, мощными осветителями и другими устройствами.

3.7. КОНТРОЛЬ ТЕЧЕИСКАНИЕМ

Основным эксплуатационным требованием к конструкциям замкнутого типа (сосудам, трубопроводам) является герметичность (непроницаемость) их стенок и сварных соединений.

Герметичность — это способность конструкции ограничивать проникновение жидкости или газа сквозь ее элементы и через их соединения. Степень герметичности измеряется утечкой жидкости или газа в единицу времени.

Испытание конструкций на герметичность, или контроль течеисканием, выполняют с использованием пробных веществ (жидкостей или газов), которые легко проходят через сквозные дефекты и хорошо различаются визуально или с помощью приборов — течеискателей и других средств регистрации.

Контроль течеисканием позволяет обнаруживать в сварных соединениях и основном металле сварных узлов и конструкций следующие виды сквозных дефектов: трещины, непровары, поры, свищи, прожоги и др. Размеры сквозных дефектов ввиду невозможности измерения их линейных размеров условно оцениваются потоком пробного вещества, протекающего через дефект в единицу времени.

Согласно ГОСТ 18353—79 различают капиллярные, компрессионные и вакуумный методы контроля течеисканием. Все эти методы в зависимости от вида и способа индикации, используемого пробного вещества, применяемой аппаратуры и технологических особенностей имеют свои разновидности.

Выбор метода течеискания определяется степенью необходимой герметичности испытуемых объектов, направлением и значением нагрузки на оболочку и допустимыми к применению пробными веществами.

Желательно, чтобы направление и значение нагрузки при испытаниях герметичности совпадали с аналогичными характеристиками рабочей нагрузки объектов контроля.

Капиллярные методы. Эти методы контроля сварных соединений основаны на явлении капиллярного проникновения жидкости, обладающей высокой смачивающей способностью, в сквозные дефекты. Для проверки на одну поверхность сварного соединения, предварительно очищенную от загрязнений, обильно наносят проникающую жидкость, например керосин, а на противоположную — адсорбирующее покрытие в виде меловой обмазки, состоящей из 350... 480 г молотого мела (или каолина) и 1 л воды.

После определенной выдержки контролируемое соединение осматривают, выявляя сквозные дефекты по желтым пятнам керосина, появившимся на меловой обмазке. Зачастую для лучшего выявления пятен керосина в обмазку добавляют красители ярко-красного цвета или люминофоры. Метод керосиновой пробы позволяет эффективно обнаружить сквозные дефекты с диаметром более 0,1 мм.

Иногда для повышения чувствительности и производительности данного метода контроля поверхность испытуемого объекта после смачивания сварного соединения керосином обдувают сжа-

тым воздухом под давлением 0,3...0,4 МПа, ускоряя проникновение керосина в полости дефектов.

Метод керосиновой пробы применяется для контроля сварных соединений наливных емкостей, нефтяных резервуаров, цистерн и других конструкций, доступ к которым возможен с обеих сторон.

Другие капиллярные методы течеискания основаны на использовании пенетрантов — красок (цветной метод) или люминофоров (люминесцентный метод).

Компрессионные методы. Данные методы контроля основаны на создании в испытуемом объекте (замкнутой системе) избыточного давления пробного вещества (жидкости или газа) и регистрации на лицевой поверхности сварного шва участков течи. В зависимости от типа пробного вещества различают жидкостные (гидравлические) и газовые методы течеискания.

Жидкостные методы течеискания применяют для проверки различных замкнутых систем (например, паровых котлов, нефтехимической аппаратуры и др.), работающих под давлением. Контролируемый объект заполняют рабочей жидкостью или водой, герметизируют, с помощью гидравлического насоса создают в нем избыточное давление и некоторое время выдерживают под этим давлением. Затем производят визуальный осмотр наружной поверхности объекта. Признаком наличия дефекта служит появление капель жидкости на поверхности или ее отпотевание. Жидкостные методы контроля позволяют выявлять течи диаметром около 1 мкм.

Гидравлическим испытаниям должен предшествовать радиационный или ультразвуковой контроль, если он предусмотрен техническими условиями.

К жидкостным относится люминесцентно-гидравлический метод контроля, при проведении которого в состав пробного вещества добавляют люминофор, а лицевую поверхность сварного соединения осматривают при воздействии на нее ультрафиолетовым излучением.

Иногда при использовании жидкостных методов контроля для лучшей выявляемости дефектов на лицевую поверхность соединения наносят индикаторное покрытие, в состав которого входит люминофор, например динариевая соль флуоресцеина, люминесцирующая при попадании на нее воды, и сорбент (крахмал), удерживающий воду в течение длительного времени. Местоположение сквозного дефекта определяется по зеленому свечению участка индикаторного покрытия при воздействии на него ультрафиолетовым излучением.

При проведении гидравлических испытаний важно правильно выбрать давление, создаваемое в сварной конструкции. Обычно испытания на герметичность совмещают с гидравлическими испытаниями конструкции на прочность и производят их при давлении, в 1,1—1,5 раза превышающем рабочее. При контроле сварных соединений в условиях серийного производства, например спирально- и продольно-шовных труб для газонефтепроводов, применяются специальные испытательные стенды.

Гидравлический метод иногда используется и для испытания открытых сосудов, например отстойников. В этих случаях их заполняют жидкостью, а затем остуживают и осматривают лицевые поверхности сварных швов.

Газовые методы течеискания обладают большей чувствительностью, чем жидкостные, поскольку газообразные пробные вещества значительно легче проходят через мелкие сквозные дефекты. Газовые методы контроля применяются исключительно для испытания замкнутых сосудов. Самый простой из газовых методов контроля — пузырьковый (рис. 3.41) — заключается в погружении сварной конструкции в емкость с водой, в которой с помощью воздуха создано избыточное давление. Участки течи выявляют по выделяющимся пузырькам воздуха.

Если размеры сварной конструкции не позволяют поместить ее в емкость, то лицевую поверхность сварного шва покрывают пенообразующим веществом (мыльным раствором) и участки течи фиксируют по мыльным пузырькам. Основой пенного индикатора служат поверхностно-активные вещества («Лотос», «Ладога» и др.) и также влагоудерживающий компонент — глицерин (до 90 %) с хромпиком (0,01 %). Пузырьковый метод контроля позволяет выявлять мелкие течи диаметром до 1 мкм.

Химические компрессионные методы контроля герметичности основаны на применении для индикации течей химических реакций пробного вещества с индикаторным слоем, нанесенным на лицевую поверхность проверяемого шва.

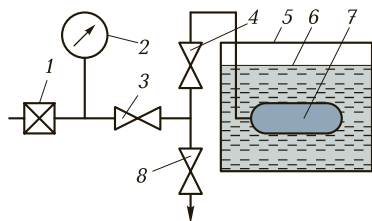


Рис. 3.41. Схема пузырькового метода контроля течеисканием:

1 — редукционный клапан; 2 — манометр; 3 — нагнетательный клапан; 4 — предохранительный клапан; 5 — бак; 6 — жидкость; 7 — контролируемый объект; 8 — вентиль сброса давления

К компрессионным относится метод контроля герметичности с помощью воздушно-аммиачной смеси, заключающийся в том, чтолицевую поверхность шва испытываемого объекта покрывают бумажной лентой, смоченной 5%-ным раствором нитрата ртути или раствором фенолфталеина, а в испытываемый объект подают смесь воздуха с 1...10 % аммиака. Бумажную ленту выдерживают в этом положении в течение 1...15 мин. Аммиак, проникая через сквозные дефекты, оставляет на бумаге в местах течи черные или фиолетовые пятна.

Для покрытия лицевой поверхности шва вместо бумажной ленты можно использовать индикаторную массу следующего состава, выраженного в массовых долях: дистиллят — 40; агар-агар — 1; фенолфталеин — 0,15; безводная сода — 0,01. В этом случае участки течи фиксируются как бесцветные пятна на малиновом фоне массы.

Весьма технологичен газолюминесцентный метод контроля герметичности, заключающийся в следующем. Емкость заполняют обессоленной водой, насыщенной пробным газом (например, CO_2 и аммиаком). На лицевую поверхность проверяемого объекта наносят индикаторную адсорбирующую обмазку, содержащую химические компоненты, которые при контакте с пробным газом образуют новый индикатор, флуоресцирующий при воздействии ультрафиолетового излучения.

Наиболее простым из компрессионных методов контроля является манометрический, который заключается в регистрации изменения давления внутри сосуда, происходящего в случае его негерметичности, с помощью манометров в течение определенного промежутка времени. Данный метод обеспечивает приблизительную оценку герметичности, но зато может применяться для периодической проверки конструкций, работающих под давлением, без каких-либо дополнительных операций.

На практике возможны течи различных сварных конструкций, которые значительно меньше выявляемых указанными ранее методами. Их обнаруживают галогенным методом течеискания. В качестве пробного газа в этом случае используют фреон-12 (химическое соединение на основе фтора), обладающий высокой проникающей способностью. Индикатором здесь служит электронный прибор с платиновым диодом в качестве чувствительного элемента, анод и коллектор которого, разделенные воздушным или вакуумным промежутком, нагреваются до 800...900 °С. При попадании в этот промежуток молекул фреона электрический ток, протекающий через диод, резко возрастает, что фиксируется электронным

стрелочным прибором. Промышленность выпускает переносные галогенные течеискатели моделей ГТИ-6 и БГТИ-5, имеющие некоторые конструктивные различия.

Существует и более чувствительный способ индикации фреона — по продуктам его распада в атмосферных условиях.

В комплекте с течеискателем БГТИ-5 поставляется измерительный блок со стрелочным прибором и звуковым индикатором — телефоном. Помимо основного атмосферного датчика в нем имеются вакуумный датчик, выносной обдуватель с регулируемым потоком и регистрирующий блок.

Течеискатель БГТИ-5 с автономным питанием от аккумуляторной батареи удобен при испытании сварных конструкций большой протяженности в монтажных и полевых условиях.

На практике при галогенном методе контроля герметичности (рис. 3.42) обычно используется щуп течеискателя. В контролируемом объекте создают небольшое избыточное давление фреона-12, и щупом течеискателя производят обследование его наружной поверхности вдоль всего шва. Скорость перемещения щупа составляет 10...25 мм/с.

При гелиевом течеискании пробным веществом служит гелий — газ, обладающий малой молекулярной массой и хорошей способностью проникать через мельчайшие каналы. Индикация газа производится масс-спектрометром. Гелий, прошедший через сквозные каналы в испытуемом объекте, попадает в камеру масс-спектрометра, в которой создан высокий вакуум. Камера масс-спектрометра, находящаяся в магнитном поле, имеет катод, ионизатор, диафрагму и коллектор, помещенные в латунный корпус.

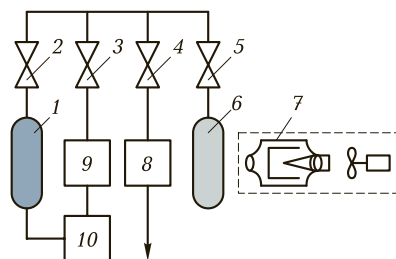


Рис. 3.42. Схема галогенного метода контроля герметичности с применением щупа и заполнением контролируемого объекта чистым фреоном:

1 — баллон с фреоном; 2...5 — вентили; 6 — контролируемый объект; 7 — щуп галогенного течеискателя с атмосферным датчиком; 8 — механический вакуумный насос; 9 — компрессор; 10 — конденсатор

Молекулы газа, поступающие в масс-спектрометр, под воздействием потока электронов, эмитируемых раскаленным катодом, ионизируются и превращаются в положительные ионы с зарядом, равным заряду электрона. Ионы, ускоряемые электрическим полем при напряжении 300...400 В, под воздействием магнитного поля приобретают круговые траектории движения, но в зависимости от массы с разными радиусами.

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 регистрировать ничтожно малое число атомов гелия, прошедших через каналы контролируемого объекта.

Выпускается несколько типов масс-спектрометрических гелиевых течеискателей, основными элементами которых являются вакуумная система, масс-спектрометр и электронный блок.

Наиболее широко применяются течеискатели передвижного типа ПТИ-7А. Их вакуумная система состоит из механического (ВН-461М) и паромасляного (НВО-40М) насосов, ловушки, охлаждаемой жидким азотом, и вентилях. Ловушка препятствует прохождению паров масла из насоса в камеру масс-спектрометра.

В настоящее время все более широкое распространение получают передвижные гелиевые течеискатели ПТИ-10, чувствительность которых на порядок выше. Они снабжены электронным автоматическим потенциометром и калиброванными гелиевыми течами (образцами), служащими для настройки.

Весьма перспективны инфракрасные газовые течеискатели, в которых реализован метод индикации газов, основанный на избирательном поглощении инфракрасного излучения анализируемого компонента. Наличие специфических особенностей инфракрасных спектров поглощения разных газов и использование селективных приемников обеспечивает высокие чувствительность и избирательность данного метода. Он также весьма универсален, так как позволяет определять концентрации паров многих веществ и газов. Выполнение измерений этим методом возможно в широких диапазонах концентраций паров с помощью сравнительно простых малогабаритных приборов (ИГТ-1 и -2), быстроедействие которых составляет несколько секунд.

Катарометрический (газоаналитический) течеискатель ТП-7102 фиксирует утечку в атмосферу пробных газов (водорода, гелия) по изменению теплопроводности индикаторной среды. Работает он на основе схемы моста Уитстона, в два плеча которого включены

два чувствительных элемента, расположенных в датчике течеискателя. Один из них выявляет утечку, а второй — служит элементом сравнения и окружается газовой средой неизменного состава.

При высоких избыточных давлениях в контролируемом объекте и истечении газов через дефекты возникают ультразвуковые колебания, регистрируемые соответствующими приборами. Ультразвуковые течеискатели имеют относительно невысокую чувствительность, однако они используются для выявления участков течи в магистральных газопроводах.

Вакуумный метод. Данный метод течеискания основан на регистрации падения вакуума в замкнутом объеме контролируемого объекта или на индикации молекул пробного газа, появившихся в этом объеме. На чувствительность вакуумного метода существенно влияет степень очистки полости объекта от загрязнений, масел и т.п. Следовательно, поверхность объекта перед контролем необходимо многократно промыть растворителями и протереть, а в отдельных случаях отшлифовать до блеска.

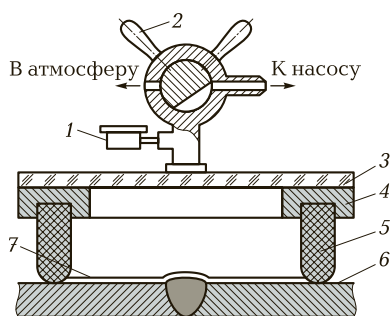
В зависимости от конструкции и конфигурации сварного узла применяют несколько схем контроля герметичности вакуумным методом. Наибольшее распространение получили две схемы контроля: с использованием гелиевой камеры и с использованием вакуумных присосок.

В первой схеме испытуемый объект помещают в заполненную гелием камеру, вакуумируют до необходимого остаточного давления и фиксируют прибором появление ионов гелия внутри объекта при негерметичности последнего. Во второй схеме на наружную поверхность сварного соединения объекта, заполненного гелием под некоторым избыточным давлением, накладывают вакуумную камеру, в которой создают разрежение (рис. 3.43). Появление в камере ионов гелия, сопровождающееся образованием вздутий в пленке пенообразующего вещества, свидетельствует о наличии течи.

Важное значение имеет выявление зарождающихся микротрещин с крайне малой шириной. Такие микродефекты можно обнаружить с помощью газосорбционного метода. В этом случае сварное соединение помещают в вакуумную камеру для того, чтобы освободить полости поверхностных дефектов от молекул воздуха. Затем в камеру вводят радиоактивный газ ^{85}Kr , являющийся источником β -излучения, молекулы которого адсорбируются поверхностными дефектами. Далее сварное соединение извлекают из камеры и на его поверхность накладывают детектор излучения (например, высокочувствительную рентгеновскую или фотогра-

Рис. 3.43. Схема контроля герметичности с помощью вакуумной камеры:

1 — вакуумметр; 2 — трехходовой кран (в двух положениях); 3 — иллюминатор из оргстекла; 4 — металлическая рамка; 5 — уплотнитель (присоска) из губчатой резины; 6 — контролируемое сварное соединение; 7 — пленка пенообразующего вещества



фическую пленку). На участках скопления радиоактивного газа, содержащих дефекты, пленка засвечивается, и после ее фотообработки на снимке получается изображение поверхностных дефектов.

В перспективе возможно использование этого метода для контроля протяженных сварных соединений крупногабаритных конструкций с применением локальных вакуумных камер.

Перспективы совершенствования методов течеискания. Выбор схемы контроля с помощью течеискателя зависит от класса герметичности сварной конструкции, устанавливаемого ее разработчиком. Например, в атомной энергетике в соответствии с условиями эксплуатации и возможностями ремонта все оборудование подразделяют на пять классов герметичности (табл. 3.8). Каждому из этих классов соответствуют определенные методы испытаний в зависимости от их чувствительности. К классу I относятся ответственные конструкции, надежность которых должна быть очень высокой в силу специфических особенностей их эксплуатации.

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.

Наиболее простую конструкцию имеют манометрические установки. Их применение облегчается при наличии в заводских условиях магистрали сжатого воздуха и возможности использования недефицитной стандартной пневмоаппаратуры управления. Эти установки получили наиболее широкое распространение в пищевой промышленности, автомобиле- и машиностроении.

Таблица 3.8. Классы герметичности изделий в зависимости от диапазонов выявляемых натеканий и методов их выявления

Класс герметичности	Диапазон выявляемых натеканий воздуха		Метод течеискания	Пробное вещество	Проявление дефекта
	см ³ /год	м ³ ·Па/с			
I	0,02...0,20	$3,75 \cdot 10^{-3} \dots 3,75 \cdot 10^{-2}$	Газовый гелиевый	Гелий	Сигнал масс-спектрометра
II	0,2...0,4	$3,75 \cdot 10^{-2} \dots 7,50 \cdot 10^{-2}$	То же	»	То же
III	0,4...0,8	0,075...0,150	Люминесцентно-гидравлический	Вода, пенетрант	Течь, свечение
IV	0,8...850	0,15...160	Галогенный, цветной и люминесцентный капиллярный	Фреоновоздушная смесь, пенетрант	Сигнал прибора, пятна, свечение
V	Более 850	Более 160	Керосиновая проба, пузырьковый, опрессовка воздухом	Керосин, воздух, азот	Пятна на меловом фоне, пузырьки

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каковы причины рассеяния ионизирующего излучения?
2. На каком физическом эффекте основано выявление дефектов радиографическим методом?
3. Какие факторы влияют на чувствительность радиографического метода контроля?
4. Назовите основные типы рентгеновских пленок.
5. Какие эталоны используются при просвечивании?
6. Каковы особенности распространения ультразвуковых волн в твердых телах?
7. Каковы основные элементы конструкции ультразвукового дефектоскопа?
8. Что представляет собой эквивалентный размер дефекта?
9. Какова физическая сущность магнитных методов выявления дефектов?
10. Какие факторы влияют на чувствительность магнитных методов контроля?
11. Какие схемы намагничивания используются при магнитных методах контроля?
12. Для каких объектов применимы методы электромагнитного контроля?
13. На каком физическом явлении основаны методы капиллярной дефектоскопии?
14. Каковы основные технологические операции капиллярной дефектоскопии?
15. Какое оборудование необходимо для капиллярной дефектоскопии?
16. Назовите основные методы контроля герметичности и сравните чувствительность этих методов.

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА С РАЗРУШЕНИЕМ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ

4.1. МЕХАНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ

Механические испытания определяют прочность и надежность сварных соединений. Основные методы определения механических свойств сварных соединений и их отдельных зон устанавливает ГОСТ 6996—66, предусматривающий статические и ударные испытания при нормальных, а в некоторых случаях и 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 проводятся испытания на устойчивость к хрупкому разрушению и усталостную прочность. По характеру нагружения различают механические испытания:

- статические — при которых сила нагружения плавно возрастает или длительное время остается постоянной;
- динамические — при которых сила нагружения возрастает практически почти мгновенно и действует короткое время;
- усталостные — при которых нагрузка многократно (при числе циклов от десятков до миллионов) изменяется по значению и знаку.

Статические испытания. Стыковые сварные соединения подвергаются следующим статическим испытаниям: на растяжение, изгиб, ползучесть, твердость и т. д.

Испытание на растяжение производится в целях определения прочности и пластичности сварного соединения. Для оценки временного сопротивления σ_b сварного соединения при растяжении (напряжения, отвечающего наибольшей нагрузке, предшествующей разрушению образца) используют:

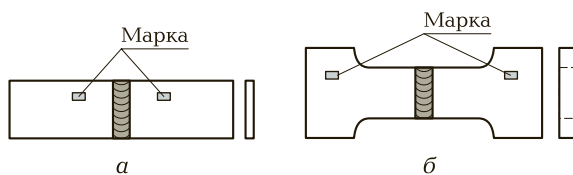


Рис. 4.1. Образцы для определения относительной прочности шва при толщине основного металла менее 3 мм (а) и более 3 мм (б)

- образцы с валиком шва на лицевой поверхности (рис. 4.1), которые позволяют найти относительное значение $\sigma_{\text{в}}$ шва в сравнении с $\sigma_{\text{в}}$ основного металла;
- образцы с валиком шва, снятым заподлицо с основным металлом, и специально выполненной выточкой шва, предопределяющей место разрушения (рис. 4.2), которые позволяют определить абсолютное значение $\sigma_{\text{в}}$.

Если прочность сварного соединения меньше прочности основного металла, то допускается использование для испытаний плоских и круглых образцов с одинаковым сечением. Причем длина захватной части таких образцов может выбираться в зависимости от конструкции испытательной машины, а изменение других их размеров недопустимо.

Для испытаний участков сварного соединения используются круглые образцы с рабочей частью диаметром 3...10 мм, вырезанные вдоль оси сварного шва в соответствующей зоне соединения при многослойной сварке.

При испытании на растяжение определяют условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, временное сопротивление $\sigma_{\text{в}}$ и относительное удлинение δ .

Под условным пределом текучести понимают напряжение, при котором деформация образца составляет 0,2 % от его первоначальной расчетной длины.

Относительное удлинение образца представляет собой процентное отношение абсолютного остаточного удлинения к первоначальной расчетной длине образца.

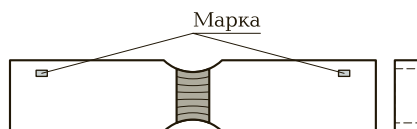


Рис. 4.2. Образец для определения абсолютной прочности шва

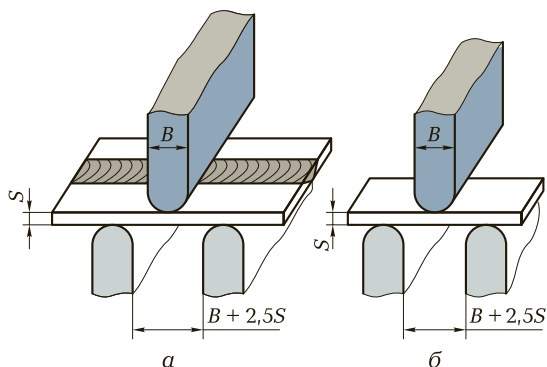


Рис. 4.3. Схемы испытаний образцов на изгиб при продольном (а) и поперечном (б) расположении шва:

B — ширина пуансона; S — толщина образца

Испытание на изгиб производится для определения пластичности сварного соединения в целом. Пластичность стыкового соединения при изгибе определяется по углу изгиба образца до образования первой трещины на любом его участке.

Схемы испытаний образцов на изгиб при продольном и поперечном расположении шва приведены на рис. 4.3, а формы образцов для испытаний — на рис. 4.4.

На практике часто вместо плоских образцов используют трубчатые. При испытаниях односторонних сварных швов в растянутой зоне должен располагаться верхний слой металла, а при многослойной сварке — шов, сваренный последним.

Для ответственных сварных соединений считается удовлетворительным угол изгиба $120...180^\circ$ без образования трещин. При отсутствии трещин испытание заканчивается изгибом образца до достижения параллельности его сторон.

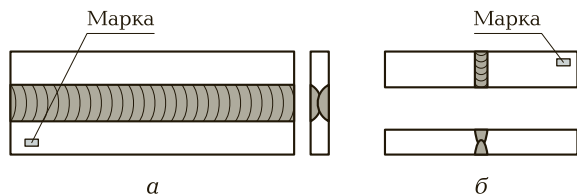


Рис. 4.4. Формы образцов для испытаний на изгиб с продольным (а) и поперечным (б) швами

Динамические испытания. К динамическим относятся испытания на ударный изгиб и усталость (выносливость).

Испытания на ударный изгиб заключаются в определении ударной вязкости сварного соединения при нормальной, пониженной и повышенной температурах, обусловленных условиями его работы. Образцы для таких испытаний (рис. 4.5) изготавливают в соответствии с ГОСТ 6996—66. Испытания проводятся на специальных образцах с надрезом, который может располагаться по оси шва, линии сплавления или в зоне термического влияния со стороны раскрытия шва. Место расположения надреза зависит от цели испытания. При испытании металла шва или основного металла надрез можно делать с любой стороны образца.

Испытания производятся на маятниковых копрах с различной предельной энергией. Для применения в лабораториях строительно-монтажных организаций рекомендуется маятниковый копер МК-30А, имеющий 15 ступеней запаса энергии и 17,5 тыс. ч полного технического ресурса. После испытания сварного шва исследуют структуру излома для определения дефектов. Ударная вязкость определяется как отношение работы, затраченной на излом образца, к площади его поперечного сечения в месте надреза до испытания.

Испытаниями на усталость (выносливость) определяют устойчивость металла к воздействию переменных нагрузок при изгибе, растяжении и кручении. Переменные нагрузки создаются при симметричном, асимметричном и пульсирующем циклах нагружения.

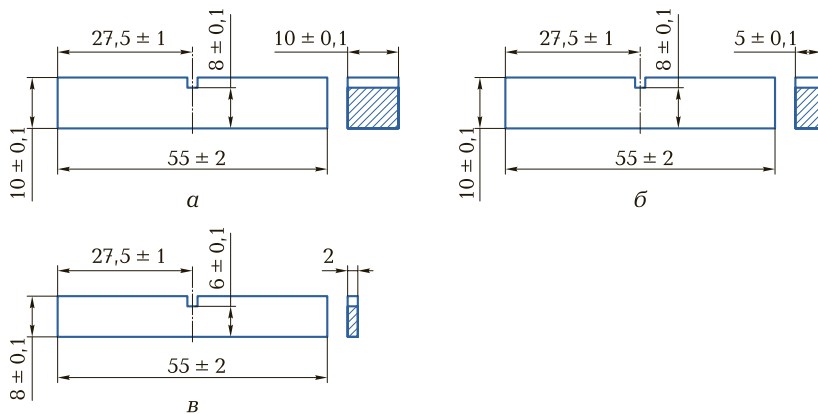


Рис. 4.5. Образцы разной толщины, используемые для испытаний на ударный изгиб:

a — 10 мм и более; *б* — 5...10 мм; *в* — 2...5 мм

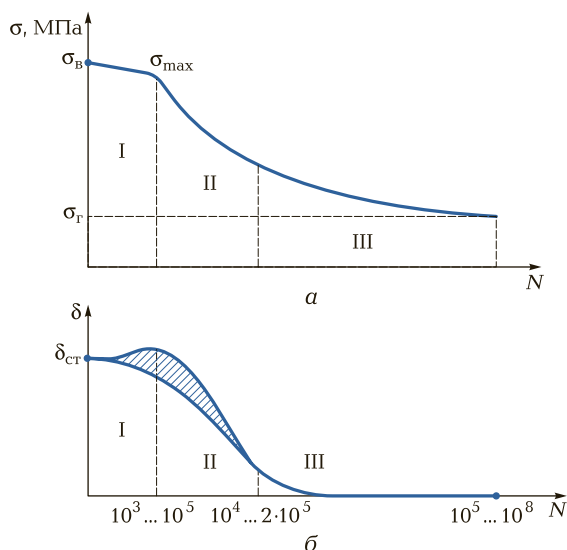


Рис. 4.6. Изменение действующих напряжений (а) и относительного удлинения (б) образца из металла в зависимости от числа циклов до разрушения

Испытаниям в условиях осевого нагружения подвергаются цилиндрические или плоские образцы специальной формы и определенных размеров, вырезанные поперек сварного соединения. При испытаниях определяют предел выносливости образца. Количественной оценкой усталостной прочности является число циклов, которое выдержал сварной образец до разрушения.

Типичные зависимости для металлов между уровнем действующих циклических напряжений σ_{\max} , удлинением после разрушения δ и числом N циклов изменения напряжений до разрушения образца, построенные по результатам испытаний при пульсирующем цикле, т. е. когда нагрузка изменяется от нуля до максимального растягивающего значения, показаны на рис. 4.6.

На кривой зависимости между действующими напряжениями и числом циклов до разрушения (рис. 4.6, а) можно выделить три участка. На участке I, называемом участком квазистатического разрушения, происходит направленное пластическое деформирование, и разрушение образца здесь соответствует разрушению при однократном приложении нагрузки. При этом относительное удлинение образца (рис. 4.6, б) равно относительному удлинению при статическом разрушении $\delta_{\text{ст}}$, а в некоторых случаях превышает

ет его, и излом ничем не отличается от излома при статическом разрушении металлов.

На участке II имеет место малоцикловая усталость материала, и разрушение образца происходит вследствие возникновения и развития усталостной трещины, сопровождающейся заметными пластическими деформациями.

Участок III — это участок многоциклового усталостного разрушения материала при почти полном отсутствии остаточного удлинения образца. В некоторых случаях этот участок на кривой $\sigma_{\max} = f(N)$ переходит в горизонтальную линию, соответствующую напряжению σ_r , что свидетельствует об отсутствии разрушений при напряжениях ниже этого значения, даже если число циклов нагружения существенно увеличивается.

Число циклов нагружения, при котором имеет место переход от одного участка зависимости $\sigma_{\max} = f(N)$ к другому, для различных материалов и режимов нагружения различное.

Исследование разрушения металлов в условиях многоциклового изменения нагрузки производится, как правило, при синусоидальном цикле нагружения. При этом различают симметричный и асимметричные циклы нагружения. При симметричном нагружении (рис. 4.7, а) среднее напряжение цикла $\sigma_{\text{ср}}$ равно нулю, а изменяется напряжение от минимальных значений сжатия σ_{min} до максимальных напряжений растяжения σ_{max} . При асимметричных циклах нагружения (рис. 4.7, б) среднее напряжение не равно нулю, и оно может иметь любые значения как в области растяжения, так и в области сжатия.

Результаты исследования усталости металлов представляются в виде кривых усталости — графиков, характеризующих зависи-

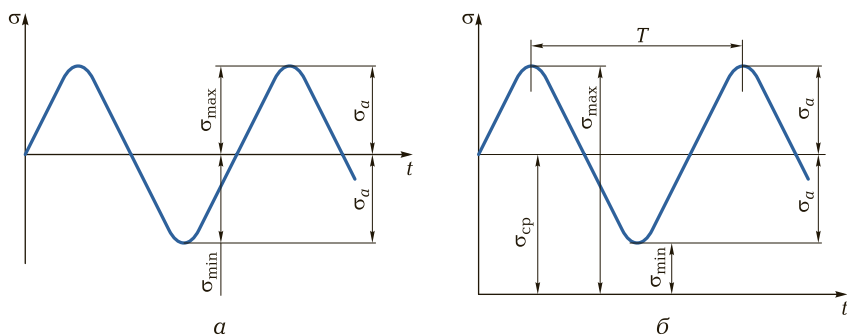


Рис. 4.7. Синусоидальные циклы нагружения образцов:

а — симметричный; б — асимметричный

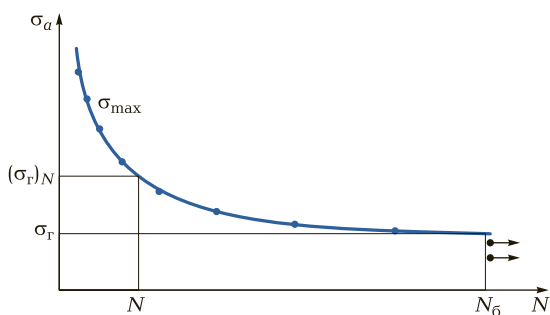


Рис. 4.8. Типовая кривая усталости для образцов металлов:

N_6 — базовое число циклов

мость между максимальными, или амплитудными, напряжениями (деформациями) и числом циклов нагружения образца до разрушения, которые были получены при испытании партии одинаковых образцов при одинаковом среднем напряжении (деформации) цикла или при одинаковом коэффициенте его асимметрии (рис. 4.8).

Помимо рассмотренных видов испытаний, предусмотренных ГОСТ 6996—66, иногда необходимо проведение дополнительных испытаний для получения других прочностных характеристик. Обычно при этом стремятся создать условия нагружения и работы образцов, идентичные тем, на которые рассчитана работа конструкции. Например, это дополнительное испытание особых образцов, в рабочих сечениях которых тем или иным способом создается плоское напряженное поле, характерное для металла сосудов, работающих под давлением. В этом случае образцы представляют собой плоские или круглые стержни с захватами на концах и специальными проточками в центральной части, которые обеспечивают получение плоской схемы напряжений при нагружении.

Однако в настоящее время чаще применяют схему испытаний с разрушением основного металла или сварных соединений. Критериями прочности в этом случае являются максимальное давление и утончение образца.

Измерение твердости. Для установления изменения структуры металла шва и околошовной зоны, а также для оценки степени закалки зон сварного соединения и неоднородности его механических свойств измеряют твердость сварных швов. Обычно твердость определяют на шлифах для металлографического анализа тремя способами:

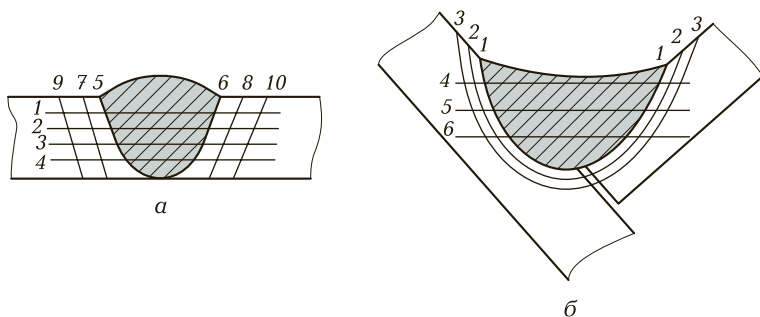


Рис. 4.9. Схемы (а, б) измерения твердости сварных швов (измерения производятся в точках пересечений линий 1... 10)

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 стыкового шва производят в двух направлениях: по его продольной оси и от центра к основному металлу. Образцы для испытаний вырезаются таким образом, чтобы в них имелись все участки сварного соединения: основной металл, металл шва и зоны термического влияния, и на этих трех участках определяют твердость. Измерения производятся на поперечном сечении образца в двух взаимно-перпендикулярных направлениях: по оси шва и вдоль линий, параллельных верхней и нижней поверхностям листа (рис. 4.9). У стыковых соединений толщиной до 3 мм твердость может измеряться на их наружной поверхности при снятом усилении шва.

4.2. МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Металлографические исследования необходимы для определения структуры сварного соединения. Исследуя структуру металла сварного соединения, можно установить правильность выбора режимов сварки, типа электродов, флюсов и присадочного металла, а также выявить дефекты шва и установить причины их образования.

Если исходить из присущей сварке неоднородности структуры соединений, их полный металлографический анализ должен включать в себя исследования макро- и микроструктуры металла шва, зоны термического влияния и структуры основного металла.

Исследование макроструктуры сварного соединения. Макроструктурный анализ является методом предварительной оценки качества сварных соединений, получаемых тем или иным способом. Макроструктура сварных соединений исследуется невооруженным глазом или при 30-кратном увеличении на поверхности макрошлифов, вырезанных и приготовленных из этих соединений. Макроструктуру можно изучать и в изломах сварных образцов после механических испытаний.

Исследованием макроструктуры можно выявить форму и размеры шва, его строение, наличие в сварном соединении и основном металле различных дефектов: непроваров, трещин, шлаковых включений, пор и др.

При исследовании макроструктуры сварных швов из контролируемого сварного соединения в плоскости поперечного сечения шва вырезают темплеты для изготовления шлифов. Иногда для определения характера кристаллизации шва в сварочной ванне шлиф изготавливают из темплета, вырезанного вдоль его продольной оси.

Поверхность шлифа должна включать в себя полное сечение сварного шва. Для удаления участков, соответствующих неустановившемуся режиму сварки, образцы для шлифов вырезают на расстоянии 20...30 мм от начала или конца шва.

При контроле макроструктуры крупного объекта от него сначала отбирают пробу.

Проба — это часть металлопродукции, предназначенная для изготовления заготовок для образцов.

Из пробы вырезают заготовку, или темплет.

Заготовка (темплет) — это часть пробы, обработанная или не обработанная механически, которая подвергается в случае необходимости термической обработке и предназначается для изготовления образцов.

Образец — это часть заготовки определенного размера, обработанная или не обработанная механически и подготовленная для испытаний.

При этом если контролируемый объект, например пруток, имеет средние размеры (диаметр 30 мм), то заготовкой служит проба. В случае если контролируемый объект имеет размеры, сопоставимые с размером образца, то образцом может служить заготовка.

Пробы, заготовки и образцы отбирают из наиболее характерных зон металлопродукции. В литом металле различия структуры вызваны разными условиями отвода теплоты по сечению и высоте отливки, а в деформированном металле — разной степенью деформации внутренних и внешних слоев металла.

Для исследования сварного соединения с неоднородной по сечению структурой используют только поперечные шлифы (плоскости которых перпендикулярны продольной оси соединения), поскольку продольные шлифы (плоскости которых параллельны оси) в этом случае могут дать неправильное представление о структуре соединения.

Пробы и заготовки отбирают огневом (газовой резкой) или холодным (на металлорежущих станках или гильотинных ножницах) способом.

При отборе проб и заготовок, а также при изготовлении образцов должны быть приняты все меры к предохранению их от нагрева и наклепа (упрочнения металла под действием пластической деформации), которые могут привести к искажению структуры и изменению свойств.

При вырезке проб и заготовок огневом способом предусматривается припуск от линии реза до края образца 15...20 мм, а при использовании холодного способа этот припуск зависит от толщины заготовки: для заготовок толщиной до 4; 4...20; 20...35 мм и более этот припуск составляет соответственно 5; 10; 15 и 20 мм.

Размеры и форма образца сварного соединения определяются задачей исследования, габаритными размерами и конфигурацией исследуемого объекта. Обычно вырезают образцы цилиндрической или прямоугольной формы высотой 15...20 мм с площадью изучаемой поверхности (шлифа) 2...3 см². Чтобы не повредить руки исследователей, с образца убирают заусенцы, а острые края опиливают напильником.

Исследуемую поверхность темплета из твердых металлов (стали) перед травлением выравнивают и шлифуют, а поверхности мягких материалов опиливают напильником и затем шлифуют наждачной бумагой.

Подготовка образцов к шлифованию состоит в следующем. Для удобства приготовления шлифов из образцов, размеры которых значительно меньше общепринятых, применяют различные приспособления. Образцы из тонколистового материала закрепляют в специальных зажимах. Самый простой зажим состоит из двух металлических (из коррозионно-стойкой стали) прямоугольных пластин, по краям которых имеются отверстия под болты. Несколько

образцов собирают в пакет, помещают между пластинами и стягиваемыми болтами.

Образцы округлой формы устанавливают в металлические оправки и заливают легкоплавким веществом.

В тех случаях, когда для дальнейшего исследования образцы не требуется вынимать из оправок, их можно заливать пластмассой (бакелитом, стиракрилом III, формваром и др.) или запрессовывать в нее. Запрессовка в бакелит и формвар производится на прессе соответственно под давлением 7...50 МПа (70...500 кгс/см²) и 20 МПа (200 кгс/см²) при температурах 140 и 220 °С. Стиракрил III при добавлении отвердителя полимеризуется при комнатной температуре в течение 30...80 мин.

Абразивные материалы представляют собой измельченные породы: природные (алмаз, корунд, наждак, гранат, кварц, кремль, крокус — оксид железа и др.) и искусственные (синтетический алмаз, эльбор — нитрид бора, электрокорунд, карбиды кремния и бора, оксид алюминия и др.), которые применяются наряду с абразивными инструментами для подготовки поверхности, шлифования и полирования образцов.

При изготовлении абразивных материалов породы дробят на отдельные зерна. Каждое зерно представляет собой кристаллический осколок твердого материала и является как бы микрорезцом, а ребра зерен — режущей кромкой. При движении абразивного материала по поверхности образца режущие кромки зерен снимают слой металла, причем чем крупнее зерно, тем более толстый слой металла удаляется за один проход.

Готовые абразивные материалы содержат зерна разных размеров и подразделяются по этому признаку на следующие фракции: предельная, крупная, основная, комплексная и мелкая. Абразивный материал характеризуется зернистостью (ГОСТ 3647—80), определяемой размерами зерен основной фракции (табл. 4.1) и содержанием этой фракции (табл. 4.2).

Например, при зернистости 50 размер зерен основной фракции абразивного материала составляет 630...500 мкм.

В зависимости от размеров зерен абразивные материалы подразделяются на шлифзерно, шлифпорошки, микропорошки и тонкие микропорошки. Абразивные материалы с зернистостью 200...16 относятся к шлифзерну, 12...3 — к шлифпорошкам, М63...М14 — к микропорошкам, М10...М5 — к тонким микропорошкам.

Приготовление макро- и микрошлифов включает в себя следующие последовательные процессы: подготовка плоской поверхности, шлифование и полирование.

Таблица 4.1. Соотношение зернистости и размеров зерен основной фракции абразивного материала

Зернистость	Размер зерен основной фракции, мкм	Зернистость	Размер зерен основной фракции, мкм	Зернистость	Размер зерен основной фракции, мкм
200	2 500 ... 2 000	20	250 ... 200	M50	50 ... 40
160	2 000 ... 1 600	16	200 ... 160	M40	40 ... 28
125	1 600 ... 1 250	12	160 ... 125	M28	28 ... 20
100	1 250 ... 1 000	10	125 ... 100	M20	20 ... 14
80	1 000 ... 800	8	100 ... 80	M14	14 ... 10
63	800 ... 630	6	80 ... 63	M10	10 ... 7
50	630 ... 500	5	63 ... 50	M7	7 ... 5
40	500 ... 400	4	50 ... 40	M5	5 ... 3
32	400 ... 315	3	40 ... 28		
25	315 ... 250	M63	63 ... 50		

Шлифование и полирование образцов можно осуществлять абразивным материалом (порошком, пастой) и абразивным инструментом (шлифовальным кругом, бруском, шлифовальной бумагой).

Маркировка всех видов шлифовальной бумаги производится в соответствии с ГОСТ 5009—82, 6456—82, 10054—82 и 13344—82, например: водостойкая 230 × 280 63С М50-ВА ГОСТ 10054—82.

Таблица 4.2. Соотношение зернистости и содержания основной фракции в абразивном материале

Индекс зернистости	Содержание основной фракции, %, при зернистости							
	200 ... 32	25 ... 16	12 ... 8	6 ... 4	3	M63 ... M28	M20 ... M14	M10 ... M5
В	—	—	—	—	—	60	60	55
П	55	55	55	55	—	50	50	45
Н	45	43	45	40	40	45	40	40
А	41	39	41	36	36	42	37	37

Примечание. Индексы зернистости В, П, Н и А соответствуют высокому, повышенному, низкому и допустимому содержанию основной фракции.

Для шлифования и полирования металлов в качестве абразивного материала используются и специальные пасты. Наиболее широко применяются пасты ГОИ и хромоалюминиевые. Пасты состоят из порошков, жиров, связующих и поверхностно-активных веществ, оказывающих химическое воздействие на поверхность обрабатываемого металла. В зависимости от размеров абразивного зерна пасты подразделяются на грубые, средние и тонкие. Составы паст, используемых для шлифования и полирования металлов, приведены в табл. 4.3.

Шлифование и полирование с использованием паст представляют собой не просто механическую, а химико-механическую обработку. При обработке пастой на мельчайших выступах поверхности образуются пленки сульфидов или оксидов. При трении эти пленки легко срываются с выступающих частиц металла, и поверхность образца выравнивается.

Если шлифование производится ручным способом, паста наносится равномерным слоем на стеклянную плиту, предварительно смоченную несколькими каплями керосина. Обработка пастой продолжается до полного удаления имеющихся рисок. В процессе обработки образца паста портится, т.е. чернеет. Отработанную пасту снимают тканью, смачивая плиту керосином. Для каждого вида пасты (грубой, средней и тонкой) предусматривается отдельная плита.

При шлифовании на станке паста наносится равномерно на хорошо отшлифованную поверхность металлического круга, слегка увлажненную керосином.

Таблица 4.3. Составы, %, разных паст для шлифования и полирования металлов

Компонент	Пасты ГОИ			Хромоалюминиевые пасты		
	Тонкая	Средняя	Грубая	Тонкая	Средняя	Грубая
Оксид хрома	72	76	86	32	35	37
Оксид алюминия	—	—	—	32	35	37
Стеарин	24	20	12	30	24	20
Олеиновая кислота	1,8	1,8	—	3	3	3
Керосин	2	2	2	2	2	2
Сода	0,2	0,2	—	1	1	1

При полировании паста наносится на ткань (сукно, фетр), слегка смоченную керосином. Процесс полирования продолжается в течение 3...5 мин.

Шлифование торцевой поверхности образца осуществляют вращающимся шлифовальным кругом или напильником. При большой частоте вращения круга обработка поверхности выполняется с легким нажимом и применением охлаждения. Перегрев образца и сильное механическое воздействие могут вызвать изменение его микроструктуры, что приведет к получению ошибочного результата исследования. Обработанная поверхность должна быть плоской, без завалов.

Существуют два способа шлифования металлографических образцов — ручной и механический.

При ручном способе шлифования на жесткую плоскую подкладку (толстое стекло или лист металла), расположенную горизонтально, помещают шлифовальную бумагу, а на нее торцевой плоскостью устанавливают образец и шлифуют его с легким нажимом. Когда на шлифе останутся риски только от бумаги, шлифование прерывают.

Шлифовальную бумагу снимают с подкладки, и стряхивают с нее выкрошившиеся абразивные зерна и частицы металла. С подкладки и шлифа абразивные зерна удаляют чистой мягкой тканью или ватным тампоном. После этого операцию шлифования повторяют на шлифовальной бумаге с более мелкими зёрнами, при этом направление движения образца должно быть перпендикулярно направлению рисок, оставшихся после предыдущего прохода.

Операцию шлифования повторяют неоднократно, используя при этом бумагу с последовательно уменьшающейся зернистостью и каждый раз изменяя направление движения шлифа на 90° , чтобы полностью уничтожить оставшиеся риски. Закончив шлифование на бумаге с самыми мелкими зёрнами, образец промывают проточной водой и полируют.

Шлифование металлографических образцов механическим способом выполняется на специальных шлифовальных станках, оборудованных одним или несколькими металлическими кругами, приводимыми в движение электродвигателем.

При шлифовании механическим способом образцы часто нагреваются, и их периодически охлаждают в воде.

При хранении шлифовальной бумаги необходимо следить за тем, чтобы крупные абразивные зерна не попадали на бумагу с мелким зерном, так как это может привести к появлению глубоких рисок на поверхности шлифа.

Полирование шлифов осуществляют в целях окончательного выравнивания их поверхности и придания ей зеркального блеска. Для полирования шлифов применяют два способа: механический и электролитический.

При *полировании механическим способом* используют полировальный станок, принцип действия которого такой же, как и шлифовального. Иногда для шлифования и полирования используют один и тот же станок.

Над полировальным станком прикрепляют бачок для полировочной жидкости, которая через тонкую трубку с краном подается на полировальный круг, помещенный в кожух с патрубком для отвода жидкости. Полировальный круг покрывают мягкой тканью (сукном, фетром, драпом, шелком и др.), причем чем мягче обрабатываемый металл, тем тоньше должно быть строение используемой ткани. Если из шлифа могут выкрашиваться хрупкие фазы, полировать его следует с помощью ткани без ворса.

Частота вращения полировальных кругов такая же, как и шлифовальных ($200 \dots 1\ 300 \text{ мин}^{-1}$), причем чем мягче сплавы, тем меньше должна быть частота вращения круга. При полировании шлиф периодически поворачивают в целях более равномерной обработки всей поверхности.

При *электролитическом полировании* получение гладкой блестящей поверхности металла является результатом анодного растворения выступов его микрорельефа. Для электролитического полирования шлифов используют специальную установку. Подготовленный к полированию шлиф — анод — включают в цепь постоянного тока и помещают в электролизную ванну, заполненную электролитом. В качестве катода используют металлическую пластину. Для равномерного протекания процесса полирования электролит перемешивается механической или электрической мешалкой.

Электролизные ванны изготавливаются из кислотоупорных материалов: неподогреваемые ванны — из стекла, фарфора или фторопластов, а подогреваемые — из коррозионно-стойкой стали. Катоды вырезаются из листового металла — меди, свинца, коррозионно-стойкой стали и т. п.

Для электролитического полирования металлов используются различные составы электролита. Часто в электролите одного и того же состава можно полировать разные металлы, изменяя режимы процесса.

Для каждой пары металл — электролит подбираются оптимальные параметры режима полирования: температура, напряжение, плотность тока, продолжительность процесса и материал катода.

Параметры режимов электролитических процессов, компоненты и назначение некоторых электролитов приведены в табл. 4.4.

Рассмотрим особенности приготовления микрошлифов из разных металлов. В случае приготовления шлифов из пористых материалов (серого чугуна) или из материалов с легко выкрашивающимися включениями перед окончательным полированием образец нагревают до 70...80 °С и погружают в расплавленный парафин. После охлаждения образца избыток парафина удаляют с поверхности шлифа ватным тампоном, и шлиф полируют на сукне.

При шлифовании образцов из мягких металлов (алюминия, меди и др.) на шлифовальную бумагу наносят слой парафина или его раствор в керосине.

Подготовку поверхности, шлифование и полирование быстроокисляющихся металлов осуществляют с использованием паст ГОИ и скипидара. На завершающем этапе полирования круг смачивают скипидаром и сразу по окончании операции на поверхность шлифа наносят состав, содержащий 0,1...0,2 г кедрового масла или канадского бальзама, растворенного в 10 мл серного эфира. После испарения эфира на шлифе остается тонкая прозрачная пленка, препятствующая окислению поверхности. Перед травлением эту пленку снимают ватным тампоном, смоченным эфиром.

Шлифы из твердых металлов и сталей готовят механическим способом: образцы шлифуют на чугунных дисках при частоте их вращения примерно 800 мин⁻¹. В качестве абразивного материала используют смесь спирта с алмазным порошком, размеры зерен которого 2...5 мкм (ГОСТ 9206—80). Полирование выполняют на деревянном диске, смоченном масляной суспензией с алмазным порошком, размеры зерен которого 1...2 мкм.

Твердые сплавы можно полировать и на тонком сукне с втертым в него алмазным порошком с размерами зерен до 2 мкм. При этом поверхность сукна смазывают тонким слоем парафина.

Для химического травления шлифов используют растворы кислот, солей или щелочей. В результате травления макрошлифа четко выявляются границы между основным металлом и металлом шва, между зоной термического влияния и зоной, не подвергавшейся воздействию теплоты, а также между отдельными слоями шва при многослойной сварке. Травление крупных макрошлифов производится в вытяжном шкафу нанесением реактива на их поверхность, а мелких — погружением в раствор. Хорошие результаты по выявлению макроструктуры обеспечивает глубокое травление образцов в кислотах, смесях кислот или смесях кислот с хлоридами. Из неорганических кислот наиболее универсальной является азотная.

Таблица 4.4. Параметры режимов электролитического полирования, компоненты и назначение некоторых электролитов

Компоненты электролита	Параметры режима полирования				Назначение электролита
	Плотность тока, мА/см ²	Напряжение, В	Длительность процесса, с	Материал катода	
Хлорная и ледяная уксусная кислоты	400...800	25...30	15...30	Коррозионно-стойкая сталь	Полирование чистого железа и аустенитных сталей при температуре 20...30 °С
Серная кислота	300...1000	20...30	180...600	Свинец	Полирование коррозионно-стойкой стали при температуре 80...90 °С
Серная кислота	300...400	—	180...300	»	Полирование никеля при температуре 40 °С
Ортофосфорная и серная кислоты, вода	100	2,2	600...900	Медь	Полирование меди, содержащей до 6 % олова, при температуре 20 °С
Ортофосфорная кислота, триоксид хрома, вода	50...80	—	30	Коррозионно-стойкая сталь	Полирование алюминия при температуре 60 °С
Хромовый ангидрид, вода	30...100	6	30...90	То же	Травление стали
Гидроксид калия или натрия, пикриновая кислота, вода	25...50	5...6	30...120	»	Травление углеродистых сталей и чугуна

Щавелевая кислота, вода	100	3...6	15	»	Травление легированных сталей
Пикриновая кислота, гидроксид калия или натрия, вода	2...5	—	30...120	»	То же
Аммиак (концентрированный)	20	4...6	10...20	»	Травление никеля
Сульфат железа, серная кислота, вода	5	8...10	15	Медь	Травление меди
Гидроксид калия или натрия, вода	5	4	120...240	»	Травление магниевых сплавов

Для глубокого травления сварных швов из углеродистых сталей, а также для сталей, содержащих никель, применяют 50%-ный водный раствор азотной кислоты. Для травления сталей, содержащих хром, используют 50%-ный водный раствор соляной кислоты. Одним из лучших универсальных реактивов для травления сталей является смесь азотной кислоты с хлоридами.

Для выявления кристаллизационных слоев в сварных швах из низкоуглеродистых низко- и среднелегированных сталей производят травление образцов в растворе серной, хромовой или пикриновой кислоты, которое основывается на избирательном растворении в нем ферритной составляющей. В 20%-ном водном растворе серной кислоты травление выполняется при температурах 80...100 °С в течение 10...12 ч.

Для выявления неоднородности химического состава сварных швов часто также используют реактивы поверхностного травления, содержащие ионы меди. Такие реактивы четко выявляют участки, обогащенные серой и фосфором (которые обычно светлее других участков).

Для выявления в металле серы и фосфора применяют и метод отпечатков, который заключается в следующем. На подготовленный макрошлиф накладывают бромосеребряную фотобумагу, предварительно выдержанную в течение 8...10 мин в 5%-ном водном растворе серной кислоты и прижимают ее. Через 3...5 мин эту бумагу осторожно снимают и регистрируют участки, соприкасавшиеся с включениями серы, и поэтому окрашенные в коричневый цвет. Вместо фотобумаги можно применять фотопленку, что позволит размножать полученные отпечатки.

Методом отпечатков на фотобумаге можно выявить не только включения серы, фосфора и оксидов железа в металле шва, но и его грубые дефекты — трещины и непровары. Картину, наблюдаемую на глубоко протравленном шлифе, можно быстро воспроизвести на бумаге типографским способом. Для этого шлиф следует покрыть тонким слоем типографской краски с помощью резинового шпателя и протереть сухим тампоном в целях удаления краски с его выпуклых участков. Затем влажный лист белой бумаги закрепляют на резиновой подложке, подготовленный шлиф накладывают на эту бумагу и все вместе зажимают в прессе.

Макроструктуру металла можно изучать и непосредственно в изломах сварного шва, которые исследуются после механических и технологических испытаний образцов, а также после разрушения сварных деталей.

По излому можно определить характер разрушения (пластичное или хрупкое), а также дефекты шва: поры, раковины, неметаллические включения, непровары и трещины. Волокнистый серый излом без блеска характерен для материалов с повышенными пластичностью и ударной вязкостью, а блестящий крупнозернистый — для хрупкого металла с пониженной ударной вязкостью. Светлые пятна (оксидные пленки) в изломе шва свидетельствуют о наличии дефектов, практически не выявляемых ни одним из известных физических методов контроля.

Исследование микроструктуры сварного соединения. Данное исследование позволяет более глубоко изучить структуру сварного соединения, чем исследование макроструктуры.

По микроструктуре сварного соединения можно установить:

- структуру металла шва и зоны термического влияния;
- примерное содержание углерода в основном металле и в металле на различных участках соединения;
- приблизительный режим сварки и скорость охлаждения металла шва и зоны термического влияния;
- число слоев сварного шва, дефекты шва и структуры.

Образцы для исследования микроструктуры сварных швов изготавливают так же, как и для макроанализа. Размеры поверхности микрошлифа не должны превышать 20×20 мм.

Выявление микроструктуры производится неглубоким травлением, позволяющим удалить слой толщиной не более 10 мкм.

Принципы выявления микроструктуры химическим травлением те же, что и при исследовании макроструктуры. Однако поскольку микроструктуру изучают на металлографических микроскопах при увеличении в 50—2000 раз и на электронных микроскопах при 100 000-кратном увеличении, получаемый при микротравлении рельеф должен иметь незначительную глубину. Следовательно, в этом случае нужно применять малоактивные травители, обеспечивающие постепенное удаление тонких слоев.

Для микротравления углеродистых, а также низко- и среднелегированных сталей в качестве травителей чаще всего используют слабые растворы кислот в спирте. Наиболее широко применяется 2...5%-ный раствор азотной кислоты в этиловом спирте.

Травление производится 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 содержании в металле легирующих примесей продолжительность травления обычно уве-

личивают. Важное значение имеет также структурное состояние металла: троостит и троостосорбит вытравливаются интенсивнее, а феррит и мартенсит медленнее.

В тех случаях, когда необходимо более тщательное травление для изучения мельчайших составляющих микроструктуры сварных швов при большом увеличении, используют растворы пикриновой кислоты.

Для травления при исследовании микроструктуры сварных швов алюминиевых сплавов в качестве реактива используют 0,5%-ный водный раствор плавиковой кислоты.

Для приготовления микрошлифов сварных коррозионно-стойких сталей находит применение электролитическое травление, обеспечивающее значительно более равномерное выявление микроструктуры, чем обычное травление. Электролитическое травление приемлемо также для низко- и среднелегированных сталей. Наиболее эффективно его использование в тех случаях, когда качество поверхности шлифов должно быть очень высоким (для электронно-микроскопических исследований) и при этом необходимо удалить следы наклепа в поверхностном слое.

Исследование микрошлифа обычно заключается в следующем. После полирования (до травления) его обследуют под микроскопом при увеличении в 100—500 раз, чтобы установить наличие пор, оксидных пленок и микротрещин в шве. Неметаллические включения на белом фоне микрошлифа имеют вид темных пятен. Микротрещины проявляются в виде тонких черных извилистых кривых. После травления микрошлиф изучают под микроскопом и определяют структуру сварного шва по всему сечению (виды и соотношения структурных составляющих, наличие и распределение карбидов, нитридов, сульфидных и оксидных включений).

В тех случаях, когда исследование осуществляется не сразу после приготовления микрошлифов или выполняется многократно с перерывами, необходимо обеспечить их хранение. Поскольку поверхность шлифа при хранении должна быть защищена от окисления, уже при полировании и промывке шлифов используют пассивирующий раствор, а также их особенно тщательно промывают спиртом и просушивают.

Если шлиф предполагается хранить длительное время, то его поверхность покрывают тонким слоем раствора кедрового масла ($0,1 \dots 0,2 \text{ см}^3$) в серном эфире (100 см^3). Образующаяся при этом прозрачная пленка не препятствует изучению шлифа и легко удаляется с помощью бензина.

Для хранения шлифы помещают в эксикатор — прозрачный сосуд, состоящий из нижней конусной части и верхней цилиндрической, разделенных тонкой металлической или фарфоровой перегородкой с отверстиями, через которые проходит воздух. Сверху такой сосуд плотно закрывается притертой крышкой с фланцем (при открывании эксикатора крышка сдвигается, а не поднимается). Для того чтобы шлифы не окислялись, в нижнюю часть эксикатора помещают слой хлорида кальция — гигроскопического вещества, хорошо поглощающего влагу (которое перед засыпкой в эксикатор прокаливают для полного удаления из него влаги).

В процессе приготовления шлифов требуется соблюдать определенные правила безопасности.

Все операции следует выполнять в специальном вентилируемом помещении. На шлифовальных и полировальных станках должны быть установлены местные отсосы.

Работать следует в спецодежде — халате, рукава которого должны быть застегнуты во избежание попадания в станок при вращении круга, а глаза должны быть защищены очками от попадания абразива.

При механическом шлифовании и полировании шлиф следует крепко держать в руке, чтобы он не вырвался и не нанес повреждений.

Особую осторожность требуется проявлять при составлении реактивов и электролитов, предназначенных для приготовления и травления шлифов. В большинстве случаев это растворы и смеси кислот, солей и щелочей, оказывающие вредное воздействие на организм человека. Попадая на кожные покровы (в виде капель, брызг или струи) и слизистые оболочки (в виде паров), вредные вещества могут вызвать ожоги разной степени, а также оказать местное или общее токсическое действие.

Наиболее сильные ожоги вызывает смесь азотной и соляной кислот («царская водка»). Далее по интенсивности вредного воздействия кислоты располагаются в следующем порядке: смесь серной и хромовой кислот (хромовая смесь), азотная, серная, плавиковая, хромовая, соляная, уксусная, молочная, ортофосфорная, щавелевая и др. Горячие кислоты и смеси могут вызвать обугливание пораженных участков.

Сильные ожоги возможны и при воздействии концентрированных растворов щелочей (например, едкого натра).

Вдыхаемые в большом количестве газы, выделяющиеся при электрополировании и травлении шлифов, могут вызвать ожоги слизистых оболочек и отравление организма, поэтому при работе

с вредными веществами необходимо принимать специальные меры предосторожности.

При розливе кислот и других едких жидкостей, а также при дроблении твердых едких веществ необходимо надевать спецодежду: прорезиненный фартук, сапоги, резиновые перчатки и защитные очки. При розливе вредных жидкостей должны применяться наклоняющиеся штативы или стеклянные трубки с грушей. Розлив непосредственно из бутылки следует производить очень осторожно.

При дроблении едкие вещества необходимо заворачивать в ткань, чтобы их мелкие кусочки не попали в глаза, на руки и одежду. Взвешивание, растворение едких веществ и электрополирование необходимо производить только в специальном помещении и вытяжном шкафу, надев защитные очки и резиновые перчатки. В помещении также должны иметься нейтрализующие растворы и аптечка со средствами для оказания первой помощи.

При составлении электролитов и травителей едкие жидкости отбирают из большой бутылки только специальными пипетками с расширителем.

Ядовитые и едкие жидкости нельзя хранить в стеклянных тонкостенных сосудах. При приготовлении смесей склянки с вредными жидкостями берут не за горловину, а снизу или под дно, а при их открывании горловину направляют в сторону от лица.

Растворение и разбавление веществ (кислот, щелочей и др.), сопровождающиеся выделением большого количества теплоты, нельзя осуществлять в толстостенных сосудах, поскольку из-за неравномерного нагрева они могут лопнуть. Чтобы разбавить серную кислоту, ее следует вливать тонкой струей в холодную воду, равномерно перемешивая. При вливании воды в серную кислоту вследствие выделения большого количества теплоты возможно ее сильное разбрызгивание или повреждение сосуда. Наливать серную кислоту разрешается только в сухую посуду.

Водные электролиты, содержащие хромовую кислоту, составляют последовательно с перемешиванием, растворяя в ней сначала фосфорную, а затем серную кислоту.

Электролиты, в состав которых входит большое количество хлорной кислоты, взрывоопасны. При составлении таких электролитов ее последней медленно подливают в раствор, охлажденный примерно до 15 °С.

Нагревать вредные и ядовитые вещества можно только в бане (воздушной, водяной, песчаной), помещенной в вытяжной шкаф.

По окончании работы следует нейтрализовать вредные вещества, попавшие на спецодежду, а сильно загрязненную одежду выстирать.

Химический анализ служит для отбраковки материалов по составу и установления причин появления дефектов в сварном соединении. При исследовании соединения обычно производят химический анализ основного, присадочного (электродов и проволоки) и наплавленного металлов шва.

При анализе металла шва необходимо выяснить соответствие содержания в нем углерода, кремния, марганца и легирующих элементов значениям, рекомендуемым для различных способов сварки, марок электродов, составов основного металла и т.д. Кроме того, важно знать, что содержание вредных элементов (серы, фосфора и др.) в стали не превышает допустимых пределов. В некоторых случаях, особенно при разработке нового состава покрытия или технологии сварки, выполняют также анализ металла шва на содержание азота, кислорода и водорода.

Пробы для химического анализа в виде стружки отбирают в соответствии с ГОСТ 7122—81 с таким расчетом, чтобы в них содержалось небольшое количество основного металла. Иногда стружку получают из образцов, предназначенных для механических испытаний.

Необходимая для анализа масса стружки зависит от числа проверяемых химических элементов: для определения углерода достаточно 3...5 г стружки, для определения азота и кислорода — 50...60 г, а для полного анализа состава — 50 г.

Стружка должна быть обезжирена спиртом или эфиром. Содержание кислорода и азота определяют методом горячей экстракции или расплавлением стружки в вакууме в специальных муфельных печах. Если полученные результаты сомнительны, то производят повторный отбор не менее двух проб.

В тех случаях, когда отбор проб затруднен, химический состав сварных швов определяют с помощью спектрального анализа, выполняемого на специальных приборах — спектрометрах, позволяющих с высокой точностью установить количественный состав элементов, входящих в металл шва. При спектральном анализе на поверхности образца зажигают микродугу. Пары металла, попадающие в эту дугу, создают присущий им спектр, который разлагается на аналитические линии. Сравнением этих линий с эталонными определяют количественный и качественный состав элементов в сплаве.

Один из способов изучения структуры металлов основывается на применении радиоактивных изотопов. Чаще всего для изучения состава металла используются радиоактивные изотопы серы и фосфора, которые вводят в шов через проволоку или основной металл. Из шва, содержащего радиоактивные изотопы, изготавливают шлифы, отпечаток которых на фотопленке или фотобумаге отображает характер распределения этих изотопов: наибольшее потемнение отвечает их максимальной концентрации. По характеру распределения изотопов определяют распределение соответствующих химических элементов в металле шва и скорости их выгорания в процессе сварки.

При оценке коррозионных свойств сварного соединения используют такие показатели, как скорость коррозии, механические, физические, электрохимические и другие свойства, а при оценке сопротивляемости разрушению — время или число циклов нагружения до растрескивания, пороговые напряжения, коэффициенты интенсивности напряжений и т. д.

Для оценки эксплуатационно-коррозионной прочности проводятся сравнительные испытания сварных соединений и основного металла в ненапряженном и напряженном состояниях.

Методы испытаний оценки коррозионной стойкости сварных соединений подразделяют:

- по целевому назначению;
- типу испытываемого объекта;
- виду напряженного состояния;
- типам используемых сред;
- показателям стойкости в зависимости от вида коррозионного разрушения.

По целевому назначению различают группы испытаний, предназначенные:

- для выявления причин, характера, кинетики и в целом механизма разрушения изделия;
- для обоснованного выбора материала, конструкции и технологии изготовления изделия;
- для решения задач экспертного типа при выяснении причин отказов конструкций.

При этом предусматриваются анализ условий эксплуатации, выявление причин разрушений, разработка мер по повышению сопротивляемости разрушению.

По типу испытываемого объекта различают испытания трех видов:

- сравнительные испытания образцов;

- модельные испытания элементов, узлов и макетов конструкций;
- натурные испытания конструкций.

Для научно-обоснованной оценки стойкости, прочности и надежности конструкций, эксплуатирующихся в агрессивных средах, необходимо проведение испытаний всех трех видов.

Испытания образцов, которые проводятся в лабораторных и натуральных условиях, относительно простые и позволяют решить ряд принципиальных вопросов: выявить механизмы разрушений, дать сравнительную оценку влияния некоторых факторов и др.

Такие испытания необходимы, однако их недостаточно для обоснованной оценки прочности и надежности, так как в связи с трудностью воспроизведения в образцах реальных условий нагружения и эксплуатации результаты этих испытаний нельзя непосредственно переносить на конструкцию. Натурные испытания позволяют непосредственно оценить прочность и надежность конструкций, однако они длительные, дорогие и не обеспечивают в полной мере дифференцированной оценки влияния различных конструктивных и технологических факторов.

Модельные испытания элементов, узлов и макетов конструкций, учитывающие конструктивные и технологические особенности изделий и условия их эксплуатации, сочетают в себе достоинства лабораторных испытаний образцов (простоту, экономичность, относительно малую длительность) и возможность дифференцированной и в различных сочетаниях оценки влияния характерных конструктивных и технологических особенностей конструкций.

Все испытания образцов проводятся в два этапа:

1) испытания стойкости к общей и местной коррозии без нагрузки (результаты этих испытаний необходимы, но их недостаточно для оценки стойкости материала в напряженной конструкции);

2) испытания стойкости к коррозионным разрушениям в напряженном состоянии (проводятся при благоприятных результатах испытаний первого этапа).

Все испытания условно подразделяются на основные — являющиеся определяющими при оценке и расчете стойкости, прочности и надежности (весовые, профилографические, механические, на стойкость к растрескиванию в напряженном состоянии и др.), и специальные — позволяющие исследовать механизм и причины коррозионных разрушений (электрохимические, металлографические, электронно-скопические и др.). При этом свойства сварных соединений сопоставляются со свойствами основного металла.

Целесообразно использовать сочетание рассмотренных видов испытаний с окончательной оценкой конструкций по результатам натурных испытаний.

В целях экономии времени испытания в ненапряженном и напряженном состояниях целесообразно проводить параллельно.

Различают ускоренные испытания в специальных средах для выполнения сравнительного анализа и испытания в производственных средах. Последние обеспечивают непосредственное получение данных о коррозионной стойкости, но не позволяют в связи с продолжительностью процесса оперативно оценивать влияние тех или иных конструктивных и технологических факторов, поэтому на практике широко используют ускоренные методы коррозионных испытаний.

При выборе ускоренного метода испытания необходимо учитывать состав и свойства коррозионной среды, а также условия эксплуатации конструкции. Механизм и характер коррозионного разрушения металла в среде для ускоренных испытаний должен быть идентичен механизму разрушения конструкции в эксплуатационной среде. Ускорение процесса возможно за счет ускорения электрохимических реакций агрессивными компонентами и деполяризаторами, повышения напряжений, температуры испытаний, а также посредством изменения условий контактирования металла со средой. При выборе метода ускорения коррозионного процесса необходимо учитывать контролирующий фактор.

Метод и режимы испытания должны обеспечивать протекание процесса с повышенной скоростью, но при этом не следует чрезмерно ускорять процессы коррозии, так как это усложняет получение сравнительных результатов.

При оценке коррозионной стойкости сплавов и средств противокоррозионной защиты важно правильно выбрать показатели коррозии, отражающие эксплуатационно-коррозионную стойкость сплава. Методы испытаний необходимо разрабатывать и выбирать отдельно для каждой группы сплавов.

Ускоренные лабораторные испытания следует по возможности использовать для получения сравнительных данных. Учитывая, что пока еще не имеется надежных коэффициентов пересчета результатов ускоренных испытаний на условия длительной эксплуатации, при выборе новых материалов и технологий целесообразно проводить параллельные испытания родственных материалов, для которых уже имеются данные по эксплуатационной стойкости.

При оценке сравнительной коррозионной стойкости сварных соединений в целях достоверности выявления влияния термиче-

ского цикла сварки целесообразно проведение испытаний в средах, обеспечивающих нахождение исследуемого материала на границе перехода из активного в пассивное состояние.

В связи с повышенной чувствительностью сварных соединений к разрушению в агрессивных средах особое значение приобретает оценка их надежности при работе в этих условиях.

Количественная оценка надежности сварных соединений и конструкций производится с учетом их особенностей двумя способами:

- по классической схеме, являющейся универсальной, т.е. на основе статистической обработки эксплуатационных наблюдений и результатов натурных и стендовых испытаний;
- по результатам сравнительных испытаний образцов из основного металла, надежность которого условно принимается за единицу, и сварных соединений, используемых для оценки предельных состояний материалов (прочности, сопротивляемости растрескиванию, допустимой глубины коррозии и др.).

Часто постепенное развитие сплошной и местной коррозии удовлетворительно описывается математическими зависимостями нормального закона безотказности (Гаусса), однако для сварных соединений, работающих в агрессивных средах в напряженном состоянии, возможно использование и других законов безотказности.

4.4. СВАРИВАЕМОСТЬ МЕТАЛЛА И МЕТОДЫ ЕЕ ОЦЕНКИ

Свариваемость — свойство металла или сочетания металлов образовывать при установленной технологии сварки соединение, отвечающее требованиям, обусловленным конструкцией и эксплуатацией изделия. Следовательно, свариваемость зависит, с одной стороны, от особенностей материала, технологии сварки и конструктивного оформления соединений, а с другой — от необходимых эксплуатационных свойств сварной конструкции. Последние определяются техническими требованиями, предъявляемыми к таким конструкциям.

Свариваемость материалов считается *достаточной*, если требования к эксплуатационным свойствам сварных соединений с принятыми допущениями удовлетворяются, и *недостаточной*, если не обеспечивается минимальный уровень хотя бы одного из эксплуатационных свойств сварного соединения. Различают свариваемость физическую и технологическую.

Физическая свариваемость определяет принципиальную возможность получения монолитных сварных соединений, что особенно важно при сварке разнородных материалов.

Технологическая свариваемость представляет собой реакцию материала на сварочный термомеханический цикл и металлургическое воздействие сварки, которая оценивается, например, посредством сравнения механических свойств металла сварного соединения с одноименными свойствами основного металла.

При оценке свариваемости учитывают также стойкость металла к образованию трещин и его специальные свойства (коррозионную стойкость, прочность при высоких или низких температурах, сопротивление хрупкому разрушению).

Свариваемость углеродистых сталей определяется, в первую очередь, содержанием в них углерода. Под хорошей свариваемостью низкоуглеродистой стали, предназначенной для изготовления конструкций, работающих при статических нагрузках, понимают возможность с использованием обычной технологии получить сварное соединение, равнопрочное основному металлу, без трещин в металле шва и снижения пластичности в околошовной зоне. При этом металлы шва и околошовной зоны должны быть стойкими к переходу в хрупкое состояние при температуре эксплуатации конструкции и наличии концентраторов напряжений, обусловленных формой сварного узла.

Свариваемость материала оценивается посредством сравнения его свойств со свойствами ранее применявшихся материалов или основного металла. Свариваемость признают удовлетворительной, если результаты испытаний различных свойств сварного соединения соответствуют нормативам, установленным техническими условиями на данную продукцию.

Стойкость металла сварного соединения к образованию горячих трещин — это наиболее важный показатель свариваемости, так как при сварке сплавов с широким температурным интервалом кристаллизации под действием возникающих при затвердевании растягивающих напряжений возможно появление горячих трещин, являющихся весьма серьезным дефектом.

Стойкость металла сварного соединения к образованию холодных трещин — это также очень важный показатель свариваемости, поскольку под действием сварочного нагрева изменяется структура основного металла. При этом в околошовной зоне закаливаемых сплавов в результате фазовых превращений образуются хрупкие структуры типа мартенситных, что может привести к появлению холодных трещин.

Процессы, происходящие в металле сварного соединения, могут вызвать хрупкие разрушения сварной конструкции. Причинами таких разрушений могут быть конструктивные недостатки, наличие макроскопических концентраторов напряжений, дефектов сварных соединений (раковин, пор, шлаковых включений, подрезов по краю швов), микротрещин и полостей.

Склонность металла сварного соединения к хрупкому разрушению — это также достаточно важный показатель свариваемости. Оценивают ее посредством специальных испытаний по сравнению со склонностью к хрупкому разрушению основного металла, зоны термического влияния и металла сварного шва. Считается, что лучшей свариваемостью обладают те металлы, сварные соединения которых не отличаются по склонности к хрупкому разрушению от основного металла.

Методы определения показателей свариваемости материалов подразделяются на прямые — при использовании которых выполняют сварку образцов заданной формы по выбранной технологии, и косвенные — основанные на замене сварочного процесса имитирующим его процессом.

Определение стойкости металла к образованию горячих трещин. Стойкость сварного соединения металла к образованию горячих трещин определяют по результатам следующих испытаний:

- машинных испытаний, основанных на принудительном деформировании образцов, подвергнутых сварочному нагреву, в температурном интервале возникновения горячих трещин;
- технологических испытаний, или сварки проб, при проведении которых условия деформирования в температурном интервале образования горячих трещин регулируют выбором формы и размеров образцов, а также последовательности выполнения сварных швов и режимов сварки.

Машинные испытания заключаются в испытаниях образцов, проплавляемых сварочной дугой, на растяжение и изгиб, а образцов, нагреваемых по сварочному циклу, — на растяжение. Для машинных испытаний применяют специальные установки.

Процедура машинных испытаний включает в себя сварку серии образцов с одновременным деформированием шва при разной скорости перемещения активного захвата и определение критической скорости деформирования, вызывающей появление горячих трещин в нескольких образцах.

Технологические испытания основываются на положении о том, что металл, в котором не возникает трещин в искусственно созданных жестких условиях (что достигается выбором форм и раз-

меров специальных технологических проб и типов их закрепления), не должен разрушаться и в реальных изделиях. При сварке кристаллизующийся металл подвергается деформации вследствие усадки шва и формоизменения технологических проб. Специальная конструкция и технология сварки проб обуславливают повышенные темпы высокотемпературной деформации.

Технологические пробы можно условно подразделить на два класса: количественные и качественные.

К *количественным* относятся технологические пробы, в которых образование горячих трещин можно связать с каким-либо конструктивным параметром (размерами пробы, глубиной или расположением надрезов и др.) или параметром режима сварки (скорость, температура подогрева). Сравнив такие пробы, можно выделить сплавы с меньшим и большим сопротивлением образованию горячих трещин.

Качественные технологические пробы предусматривают выполнение сварных швов на образцах постоянной формы в строго заданной последовательности и при соблюдении определенных режимов сварки. Сопротивление металла шва образованию горячих трещин оценивают в этом случае по их наличию или отсутствию на поверхности проб и шлифов или в изломах сварных швов. Качественные пробы не позволяют оценить количественно стойкость сплавов к образованию горячих трещин и предназначены лишь для отбраковки плохо сваривающихся сплавов.

Для определения стойкости металла к образованию горячих трещин используют различные виды проб.

Составная тонколистовая проба содержит несколько пластин разной ширины, соединенных с одной стороны прихватками. Сварку производят в направлении расширения пластин. При этом в местах пересечения стыков пластин сварным швом образуются горячие трещины. Показателем стойкости металла шва к образованию горячих трещин служит минимальная (критическая) ширина пластины, при сварке которой горячие трещины не возникают: чем меньше критическая ширина пластины, тем больше стойкость металла шва.

Проба ИМЕТ из тонколистового металла представляет собой пластину с постоянными размерами и надрезом, параллельным ее короткой стороне. Пластины проплавляют вольфрамовым электродом в струе аргона или электронным лучом таким образом, чтобы ось шва проходила через вершину надреза. Вероятность появления трещины от надреза зависит от его положения на пластине: чем больше длина шва до надреза, тем выше стойкость металла шва к образованию горячих трещин.

Проба Хоулдрокфта («рыбья кость») используется для оценки сопротивления металла шва образованию горячих трещин при сварке тонких листов легированных сталей, алюминиевых и магниевых сплавов. Данная проба представляет собой пластину с боковыми прорезями увеличивающейся длины. При испытании выполняют наплавку или проплавливают пластину вольфрамовым электродом в защитном газе. Критерием оценки стойкости металла служит длина горячей трещины.

Крестовидная тонколистовая проба применяется для определения склонности к образованию горячих трещин главным образом алюминиевых и магниевых сплавов. Две прямоугольные пластины сваривают друг с другом четырьмя валиковыми швами в определенных последовательности и направлениях. Критерием наличия склонности к появлению горячих трещин служит отношение длины швов с трещинами к общей длине швов.

Кольцевая сегментная проба для испытания листов большой толщины состоит из четырех заготовок с шлифованными торцевыми поверхностями, свариваемых друг с другом с двух сторон. Размеры такой пробы после сборки составляют $90 \times 90 \times 25$ мм. На ее верхней стороне протачивают кольцевую канавку. При испытании пробу сваривают по канавке по ходу часовой стрелки. После ее охлаждения до температуры ниже 50°C выполняют замыкающий шов. Горячие трещины образуются в местах стыка заготовок и распространяются вдоль сварного шва. Критерием стойкости металла шва к образованию горячих трещин служит процентное отношение суммарной длины образовавшихся трещин к длине шва.

Пробу с канавками изготавливают из пластин толщиной более 40 мм. При толщине пластины менее 60 мм ее приваривают к жесткой плите по флангам швом с катетом 20 мм, а канавки располагают с шагом 100 мм. При толщине пластины более 60 мм канавки выполняют с двух сторон образца, а пластины сваривают по канавкам с минимальной скоростью. Склонность к образованию горячих трещин в этом случае определяют по отношению суммарной длины образовавшихся трещин или их площади соответственно к длине или площади поперечного сечения шва, а также по коэффициенту периодичности — числу трещин на единице длины шва. При отсутствии горячих трещин в швах, выполненных на рекомендованных для анализа режимах сварки, переходят к сварке более узких образцов либо к сварке с повышенной скоростью.

Способы оценки склонности металла к образованию холодных трещин. Все способы оценки склонности (стойкости, сопротивле-

ния) металла сварного соединения к образованию холодных трещин подразделяются следующим образом. По операции оценки различают косвенные и прямые способы, по форме представления показателей — количественные, полуколичественные и качественные, по варианту использования результатов оценки — сравнительные и прикладные.

Косвенные способы позволяют оценить склонность сварного соединения к образованию холодных трещин посредством расчета без непосредственного испытания материалов.

Прямые способы оценки склонности к образованию холодных трещин предусматривают сварку технологических проб и проведение специализированных испытаний сварных соединений или основного материала, подлежащего сварке, в условиях, имитирующих сварочные.

Количественные способы оценки склонности к образованию холодных трещин обеспечивают получение числового значения показателя, связанного с изменением одного из факторов, обеспечивающих контроль этого процесса.

Качественные способы не обеспечивают количественной оценки склонности к образованию холодных трещин и по существу служат для отбраковки материалов.

Способы оценки, которые могут использоваться только для сопоставления материалов и технологических вариантов сварки в целях выбора лучших из них, относятся к *сравнительным*.

Способы, позволяющие оценить стойкость реальных сварных конструкций к образованию холодных трещин, относятся к *прикладным*.

По тем же признакам подразделяются и технологические пробы.

Пробы отраслевого назначения, или *прикладные*, позволяют оценить склонность материалов к образованию холодных трещин в условиях, максимально приближенных к технологическим и климатическим условиям изготовления реальных сварных конструкций.

Проба «Геккен» представляет собой плоский прямоугольный образец толщиной 12... 40 мм, имеющий в центре продольную прорезь с V-образной разделкой. Этот образец заваривается в свободном состоянии и затем выдерживается в течение 20 ч. Сварку выполняют вручную покрытыми электродами, под флюсом или в защитных газах. При этом трещины образуются в корневой части сварного соединения. Обязательное условие пробы — наличие в корне шва непровара, служащего концентратором напряжений. Количественным показателем стойкости к образованию холодных

трещин в этом случае могут служить процентное отношение суммарной длины трещин к длине шва; процентное отношение площади трещин к площади сечения шва, температура подогрева, при которой не образуются трещины.

Крестовая проба состоит из трех пластин, собранных в крестовидное соединение. Все поверхности касания этих пластин предварительно шлифуются для обеспечения хорошего контакта. На пробе выполняют четыре угловых шва длиной 160 мм в определенной последовательности. Температура пробы перед сваркой очередного шва не должна превышать $(28 \pm 3)^\circ\text{C}$. Через 48 ч после сварки для снятия напряжений производится двухчасовой отжиг пробы при температуре 595...650 °С. Пробу разрезают на поперечные темплеты для изготовления микрошлифов и выявления трещин в околошовной зоне. Результаты испытаний считаются удовлетворительными, если на двух первых темплетях не обнаружено ни одной трещины.

Лихайская модифицированная проба состоит из образцов с прорезями, завариваемыми на разных режимах при различных температурах предварительного подогрева. При этом начало и концы прорезей образцов (по 2...3 мм) оставляют незаплавленными. Наличие трещин на поверхности сварного соединения, в корне шва и поперечном сечении выявляют через 24 ч после окончания сварки. Для оценки склонности материала к образованию холодных трещин определяют процентную долю разрушений сварных соединений в зависимости от скорости охлаждения металла с температурой 300 °С или от продолжительности его охлаждения в температурном интервале 800...300 °С. Скорость охлаждения, при превышении которой разрушение швов заметно усиливается, принимается в качестве критерия оценки сопротивления материала образованию холодных трещин. Также оценку можно производить и по критическому времени охлаждения материала или по минимальной температуре предварительного нагрева, необходимой для устранения холодных трещин.

Оценка влияния термического цикла сварки на изменение структуры и свойств свариваемых металлов. Предварительную оценку в этом случае выполняют по методикам, предусматривающим нагрев и охлаждение образцов по программе с заданными скоростями и механические испытания на любом этапе термической обработки. Такие испытания позволяют имитировать сварочные термические циклы любого участка сварного соединения и выявлять их воздействие на структуру и свойства металла. Для этой же цели используют и специальные технологические пробы,

например валиковую. Для такой пробы на пластины металла толщиной 14...30 мм наплавляют валики на режимах с разной погонной энергией. Из пластин вырезают поперечные образцы для определения структуры и твердости, а также для испытаний на ударный и статический изгиб.

Расчетная оценка свариваемости конструкционных сталей по химическому составу выполняется следующим образом. Технологическая свариваемость металлов и их сплавов зависит от ряда факторов: их химической активности, степени легирования, содержания примесей и особенностей структуры. Чем выше химическая активность металла, тем больше его склонность к взаимодействию с окружающей средой и в первую очередь к окислению, а следовательно, требуется более эффективная его защита и металлургическая обработка при сварке. Защита расплавленных сталей и сплавов на основе железа от взаимодействия с воздухом обеспечивается с помощью электродных покрытий, флюсов и инертных газов.

Наибольшее влияние на свариваемость сталей оказывает углерод: при увеличении содержания углерода и ряда других легирующих элементов их свариваемость ухудшается.

Ориентировочным количественным показателем свариваемости стали является эквивалент углерода, рассчитываемый по формуле

$$C_{\text{ЭКВ}} = C + \text{Mn}/6 + \text{Si}/24 \quad (4.1)$$

в которой содержание углерода и легирующих элементов выражено в процентах.

В зависимости от эквивалента углерода (и связанной с этой величиной склонности материала к закалке и образованию трещин) все конструкционные стали подразделяются на четыре группы соответственно с хорошей, удовлетворительной, ограниченной и плохой свариваемостью.

Стали с $C_{\text{ЭКВ}} < 0,25\%$ хорошо свариваются без образования закалочных структур и трещин в широком диапазоне режимов, толщин и конструктивных форм.

Стали с $C_{\text{ЭКВ}} = 0,25...0,35\%$ свариваются удовлетворительно. Они не склонны к образованию холодных трещин при правильном выборе режимов сварки, однако в ряде случаев необходим их подогрев.

Стали с $C_{\text{ЭКВ}} = 0,36...0,45\%$ свариваются ограниченно с образованием трещин. Возможность регулирования сопротивления этих сталей образованию трещин посредством изменения режимов сварки ограничена, а следовательно, требуется их подогрев.

Стали с $C_{\text{экв}} > 0,45\%$ плохо свариваются. Они весьма склонны к закалке и возникновению холодных трещин. При сварке необходим их подогрев и применение специальных технологических приемов, а после сварки требуется термическая обработка.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите виды механических испытаний сварных соединений.
2. Каковы отличительные особенности макро- и микроанализа?
3. Для чего выполняется химический анализ?
4. Как отбирают образцы для металлографического исследования?
5. В чем заключается подготовка образцов к шлифованию?
6. Какие абразивные материалы применяются для шлифования и полирования образцов?
7. Какие показатели характеризуют абразивные материалы?
8. Как выполняется шлифование образцов механическим способом?
9. Опишите процесс полирования образцов электролитическим способом.
10. Каковы правила хранения шлифов?
11. Какие правила безопасности необходимо соблюдать при приготовлении шлифов?
12. Какие основные показатели характеризуют свариваемость металлов?

ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ УСТРАНЕНИЯ ДЕФЕКТОВ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ

5.1. ИСПРАВЛЕНИЕ НАРУЖНЫХ И ВНУТРЕННИХ ДЕФЕКТОВ

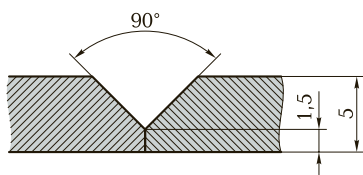
При обнаружении недопустимых наружных или внутренних дефектов сварных соединений их обязательно исправляют. Наружные дефекты вышлифовывают с обеспечением плавных переходов на участке выборки. Выборку можно не заваривать только в том случае, если в зоне максимальной ее глубины сохранилась минимально допустимая толщина детали. Удаление дефектов с обратной стороны шва производится по всей его длине заподлицо с основным металлом.

Если в процессе механической обработки (вышлифовывания) не удалось полностью исправить наружные дефекты, то их следует полностью устранить как недопустимые внутренние дефекты.

Подповерхностные и внутренние дефекты (дефектные участки) в соединениях из алюминия, титана и их сплавов исправляют только механическим способом — вышлифовыванием абразивным инструментом, обработкой резанием или вырубкой с последующим зашлифовыванием. В ряде случаев в конструкциях из стали допускается удаление дефектных участков воздушно-дуговой или плазменно-дуговой строжкой с последующей обработкой поверхности выборки абразивными инструментами. Детали из углеродистых и кремнемарганцовистых сталей необходимо зашлифовывать до полного удаления следов предыдущей обработки.

Исправлять дефекты подваркой в зоне выборки (рис. 5.1) в сварных соединениях, подлежащих обязательной термической обработке и выполненных из легированных и хромистых сталей, следует после высокого (при температурах 450 ... 650 °С) их отпуска (промежуточного или окончательного) за исключением отдельных случаев, оговоренных в технологической документации.

Рис. 5.1. Форма разделки шва при выборке внутреннего дефекта



При исправлении дефектных участков целесообразно соблюдать определенные условия. Длина исправляемого участка должна быть на 10...20 мм больше длины дефекта с каждой стороны. Ширина выборки должна быть такой, чтобы ширина шва, получаемого после подварки, не превышала его двойную исходную ширину. Форма и размеры подготовленной под подварку выборки должны обеспечивать возможность надежного провара. Поверхность каждой выборки должна иметь плавные очертания без резких выступов, острых углублений и заусенцев. При подварке дефектного участка следует перекрывать прилегающие участки основного металла.

В сварных швах со сквозными трещинами перед подваркой требуется зачистить поверхности детали вдоль трещины (рис. 5.2, а) и просверлить отверстия на расстоянии 10 мм от концов этой трещины (рис. 5.2, б) в целях предотвращения ее распространения. Затем нужно произвести разделку трещины в соответствии с рис. 5.2, в, после чего проварить дефектный участок на полную глубину.

Подварку дефектного участка осуществляют одним из способов сварки плавлением (ручной дуговой, дуговой в защитном газе и т.д.).

Исправленные швы сварных соединений следует повторно контролировать в соответствии с требованиями, предъявляемыми к качеству конструкции. Если при этом вновь будут обнаружены дефекты, то их необходимо повторно исправить с соблюдением

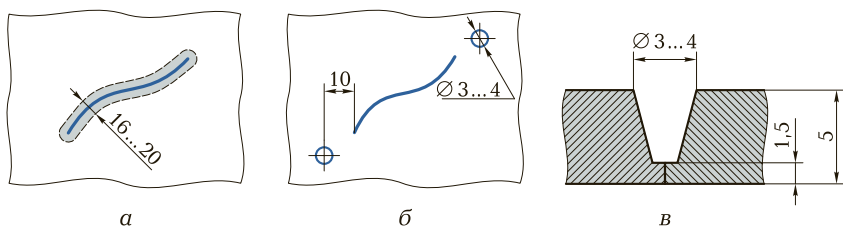


Рис. 5.2. Схемы подготовки сквозной трещины к подварке:

а — зачистка поверхности детали вдоль трещины; б — сверление отверстий на расстоянии от концов трещины; в — разделка сквозной трещины

определенных требований. Число исправлений одного и того же дефектного участка, зависящее от категории ответственности конструкции, как правило, не превышает трех.

5.2. ЗАВАРКА ДЕФЕКТНЫХ МЕСТ

Технология, рекомендуемая для исправления дефектов сварных соединений аргонодуговой сваркой, следующая:

- подобрать соответствующий режим сварки;
- сварочную дугу возбуждать на технологической пластине и после нагрева электрод переносить на место заварки;
- в процессе заварки и при возбуждении сварочной дуги не допускать соприкосновения конца вольфрамового прутка со сварочной ванной или присадочной проволокой;
- присадочную проволоку подавать только после оплавления кромок разделки и образования сварочной ванны;
- заварку дефектов производить в нижнем положении и под углом не более 30°;
- при многослойной заварке после наложения каждого слоя очищать наплавленный металл шва стальной щеткой;
- вылет вольфрамового электрода по отношению к нижней кромке газового сопла должен составлять 3...8 мм;
- горелку следует держать под углом 60...80° к поверхности детали в месте заварки дефекта;
- присадочную проволоку держать под углом к оси электрода горелки и вводить в сварочную ванну равномерными возвратно-поступательными движениями часто и небольшими порциями;
- заварку дефектов во всех случаях заканчивать с образованием усиления шва высотой 3...5 мм;
- наконечник горелки и вольфрамовый электрод периодически очищать от брызг металла;
- при случайных обрывах дуги ее повторное зажигание производить на шве на расстоянии 30 мм от места обрыва;
- длину дуги поддерживать в пределах 2,5...3,0 мм, обрыв дуги производить постепенным ее увеличением;
- процесс заварки начинать с предварительного местного подогрева дефектного места до оплавления кромок.

Если толщина материала детали более 15 мм, заварку дефектного участка следует производить многослойным швом. В этом случае высота наплавленного металла над поверхностью детали должна быть не менее 3 мм.

Для ответственных конструкций допускаются две подварки одного и того же дефектного участка, поскольку при большем числе подварок наблюдается существенное снижение механических свойств металла в этих зонах.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каким методом устраняются наружные дефекты сварных швов?
2. В каком случае допускается не заваривать выборку наружного дефекта?
3. Как удаляются дефекты с обратной стороны сварного шва?
4. Какие способы сварки плавлением применяются для подварки дефектов?
5. Как повторно возбуждается сварочная дуга при ее обрыве в процессе заварки дефекта?

Список литературы

1. *Алешин Н.П.* Контроль качества сварочных работ : учеб. пособие / Н.П.Алешин, В.Г.Щербинский. — М. : Высш. шк., 1986. — 206 с.
2. *Волченко В.Н.* Контроль качества сварки : учеб. пособие / В.Н.Волченко. — М. : Машиностроение, 1975. — 325 с.
3. *Григорьянц А.Г.* Технологические процессы лазерной обработки : учеб. пособие / А.Г.Григорьянц, И.Н.Шиганов, А.И.Мисюров. — М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2006. — 604 с.
4. *Деев Г.Ф.* Дефекты сварочных швов / Г.Ф.Деев, И.Р.Пацкевич. — Киев : Наукова думка, 1984. — 208 с.
5. *Лихачев В.Л.* Электродуговая сварка : пособие для сварщиков и специалистов сварочного производства / В.Л.Лихачев. — М. : СОЛОН-Пресс, 2006. — 640 с.
6. Неразрушающий контроль и диагностика : справочник / [В.В.Клюев, Ф.Р.Соснин, А.В.Ковалев и др.] ; под ред. В.В.Клюева. — М. : Машиностроение, 2005. — 656 с.
7. *Овчинников В.В.* Контроль качества сварных соединений : учебник для студ. учреждений сред. проф. образования / В.В.Овчинников. — 2-е изд., стер. — М. : Изд. центр «Академия», 2012. — 208 с.
8. Основы технологии электронно-лучевой и диффузионной сварки / [С.И.Глазов, А.В.Люшинский, В.С.Магнитов и др.] ; под ред. О.С.Сироткина, С.В.Чуклинова. — Рыбинск : Изд-во РГТА, 2001. — 287 с.
9. *Рязанцев В.И.* Технологические основы контактной сварки легких сплавов : учеб. пособие / В.И.Рязанцев, В.В.Овчинников. — М. : Изд-во МГИУ, 2006. — 164 с.
10. *Троицкий В.А.* Дефекты сварных соединений и средства их обнаружения / В.А.Троицкий, В.П.Радько, В.К.Демидко. — Киев : Вища шк., 1983. — 144 с.
11. *Чернышов Г.Г.* Сварочное дело : Сварка и резка металлов : учебник / Г.Г.Чернышов. — 7-е изд., стер. — М. : Изд. центр «Академия», 2012. — 496 с.

Предисловие.....	4
Глава 1. Дефекты сварных соединений	6
1.1. Строение сварного шва.....	6
1.2. Напряжения и деформации при сварке.....	17
1.3. Дефекты соединений при сварке плавлением.....	29
1.4. Влияние дефектов сварки на работоспособность конструкций.....	53
Глава 2. Организация и система контроля качества сварных швов	62
2.1. Классификация видов технического контроля.....	62
2.2. Задачи предупредительного контроля.....	63
2.3. Контроль основных и сварочных материалов.....	64
2.4. Контроль квалификации сварщиков.....	72
2.5. Контроль подготовки изделий под сварку, сварочного оборудования и технологии сварки.....	75
2.6. Статистический метод контроля.....	80
Глава 3. Контроль качества без разрушения сварных соединений	83
3.1. Визуальный и измерительный контроль.....	83
3.2. Радиографическая дефектоскопия.....	99
3.2.1. Физические основы радиографической дефектоскопии.....	99
3.2.2. Технология радиографического контроля.....	105
3.2.3. Аппаратура для рентгеновского контроля.....	115
3.3. Ультразвуковая дефектоскопия.....	119
3.3.1. Физические основы ультразвуковой дефектоскопии.....	119
3.3.2. Технология ультразвукового контроля.....	124
3.3.3. Аппаратура для ультразвукового контроля.....	143
3.4. Магнитная дефектоскопия.....	147
3.4.1. Физические основы магнитной дефектоскопии.....	147
3.4.2. Магнитопорошковый метод.....	149
3.4.3. Магнитографический метод.....	155
3.5. Вихретоковая дефектоскопия.....	159
3.6. Капиллярная дефектоскопия.....	164
3.6.1. Физические основы капиллярной дефектоскопии.....	164
3.6.2. Методика капиллярной дефектоскопии.....	167
3.7. Контроль течением.....	171
Глава 4. Контроль качества с разрушением сварного соединения	182
4.1. Механические испытания.....	182
4.2. Металлографический анализ.....	189

4.3. Химический анализ и коррозионные испытания	205
4.4. Свариваемость металла и методы ее оценки	209
Глава 5. Основные методы устранения дефектов в сварных соединениях	218
5.1. Исправление наружных и внутренних дефектов	218
5.2. Заварка дефектных мест	220
Список литературы	222

Учебное издание

Овчинников Виктор Васильевич
Дефектация сварных швов и контроль качества
сварных соединений

Учебник

3-е издание, стереотипное

Редактор *В. Н. Махова*
Технический редактор *О. Н. Крайнова*
Компьютерная верстка: *С. Ф. Фёдорова*
Корректоры *С. Ю. Свиридова, С. А. Передкова*

Изд. № 703216325. Подписано в печать 21.11.2016. Формат 60 × 90/16.
Гарнитура «Балтика». Усл. печ. л. 14,0.

ООО «Издательский центр «Академия». www.academia-moscow.ru
129085, Москва, пр-т Мира, 101В, стр. 1.

Тел./факс: (495) 648-0507, 616-0029.

Санитарно-эпидемиологическое заключение № РОСС RU.ПЩ01.Н00695 от 31.05.2016.