

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»*



Москва
Издательский центр «Академия»
2013

УДК 621.791.05(075.32)

ББК 34.441-7я722

О-355

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

Овчинников В.В.

О-355 Дефектация сварных швов и контроль качества сварных соединений : учебник для нач. проф. образования / В.В.Овчинников. — М. : Издательский центр «Академия», 2013. — 224 с.

ISBN 978-5-7695-6878-7

Учебник создан в соответствии с Федеральным государственным образовательным стандартом по профессии 150709.02 «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 учащихся учреждений начального 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*

© Овчинников В. В., 2013

© Образовательно-издательский центр «Академия», 2013

© Оформление. Издательский центр «Академия», 2013

ISBN 978-5-7695-6878-7

Уважаемый читатель!

Данный учебник является частью учебно-методического комплекта по профессии 150709.02 «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 включен 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.

Учебно-методический комплект разработан на основании Федерального государственного образовательного стандарта начального профессионального образования с учетом его профиля.

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

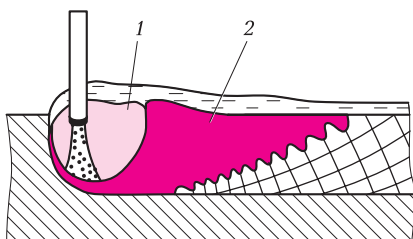
При сварке плавлением до жидкого состояния доводятся кромки соединяемых элементов — основной металл и вводимый дополнительный металл. При сварке без использования дополнительного металла расплавляются только кромки соединяемых элементов. Плавление происходит в зоне сварки — плавильном пространстве. Расплавленные 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, s , определяется по формуле

$$t_{св} \approx L/v, \quad (1.1)$$

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

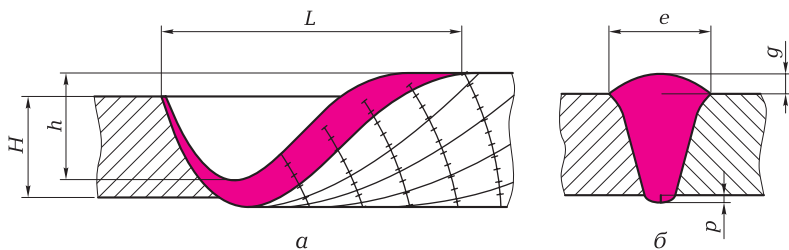


Рис. 1.2. Продольное (а) и поперечное (б) сечения сварочной ванны:

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

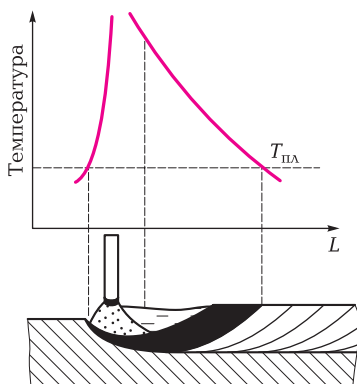


Рис. 1.3. Распределение температуры по длине сварочной ванны

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_A и гидростатическим давлением жидкого металла и шлака p_r . Если $p_A < p_r$, то металл и шлак заполняют образовавшееся углубление, что имеет место в конце процесса сварки. Если $p_A > p_r$, 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-

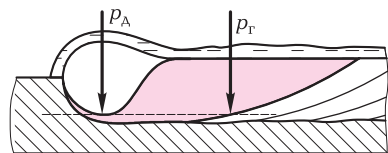


Рис. 1.4. Расположение жидкого металла в головной и хвостовой частях сварочной ванны

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 полуокружности 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 внутридендритной 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 внутридендритная 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 внутридендритной неоднородности и зональной ликвации в значительной мере зависят от условий остывания (кристаллизации) металла шва и его химического состава.

Степень внутридендритной 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

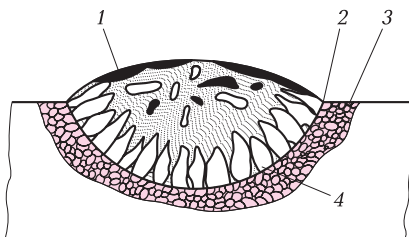
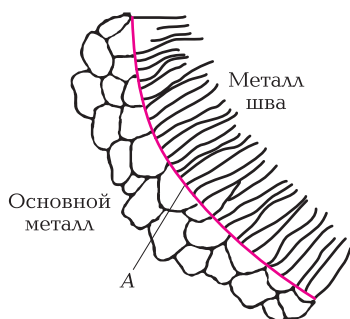


Рис. 1.6. Граница сплавления А



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 глубь 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

ракти. 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.

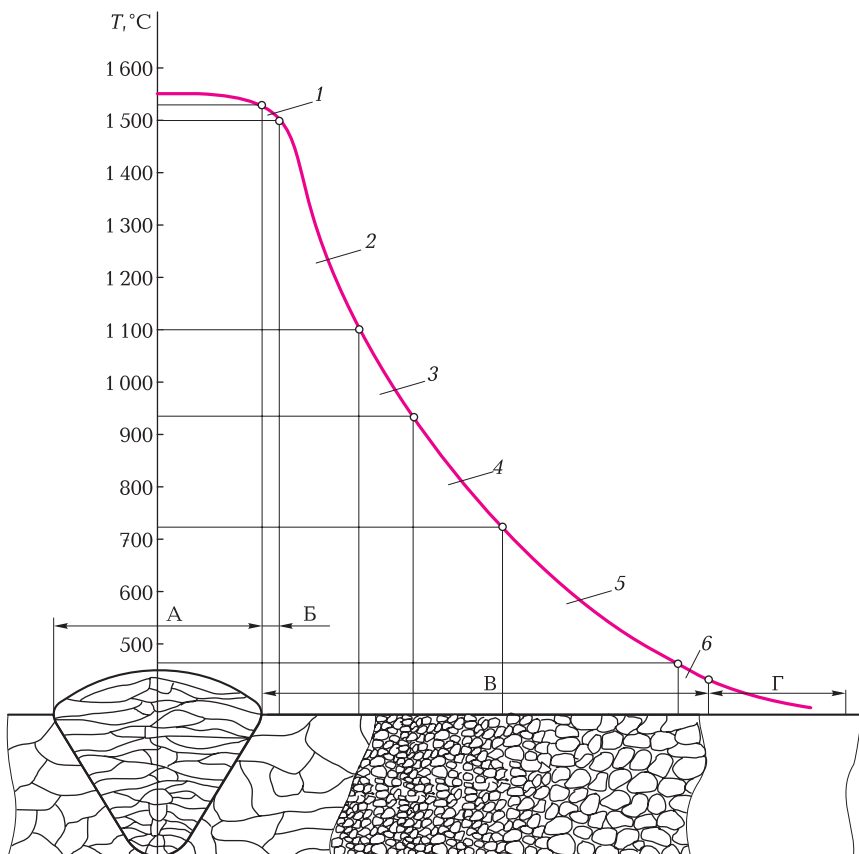


Рис. 1.8. Термический цикл сварки (зоны А...Г сварного соединения и участки 1...6 околошовной зоны):

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 зёрнами основного металла.

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