

ВВЕДЕНИЕ

Сварка плавлением является одним из основных технологических процессов, применяемых при изготовлении конструкций практически во всех отраслях промышленности. Номенклатура материалов, используемых при изготовлении сварных конструкций, весьма широка и зависит от требований по прочности, пластичности, жаростойкости, коррозионной стойкости.

Сварка плавлением связана с нагревом металла до температур плавления и последующего охлаждения с высокими скоростями, что вызывает сложные структурно-фазовые превращения в свариваемом материале. Характеристики сварных соединений во многом определяют качество конструкции, поэтому знание металловедения сварки плавлением позволит рационально выбирать материалы и технологии изготовления конструкций с оптимальными технико-экономическими показателями.

В данном методическом пособии рассмотрены основные классы сталей, применяемые в машиностроении, их состав, структура, структурно-фазовые превращения, возникающие при сварке плавлением, и влияние этих факторов на механические характеристики сварного узла. Подробно рассмотрено влияние структурных и фазовых превращений в металле при сварке на конструктивную и технологическую прочность конструкций.

Особое внимание уделено рассмотрению вопроса сварки плавлением разнородных сталей и сплавов, а также металловедческим основам формирования свойств современных трубных сталей в процессе производства.

Приведены подходы для разработки технологии сварки труб из высокопрочных сталей нового поколения.

Глава 1

НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫЕ И НИЗКОЛЕГИРОВАННЫЕ УГЛЕРОДИСТЫЕ СТАЛИ

1.1. СОСТАВ И СВОЙСТВА

Сталь — это железистый сплав, содержащий до 2% С. В углеродистых конструкционных сталях, широко используемых в машиностроении, судостроении и др., содержание углерода обычно составляет 0,06–0,9%. Углерод является основным легирующим элементом и определяет механические свойства этой группы сталей. Повышение его содержания в стали усложняет технологию сварки и затрудняет возможности получения равнопрочного сварного соединения без дефектов.

По степени раскисления сталь изготавливают кипящей, спокойной и полуспокойной (соответствующие индексы «кп», «сп» и «пс»). Кипящую сталь, содержащую не более 0,07% Si, получают при неполном раскислении металла. Сталь характеризуется резко выраженной неравномерностью распределения серы и фосфора по толщине проката. Местная повышенная концентрация серы может привести к образованию кристаллизационных трещин в шве и околошовной зоне. Кипящая сталь склонна к старению в околошовной зоне и переходу в хрупкое состояние при отрицательных температурах. В спокойной стали, содержащей не менее 0,12% Si, распределение серы и фосфора более равномерно. Эти стали менее склонны к старению. Полуспокойная сталь занимает промежуточное положение между кипящей и спокойной сталью.

Стали с содержанием до 0,25% С относятся к низкоуглеродистым. По качественному признаку углеродистые стали разделяют на две группы: обыкновенного качества и качественные.

Углеродистая сталь обыкновенного качества в соответствии с ГОСТ 380-71 подразделяется на три группы. Сталь группы А для производства сварных конструкций не используют. Сталь группы Б поставляют по химическому составу, а группы В — по химическому составу механических свойств. Сталь марок ВСт1, ВСт2, ВСт3 всех степеней раскисления и ВСт3пс, а по требованиям заказчика и сталь марок БСт1, БСт2 всех степеней раскисления и БСт3Гпс по-

ставляют с гарантией свариваемости. Обычно для ответственных конструкций используют сталь группы В. Углеродистую качественную сталь с нормальным и повышенным (марки 15Г и 20Г) содержанием марганца поставляют по ГОСТ 1050-74. Она содержит пониженное количество серы. Стали этой группы для изготовления конструкций обычно применяют в горячекатаном состоянии и в меньшем объеме — после термообработки, нормализации или закалки с отпуском (термоупрочнение). Механические свойства этих сталей зависят от термообработки.

Легированными называются стали, содержащие специально введенные элементы. Марганец считается легирующим компонентом при содержании его в стали более 0,7% по нижнему пределу, а кремний — свыше 0,4%. Поэтому углеродистые стали марок ВСтЗГпс, 15Г и 20Г с повышенным содержанием марганца соответствуют низколегированным конструкционным сталям. Легирующие элементы, вводимые в сталь, вступая во взаимодействие с железом и углеродом, изменяют ее свойства. Это повышает механические свойства стали и, в частности, снижает порог хладноломкости. В результате появляется возможность снизить массу конструкций.

При производстве сварных конструкций широко используют низкоуглеродистые, низколегированные конструкционные стали. Суммарное содержание легирующих элементов в этих сталях обычно не превышает 4,0%, а углерода 0,25%. Низколегированные стали в зависимости от вводимых в сталь легирующих элементов разделяют на марганцевые, кремнемарганцевые, хромокремненикелемедистые и т. д.

Наличие марганца в сталях повышает ударную вязкость и хладноломкость, обеспечивая удовлетворительную свариваемость. По сравнению с другими низколегированными сталями марганцевые позволяют получить сварные соединения более высокой прочности при знакопеременных и ударных нагрузках. Введение в низколегированные стали небольшого количества меди (0,3–0,4%) повышает стойкость стали против коррозии атмосферной и в морской воде. Для изготовления сварных конструкций низколегированные стали используют в горячекатаном состоянии. Термообработка значительно улучшает механические свойства стали, которые, однако, зависят от толщины проката. При этом может быть

достигнуто значительное снижение порога хладноломкости. Поэтому в последние годы некоторые марки низколегированных сталей для производства сварных конструкций используют после упрочняющей термообработки.

1.2. ОБРАЗОВАНИЕ ШВА И ОКОЛОШОВНОЙ ЗОНЫ

В сварочной ванне расплавленные основной и, если используют, дополнительный металлы перемешиваются. По мере перемещения источника теплоты вслед за ним перемещается и сварочная ванна. В результате потерь теплоты на излучение, теплоотвод в изделие, а при электрошлаковой сварке — и в формирующиеся ползуны в хвостовой части ванны происходит понижение температуры расплавленного металла, который, затвердевая, образует сварной шов. Форма и объем сварочной ванны зависят от способа сварки и основных параметров режима. Ее объем может составлять от миллиметров до сотен кубических сантиметров.

В результате этого изменяются и условия затвердевания (кристаллизации) сварочной ванны, которые также зависят от условий теплоотвода, т. е. от толщины свариваемого металла, типа сварного соединения, способа сварки, наличия шлака на поверхности сварочной ванны и т. д. Таким образом, названные выше условия определяют и неодинаковое время существования в расплавленном состоянии металла в различных участках сварочной ванны.

Кристаллизация металла сварочной ванны у границы с нерасплавившимся основным металлом (границы сплавления) протекает очень быстро. По мере удаления от нее к центру ванны длительность пребывания металла в расплавленном состоянии увеличивается. Переход металла из жидкого состояния в твердое состояние — первичная кристаллизация на границе сплавления начинается от частично оплавленных зерен основного и ранее наплавленного металла (рис. 1.1) в виде дендритов, растущих в направлении, обратном теплоотводу, т. е. вглубь сварочной ванны. Таким образом, возникают общие зерна. При многослойной сварке, когда кристаллизация начинается от частично оплавленных зерен предыдущего шва, возможно прораствание кристаллов из слоя в слой — образуется транскристаллитная структура.

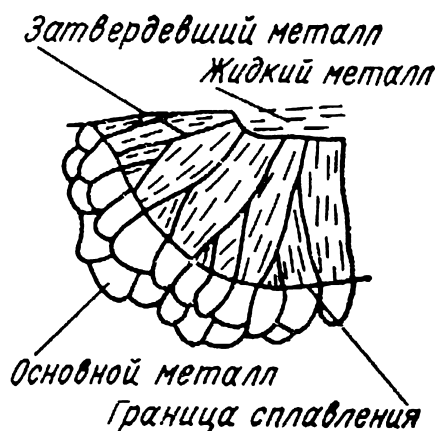


Рис. 1.1

Строение зоны плавления

В различные этапы кристаллизации металла сварочной ванны и роста дендритов состав кристаллизующегося жидкого металла не одинаков. Первые порции металла менее загрязнены примесями, чем последние. В результате образуется зональная и внутридендритная химическая неоднородность металла. Неоднородность химического состава в различных участках одного дендрита, когда его поверхностные слои более загрязнены примесями — внутридендритная ликвация, имеет преимущественное развитие в сварном шве. Ликвация в сварном шве зависит от его химического состава, формы сварочной ванны и скорости кристаллизации. Способ сварки оказывает существенное влияние на развитие ликвации.

Первичная кристаллизация металла сварочной ванны имеет прерывистый характер, вызванный выделением перед фронтом кристаллизации скрытой теплоты кристаллизации. Это приводит к характерному строению шва и появлению ликвации в виде слоистой неоднородности, которая в наибольшей степени проявляется вблизи границы сплавления. Слоистая ликвация также зависит от характера и скорости кристаллизации металла сварочной ванны. Слоистая и дендритная ликвации уменьшаются при улучшении условий диффузии ликвирующих элементов в твердом металле.

Образовавшиеся в затвердевшем металле шва в результате первичной кристаллизации столбчатые кристаллиты имеют аустенитную микроструктуру (диаграмма состояния

системы Fe-C сплавов на рисунке 1.2, справа). При дальнейшем охлаждении металла, при температуре аллотропического превращения A_{c3} начинается процесс перестройки атомов пространственной решетки — перекристаллизация. В результате перекристаллизации происходит распад части аустенита и превращение его в феррит. Так как растворимость углерода в феррите меньше, чем в аустените, выделяющийся углерод вступает в химическое соединение с железом, образуя цементит.

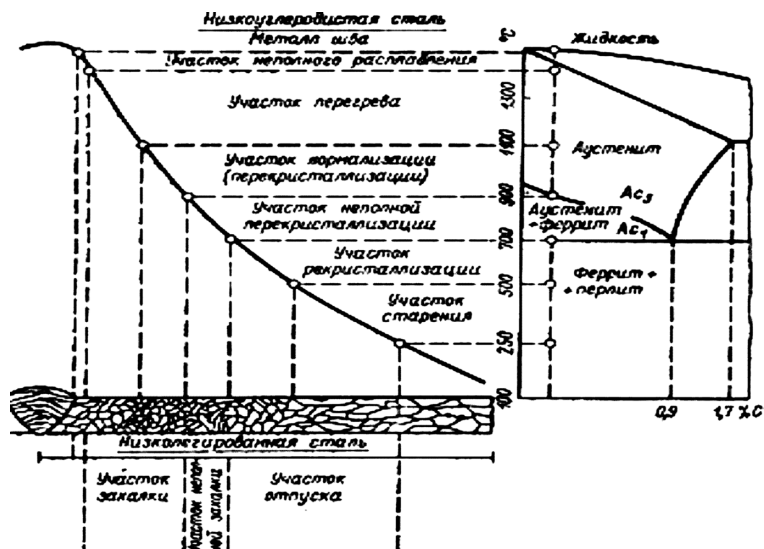


Рис. 1.2

Строение зоны термического влияния сварного шва при дуговой сварке низкоуглеродистой и низколегированной стали

Дальнейшее охлаждение стали ниже температуры превращения A_{c1} , приводит к образованию эвтектоидной смеси феррита и цементита — перлита. Вторичная кристаллизация сопровождается значительным увеличением числа зерен, так как в пределах первичного зерна аустенита образуется несколько зерен перлита и феррита. Это благоприятно влияет на механические свойства стали.

С увеличением в стали содержания углерода количество перлита возрастает. Одновременно может наблюдаться и рост величины зерен. Количество и строение перлитной фазы зависит также от скорости охлаждения металла шва.

Слоистая ликвация способствует увеличению химической неоднородности металла на этом участке по сравнению с металлом шва. Состав и структура металла в этой зоне зависят также от диффузии элементов, которая может проходить как из основного нерасплавившегося металла в жидкий металл, так и наоборот. Этот участок по существу и является местом сварки. Его протяженность зависит от состава и свойств металла, способа сварки и обычно не превышает 0,5 мм, но свойства металла в нем могут оказывать решающее влияние на свойства всего сварного соединения.

На участке перегрева металл нагревался в интервале температур от 1100–1150°C до линии солидуса. Металл, нагревавшийся выше температуры A_{c3} , полностью переходит в состояние аустенита, при этом происходит рост зерна, размеры которого увеличиваются тем больше, чем выше температура металла. Даже непродолжительное пребывание металла при температурах выше 1100°C приводит к значительному увеличению размера зерен. Крупнозернистая структура металла на этом участке перегрева после охлаждения может привести к образованию неблагоприятной видманштеттовой структуры. Металл, нагретый незначительно выше температур A_{c3} , имеет мелкозернистую структуру с высокими механическими свойствами. Этот участок называется участком нормализации (перекристаллизации). На участке неполной перекристаллизации металл нагревался до температуры между A_{c1} и A_{c3} . Поэтому он характеризуется почти неизменным ферритным зерном и некоторым измельчением и сфероидизацией перлитных участков.

Металл, нагревавшийся в интервале температур 500–550°C до A_{c1} (участок рекристаллизации), по структуре незначительно отличается от основного. Если до сварки металл подвергался пластической деформации, то при нагреве в нем происходит сращивание раздробленных зерен основного металла — рекристаллизация. При значительной выдержке при этих температурах может произойти значительный рост зерен. Механические свойства металла этого участка могут несколько снизиться вследствие разупрочнения ввиду снятия наклепа.

При нагреве металла в интервале температур 100–500°C (участок старения) его структура в процессе сварки не претерпевает видимых изменений. Однако в некоторых сталях, содержащих повышенное количество кислорода и азота (обычно кипящих), их нагрев при температурах 150–350°C сопровождается резким снижением ударной вязкости и сопротивляемости разрушению.

Многослойная сварка ввиду многократного воздействия термического цикла сварки на основной металл в околошовной зоне изменяет строение и структуру зоны термического влияния. При сварке длинными участками после каждого последующего прохода предыдущий шов подвергается своеобразному отпуску.

При сварке короткими участками шов и околошовная зона длительное время находятся в нагретом состоянии. Помимо изменения структур, это увеличивает и протяженность зоны термического влияния. Последующие слои термически воздействуют на ранее наплавленные швы, имеющие структуру литого металла, и создают в них зону термического влияния, строение и структура которой значительно отличаются от зоны термического влияния в основном металле, подвергавшемся прокатке. Эта зона на участке перегрева обычно не имеет крупного зерна и характеризуется мелкозернистыми структурами с повышенными пластическими свойствами.

Структура металла швов при электрошлаковой сварке может характеризоваться наличием трех зон (рис. 1.3а): зона 1 крупных столбчатых кристаллов, которые растут в направлении, обратном отводу теплоты; зона 2 тонких столбчатых кристаллов с меньшей величиной зерна и несколько большим их отклонением в сторону теплового центра; зона 3 равноосных кристаллов, располагающаяся посередине шва. В зависимости от способа электрошлаковой сварки, химического состава металла шва и режима сварки может быть получено различное строение швов. Повышение содержания в шве углерода и марганца увеличивает, а уменьшение интенсивности теплоотвода уменьшает ширину зоны 1.

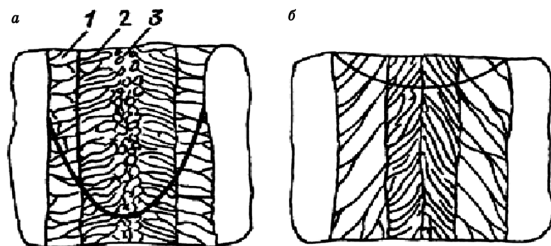


Рис. 1.3

Строение металла шва при электрошлаковой сварке

Направленность кристаллизации зависит от коэффициента формы шва. При его увеличении за счет уменьшения скорости подачи электродной проволоки (рис. 1.3б) происходит отклонение роста кристаллов в сторону теплового центра сварочной ванны. Подобные швы имеют повышенную стойкость против кристаллизационных трещин. Медленное охлаждение швов при электрошлаковой сварке в интервале температур фазовых превращений способствует тому, что их структура характеризуется грубым ферритно-перлитным строением с утолщенной оторочкой феррита по границам кристаллов.

Термический цикл околошовной зоны при электрошлаковой сварке характеризуется длительным ее нагревом и выдержкой при температурах перегрева и медленным охлаждением. Поэтому в ней могут образовываться грубые видманштеттовы структуры, которые по мере удаления от линии сплавления сменяются нормализованной мелкозернистой структурой. В зоне перегрева может наблюдаться явление ударной вязкости, что устраняется последующей термообработкой (нормализация с отпуском). Термический цикл электрошлаковой сварки, способствуя распаду аустенита в области перлитного и промежуточного превращений, благоприятен при сварке низколегированных сталей, так как способствует подавлению образования закалочных структур.

Основным фактором, определяющим после окончания сварки конечную структуру металла в отдельных участках зоны термического влияния, является термический цикл, которому подвергался металл этого участка при сварке. Решающими факторами термического цикла сварки являются максимальная температура, достигаемая металлом в рассматриваемом объеме, и скорость его охлаждения. Ширина и конечная структура различных участков зоны термического влияния определяются способом и режимом сварки, составом и толщиной основного металла. Общая протяженность зоны термического влияния может достигать 30 мм. При более концентрированных источниках теплоты протяженность зоны меньше.

Рассмотренное разделение зоны термического влияния приближенно. При переходе от одного структурного участка к другому имеются промежуточные структуры. Кроме того, диаграмму железо-углерод мы рассматривали статично, в какой-то момент существования сварочной ванны.

В действительности температура в точках зоны термического влияния изменяется во времени в соответствии с термическим циклом сварки.

Повышение прочности низколегированных сталей достигается легированием их элементами, которые растворяются в феррите и измельчают перлитную составляющую. Наличие этих элементов при охлаждении тормозит процесс распада аустенита и действует равносильно некоторому увеличению скорости охлаждения. Поэтому при сварке в зоне термического влияния на участке, где металл нагревался выше температур A_{c1} , при повышенных скоростях охлаждения могут образовываться закалочные структуры. Металл, нагревавшийся до температур значительно выше A_{c3} , будет иметь более грубозернистую структуру.

При сварке термически упрочненных сталей на участках рекристаллизации и старения может произойти отпуск металла с образованием структуры сорбита отпуска и понижением прочностных свойств металла. Технология изготовления сварных конструкций из низколегированных сталей должна предусматривать минимальную возможность появления в зоне термического влияния закалочных структур, способных привести к холодным трещинам, особенно при сварке металла больших толщин. При сварке термически упрочненных сталей следует принимать меры, предупреждающие разупрочнение стали на участке отпуска.

На участке неполного расплавления объемы металла нагревались в интервале температур между солидусом и ликвидусом, что приводило к частичному расплавлению (оплавлению) зерен металла. Пространство между нерасплавившимися зернами заполнено жидкими прослойками, связанными с металлом сварочной ванны. Поэтому в него могли проникать и элементы, вводимые в металл сварочной ванны. В результате состав металла на этом участке может отличаться от состава основного металла, а за счет нерасплавившихся зерен основного металла — и от состава металла шва.

При некоторых условиях может образоваться видманштеттова структура, характеризующаяся выделением феррита из аустенита не только по границам зерен, но и по кристаллографическим плоскостям отдельных кристаллитов. Видманштеттова структура в сварных соединениях не желательна, так как снижает их механические свойства. Металл шва при комнатной температуре и обычных для

сварки скоростях охлаждения в области температур перекристаллизации имеет ферритно-перлитную или сорбитообразную структуру.

Теплота, выделяемая при сварке, распространяется вследствие теплопроводности в основной металл. Этот процесс характеризуется термическим циклом. В каждой точке околошовной зоны температура вначале нарастает, достигая максимума, а затем снижается. Чем ближе точка расположения к границе сплавления, тем быстрее происходит нагрев металла в данном участке и тем выше максимальная температура, достигаемая в нем. При значительном удалении от шва нагрев основного металла практически не происходит.

Таким образом, различные участки основного металла характеризуются различными максимальными температурами и различными скоростями нагрева и охлаждения, т. е. подвергаются своеобразной термообработке. Поэтому структура и свойства основного металла в различных участках сварного соединения различны. Зону основного металла, в которой под воздействием термического цикла при сварке произошли фазовые и структурные изменения, называют зоной термического влияния. Характер этих превращений и протяженность зоны термического влияния зависят от состава и теплофизических свойств свариваемого металла, способа и режима сварки, типа сварного соединения и т. п.

На рисунке 1.2 слева показаны поперечное сечение стыкового сварного соединения при однослойной сварке низкоуглеродистой стали, кривая распределения температур по поверхности сварного соединения в момент, когда металл шва находится в расплавленном состоянии, и структуры различных участков зоны термического влияния шва после сварки, образованные в результате действия термического цикла сварки. Эта схема — условная, так как кривая распределения температур по поверхности сварного соединения во время охлаждения меняет свой характер.

1.3. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О СВАРИВАЕМОСТИ

Рассматриваемые стали обладают хорошей свариваемостью. Технология их сварки должна обеспечивать определенный комплекс требований, основные из которых —

обеспечение надежности и долговечности конструкций (особенно из термически упрочняемых сталей, обычно используемых при изготовлении ответственных конструкций). Важное требование при сварке рассматриваемых сталей — обеспечение равнопрочности сварного соединения с основным металлом и отсутствие дефектов в сварном шве. Для этого механические свойства металла шва и околошовной зоны должны быть не ниже нижнего предела соответствующих свойств основного металла.

В некоторых случаях конкретные условия работы конструкций допускают снижение отдельных показателей механических свойств сварного соединения. Однако во всех случаях, особенно при сварке ответственных конструкций, швы не должны иметь трещин, непроваров, пор, подрезов. Геометрические размеры и форма швов должны соответствовать требуемым. Сварное соединение должно быть стойким против перехода в хрупкое состояние. Иногда к сварному соединению предъявляют дополнительные требования (работоспособность при вибрационных и ударных нагрузках, пониженных температурах и т. д.). Технология должна обеспечивать максимальную производительность и экономичность процесса сварки при требуемой надежности конструкции.

Механические свойства металла шва и сварного соединения зависят от его структуры, которая определяется химическим составом, режимом сварки, предыдущей и последующей термообработкой. Химический состав металла шва при сварке рассматриваемых сталей незначительно отличается от состава основного металла. Это различие сводится к снижению содержания в металле шва углерода для предупреждения образования структур закалочного характера при повышенных скоростях охлаждения. Возможное снижение прочности металла шва, вызванное уменьшением содержания в нем углерода, компенсируется легированием металла через проволоку, покрытие или флюс марганцем, кремнием, а при сварке низколегированных сталей — также и за счет перехода этих элементов из основного металла.

Таким образом, химический состав металла шва зависит от доли участия основного и дополнительного металлов в образовании металла шва и взаимодействий между металлом, шлаком и газовой фазой.

Повышенные скорости охлаждения металла шва также способствуют повышению его прочности (рис. 1.4), однако при этом снижаются его пластические свойства и ударная вязкость. Это объясняется изменением количества и строения перлитной фазы.

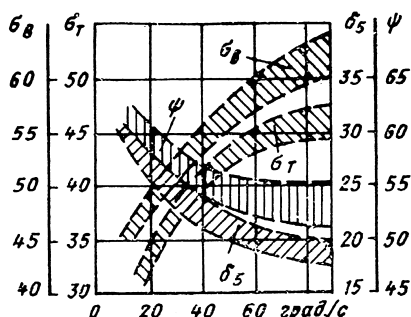


Рис. 1.4

Зависимость между скоростью охлаждения и механическими свойствами металла шва при дуговой сварке низкоуглеродистых сталей

Критическая температура перехода металла однослойного шва в хрупкое состояние практически не зависит от скорости охлаждения. Скорость охлаждения металла шва определяется толщиной свариваемого металла, конструкцией сварного соединения, режимом сварки и начальной температурой изделия. Влияние скорости охлаждения в наибольшей степени проявляется при дуговой сварке однослойных угловых швов и последнего слоя многослойных угловых и стыковых швов при наложении их на холодные, предварительно сваренные швы.

Металл многослойных швов, кроме последних слоев, подвергающийся действию повторного термического цикла сварки, имеет более благоприятную мелкозернистую структуру. Поэтому он обладает более низкой критической температурой перехода в хрупкое состояние. Пластическая деформация, возникающая в металле шва под воздействием сварочных напряжений, также повышает предел текучести металла шва.

Обеспечение равнопрочности металла шва при дуговых способах сварки низкоуглеродистых и низколегированных нетермоупрочненных сталей обычно не вызывает затруднений. Механические свойства металла околошовной зоны

зависят от конкретных условий сварки и от вида термообработки стали перед сваркой.

При сварке низкоуглеродистых горячекатаных (в состоянии поставки) сталей при толщине металла до 15 мм на обычных режимах, обеспечивающих небольшие скорости охлаждения, структуры металла шва и околошовной зоны примерно такие, как было рассмотрено выше (рис. 1.2). Повышение скоростей охлаждения при сварке на форсированных режимах металла повышенной толщины, однопроходных угловых швов, при отрицательных температурах и т. д. может привести к появлению в металле шва и околошовной зоны закалочных структур на участках перегрева и полной и неполной рекристаллизации.

Скорость охлаждения для низкоуглеродистых сталей оказывает большое влияние на их механические свойства. При повышении содержания марганца это влияние усиливается. Поэтому даже при сварке горячекатаной низкоуглеродистой стали марки ВСт3 при указанных выше условиях не исключена возможность получения в сварном соединении закалочных структур. Если сталь перед сваркой прошла термическое упрочнение — закалку, то в зоне термического влияния шва на участках рекристаллизации и старения будет наблюдаться отпуск металла, т. е. снижение его прочностных свойств. Уровень изменения этих свойств зависит от погонной энергии, типа сварного соединения и условий сварки.

При сварке низколегированных сталей изменение свойств металла шва и околошовной зоны проявляется более значительно. Сварка горячекатаной стали способствует появлению закалочных структур на участках перегрева и нормализации. Уровень изменения механических свойств металла больше, чем при сварке низкоуглеродистых сталей. Термообработка низколегированных сталей, наиболее часто — закалка (термоупрочнение) с целью повышения их прочностных показателей при сохранении высокой пластичности усложняет технологию сварки.

На участках рекристаллизации и старения происходит разупрочнение стали под действием высокого отпуска с образованием структур преимущественно троостита или сорбита отпуска. Это разупрочнение тем больше, чем выше была прочность основного металла, полученная после термообработки. При температурах выше $A_{с3}$ разупрочнение обусловлено совместно протекающими процессами высокого отпуска и фазовой перекристаллизации. В этих процессах решающее значение имеют скорость охлаждения металла шва и в первую очередь погонная энергия при сварке.

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

e-Univers.ru