

С. В. Михайлицын
И. Н. Зверева
М. А. Шекшеев

СВАРКА СПЕЦИАЛЬНЫХ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ



«Инфра-Инженерия»

УДК 621.791
ББК 34.641
М69

Михайлицын, С. В.

М69 Сварка специальных сталей и сплавов : учебник / С. В. Михайлицын, И. Н. Зверева, М. А. Шекшеев. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2020. – 192 с. : ил., табл.
ISBN 978-5-9729-0481-5

Рассмотрена технология создания качественных сварных соединений специальных сталей и сплавов. Показаны различные способы сварки, представлены пути обоснованного выбора способа сварки в зависимости от материала, размеров и конфигурации сварного изделия, а также выбора необходимых сварочных материалов, оборудования и режимов сварки.

Для студентов магистратуры и бакалавриата машиностроительных направлений подготовки, а также специалистов и исследователей сварочного производства.

УДК 621.791
ББК 34.641

ISBN 978-5-9729-0481-5

© Михайлицын С. В., Зверева И. Н., Шекшеев М. А., 2020
© Издательство «Инфра-Инженерия», 2020
© Оформление. Издательство «Инфра-Инженерия», 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	4
1. Основные сведения о специальных сталях и их поведении при сварке.....	5
2. Сварка низкоуглеродистой и низколегированной конструкционной стали	12
3. Сварка углеродистой низколегированной и среднелегированной закаливающейся стали.. ..	24
4. Сварка высокохромистой мартенситной, мартенситно-ферритной и ферритной стали	58
5. Сварка высоколегированной аустенитной стали и сплавов.. ..	72
6. Технология сварки чугуна.....	102
7. Технология сварки цветных металлов и сплавов на их основе	116
8. Сварка меди и сплавов на её основе.....	120
9. Сварка алюминия и сплавов на его основе.....	129
10. Сварка магния и сплавов на его основе	138
11. Сварка никеля и сплавов на его основе	145
12. Сварка титана и сплавов на его основе.....	153
13. Сварка тугоплавких и химически активных конструкционных металлов (циркония, ниобия, тантала, молибдена, гафния, ванадия, хрома, вольфрама).....	161
14. Технология сварки разнородных металлов и сплавов. Сварка биметалла	167
Заключение.....	182
Вопросы для самоконтроля	183
Библиографический список.....	185
Приложение	186

1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О СПЕЦИАЛЬНЫХ СТАЛЯХ И ИХ ПОВЕДЕНИИ ПРИ СВАРКЕ

1.1. Содержание и значение курса

Курс «Сварка специальных сталей и сплавов» включает:

- изучение состава, свойств и области применения углеродистой конструкционной стали, углеродистой низко- и среднелегированной закаливающейся стали, высокохромистой мартенситной, мартенситно-ферритной и ферритной стали, высоколегированной аустенитной стали и сплавов, а также чугуна, цветных металлов и сплавов на их основе, тугоплавких и разнородных металлов и сплавов;
- изучение процессов образования швов и околошовной зоны при сварке, основных сведений о свариваемости специальных сталей и сплавов;
- изучение подходов к выбору способов, техники, технологии сварки и сварочных материалов;
- изучение свойств сварных соединений, выполненных различными способами сварки, требований и способов технологической обработки конструкций после сварки.

Курс «Сварка специальных сталей и сплавов» имеет большое теоретическое и практическое значение в выборе способов, техники, технологии сварки и сварочных материалов при производстве сварных конструкций из специальных сталей и сплавов (легированных, теплоустойчивых, жаропрочных, жаростойких, хладостойких, коррозионно-стойких, жаропрочных никелевых сталей, чугуна, цветных металлов и др.) в различных отраслях промышленности (энергетическом, криогенном, химическом, нефтехимическом машиностроении и т. д.).

1.2. Углеродистая конструкционная сталь

В зависимости от содержания углерода конструкционная *углеродистая* сталь делится на 3 группы: низко-, средне- и высокоуглеродистая с содержанием углерода, соответственно, до 0,25 %; 0,26–0,45 % и 0,46–0,75 %. Повышение содержания углерода и основного легирующего элемента в этой стали, усложняет технологию сварки и затрудняет получение равнопрочного сварного соединения без дефектов. С увеличением содержания углерода повышается склонность к перегреву и закалке при сварке, образованию холодных и горячих трещин и пор в металле шва, трудно достигается равнопрочность металла шва с основным металлом.

Местная повышенная концентрация серы из-за характерной неоднородности может привести к образованию кристаллизационных трещин в шве и околошовной зоне. Спокойная сталь в отличие от кипящей стали менее склонна к старению в околошовной зоне при сварке и слабее реагирует на сварочный нагрев.

Легированной называется сталь, содержащая специально введённые элементы. Например, марганец считается легирующим компонентом при содержании его в стали более 0,7 %. Наличие в стали марганца повышает ударную вязкость и хладноломкость, обеспечивая удовлетворительную свариваемость.

1.3. Углеродистая низко- и среднелегированная закаливающаяся сталь

Низколегированная сталь обладает небольшой чувствительностью к термическому циклу сварки. Это связано с невысоким содержанием углерода (до 0,25 %) и низкой степенью легирования (суммарно до 4 %).

Повышение содержания углерода, а также степени легирования стали увеличивает её склонность к резкой закалке, в связи с этим, такие стали обладают высокой чувствительностью к термическому циклу сварки, а околошовная зона оказывается резко закалённой и непластичной при всех режимах сварки, обеспечивающих удовлетворительное формирование шва. Для снижения скорости охлаждения околошовной зоны необходим предварительный подогрев свариваемого изделия.

Но уменьшение скорости охлаждения вследствие предварительного подогрева может привести к образованию мартенсита (значительного роста зёрен), что вызывает резкое снижение пластичности. Т. е. чрезмерно высокий подогрев наоборот может вызвать ухудшение свойств (ударной вязкости) металла зоны термического влияния.

В *среднелегированной* высокопрочной стали содержание углерода составляет до 0,5 % при комплексном легировании в сумме 5–9 % (хром, никель и молибден упрочняют феррит и повышают прокаливаемость стали). На практике применяют сталь с содержанием углерода 0,12–0,17 %, что существенно улучшает её свариваемость.

Увеличение степени легирования при повышенном содержании углерода повышает устойчивость аустенита, и при всех скоростях охлаждения околошовной зоны распад аустенита происходит в мартенситной области. Поэтому такую сталь сваривают без предварительного подогрева, но подогревают её в процессе сварки для увеличения времени пребывания в субкритическом интервале температур (сварка каскадом, блоками, короткими участками, подогрев шва).

1.4. Высокохромистая мартенситная, мартенситно-ферритная и ферритная сталь

Хром придаёт сплавам с железом ряд специфических свойств. Так при наличии ~12 % Cr возникающая при окислении поверхностная плёнка

приводит к пассивации этой поверхности, и сталь становится коррозионно-стойкой. Для обеспечения окалиностойкости при 800–1050 °С содержание хрома должно быть до 30 %.

Хромистая сталь при содержании менее 0,2 % углерода и более 16 % хрома не имеет γ -фазы при температурах от комнатной до плавления и является *ферритной*.

Средне- и высоколегированная хромистая сталь (до 12–13 % Cr и $C \geq 0,05$ %), имеющая область аустенита при высоких температурах, после охлаждения даже с умеренными скоростями при комнатной температуре приобретает *мартенситную* структуру.

При более высокой концентрации хрома (больше 16 % Cr при 0,06 % C) сталь в процессе нагрева не будет целиком переходить в состояние аустенита, а будет содержать часть ферритной фазы. Последующее её охлаждение приведёт к получению смешанной *мартенситно-ферритной* структуры.

Т. е. при 0,05–0,06 % C сталь с содержанием до 12–13 % Cr относится к мартенситному классу; при 13–16 % Cr – к мартенситно-ферритному классу, а при $Cr > 16$ % – к ферритному классу.

Сталь *мартенситного* класса при сварке закаливается на мартенсит. Её твёрдость и низкая деформационная способность приводят к возможности образования холодных трещин. Модифицируют металл швов титаном, а также снижают погонную энергию при сварке. После сварки сварное соединение подвергают специальной термообработке.

Общей характеристикой для высокохромистой *ферритной* стали служит её склонность к росту зерна в результате сварочного нагрева, что ведёт к потере пластичности и вязкости при комнатной температуре и ниже. В целях максимального ограничения роста зёрен при сварке предпочтительны методы сварки с сосредоточенными источниками теплоты (дуговая сварка, а не газовая) и малой погонной энергией. Наиболее предпочтительными являются ручная дуговая сварка и механизированная сварка под флюсом и в углекислом газе.

1.5. Высоколегированная аустенитная сталь и сплавы

Высоколегированная аустенитная сталь имеет повышенное содержание легирующих материалов – хрома 18–25 % (хром обеспечивает жаростойкость и коррозионную стойкость) и никеля 8–35 % (никель стабилизирует аустенитную структуру и повышает жаропрочность, пластичность и технологичность). Это позволяет применять аустенитную сталь в качестве коррозионно-стойкой, жаропрочной, жаростойкой и криогенной, в качестве конструкционных материалов в теплоэнергетических, химических и атомных установках, где они подвергаются совместному действию напряжений, высоких температур и агрессивных сред.

Для сокращения сталь обозначают цифрами, указывающими на содержание основных легирующих элементов хрома и никеля (например, 18–8, 25–20).

1.6. Состояние и перспективы использования специальной стали и сплавов в различных отраслях промышленности

Высоколегированная сталь и сплавы по сравнению с легированной сталью обладают высокой хладостойкостью, жаропрочностью, коррозионной стойкостью и жаростойкостью. Эти важнейшие материалы для химического, нефтяного, энергетического машиностроения и ряда других отраслей промышленности используют при изготовлении конструкций, работающих в широком диапазоне: от отрицательных температур до положительных температур.

Характерное отличие *коррозионно-стойкой* стали – пониженное содержание углерода (до 0,12 %), оказывающее решающее влияние на межкристаллитную коррозию. Благодаря этим свойствам эту сталь используют при изготовлении трубопроводов и аппаратов для химической и нефтяной промышленности.

Одной из основных областей применения *жаропрочной* стали, легированной элементами-упрочнителями (молибден до 7 %, вольфрамом до 7 %) – энергетическое машиностроение (трубопроводы, детали и корпуса газовых и паровых турбин и т. д.), где рабочие температуры достигают 750 °С и выше.

Жаростойкие сталь и сплавы обладают стойкостью против химического разрушения поверхности в газовых средах при температуре 1100–1150 °С. Обычно её используют для слабонагруженных деталей (нагревательные элементы, печные арматуры, газопроводные системы и т. д.). Высокая окислостойкость этой стали и сплавов достигается легированием их алюминием (до 2,5 %) и вольфрамом (до 7 %).

В отличие от углеродистой стали при закалке высоколегированная сталь приобретает повышенные пластические свойства. Структура высоколегированной стали зависит от содержания основных элементов: хрома (ферритизатор) и никеля (аустенитизатор). На структуру влияет также содержание и других элементов-ферритизаторов (Si, Mo, Ti, Al, Nb, W V) и элементов-аустенитизаторов (C, Co, Ni, Cu, Mn, B).

1.7. Характеристики работоспособности сварных соединений

Свариваемость аустенитной стали и сплавов затруднена многокомпонентностью их легирования и разнообразием условий эксплуатации (коррозионная стойкость, жаростойкость или жаропрочность). Общей сложностью сварки является предупреждение образования в шве и околошовной зоне кристаллизационных (горячих) трещин. Они могут возникнуть и при термообработке изделий или во время работы конструкций при повышенных температурах.

К сварным соединениям из *жаропрочной* стали предъявляются требования длительного сохранения высоких механических свойств при повышенных температурах. Термическое старение при 350–500 °С может привести к появлению 475-градусной хрупкости.

При сварке *высокопрочной* стали в околошовной зоне возможно образование холодных трещин. Подбор химического состава металла шва, получение в нём благоприятных структур за счёт выбора режима сварки и термообработки, снижение уровня остаточных напряжений за счёт уменьшения жёсткости сварных соединений или термообработки – это основные пути предотвращения охрупчивания сварных соединений и образования в них трещин (например, предварительный или сопутствующий подогрев до температуры 350–450 °С).

Высокая коррозионная стойкость *жаростойкой* стали в газовых средах при повышенной температуре определяется образованием и сохранением на поверхности прочных и плотных плёнок окислов (за счёт легирования хромом, кремнием, алюминием). В сварных соединениях достигается максимальное приближение состава шва к составу основного металла.

При использовании высоколегированной аустенитной стали основное требование к сварным соединениям – стойкость к различным видам коррозии (межкристаллитной, ножевой, коррозионному растрескиванию).

1.8. Влияние легирующих добавок

Одна из основных трудностей при сварке специальной стали и сплавов – это предупреждение образования в швах и околошовной зоне горячих трещин. Это достигается регулированием химического состава сварных швов (получение аустенитной структуры с мелкодисперсными карбидами и интерметаллидами). Так, например, благоприятно легирование швов молибденом, марганцем, вольфрамом.

1.9. Изменение свойств стали под действием термомеханического цикла сварки

В связи с пониженным коэффициентом теплопроводности высоколегированной стали в ней одинаковые изотермы более развиты, чем в углеродистой. Это увеличивает глубину проплавления основного металла, а с учётом повышенного коэффициента теплового расширения возрастает и *коробление* изделий.

Для уменьшения коробления применяют способы сварки с максимальной концентрацией тепловой энергии.

1.10. Технологическая прочность сварных соединений

Механические свойства металла шва и сварного соединения зависят от его структуры, определяемой химическим составом, условиями остывания сварной конструкции и термообработкой.

На прочность сварных соединений оказывает влияние получаемая при сварке структура металла. При сварке низколегированной стали при

небольшом количестве закалочных структур их влияние на механические свойства сварных соединений незначительно, поскольку эти составляющие дезориентировано и равномерно расположены в мягкой ферритной основе. Однако при увеличении доли закалочных структур пластичность металла и его стойкость против хрупкого разрушения ухудшаются. Легирование стали марганцем и кремнием способствует образованию в сварных соединениях таких закалочных структур.

Высокие механические свойства среднелегированной стали (перлитного класса) достигаются легированием элементами, упрочняющими феррит и повышающими прокаливаемость стали, и надлежащей термообработкой.

При сварке высоколегированной стали для получения и сохранения в процессе эксплуатации заданных свойств сварного соединения, для обеспечения аустенитных швов без трещин, часто приходится прибегать к применению присадочных материалов, отличающихся по композиции от основного металла (даже в ущерб свойствам сварных соединений).

При сварке хромистой коррозионно-стойкой стали в результате воздействия сварочного термического цикла происходит укрупнение зерна, резко падает вязкость металла околосварной зоны. Это требует высокотемпературного отпуска при 760–780 °С для повышения пластичности стали.

В результате длительной эксплуатации и пребывания при высоких температурах (500–850 °С) высоколегированные швы лишаются своей первоначальной пластичности: происходит охрупчивание металла – тепловая хрупкость, сигматизация и старение. Средством предотвращения охрупчивания металла является изменение структуры за счёт легирования и термообработки.

1.11. Металлургическая характеристика способов сварки

Процесс плавления характеризуется химическими реакциями между расплавленным металлом и окружающей средой (газовой фазой, флюсом и шлаком). Металл шва претерпевает реакции и превращения:

- химические реакции – окисление элементов, усвоение заданных элементов, поглощение газов и т. д.;
- физико-химические и структурные превращения – рост зёрен, образование структур закали, эвтектические превращения, выпадение новых структурных составляющих.

Ручная дуговая сварка – высокоманевренный способ, при сварке высоколегированной стали различные сварочные материалы имеют широкий допуск по химическому составу. Различные типы сварных соединений, пространственные положения сварки и т. п. заставляют корректировать состав покрытия с целью обеспечения необходимого содержания в шве феррита и предупреждения образования в шве горячих трещин. Этим же достигается и необходимая жаропрочность и коррозионная стойкость швов.

При **сварке под флюсом** преимущество перед ручной дуговой сваркой достигается:

- отсутствием частых кратеров, образующихся при смене электродов;
- равномерностью электродной проволоки и основного металла по длине шва;
- более надёжной защитой зоны сварки от окисления легирующих компонентов кислородом воздуха и др.

Однако при сварке под флюсом жаропрочной стали требование обеспечения необходимого количества ферритной фазы не всегда может быть достигнуто – в этом трудность получения необходимого состава металла шва только за счёт выбора сварочных флюсов и проволок.

Легирование через проволоку предпочтительно, т. к. обеспечивает стабильность состава металла шва. При сварке используют безокислительные низкокремнистые фторидные и высокоосновные флюсы (происходит минимальный угар легирующих элементов).

Электрошлаковая сварка позволяет получать чисто аустенитные швы без трещин за счёт малой скорости перемещения источника нагрева и характера кристаллизации металла сварочной ванны, но повышенная длительность пребывания металла шва и околошовной зоны при повышенных температурах увеличивают его перегрев и ширину околошовной зоны.

При **сварке в защитных газах** (инертных) наблюдается минимальный угар легирующих элементов, что важно при сварке высоколегированной стали. При сварке в *углекислом газе* низкоуглеродистой высоколегированной стали, если концентрация углерода в сварочной ванне составляет 0,1 %, происходит науглероживание металла на 0,02–0,04 %. Этого достаточно для снижения стойкости металла шва к межкристаллитной коррозии. Одновременно окислительная атмосфера, создаваемая в дуге за счёт диссоциации углекислого газа, способствует угару до 50 % титана и алюминия. Но науглероживание металла шва благоприятно при сварке жаропрочной стали, поскольку при наличии карбидообразователей (титана и ниобия) науглероживание при увеличении в структуре карбидной фазы повышает жаропрочность.

1.12. Термическая обработка сварных соединений

После сварки изделия часто подвергаются температурной обработке. Длительное пребывание специальной стали и сплавов при температурах 1200–1250 °С, приводя к необратимым изменениям в их структуре, снижает прочностные и пластические свойства. Это повышает склонность сварных соединений теплоустойчивой стали к локальным (околошовным) разрушениям в процессе термообработки и эксплуатации при повышенных температурах. При сварке коррозионно-стойкой стали перегрев в околошовной зоне может привести к образованию ножевой коррозии. Для предупреждения этих дефектов необходима термообработка сварных изделий (закалка или стабилизирующий отжиг). При сварке жаропрочной и жаростойкой стали обеспечение требуемых свойств достигается термообработкой (аустенизацией), снимающей остаточные сварочные напряжения, с последующим стабилизирующим отпуском.

2. СВАРКА НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ И НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ

2.1. Состав, свойства, области применения

Сталь – это сплав железа, содержащий, примерно, до 2,1 % углерода. *Углеродистая конструкционная сталь* содержит 0,06–0,90 % углерода, а к *низкоуглеродистой* относится сталь, содержащая до 0,25 % углерода. Углерод является основным элементом, который определяет механические свойства стали. Повышение его содержания усложняет технологию сварки и затрудняет получение равнопрочного сварного соединения без дефектов.

По степени раскисления сталь изготовляют кипящей (кп), спокойной (сп) и полуспокойной (пс).

Кипящую сталь (Si не более 0,07 %) получают при неполном раскислении металла. Она 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 (Si не менее 0,12 %) распределение серы и фосфора более равномерно, она менее склонна к старению. *Полуспокойная* сталь занимает промежуточное положение.

По качественному признаку углеродистую сталь разделяют на 2 группы: обыкновенного качества и качественные.

Сталь *обыкновенного качества* поставляют без термообработки в горячекатаном состоянии. Изготовленные из неё конструкции также не подвергают последующей термообработке. Эта сталь поставляют по ГОСТ 308-94 как сталь углеродистую обыкновенного качества, по ГОСТ 5520-79 как сталь для котлостроения, по ГОСТ 5521-93 как сталь для судостроения и т. д.

Углеродистую сталь обыкновенного качества подразделяют на 3 группы:

А – для производства сварных конструкций не используют;

Б – сталь поставляют по химическому составу;

В – сталь поставляют по химическому составу и механическим свойствам.

Сталь марок ВСт1, ВСт2, ВСт3 всех степеней раскисления и ВСт3Гпс, БСт1, БСт2, БСт3 всех степеней раскисления и БСт3Гпс по требованию заказчика поставляют с гарантией свариваемости.

Качественную углеродистую сталь с нормальным (марки 10, 15 и 20) и повышенным (марки 15Г и 20Г) содержанием марганца поставляют по ГОСТ 1050-88 и ГОСТ 4543-71. Эта сталь содержит пониженное количество

серы. Её применяют для изготовления конструкций в горячекатаном состоянии, реже после нормализации или закалки с отпуском (термоупрочнение).

Легированной называют сталь, содержащую специально введённые элементы (например, марганец считается легирующим, если его содержание более 0,7 %, а кремний – свыше 0,4 %). Поэтому углеродистая сталь марок ВСтЗГпс, ВСт5Гпс, 15Г, 20Г с повышенным содержанием Mn соответствует низколегированной конструкционной стали. Легирующие элементы, вступая во взаимодействие с железом и углеродом, изменяют свойства стали – это повышает механические свойства стали и снижает порог хладноломкости.

При производстве сварных конструкций широко используют низкоуглеродистую низколегированную конструкционную сталь, суммарное содержание легирующих элементов в которой не превышает 4,0 %, а углерода – 0,25 %.

Низколегированную сталь разделяют на марганцевую, кремнемарганцевую, хромокремненикелемеднистую и т. д.

Наличие марганца в стали повышает ударную вязкость и хладноломкость, обеспечивая удовлетворительную свариваемость. Марганцевая сталь позволяет получить сварное соединение более высокой прочности при знакопеременных и ударных нагрузках. Введение в низколегированную сталь небольшого количества меди (0,3–0,4 %) повышает стойкость против атмосферной коррозии и коррозии в морской воде. Термообработка (горячекатаное состояние) значительно улучшает механические свойства стали (значительно снижается порог хладноломкости). Поэтому некоторые марки низколегированной стали для производства сварных конструкций используют после упрочняющей термообработки.

2.2. Образование шва и околошовной зоны

В сварочной ванне расплавленный основной и дополнительный (присадочный) металл перемешиваются. За источником теплоты перемещается и сварочная ванна (объёмом от мм³ до сотен см³). В результате потерь теплоты на излучение, отвод тепла в изделие, в ползуны при электрошлаковой сварке температура расплава понижается, он затвердевает, и образуется сварной шов.

Неодинаковое время существования металла в расплавленном состоянии в различных участках сварочной ванны определяются условиями отвода тепла. Это время определяется толщиной свариваемого металла, типом сварного соединения, наличием шлака на поверхности сварочной ванны и т. д.

Кристаллизация металла сварочной ванны у границы с нерасплавившимся основным металлом протекает очень быстро. По мере удаления от границы сплавления к центру ванны, длительность пребывания металла в расплавленном состоянии увеличивается. Переход металла из жидкого в твёрдое состояние – это *первичная кристаллизация* на границе сплавления. Она начинается от частично оплавленных зёрен основного или ранее наплавленного металла

(транскристаллитная структура) в виде дендритов, растущих обратно отводу тепла вглубь сварочной ванны, возникают общие зёрна. Строение зоны плавления представлено на рис. 2.1.



Рис. 2.1. Строение зоны плавления

При кристаллизации первые порции металла менее загрязнены примесями, чем последние, поэтому образуется зональная и внутридендритная химическая неоднородность. Внутридендритная ликвация (неоднородность в различных участках одного дендрита) имеет преимущественное развитие.

Первичная кристаллизация металла сварочной ванны имеет прерывистый характер, вызванный выделением перед фронтом кристаллизации скрытой теплоты кристаллизации. Это приводит к характерному слоистому строению шва и появлению ликвации в виде слоистой неоднородности (имеет наибольшее проявление вблизи границ сплавления). Слоистая и дендритная ликвации уменьшаются при улучшении условий диффузии ликвирующих элементов в твёрдом металле.

Образовавшиеся в затвердевшем металле шва в результате первичной кристаллизации столбчатые кристаллы имеют *аустенитную* микроструктуру.

При дальнейшем охлаждении металла, при температуре аллотропического превращения A_{c3} начинается процесс перестройки атомов пространственной решётки – перекристаллизация. В результате перекристаллизации происходит распад частиц аустенита и превращение его в *феррит*. Т. к. растворимость углерода в феррите меньше, чем в аустените, выделяющийся углерод вступает в химическое соединение с железом, образуя *цементит*.

На рис. 2.2. представлена зона термического влияния сварного шва.

Дальнейшее охлаждение стали ниже температуры превращения A_{c1} приводит к образованию эвтектоидной смеси феррита и цементита – *перлита*. Вторичная кристаллизация сопровождается значительным увеличением числа зёрен, т. к. в пределах первичного зерна аустенита образуется несколько зёрен 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 зёрен.

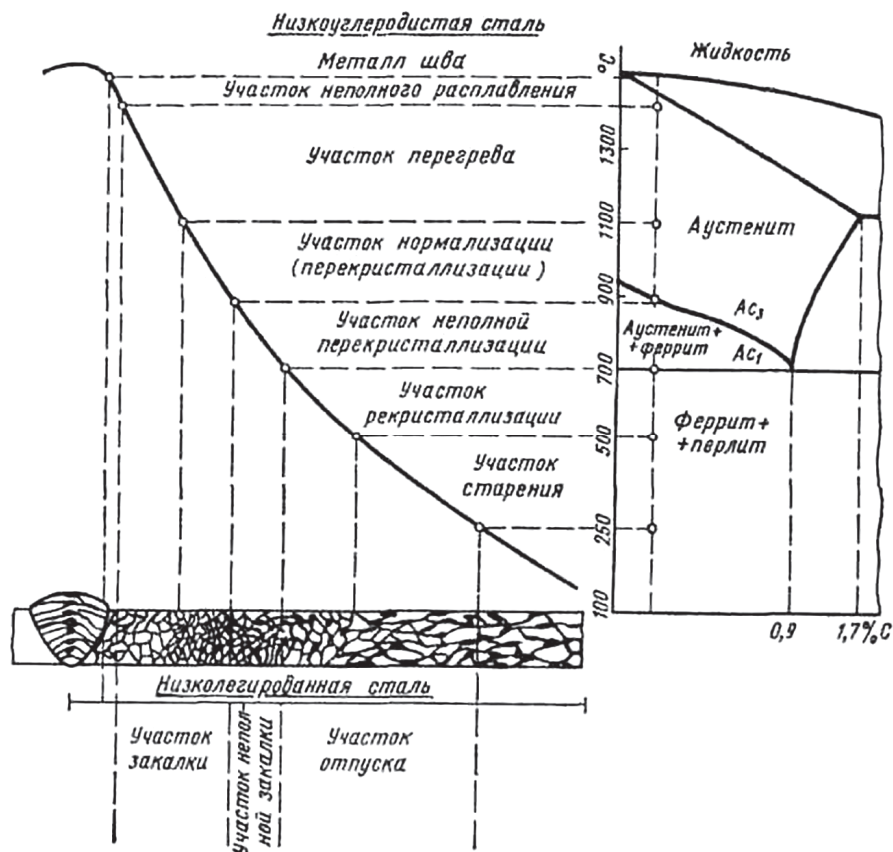


Рис. 2.2. Строение зоны термического влияния сварного шва при дуговой сварке низкоуглеродистой и низколегированной стали

При некоторых условиях может образовываться грубая видманштеттова структура (нежелательная в сварных соединениях, т. к. снижаются механические свойства), характеризующаяся выделением феррита из аустенита не только по границам зёрен, но и по кристаллографическим плоскостям отдельных кристаллов. 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 возрастает, достигая максимума, а затем снижается. Чем ближе точка расположена к границе сплавления, тем быстрее происходит нагрев металла в данном участке и тем выше максимальная температура, достигаемая в нём.

Зону основного металла в сварном соединении, в которой под воздействием термического цикла происходят фазовые и структурные изменения, называют *зоной термического влияния*. На участке неполного расплавления (рис. 2.2) объёмы металла нагреваются в интервале температур между солидусом и ликвидусом, что приводит к частичному расплавлению (оплавлению) зёрен металла. Пространство между нерасплавившимися зёрнами заполнено жидкими прослойками, связанными с металлом сварочной ванны. В результате проникновения элементов, вводимых в металл сварочной ванны, состав металла на этом участке может отличаться от состава основного металла или металла шва.

Слоистая ликвация способствует увеличению химической неоднородности металла на этом участке. От состава и структуры металла в этой зоне зависят также диффузия элементов (как из нерасплавившегося металла в жидкий металл, так и наоборот). Этот участок и является *местом сварки* (не превышает 0,5 мм), свойства металла в нём оказывают решающее влияние на свойства всего сварного соединения.

На *участке перегрева* металл нагревался в интервале 1100–1150 °С до линии солидуса. Металл, нагретый 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 при температуре 1100 °С приводит к значительному росту зёрен. Крупнозернистая структура на участке перегрева после охлаждения может привести к образованию неблагоприятной видманштеттовой структуры. Металл, нагретый незначительно выше температур A_{c3} , имеет мелкозернистую структуру с повышенными механическими свойствами – это *участок нормализации* (перекристаллизации). На *участке неполной перекристаллизации* металл нагревается до температуры между A_{c1} и A_{c3} . Поэтому он характеризуется почти неизменным ферритным зерном и некоторым измельчением и сфероидизацией перлитных участков.

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

При нагреве металла в интервале температур 100–500 °С (*участок старения*) его структура в процессе сварки не претерпевает видимых изменений. Но при содержании повышенного количества кислорода и азота (обычно кипящие стали), их нагрев при температурах 150–350 °С сопровождается резким снижением ударной вязкости и сопротивляемости разрушению.

Многослойная сварка ввиду многократного воздействия термического цикла сварки на основной металл в околошовной зоне изменяет строение и структуру зоны термического влияния. При сварке длинными участками после каждого 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 протяжённость 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 не имеет крупного зерна и характеризуется мелкозернистой структурой с повышенными пластическими свойствами.

На рис. 2.3 представлено строение металла шва при электрошлаковой сварке.

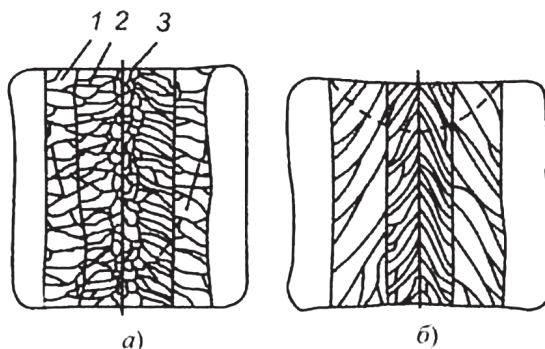


Рис. 2.3. Строение металла шва при электрошлаковой сварке

Структура металла швов может характеризоваться наличием трёх зон (рис. 2.3, а):

- зона 1 крупных столбчатых кристаллов, которые растут в направлении, обратном отводу теплоты;
- зона 2 тонких столбчатых кристаллов с меньшей величиной зерна и большим их отклонением в сторону теплового центра;
- зона 3 равноосных кристаллов, располагающаяся посередине шва.

Повышение содержания в шве углерода и марганца увеличивает, а снижение интенсивности отвода тепла уменьшает ширину зоны 1.

При увеличении коэффициента формы шва за счёт уменьшения скорости подачи электродной проволоки (рис. 2.3, б) 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, утолщенным оторочкой феррита по границам кристаллов.

Термический цикл околошовной зоны электрошлаковой сварки характеризуется длительным 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 падение 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, т. к. способствует подавлению образования закалочных структур.

Повышение прочности низколегированной стали достигается легированием элементами (Mn, Si), 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 нагревается выше температур A_{c1} , при повышенных скоростях охлаждения могут образовываться закалочные структуры. Металл, нагревавшийся до температур выше A_{c3} , будет иметь грубозернистую структуру.

При сварке термически упрочнённых сталей на участках рекристаллизации и старения может произойти отпуск металла. При этом образуется структура сорбита отпуска, и снижаются прочностные свойства 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 это актуально при сварке металла большой толщины. При сварке термически упрочнённых сталей следует применять меры, предупреждающие разупрочнение стали на участке отпуска.

2.3. Основные сведения о свариваемости

Рассматриваемая сталь обладает хорошей свариваемостью. Технология сварки должна обеспечивать надёжность и долговечность конструкций (особенно из термоупрочнённой стали), равнопрочность сварного соединения с основным металлом и отсутствие дефектов в сварном шве.

Во всех случаях швы не должны иметь трещин, непроваров, пор, подрезов, геометрические размеры и форма шва должны соответствовать требуемым, сварное соединение должно быть стойким против перехода в хрупкое состояние. Иногда к сварному соединению предъявляют требования высокой работоспособности при вибрационных и ударных нагрузках, пониженных температурах и т. д. Технология сварки должна обеспечивать

максимальную производительность и экономичность процесса при требуемой надёжности конструкций.

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 рассматриваемой стали незначительно отличается от состава основного металла, что показано в таблице 2.1.

Т а б л и ц а 2.1

Средний химический состав металла шва

Металл	Элементы, %		
	C	Si	Mn
Сталь ВСтЗ	0,14–0,22	0,05–0,30	0,40–0,45
Шов при сварке покрытыми электродами	0,08–0,13	0,20–0,25	0,30–0,90
Сталь 19Г	0,16–0,22	0,17–0,37	0,80–1,15
Шов при сварке покрытыми электродами	0,09–0,15	0,20–0,30	0,40–1,2

Это различие сводится к снижению содержания в металле шва углерода, которое предупреждает образование структур закалочного характера при повышенных скоростях охлаждения. Возможное снижение прочности металла шва (за счёт уменьшения содержания углерода) компенсируется легированием металла марганцем и кремнием через проволоку, покрытие электродов или флюс. При сварке низколегированной стали – и за счёт 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 взаимодействия между металлом, шлаком и газовой фазой. Повышение скорости охлаждения металла шва, также способствуют повышению его прочности, однако при этом снижаются его пластические свойства и ударная вязкость. Это объясняется изменением количества и строения перлитной фазы. Критическая температура перехода металла однослойного шва в хрупкое состояние 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. Это происходит, когда такие швы накладываются на холодные, предварительно сваренные швы. Металл многослойных швов, кроме последних слоёв, подвергающийся действию повторного термического цикла сварки, имеет более благоприятную мелкозернистую структуру. Поэтому он обладает более низкой критической температурой перехода в хрупкое состояние. Пластическая деформация металла шва под воздействием сварочных напряжений также повышает предел текучести металла шва.

Повышение скорости охлаждения при сварке на форсированных режимах низкоуглеродистой горячекатаной стали (в состоянии поставки) повышенной толщины (до 15 мм), однопроходных угловых швов, при отрицательных температурах и т. д. может привести к появлению в металле шва и околошовной зоне закалочных структур на участке перегрева и полной и неполной рекристаллизации.

При повышении содержания марганца усиливается влияние скорости охлаждения низкоуглеродистой стали на её механические свойства. Если сталь перед сваркой прошла термическое упрочнение – закалку, то в зоне термического влияния шва на участке рекристаллизации и старения будет наблюдаться отпуск металла, т. е. снижение его прочностных свойств. Сварка горячекатаной стали способствует появлению закалочных структур на участке перегрева и нормализации. Термообработка низколегированной стали – закалка (термоупрочнение) с целью повышения прочности при сохранении высокой пластичности усложняет технологию сварки.

На участке рекристаллизации и старения происходит разупрочнение стали под действием высокого отпуска с образованием структур преимущественно троостита или сорбита отпуска. При температурах выше A_{c3} разупрочнение обусловлено совместно протекающими процессами высокого отпуска и фазовой перекристаллизации.

Таким образом, при сварке низколегированной стали получение равнопрочного сварного соединения вызывает трудности и поэтому требует применения определённых технических приёмов (сварка короткими участками не термоупрочнённой стали и длинными участками термоупрочнённой стали).

Повышение погонной энергии сварки сопровождается расширением разупрочнённой зоны и снижением твёрдости металла в ней. Это вызвано увеличением объёма металла, подвергавшегося высокому сварочному нагреву, и замедлением темпа охлаждения. Кроме того, повышение погонной энергии уменьшает скорость охлаждения в субкритическом интервале температур, что уменьшает количество неравновесных структур (снижает твёрдость) в прилегающем к шву участке перегрева и полной перекристаллизации. Околошовная зона, где наиболее резко выражены перегрев и закалка – место образования холодных трещин при сварке низколегированной стали.

При сварке конструкций из низкоуглеродистой и низколегированной стали в зонах, удалённых от высокотемпературной области, возникает холодная пластическая деформация. Попадая при наложении последующих швов под сварочный нагрев до температур около 300 °С, эти зоны становятся участками деформационного старения, приводящего к снижению пластических и повышению прочностных свойств металла и возможному возникновению трещин, особенно при низких температурах или в концентраторах напряжений.

Высокий отпуск при температуре 600–650 °С в этом случае является эффективным средством восстановления свойств металла, его применяют