

**Министерство образования и науки
Российской Федерации**

*Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Алтайский государственный технический
университет им. И.И. Ползунова»*

В. П. Тимошенко, М. В. Радченко

**ТЕПЛОВЫЕ И МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ
ПРОЦЕССЫ В СВАРОЧНЫХ
ТЕХНОЛОГИЯХ**

**Учебное пособие
Часть 1**

Изд-во АлтГТУ
Барнаул • 2016

УДК 621.791.7(075.8)

Тимошенко В. П. Тепловые и металлургические процессы в сварочных технологиях: учебное пособие в 2 ч. Ч.1 / В. П. Тимошенко, М. В. Радченко; Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2016. – 261 с.

ISBN 978-5-7568-1198-8

ISBN 978-5-7568-1199-5 (ч. 1)

Учебное пособие написано в соответствии с действующим Государственным образовательным стандартом для студентов специальности 150202 – «Оборудование и технология сварочного производства», направления подготовки бакалавров 150700 «Машиностроение», изучающих дисциплину «Материалы и их поведение при сварке», для оказания помощи при изучении теоретического материала, подготовке к лабораторным работам, к выполнению курсовых и выпускных квалификационных работ.

В первой части учебного пособия освещены вопросы физической сущности основных способов сварки, основные закономерности формирования структуры и свойств сварных соединений для различных металлов и сплавов, а также вопросы технологической свариваемости металлов и сплавов и режимов сварки для различных сварных конструкций.

Во второй части рассмотрены тепловые процессы при сварке металлов.

В учебном пособии использованы труды ведущих организаций, кафедр и специалистов в области сварки.

Рецензент: А. Н. Смирнов директор ООО «КЦСК», д.т.н., профессор кафедры «Технология машиностроения» Кузбасского государственного технического университета им. Т.Ф. Горбачева.

ISBN 978-5-7568-1198-8

ISBN 978-5-7568-1199-5 (ч. 1)

© Тимошенко В.П., Радченко М.В., 2016

© Алтайский государственный технический университет
им. И.И. Ползунова, 2016

Учебное пособие посвящается 90-летию со дня рождения лауреата Ленинской премии, доктора технических наук, профессора, основателя кафедры сварки на Алтае В. Г. Радченко.



**Радченко Василий Григорьевич
(1926 – 2012 гг.)**

СОДЕРЖАНИЕ

1 ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА.....	9
2 ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ СВАРНЫХ, ПАЯНЫХ И КЛЕЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ.....	12
2.1 Агрегатные состояния вещества	12
2.2 Виды элементарных связей в твердых телах.....	13
2.3 Искажение кристаллической структуры в сплавах.....	20
2.4 Особенности получения неразъемных соединений.....	23
2.5 Механизм образования монолитных соединений твердых тел.....	26
2.5.1 Схватывание металла.....	26
2.5.2 Установление сил сцепления при сварке в жидкой фазе.....	27
2.5.3 Установление сил сцепления при сварке металлов в твердой фазе.....	27
2.5.4 Сцепление твердых металлов с расплавленными.....	30
2.6 Стадийность процесса сварки.....	31
2.7 Термодинамика и баланс энергии процесса сварки. Классификация способов сварки.....	32
2.8 Оценка энергетической эффективности процессов сварки.....	35
2.9 Требования к источникам энергии для сварки.....	37
3 ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СВАРОЧНАЯ ДУГА. СОСТАВ, СТРОЕНИЕ И СВОЙСТВА.....	39
3.1 Общая характеристика дугового разряда.....	39
3.2 Зажигание и развитие сварочной дуги.....	42
3.3 Составные части дугового разряда. Строение и свой- ства сварочной дуги.....	44
3.4 Виды сварочных дуг.....	45
3.5 Технологические свойства дуги.....	52
3.6 Статическая вольтамперная характеристика сварочной дуги.....	54
3.7 Магнитное дутье при сварке.....	57
3.8 Перенос металла в сварочной дуге.....	60

4 КЛАССИФИКАЦИЯ И ОБОЗНАЧЕНИЕ СТАЛЕЙ.....	65
4.1 Основы классификации и принципы обозначения (маркировки) сталей.....	65
4.1.1 Классификация и маркировка легированных сталей.....	68
4.1.2 Влияние примесей на свойства сталей.....	69
4.2 Группы материалов, применяемых при изготовлении, монтаже и ремонте технических устройств опасных производственных объектов.....	76
5 ОЦЕНКА СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ И СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ.....	80
5.1 Основные характеристики механических свойств сталей и сварных соединений.....	80
6 ОСНОВЫ ФИЗИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ МЕТАЛЛОВ И ЕГО ЗНАЧЕНИЕ ДЛЯ СВАРКИ.....	85
6.1 Краткие сведения о диаграмме состояния железо–углерод.....	85
6.2 Кристаллическое строение металлов.....	90
6.3 Основные представления о первичной кристаллизации и формировании структуры наплавленного металла шва.....	96
6.4 Структура и свойства сварных швов углеродистых сталей.....	99
7 ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ И МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ СВАРКЕ ПЛАВЛЕНИЕМ.....	105
7.1 Анализ состава газовой фазы в столбе дуги.....	108
7.1.1 Распад и образование соединений между компонентами газовой смеси.....	109
7.1.2 Насыщение расплавленного металла газами в капле и сварочной ванне.....	111
7.2 Влияние атмосферных газов на свойства стали и сплавов при сварке.....	112
7.2.1 Влияние кислорода на свойства стали.....	112
7.2.2 Влияние азота на свойства стали.....	114
7.2.3 Влияние водорода на свойства стали.....	115
7.2.4 Влияние CO ₂ , CO и паров H ₂ O на свойства стали.....	116
7.3 Взаимодействие металла с защитными флюсами при сварке.....	117

7.4 Массообмен между расплавленным металлом, газовой средой и шлаком.....	120
7.5 Расплавление электрода и перенос капель в ванну.....	121
7.6 Источники водорода при сварке под флюсом.....	124
7.7 Окисление металла шва флюсом.....	125
7.8 Переход вредных примесей из флюса в металл шва.....	126
7.9 Раскисление металла при сварке.....	127
7.9.1 Виды раскислительных процессов.....	127
7.9.2 Легирование наплавленного металла.....	131
7.10 Рафинирование сварочной ванны и модифицирование металла шва.....	132
7.10.1 Влияние серы на структуру и свойства шва.....	133
7.10.2 Десульфатация сварочной ванны.....	134
7.10.3 Снижение содержания фосфора в металле шва.....	135
7.10.4 Модифицирование металла шва.....	136
7.11 Дефекты металлургического происхождения в сварных швах.....	137
7.11.1 Поры в металле шва.....	137
7.11.2 Шлаковые включения в металле шва.....	138
7.11.3 Ликвационная неоднородность в металле шва.....	140
8 ОСОБЕННОСТИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ СВАРКЕ ПЛАВЛЕНИЕМ.....	143
8.1 Шлаковая защита при дуговой сварке под флюсом.....	143
8.1.1 Формирование шлаковой защиты сварочной ванны при дуговой сварке.....	143
8.1.2 Способы изготовления сварочных флюсов.....	145
8.1.3 Особенности металлургических процессов при дуговой сварке под слоем плавящихся и керамических флюсов...	146
8.1.4 Влияние параметров режима сварки на развитие металлургических процессов при сварке под флюсом.....	148
8.1.5 Снижение содержания водорода в металле шва при сварке под флюсом.....	148
8.1.6 Принципы выбора состава флюсов для сварки сталей и сплавов. Флюсы для сварки низкоуглеродистых сталей...	149
8.1.7 Особенности металлургических процессов при электрошлаковой сварке и переплаве металлов.....	154
8.2 Дуговая сварка в защитных газах и смесях.....	156

8.2.1 Формирование газовой струйной защиты.....	157
8.2.2 Металлургические процессы при сварке сталей в струе CO ₂	158
8.3 Металлургические процессы при сварке в инертных газах и их смесях.....	159
8.4 Особенности сварки различных сталей и сплавов в инертных газах.....	160
8.5 Металлургические особенности вакуумной защиты сварочной ванны.....	163
8.6 Металлургия газопламенной обработки.....	165
8.7 Формирование защиты металла при сварке электрода- ми с покрытием и порошковой проволокой.....	167
8.7.1 Назначение и основные элементы электродных по- крытий.....	168
8.7.2 Металлургические процессы при сварке электродами с различными покрытиями.....	169
8.7.3 Сравнительные характеристики защитных свойств покрытий.....	172
8.7.4 Особенности легирования металла шва при сварке электродами с покрытием.....	173
8.7.5 Особенности металлургических процессов при свар- ке порошковой проволокой.....	174
9 ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В МЕТАЛЛАХ ПРИ СВАРКЕ.....	177
9.1 Понятие свариваемости материалов.....	177
9.1.1 Физическая и технологическая свариваемость.....	177
9.1.2 Показатели свариваемости.....	178
9.2 Дефекты кристаллической решетки в металлах при сварке.....	179
9.2.1 Понятие о дефектах кристаллической решетки.....	179
9.2.2 Распределение дефектов кристаллического строения в металле сварного соединения.....	180
9.3 Фазовые и структурные превращения в металлах при сварке.....	181
9.3.1 Особенность превращений в металлах при сварке.....	181
9.3.2 Химическая неоднородность сварных соединений....	182

9.4 Фазовые превращения в металлах в твердом состоянии.....	183
9.5 Фазовые и структурные превращения в сталях при сварке.....	187
9.6 Физические основы формирования сварочных деформаций и напряжений в различных металлах и сплавах.....	189
10 ДЕФЕКТЫ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ.....	193
10.1 Типичные дефекты и их классификация.....	193
10.2 Технологическая прочность материалов при сварке...	194
10.3 Горячие трещины при сварке.....	194
10.3.1 Влияние растягивающих напряжений.....	204
10.3.2 Влияние химического состава металла шва.....	206
10.3.3 Методы снижения образования горячих трещин.....	208
10.3.4 Влияние формы сварочной ванны.....	209
10.3.5 Горячие трещины в околошовной зоне.....	213
10.3.6 Трещины повторного нагрева.....	214
10.4 Образование холодных трещин.....	215
10.4.1 Способы повышения сопротивляемости сварных соединений легированных сталей образованию холодных трещин.....	225
10.5 Поры в сварных швах.....	228
10.6 Неметаллические включения в сварных швах.....	231
10.7 Прочие дефекты сварных соединений.....	232
11 ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ.....	245
11.1 Виды термической обработки сварных соединений....	245
11.2 Термическая обработка сталей.....	250
ЛИТЕРАТУРА.....	260

1 ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА

В настоящее время сварка используется во всех отраслях промышленности и строительства, а удельный вес и объем сварочных работ продолжает возрастать. В современном варианте сваркой называют технологический процесс получения монолитных неразъемных соединений посредством установления межатомных связей между свариваемыми деталями при их местном или общем нагреве, или пластическом деформировании, а также совместным действием того и другого.

Все существующие способы сварки по энергетическим признакам разделяют на две основные группы: сварку плавлением и сварку давлением. В силу своих технологических возможностей наибольшее распространение получили способы электрической дуговой сварки плавлением.

Разработка первых способов дуговой сварки тесно связана с открытием явления электрической дуги, сделанным в 1802 г. русским физиком профессором Санкт-Петербургской Академии наук Василием Владимировичем Петровым (1761–1834 гг.). В своих ранних работах В. В. Петров указывал на возможность применения дугового разряда для расплавления металлов. Однако первое практическое применение электрической дуги с целью сварки металлов принадлежит русскому инженеру Николаю Николаевичу Бенардосу.

Сущность метода, разработанного в 1882 г. Н. Н. Бенардосом, заключается в следующем. Электрическая дуга возбуждается и горит между угольным электродом и изделием. Формирование сварочной ванны и сварного шва на первом этапе осуществлялось только за счет расплавления основного металла. Впоследствии был использован присадочный прутки, позволяющий до некоторой степени повысить механические свойства сварного соединения.

В 1888 г. русский инженер Николай Гаврилович Славянов усовершенствовал процесс сварки, предложенный Н. Н. Бенардосом, заменив неплавящийся угольный электрод плавящимся

металлическим электродом, причем плавящийся электрод является одновременно и присадочным металлом.

Эти способы не нашли широкого применения в силу ряда существенных недостатков. Основными недостатками являлись: низкая стабильность горения дуги; отсутствие защиты дугового промежутка металла сварочной ванны и сварного шва от взаимодействия с окружающей средой; попадание продуктов сгорания угольного электрода и вредных газов воздуха (O_2 , N_2) в расплавленный металл, существенно снижающих механические и технологические характеристики сварного соединения в целом.

Усовершенствование дуговой сварки развивалось по двум направлениям: изыскание средств защиты и металлургической обработки металла сварочной ванны и автоматизация процесса. Первые шаги в этих направлениях сделаны самими изобретателями. Например, Н. Н. Бенардос впервые предложил применять при сварке защиту сварочной ванны газом и изготовил для этого горелку, положив начало развитию дуговой сварки в защитных газах. Н. Г. Славянов впервые выдвинул идею о необходимости защиты ванны и ее металлургической обработки. В частности, он предложил подбрасывать в сварочную ванну ферросплавы и стекло. Развитие этой идеи на первом этапе привело к созданию покрытия электродов, а впоследствии – способа дуговой сварки под слоем гранулированного флюса.

Способы дуговой сварки неплавящимся и плавящимся электродами Н. Н. Бенардосом и Н. Г. Славяновым были запатентованы, кроме России, во Франции, Бельгии, Великобритании, Италии, Германии, Швеции, Норвегии, Дании, Испании, Швейцарии, Соединенных штатах Америки, Австро-Венгрии и в ряде других стран. До настоящего времени в мировой технической литературе часто эти основные виды сварки называют по их имени – способ Бенардоса и способ Славянова.

Разработанные в 90-х гг. XIX в. газовая и термитная сварка уже в начале XX в. стали широко применяться и временно обогнали в своем развитии дуговую сварку. Однако в дальнейшем, главным образом в связи с разработкой ряда вопросов металлургии сварки, дуговая сварка стала основным промышленным способом, широко используемым при изготовлении и ремонте

металлических конструкций. Этому способствовала и механизация процессов дуговой сварки, особенно разработка автоматической и полуавтоматической сварки под флюсом и в защитном газе.

Разработка новых видов сварки продолжается и по настоящее время. Это электронно-лучевая, лазерная, ультразвуковая, диффузионная сварка, сварка трением и взрывом и др. Сваркой уже соединяют не только металлы, но и многие неметаллические материалы (даже кости скелета при лечении переломов и биологических тканей). Все виды сварки продолжают развиваться и совершенствоваться.

Роль сварки в развитии техники очень велика. Она широко применяется в промышленности, строительстве, на транспорте, в сельском хозяйстве, во всех производствах, занятых обработкой металла и изготовлением всевозможных металлических изделий, – от мельчайших деталей, обрабатываемых при помощи микроскопов, до гигантских сварных конструкций, корпусов морских судов, трубопроводов и др.

2 ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ СВАРНЫХ, ПАЯНЫХ И КЛЕЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ [1, 9, 11]

2.1 Агрегатные состояния вещества

Всякое вещество при соответствующих температурах и давлениях может находиться в различных агрегатных состояниях и представлять собой твердое, жидкое или газообразное тело.

В твердом теле силы внутренних связей атомов настолько велики, что для изменения взаимного их расположения нужно приложить значительные усилия. Жидкости характеризуются сравнительно свободным перемещением частиц – атомов, молекул, однако силы связи между частицами при этом сохраняют значительную величину (*силы поверхностного натяжения*). Атомы или молекулы газообразного вещества полностью теряют связь между собой и при отсутствии ограничений удаляются друг от друга.

В металле, находящемся в твердом состоянии, атомы фиксированы в определенном положении относительно друг друга, и при этом непрерывно колеблются относительно некоторого среднего положения. Величина амплитуды и интенсивность этих колебаний зависят от температуры. При нагревании амплитуда колебаний начинает расти и при некоторых значениях равных $T_{пл}$ металл переходит в жидкое, а затем и в газообразное состояние. Дальнейшее повышение температуры приводит к нарушению структуры электронных оболочек атомов. В первую очередь от своих ядер отрываются наиболее удаленные и обладающие самой большой энергией валентные электроны, затем последовательно разрушаются все более глубокие оболочки – происходит *процесс ионизации*.

Ионизация коренным образом меняет свойства газов. В обычных условиях они состоят из электрически нейтральных атомов или молекул и поэтому являются изоляторами. При начавшейся ионизации газа в нем появляются частицы, электрически заряженные – свободные электроны и ионы, образующие-

ся из нейтральных частиц вследствие потери или присоединения лишнего электрона.

Электропроводность газа зависит от степени его ионизации. При высокой степени ионизации электропроводность газа может приближаться к электропроводности металлов.

Явления плавления, испарения, диссоциации и ионизации постоянно наблюдаются в сварочных процессах.

При охлаждении восстановление связей происходит в обратной последовательности.

2.2 Виды элементарных связей в твердых телах

Известно, что все вещества состоят из различных частиц, между которыми существуют силы взаимодействия, называемые элементарными связями. В твердых телах различают несколько типов связей: ионная, ковалентная, межмолекулярная и в металлах – металлическая, которая является разновидностью ковалентной.

Наиболее типичны первые две химические связи – ковалентная и ионная.

Межмолекулярные связи действуют между любыми атомами и молекулами, но они очень малы. Поэтому молекулярные кристаллы, обусловленные этими силами, отличаются низкой температурой плавления.

Атомы состоят из положительно заряженного ядра и с огромной скоростью движущихся вокруг него отрицательно заряженных электронов. Число электронов в атоме равно положительному заряду ядра (*поэтому атом электрически нейтрален*). Электроны движутся по определенным круговым или эллиптическим орбитам. Чем радиус орбиты больше, тем выше энергетический уровень электрона (рисунок 2.1).

Металлические связи. Металлические связи характерны для металлов. Природа металлической связи обуславливает отсутствие в ней направленных сил, поскольку связующей средой для ионов служит равномерно распределенный электронный газ, состоящий из отделившихся внешних электронов. Остающиеся у ионов заполненные или незаполненные оболочки, взаимодей-

ствуя, определяют строгую закономерность расположения атомов – ионов в виде так называемой пространственной кристаллической решетки.

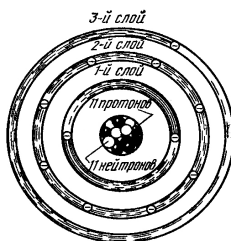


Рисунок 2.1 – Схема строения атома

Закономерность такого построения определяется тем, какие уровни взаимодействуют и какова их энергия. Характер закономерного расположения атомов определяет вид пространственной кристаллической решетки. Для металлов характерны три типа кристаллических решеток: кубическая гранецентрированная, кубическая объемно-центрированная и гексагональная плотноупакованная (рисунок 2.2).

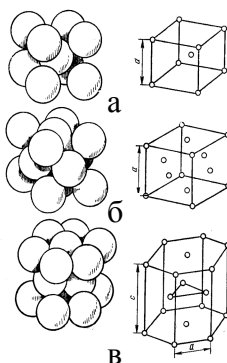


Рисунок 2.2 – Элементарные кристаллические ячейки:
а – кубическая объемно-центрированная; б – кубическая гранецентрированная; в – гексагональная плотноупакованная

Построение той или иной кристаллической решетки следует рассматривать как закономерное расположение атомов – ионов. Так, для кубических решеток атомы, располагаясь в вершинах на равном расстоянии, образуют как бы фигуру куба (*атомы по углам*) с дополнительным атомом в центре или на грани. Для гексагональной характерно расположение в виде шестигранника (рисунок 2.2). Многократное повторение такого элемента построения (*элементарной ячейки*) создает кристалл того или иного металла (*элемента или вещества*) рисунок 2.3.

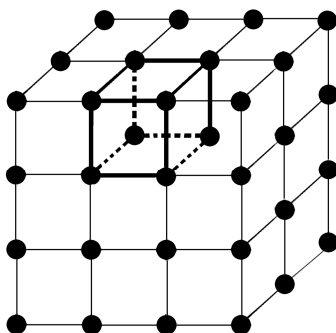


Рисунок 2.3 – Пространственное изображение кристаллической структуры металлов

Атомы в таких решетках расположены не на произвольно больших расстояниях, а на расстояниях, определяемых равнодействующими сил взаимодействия между положительными зарядами ионов, отрицательными зарядами оставшихся оболочек и взаимодействия положительных зарядов ионов с отрицательно заряженным электронным газом. Расстояние между центрами атомов будет зависеть от закономерности их расположения, т. е. с изменением типа решетки одного и того же вещества расстояние между центрами атомов будет меняться.

У многих металлов наблюдается так называемый **полиморфизм**, т. е. изменение типа кристаллической решетки с изменением температуры (рисунок 2.4). Так, например, у железа имеются две основные полиморфные формы: кубическая объ-

емно-центрированная и кубическая гранецентрированная. Изменение кристаллического строения одного и того же металла с изменением температуры объясняется изменением энергетического состояния атомов и, соответственно, взаимодействия оболочек.

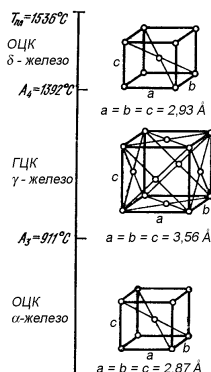


Рисунок 2.4 – Изменение типа кристаллической решетки с изменением температуры (*полиморфизм*)

Таким образом, кристаллическую решетку помимо ее типа характеризуют атомный диаметр и параметр решетки.

Металлическое тело можно считать одной макромолекулой, потому что металлические связи имеют место не только между двумя или несколькими атомами металла. Все образовавшиеся «свободные» электроны связываются в общих орбитах, пересекающих весь объем металла, а все положительные ионы срастаются в неподвижную кристаллическую решетку металла. В реальных твердых веществах атомы находятся на очень близких расстояниях и взаимодействуют между собой. В результате такого взаимодействия меняется энергия и распределение в пространстве валентных электронов, а сами атомы размещаются один относительно другого в определенном порядке (рисунок 2.3).

Часть валентных электронов легко переходит на более высокие энергетические подуровни, т. е. отрываются от своих атомов, которые превращаются при этом в положительно заряжен-

ные ионы. Оторвавшиеся электроны в твердом веществе называют **электронным газом**. Такие электроны коллективно «обслуживают» всю упорядоченно расположенную систему ионов, при этом общая система ионов и электронов остается электрически нейтральной.

Такое взаимодействие между ионным скелетом и электронным газом называют **металлической связью**.

Металлическая связь существует лишь в конденсированной фазе – твердом или жидком металле. Газообразные пары металла уже не имеют металлических свойств.

Сила связи в металлах определяется соотношением сил отталкивания и сил притяжения между ионами и электронами.

Атомы, размещенные на поверхности металла, находятся в особых условиях, по сравнению с расположенными в глубине. Внутри кристалла каждый атом взаимосвязан с окружающими его соседними атомами. Действующие на него силы симметричны.

Поверхностные атомы взаимодействуют с соседними атомами свободной поверхности, а также теми, которые расположены внутри кристалла. Силы, действующие на поверхностный слой со стороны окружающей среды, обычно бывают незначительными.

Под действием больших сил притяжения от внутренних атомов слой поверхностных атомов сдвигается из своих нормальных положений в сторону внутренних слоев (рисунок 2.5) $a_1 < a_0$. Любая свободная поверхность кристалла обладает некоторым запасом поверхностной энергии, которая играет существенную роль при некоторых видах сварки, при адсорбции (*поверхностное поглощение*) и других процессах.

Сварка давлением в твердом состоянии предусматривает два необходимых условия. Первое – это сближение свариваемых поверхностей на расстояние равное или меньше параметра кристаллической решетки, при котором могут реализоваться силы атомного взаимодействия. Однако такого сближения еще недостаточно, чтобы произошло соединение сближенных поверхностей в неразъемное соединение. Поскольку поверхностные атомы на сближенных поверхностях не активны, их сило-

вые поля уравновешены полями соседних и внутренних атомов в каждой из свариваемых частей (рисунок 2.5.1, а, б).

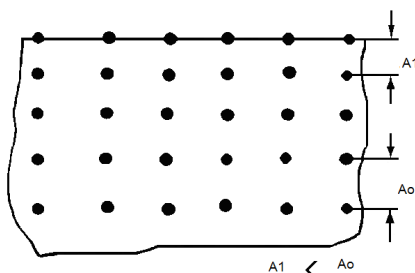


Рисунок 2.5 – Искажение параметров кристаллической решетки вблизи поверхности

Поскольку поверхностные атомы находятся в условиях, отличных от внутренних атомов в связи с тем, что их внутренние связи оказываются пересыщенными, они имеют тенденцию к переходу в равновесное состояние за счет установления нормальных связей с атомами приближенной поверхности с переходом в этом случае в состояние нормального внутреннего атома.

Однако для установления таких связей с атомами приближенной поверхности следует разорвать пересыщенные внутренние связи поверхностных атомов. Для этого необходимо второе условие — затрата определенной энергии для их активации. Такая активация участков на соединяемых поверхностях достигается при пластической деформации их в процессе сдавливания за счет выхода на поверхность дислокаций с повышенной свободной энергией и нагрева. При этом условии может совершиться электронный обмен между атомами соединяемых поверхностей и установление прочной металлической связи с образованием неразъемного сварного соединения (рисунок 2.6, в, г).

Без активации поверхностных атомов и электронного обмена связь между поверхностями может быть непрочной, и такое соединение не будет надежным сварным.

В результате теплового движения с ростом температуры часть атомов приобретает высокие скорости движения, преодолевают силы связей с соседними атомами, покидают свое место с образованием вакансий и перемещаются в кристаллической решетке. При этом возможно, что будет происходить испарение (*выгорание*) некоторых элементов.

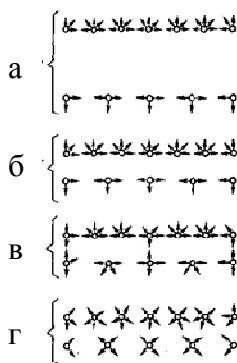


Рисунок 2.6 – Схема образования соединения при сварке давлением в твердом состоянии: векторы – направление связей атомов:

а – связи поверхностных атомов соединяемых металлов (различных) до сближения; б – то же, после сближения на расстояние, близкое к параметру кристаллической решетки одного из металлов, до активации отдельных атомов; в – то же, после активации отдельных атомов; г – то же, после завершения сварки

К зонам интенсивного образования вакансий относятся: поверхностные слои, границы зерен, зоны местных дефектов и т.д.

Основой (*металлической*) межатомной связи и, следовательно, образования неразъемных соединений является взаимодействие электронов, а движущей силой этого взаимодействия – стремление атомов к получению завершающих электронных оболочек и достижению наиболее устойчивого распределения электронов по уровням и подуровням.

Понятие «металлические связи» можно считать качественным, т. к. металлы не имеют молекулярного строения, а их атомы соединяются в кристаллические образования. Этот вид связи и обуславливает высокую прочность, пластичность и электропроводность металлов. Прочная металлическая связь наблюдается при образовании *интерметаллидов* и некоторых твердых растворов. Одна из ее особенностей – отсутствие насыщения, определяемого валентностью соответствующих атомов. Металлическая связь допускает большее смещение атомов, чем другие типы связей. Этим обуславливается высокая пластичность металлических кристаллов по сравнению с валентными или ионными кристаллами.

Силы взаимодействия между частицами, кроме прочих факторов, зависят от расстояния между ними и при некотором расстоянии силы притяжения и отталкивания равны между собой. У металлов такое расстояние называют параметром кристаллической решетки. Для большинства технических металлов оно составляет от 3 до 5 ангстрем. Один ангстрем равен 10^{-10} м.

2.3 Искажение кристаллической структуры в сплавах

Рассмотренное выше идеальное строение кристаллической решетки металлов в реальных кристаллах практически не имеет места. Только при идеальных условиях кристаллизации и удается получить кристаллическое строение, близкое к тому, о котором шла речь.

В реальных кристаллах четкая закономерность построения кристаллической решетки нарушается наличием несовершенств. Роль несовершенств кристаллического строения огромна. Они определяют основные механические свойства металлов, их способность сопротивляться воздействию внешних сил, способность к деформации при нагружении, склонность к хрупкости, а также поведение при сварке, особенно давлением в твердом состоянии и при сварке плавлением.

Имеются три основных вида несовершенств: точечные, линейные и плоские. Точечные несовершенства (рисунок 2.6) – это:

- 1) пропуски отдельных атомов в решетке (*незаполненные узлы*);
- 2) лишние, внедренные атомы в междуузлия;
- 3) замещенные в узле атомы данного элемента атомами другого элемента.

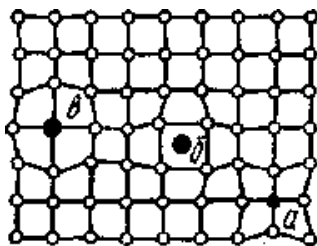


Рисунок 2.7 – Точечные дефекты кристаллической решетки:
a – незаполненный узел; *б* – внедренный в междуузлие атом;
в – замещенный атом

Любое из перечисленных несовершенств приводит не только к нарушению геометрически правильного атомного строения, но и к энергетическим изменениям в области дефекта. В этом месте могут уменьшиться или увеличиться, а также исказиться параметры решетки. Такая местная геометрическая и энергетическая неравномерность в решетке приводит к тому, что при наличии каких-либо внешних энергетических воздействий (*теплота, колебания, облучение и т. д.*) дефектные места первыми выходят из занимаемого положения и начинают перемещаться. Если речь идет о пропусках в узлах или замещенных в узлах атомах, то при их перемещении место в узле занимает атом основного элемента, свободная энергия в этом узле понижается до величины свободной энергии бездефектных узлов решетки. Может быть и так, что при перемещении атома из междуузлия освободившееся место остается незанятым.

Линейные (*одномерные*) дефекты образуются вследствие появления в какой-то части кристалла дополнительной атомной плоскости вследствие частичного сдвига в кристалле одной части плоскостей по отношению к другой. При появлении в кристалле такой плоскости образуется линейный дефект, называемый дислокацией (рисунок 2.7).

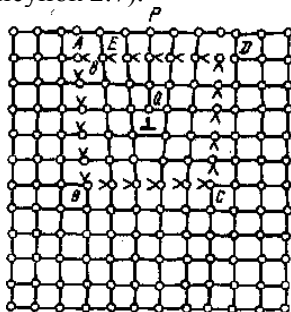


Рисунок 2.7 – Схема краевой (*линейной*) дислокации

Дислокация вносит определенные энергетические искажения в кристаллическую решетку и является, естественно, неравновесным – наименее стабильным участком кристалла. Внешние энергетические вмешательства в первую очередь активизируют дислокацию, и она может начать передвижение.

При образовании твердого раствора атомы растворяемого элемента располагаются в решетке растворителя. Они могут замещать атомы растворителя в узлах решетки, либо находиться в пространстве между узлами.

В первом случае будем иметь дело с раствором типа замещения, во втором – типа внедрения. Характер образующегося раствора зависит от соотношения размеров атомных диаметров. Процесс растворения всегда приводит к искажению формы и параметров первоначальной решетки растворителя.

Причины образования дислокаций связывают с условиями кристаллизации. При этом значение могут иметь различные факторы, нарушающие последовательное бездефектное построение кристаллической решетки металла.

Этими факторами могут быть:

- 1) возникновение напряжений в растущем кристалле, его деформация;
- 2) сегрегация примесей с изменением состава смежных атомных слоев;
- 3) ускоренное охлаждение, осложняющее нормальные условия роста зерен.

Особенно большое скопление дислокаций имеет место на границах зерен. В этих участках высокая плотность дислокаций связана с сильной разориентировкой атомных плоскостей на поверхностях различных зерен, выросших из разных центров.

2.4 Особенности получения неразъемных соединений

При разрезании какой-либо детали поверхностные частицы удаляются на расстояние, значительно превышающее параметр решетки. Для соединения деталей в единое целое необходимо сблизить их на расстояние, соизмеримое с параметром решетки. Тогда между сопряженными атомами возникнут связи, граница раздела исчезнет и произойдет сварка. Такому сближению препятствуют в основном два фактора:

- 1) микро- и макронеровности соединяемых поверхностей;
- 2) механические и химические загрязнения на них.

Соединение деталей возможно следующими способами:

I. Приложением к деталям сжимающего усилия, под действием которого хрупкие химические загрязнения разрушаются, неровности сминаются, загрязнения из зоны соединения выдавливаются в стороны, и в контакт входят свежееобразованные, неокисленные (*ювенильные*) поверхности. В результате таких манипуляций детали сближаются на необходимое расстояние, и образуется монолитное соединение.

Сталь является материалом с относительно низкой пластичностью, поэтому такая схема затруднительна по двум причинам:

- 1) необходимо создавать большие усилия, что значительно увеличивает габариты силовых установок;
- 2) при холодной обработке давлением сталь упрочняется и теряет пластичность (*происходит наклеп, нагартовка – измене-*

ние структуры и свойств металлов и сплавов в результате пластической деформации). Поэтому, даже при больших усилиях, нагартованная сталь выкрашивается. Процесс выкрашивания будет идти непрерывно и сопровождаться образованием новых неровностей. Поэтому соединение на сталях в большинстве случаев получают другими методами:

1. Малопластичные материалы перед сваркой нагревают до температуры, приблизительно равной $T_n = 0,8T_{пл}$, в результате чего их пластичность повышается, и после этого прикладывают сжимающее усилие. В нагретых деталях соединение образуется по первой схеме.

2. Подлежащие соединению кромки нагревают выше температуры плавления. Жидкий металл, вследствие высокой жидкотекучести, заполняет все неровности и при последующем охлаждении вновь образуемая кристаллическая решетка пристраивается к решетке оплавленных кромок по встречным направлениям. В результате этого образуется монолитное соединение с непрерывной кристаллической решеткой.

Вид, интенсивность и характер преобразования вводимой энергии – вот главное, что определяет вид процесса сварки. Введение энергии – всегда необходимое условие сварки, т. к. без этого невозможна активация соединяемых поверхностей.

Таким образом, для получения сварного соединения необходимо наличие одного из этих факторов: нагрева, деформации, или того и другого вместе. Сочетание низких температур и высоких давлений на практике имеет ограниченное применение. Высокие температуры (как правило, ниже $T_{пл}$) и среднее давление характерны для способов сварки давлением. Температуры выше $T_{пл}$ предусматриваются при сварке плавлением.

II. Близким по физической сущности сварки является процесс пайки, при которой металл свариваемых элементов остается в твердом состоянии, а соединяющий металл (*припой*) – в жидком. При пайке важную роль играет смачиваемость соединяемого металла припоем, которая зависит от качества подготовки поверхности, состава припоя, температуры деталей и припоя и др.

Процессы сцепления между двумя металлами, один из которых находится в твердой, а другой в жидкой фазе, служат отличительным признаком пайки, однако и в условиях сварки они оказывают большое влияние на качество сварных соединений.

Хорошо известно, что налипание брызг является браковочным признаком. Это явление наблюдается особенно часто при сварке в углекислом газе, порошковой проволокой без флюса, при ручной дуговой сварке.

Необходимым условием установления металлической связи между атомами твердого и жидкого металла является сближение атомов, которое достигается при смачивании твердого тела жидким. С энергетической точки зрения самопроизвольно такое смачивание будет происходить только в том случае, если работа сил притяжения между жидкостью и твердым металлом (*работа адгезии*) будет равна или больше работы сил притяжения частиц жидкости друг к другу (*работа когезии*).

Смачивание зависит от химического средства между контактирующими металлами и, в первую очередь, от их взаимной растворимости. Отмечено также, что смачивание улучшается при меньшей разнице температур плавления.

Растекание расплава по поверхности, или смачивание, осуществляется главным образом за счет поверхностной диффузии и потому облегчается при повышении температуры.

В реальных условиях поверхностное натяжение и растекание зависят от чистоты, состояния поверхности твердого тела, от состава расплавленного металла и других причин.

Введение в расплав поверхностно-активных примесей улучшает смачиваемость твердого тела жидким.

Для осуществления физико-химического взаимодействия между твердым и жидким металлом нужно, чтобы температура твердого металла была выше или равна температуре плавления расплава. В противном случае кристаллизация, начавшаяся у границ холодного твердого тела, затруднит взаимодействие металлов и возникновение металлической связи. При соблюдении указанного условия на границе жидкость – твердое тело возможно растворение одного металла в другом или прямое образование химических соединений.

III. Склеиванием также получают неразъемные соединения. Прочность клеевого соединения зависит от сил сцепления между частицами клея и склеиваемыми поверхностями (*силы адгезии*) и силами взаимодействия между частицами самого клея (*силы когезии*). Первая из них во многом зависит от качества подготовки поверхностей, а вторые полностью определяются природой самого клея.

2.5 Механизм образования монолитных соединений твердых тел

2.5.1 Схватывание металла

Все сварочные процессы преследуют одну и ту же цель: создание условий сцепления поверхностных частиц соединяемых деталей.

В зависимости от способа сварки это сцепление может возникать между частицами тел, находящихся в различных агрегатных состояниях:

- 1) в жидкой фазе – между жидкими компонентами в процессе совместного расплавления свариваемых деталей и последующей кристаллизацией металла шва;
- 2) в твердой фазе – между поверхностными частицами твердых тел.

Возможны и промежуточные случаи, когда силы сцепления возникают между твердым металлом и расплавом.

Реальные металлы являются поликристаллическими, состоящими из множества отдельных кристаллов, взаимосвязанных в общее монолитное целое. Переферийные части отдельных кристаллов зерен металла сопрягаются с соседними, образуя межзеренные, межкуристаллические границы. Несовершенства кристаллического строения межкуристаллических границ больше, чем внутри кристаллов, в связи с нарушениями порядка расположения узлов решеток и, как правило, большим количеством атомов инородных веществ – примесей и пр.

Физические свойства поликристаллического тела зависят от соотношений свойств зерен и межзеренных границ, от вели-

чины зерна металла, что определяет преобладающее действие внутрикристаллических или межкуристаллических свойств.

Для всех частиц тела, кроме находящихся на поверхности, силы сцепления использованы и взаимно уравновешены. Поверхностные атомы или молекулы имеют свободные связи и в определенных условиях могут присоединять к себе другие молекулы и атомы (*адсорбировать на поверхности различные газы или вступать в связь с поверхностными атомами другого твердого или жидкого вещества*).

2.5.2 Установление сил сцепления при сварке в жидкой фазе

Одним из наиболее широко применяемых способов создания межатомных связей является расплавление некоторых объемов металла вблизи соединяемых поверхностей, создание общей для обоих тел ванны расплавленного металла и последующая кристаллизация металла шва. Сцепление здесь осуществляется в жидкой фазе в результате диффузии и взаимного растворения металлов друг в друге. При последующем охлаждении кристаллы строятся из атомов обоих металлов. Процессы растворения и диффузии обеспечивают высокую прочность сварного соединения.

Совместно расплавляемые частицы свариваемых металлов обычно сильно измельчаются и перемешиваются, однако при последующем охлаждении они успевают *коагулировать* (*коагуляция – это объединение мелких диспергированных частиц в большие по размеру агрегаты*) и кристаллизуются в виде отдельно расположенных зерен, не имеющих общих кристаллов и соединенных между собой только силами сцепления на пограничных межкуристаллитных поверхностях.

2.5.3 Установление сил сцепления при сварке металлов в твердой фазе

На первый взгляд кажется, что образование монолитного соединения двух одинаковых монокристаллов с идеально глад-

кими и чистыми поверхностями возможно при любой температуре и без ввода внешней энергии. Для этого достаточно сблизить их поверхности на расстояние, соизмеримое с параметрами кристаллической решетки (*порядка долей нанометра*). Тогда между сопряженными атомами возникнут связи, граница раздела Δ (рисунок 2.9) исчезнет и произойдет сварка.

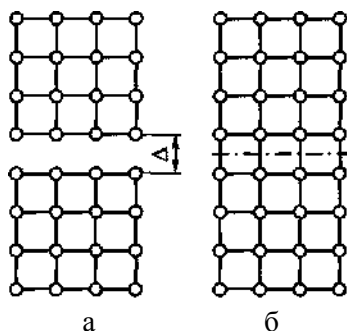


Рисунок 2.9 – Схема образования соединения двух монокристаллов с идеально чистыми и гладкими поверхностями: монокристаллы до (а) и после (б) соединения

Термин «схватывание» относят к образованию соединения между твердыми металлами при низких температурах. Однако схватывание происходит не всегда. Две металлические пластины с тщательно зачищенными и хорошо пригнанными поверхностями, не обнаруживают никаких признаков соединения или схватывания не только при соприкосновении, но и при сдавливании достаточно большими удельными давлениями. Причиной этого является наличие неметаллических пленок на поверхности всякого твердого тела. Известно, что у атомов, лежащих на поверхности твердых или жидких тел, заняты не все связи. Частицы, приблизившиеся к поверхности металла, захватываются свободными связями атомов и прочно присоединяются к ней.

Основной причиной, мешающей схватыванию поверхностей, служит возникновение на них слоя адсорбированных газовых молекул. Удаленные от поверхности молекулы или атомы газа слабо связаны с металлом и сравнительно легко удаляются.

Самый нижний мономолекулярный слой газовых молекул, лежащий непосредственно на поверхности металла, связан с ним чрезвычайно прочно. Адсорбционную пленку можно удалить, только срезав ее вместе с металлом. Однако и в этом случае на зачищенной поверхности очень быстро образуется новый мономолекулярный слой.

Для соединения двух монокристаллов в один требуется деформационная, или тепловая, энергия извне. Внешняя энергия деформации будет затрачиваться на преодоление сил отталкивания, возникающих между сближаемыми поверхностными атомами. Когда расстояния между ними будут равны межатомному расстоянию в решетке кристаллов, возникают процессы взаимодействия электронных оболочек атомов. После этого общая энергия системы начнет снижаться до уровня, соответствующего энергии атомов в решетке целого кристалла, и появится выигрыш энергии, равный избыточной энергии поверхностных атомов кристаллов до их соединения – *энергии активации*.

Следует иметь в виду, что при сварке возможность встречи двух одинаково ориентированных кристаллов очень мала. Как правило, соприкасаются будут монокристаллы с различной ориентацией кристаллических решеток (рисунок 2.10).

Соединение атомов в этом случае возможно только при условии искажения решеток, на что требуется определенная затрата энергии.

Если энергии, освобождающейся при сдавливании двух соединяемых поверхностей, будет достаточно для перестройки и искажения решеток в граничном слое, то соединение может произойти самопроизвольно, без дополнительного внешнего воздействия. В противном случае к границе раздела необходимо подвести некоторую энергию активации (*повысить температуру металла*).

В этом случае повышается энергетический уровень атомов, благодаря чему облегчается перестройка решетки при контакте различно ориентированных монокристаллов. Нагрев снижает твердость и повышает пластичность металла.

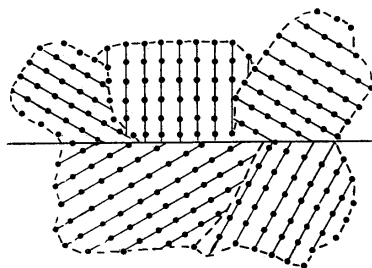


Рисунок 2.10 – Схема ориентации кристаллических решеток отдельных зерен

Резко повышается скорость диффузии, причем атомы получают способность диффундировать не только по объему металла, но и через слой окислов и тонкие зазоры между поверхностями. Диффузия расширяет зону соединения и делает ее объемной.

2.5.4 Сцепление твердых металлов с расплавленными

Процессы сцепления между металлами, один из которых находится в твердой, а другой в жидкой фазе, являются отличительным признаком пайки, однако и в условиях сварки они оказывают большое влияние на качество сварных соединений.

Необходимым условием установления металлической связи между атомами твердого и жидкого металла является сближение атомов, которое достигается при смачивании твердого тела жидким. С энергетической точки зрения такое смачивание будет происходить самопроизвольно только в том случае, если работа сил притяжения между жидкостью и твердым телом (*работа адгезии*) будет равна или больше работы сил притяжения частиц жидкости друг к другу (*работа когезии*).

Смачивание зависит от химического средства между контактирующими металлами и, в первую очередь, от их взаимной растворимости.

Смачивание осуществляется главным образом за счет поверхностной диффузии и поэтому облегчается при повышении температуры.

Для осуществления физико-химического взаимодействия между твердым и жидким металлом необходимо, чтобы температура твердого металла была выше или равна температуре плавления расплава. В противном случае кристаллизация, начавшаяся у границы холодного твердого тела, затрудняет взаимодействие металлов и установление металлической связи.

2.6 Стадийность процесса сварки

Сварку и пайку можно отнести к классу реакций, отличающихся двухстадийностью процесса образования связей между атомами соединяемых веществ.

На первой стадии А (рисунок 2.11) развивается физический контакт, т. е. осуществляется сближение соединяемых веществ на расстояния, требуемые для межатомного взаимодействия, а также происходит подготовка поверхностей к взаимодействию.

На второй стадии Б – стадии химического взаимодействия – заканчивается процесс образования прочного соединения.

Для качественного соединения материалов необходимо обеспечить контакт по большей части стыкуемой поверхности и активизировать ее.

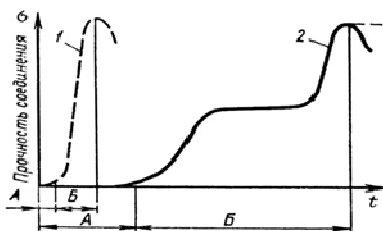


Рисунок 2.11 – Кинетика изменения прочности соединения при быстрым (1) и медленном (2) развитии физического контакта (А) и химического взаимодействия (Б) в зависимости от длительности сварки t

Энергия активации. Активация поверхности заключается в том, что поверхностным атомам твердого тела сообщается некоторая энергия, необходимая:

- 1) для обрыва связей между атомами тела и атомами внешней среды, насыщающими их свободные связи;
- 2) повышения энергии поверхностных атомов до уровня энергетического барьера схватывания, т. е. для перехода их в активное состояние.

Такая энергия активации может сообщаться в виде теплоты (*термическая активация*), упругопластической деформации (*механическая активация*), электронного, ионного и других видов облучения (*радиационная активация*).

2.7 Термодинамика и баланс энергии процесса сварки.

Классификация способов сварки

Классификацию способов сварки регламентирует ГОСТ 19.521–74.

Определение процесса сварки целесообразно дать исходя из анализа физико-химических особенностей получения соединений. В зоне сварки можно установить наличие двух основных физических явлений, связанных с термодинамически необратимым изменением формы энергии и состояния вещества (рисунок 2.12); введения и преобразования энергии; движения (превращения) вещества.

Вид, интенсивность вводимой энергии и характер ее преобразования – это главное, что определяет вид процесса сварки, причем введение энергии всегда является необходимым условием сварки, т. к. без этого невозможна активация соединяемых поверхностей.

Введение вещества необходимо только при некоторых видах сварки плавлением и пайки, причем энергия в этих случаях может быть введена также с расплавленным металлом. Характер движения вещества в зоне сварки сильно меняется от процесса к процессу. Движение значительно при сварке плавлением, особенно при наличии присадочного материала, и при пайке. При сварке давлением с нагревом движение материала в зоне стыка

незначительное, и существенна только диффузия вещества через стык. Холодная сварка реализуется практически без движения вещества, если не учитывать передвижения дислокаций и выхода их на поверхность.

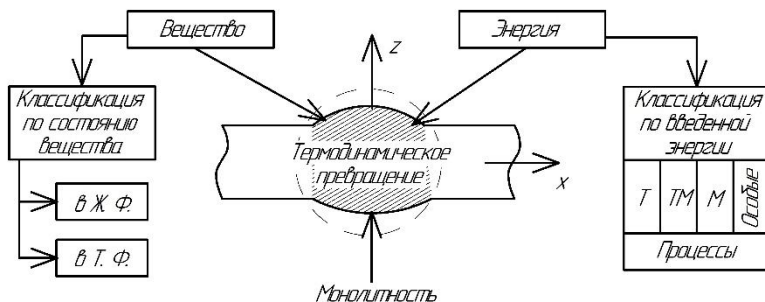


Рисунок 2.12 – Схема-модель, поясняющая термодинамическое определение и классификацию процессов сварки: Т, ТМ, ПМ – термические, термомеханические и прессово-механические процессы

Исходя из сказанного, ГОСТ 2601–84 дает такое определение сварке: **«Сварка – это процесс получения монолитного соединения материалов в результате введения и термодинамически необратимого преобразования энергии и вещества в месте соединения».**

По виду вводимой в изделие энергии все сварочные процессы могут быть разделены на термические, термомеханические и прессово-механические способы.

К термическим процессам относятся: дуговая сварка плавлением (рисунок 2.13), электрошлаковая, газовая, электронно-лучевая (рисунок 2.14), лазерная, индукционная и др.

К термомеханическим – контактная (рисунок 2.15–2.16), диффузионная, газопрессовая, дугопрессовая и др.

К прессово-механическим – холодная сварка, взрывом, ультразвуковая, трением и др.

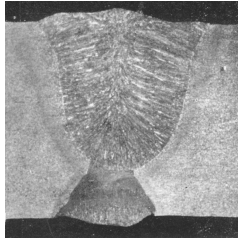


Рисунок 2.13 – Макроструктура сварного шва, выполненного электродуговой сваркой

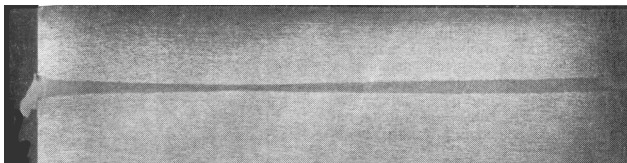


Рисунок 2.14 – Макроструктура поперечного сечения шва, полученного электронно-лучевой сваркой

Энергетический анализ показывает, что все известные в настоящее время процессы сварки металлов осуществляются введением только двух видов энергии – термической и механической или их сочетания. Поэтому в группу особых процессов могут быть включены только нейтронная сварка пластмасс и склеивание, которое происходит без введения энергии.

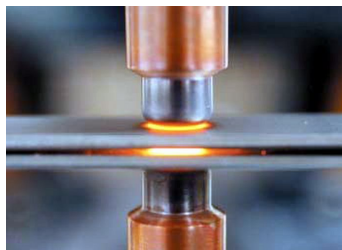


Рисунок 2.15 – Общий вид точечной сварки

2.8 Оценка энергетической эффективности процессов сварки

При выборе источника энергии для сварки необходимо учитывать два условия:

1) техническую возможность этого источника (*обязательный фактор*);

2) энергетическую и экономическую эффективность применяемого источника и возможность получения качественного соединения.

Источники энергии принято характеризовать их концентрацией, представляющей собой плотность энергии в пятне нагрева, т. е. количество энергии, приходящейся на единицу площади пятна нагрева. Чем выше этот показатель, тем эффективнее используется тепловая энергия. Однако по этому показателю не всегда удастся сравнивать источники разных классов. Поэтому чаще всего сравнительную оценку выполняют по удельной энергии, затрачиваемой на сварку конкретного соединения $\epsilon_{\text{св}}$. Чем меньше $\epsilon_{\text{св}}$, тем эффективнее источник. Энергия, потребляемая для сварки от сети, не вся расходуется полезно. Часть энергии теряется, что можно представить схемой (рисунок 2.17): сеть питания; источник энергии для сварки или трансформатор энергии ТЭ; носитель энергии – инструмент, передающий энергию от трансформатора к зоне сварки (*резки или напыления*), и изделие – зона сварки (*стык соединяемых изделий*).

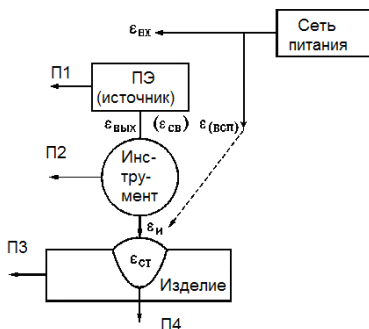


Рисунок 2.17 – Обобщенная схема баланса энергии сварочного процесса

Здесь энергия w может быть выражена в джоулях, но удобнее использовать удельную энергию ϵ , определяемую в расчете на единицу площади соединения.

$\epsilon_{\text{вых}} = \epsilon_{\text{вх}} - \text{П1}$, где П1 – потери в источнике питания (*нагрев обмоток и т.д.*);

$\epsilon_{\text{изд}} = \epsilon_{\text{св}} - \text{П2}$, где П2 – потери в окружающую среду (*от дуги, пламени*);

$\epsilon_{\text{ст}} = \epsilon_{\text{изд}} - (\text{П3} + \text{П4})$, где П3 – потери с каплями разбрызгиваемого металла, П4 – потери в результате теплопроводности свариваемого металла.

Потери П2 и П3 поддаются активному регулированию, П1 и П4 – значительно в меньшей степени.

Эффективность источников разных классов оценивают либо по $\epsilon_{\text{св}}$, либо по $\epsilon_{\text{изд}}$. В конкретных случаях более эффективными являются определенные источники или способы сварки. Например, при сварке встык стальных стержней с диаметром 20 мм $\epsilon_{\text{св}}$ составляет:

- 1) при дуговом способе – 1800 Дж/мм²;
- 2) при контактно-стыковой сварке – 400 Дж/мм²;
- 3) при сварке трением 130 Дж/мм².

Потери уноса характерны, главным образом, для резки, но могут возникать и при высокоинтенсивных процессах лучевой сварки.

Отдельные элементы в схеме передачи энергии в зависимости от вида процесса могут существенно изменяться и даже отсутствовать совсем. Например, носитель энергии (*инструмент*) в термических процессах – луч, дуга или пламя, а при контактной сварке – сам нагретый металл в зоне контакта.

Удельная энергия сварки резко увеличивается в случае выполнения многопроходной сварки. Например, аргонно-дуговая сварка металла толщиной 15 мм за несколько проходов требует затрат энергии до 1000 Дж/мм², а электронно-лучевая всего 20...50 Дж/мм², поскольку она выполняется за один проход.

2.9 Требования к источникам энергии для сварки

Сварка характеризуется местным нагревом. В этой связи первым требованием к источникам нагрева является концентрация их тепловой энергии, т. е. максимальная локализация ввода тепла с тем, чтобы до температуры, обеспечивающей получение сварного соединения, нагревались минимальные объемы металла.

Первое требование является необходимым, но не является достаточным. Для того чтобы источник смог нагреть и расплавить металл, его температура должна быть выше температуры плавления свариваемого металла – это **второе требование**.

Третье требование связано с тем фактором, что вследствие теплопроводности металлов часть тепла отводится в прилегающие к шву объемы основного металла и нагревает его.

Для установления положительного теплового баланса в зоне сварки источник должен обладать достаточной мощностью, которая позволила бы эффективно повышать там температуру нагрева металла, вплоть до температуры плавления.

Наибольшее распространение для целей сварки получили такие источники нагрева, как электрическая дуга, газовое пламя, ванна расплавленного шлака, электронный и лазерный лучи и др., которые отличаются как по своим энергетическим характеристикам, так и по физической сущности, поэтому и рассматриваться должны отдельно.

Вопросы для самопроверки

1. В каких агрегатных состояниях могут существовать вещества?
2. Что такое ионизация?
3. Какие существуют межатомные силы связей, какова их природа?
4. Почему атомы в кристаллической решетке занимают определенное положение по отношению друг к другу?
5. Чем объясняется тепловое расширение твердых тел?
6. Чем определяется количество электронов в атоме?

7. Из чего состоит атом?
8. В чем особенности молекулярной, ионной, валентной и металлической связей? Как эти особенности влияют на физические свойства кристаллов?
9. Что такое металлическая связь?
10. Что такое электронный газ?
11. В чем отличие поверхностных атомов от атомов находящихся внутри тела?
12. Что такое вакансия?
13. Чем отличается твердый раствор внедрения от твердого раствора замещения?
14. Какие условия должны быть выполнены для получения качественного сварного соединения?
15. В чем заключается физическая сущность процесса пайки?
16. В чем заключается физическая сущность процесса склеивания?
17. В чем заключается механизм схватывания металла?
16. Что такое энергия активации?
17. На какие стадии делится процесс сварки?
18. Классификация способов сварки.
19. Как влияют размеры зерен на механические свойства железа?
20. Какие основные источники тепла применяются в сварочной технике?
21. Каким требованиям должны удовлетворять источники тепла, применяющиеся для сварки?
22. Что такое тепловая мощность источника, в каких единицах она измеряется?
23. Что такое эффективная тепловая мощность и эффективный коэффициент полезного действия источника тепла?

3 ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СВАРОЧНАЯ ДУГА. СОСТАВ, СТРОЕНИЕ И СВОЙСТВА [1, 8]

3.1 Общая характеристика дугового разряда

Электрическая дуговая сварка является ведущим технологическим процессом в производстве сварных конструкций. Источником нагрева при дуговой сварке служит электрическая дуга, определяющая производительность расплавления металла.

Впервые дуговой разряд наблюдался и был описан В. В. Петровым в 1802 г. Название «*дуга*» он получил за форму ярко светящегося шнура (*столба*) разряда, который в первых опытах со слаботочными разрядами изгибался вверх серповидной дужкой под действием восходящих потоков нагретого разрядом воздуха. Первоначальное название такого разряда сохранилось и до настоящего времени.

Что же такое электрическая дуга?

Электрическая дуга представляет собой мощный, длительный электрический разряд в газовой среде между двумя электродами.

В физике известны многие виды таких разрядов, отличающиеся друг от друга главным образом величиной разрядного тока, напряжением, температурой и давлением газа между электродами. Различают темный, тлеющий, дуговой, искровой, коронный разряды. Дуговой разряд отличается от других сравнительно большим током, низким напряжением и высокой температурой газа.

Общей характеристикой газов является то, что они в нормальных условиях не являются проводниками электрического тока. Однако, при благоприятных условиях (*высокая температура и наличие внешнего электрического поля высокой напряженности*) газы могут ионизироваться, т. е. их атомы или молекулы могут освобождать или, для электроотрицательных элементов наоборот, захватывать электроны, превращаясь соответственно в положительные или отрицательные ионы. Благодаря этим изменениям газы переходят в четвертое состояние вещества называемого ***плазмой***, которая является электропроводной.

Любой газ при комнатной температуре и нормальном давлении состоит из электрически нейтральных (*не имеющих заряда*) атомов и молекул и является изолятором, поскольку в нем нет носителей тока – электрически заряженных частиц. Газы способны проводить электрический ток при условии, если в них появляются свободные электрически заряженные частицы. Такие частицы могут поступить в межэлектродный промежуток извне, или образоваться из нейтральных газовых атомов и молекул в этом промежутке путем отщепления от них, или присоединения к ним электронов. В первом случае образуются заряженные частицы – **ионы** с положительным зарядом, во втором – с отрицательным. В дуге содержатся в основном ионы с положительным зарядом.

Процесс образования в газовой среде заряженных частиц из нейтральных называется **ионизацией**.

Ионизация газа может происходить:

- 1) при воздействии на него высокой температуры;
- 2) мощного электрического поля;
- 3) светового излучения определенной частоты;
- 4) при столкновении свободных электронов с нейтральными частицами.

В зоне сварочной дуги ионизация происходит в основном за счет высокой температуры (*термическая ионизация*).

Для начала процесса ионизации необходимо поступление в межэлектродный промежуток свободных электронов от внешнего источника. Их испускает нагретый до высокой температуры в результате короткого замыкания отрицательный электрод – **катод** (*происходит катодная эмиссия*).

Электроны имеют отрицательный заряд, поэтому они летят с большой скоростью к положительному электроду – **аноду**. На своем пути они сталкиваются с нейтральными частицами и выбивают из них электроны (*ионизация соударением*). Так в межэлектродном промежутке образуются ионы с положительным зарядом и возбуждается дуга. Наряду с этим происходит и обратный процесс – **рекомбинация**, когда происходит объединение электронов с ионами с образованием нейтральной частицы.

Газ, содержащий заряженные частицы, называют **ионизированным**.

Исходя из сказанного можно дать определение сварочной дуге:

«Сварочная дуга представляет собой длительно существующий электрический разряд в ионизированной смеси газа, паров металла, веществ, входящих в состав электродных покрытий, флюсов».

С ростом числа заряженных частиц в дуговом промежутке растет его электрическая проводимость, в результате чего сила тока увеличивается, а напряжение дуги уменьшается. Это продолжается до определенного предела, после чего наступает устойчивое состояние дугового разряда – горение дуги.

Газ, содержащий заряженные частицы, называют **ионизированным**.

Ионизация дугового промежутка (рисунок 3.1) в начальный момент происходит в результате термоэлектронной эмиссии с поверхности катода.



Рисунок 3.1 – Схема ионизации дугового промежутка

Чтобы создать условия для термоэлектронной эмиссии, необходимо раскалить поверхность катода. С этой целью производят короткое замыкание электрической (сварочной) цепи, касаясь электродом изделия. При отрыве электрода дуговой промежуток заполняется свободными электронами, покинувшими поверхность раскаленного катода. Одновременно происходит термическая ионизация дугового промежутка – он заполняется

ионизированными частицами газов, паров металла и электродного покрытия.

3.2 Зажигание и развитие сварочной дуги

Основными способами возбуждения дуги являются следующие:

- 1) при замыкании и последующем размыкании токонесущих электродов;
- 2) возбуждение дополнительным импульсом высокого напряжения и высокой частоты (*от осциллятора*);
- 3) дополнительной дугой, промежуточной вставкой и др.

Возникновение дуги (рисунок 3.2). При касании концом электрода свариваемого металла происходит короткое замыкание сварочной цепи (рисунок 3.2, а). Проходя через отдельные выступы, ток, имеющий в точках соприкосновения электрода с металлом очень высокую плотность, мгновенно расплавляет их, вследствие чего между электродом и металлом образуется тонкая прослойка из жидкого металла (рисунок 3.2, б). В следующий момент сварщик несколько отводит электрод, отчего в жидком металле образуется шейка (рисунок 3.2, в), в которой плотность тока и температура металла возрастают. Затем, благодаря испарению расплавленного металла, шейка разрывается, газы и пары, заполняющие образовавшийся промежуток, мгновенно ионизируются и между электродом и металлом возникает сварочная дуга (рисунок 3.2, г).

С ростом числа заряженных частиц в дуговом промежутке растет его электрическая проводимость, в результате чего сила тока увеличивается, а напряжение дуги уменьшается. Это продолжается до определенного предела, после чего наступает устойчивое состояние дугового разряда – горение дуги (рисунок 3.3).

Дуга, горящая равномерно, без произвольных обрывов, требующих повторного зажигания, называется **устойчивой**. Наиболее известна оценка устойчивости дуги по ее разрывной длине $I_{разр}$. Чем больше разрывная длина дуги, тем выше ее устойчивость.

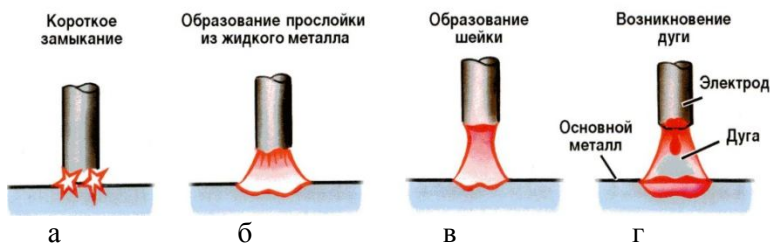


Рисунок 3.2 – Этапы возникновения сварочной дуги

Если дуга горит неравномерно, часто обрывается и гаснет, то такая дуга называется **неустойчивой**. Устойчивость дуги зависит от многих причин, основными из которых являются род и полярность тока, состав покрытия электродов, длина дуги.



Рисунок 3.3 – Схема горения сварочной дуги

Для электродов диаметром 4...5 мм с покрытием нормальная длина дуги равна 2...4 мм. Такая дуга называется **короткой**. Она горит устойчиво и обеспечивает нормальное протекание процесса сварки. Дуга длиной 4...6 мм – **нормальная**, свыше 6 мм – **длинная**.

Процесс плавления металла электрода при длинной дуге протекает неравномерно. Стекающие с конца электрода капли металла в большей степени могут окисляться кислородом и обогащаться азотом воздуха. Наплавленный металл получается пористым, шов имеет неровную поверхность, а дуга горит неустойчиво. При длинной дуге понижается производительность, увеличивается разбрызгивание металла, чаще образуются места

с непроваром и недостаточным сплавлением наплавленного металла с основным.

3.3 Составные части дугового разряда. Строение и свойства сварочной дуги

Сварочная дуга может питаться постоянным и переменным током. Если дуга питается постоянным током и электрод присоединен к отрицательному полюсу источника тока, а изделие к положительному, то имеем **прямую полярность**; присоединение электрода к положительному, а изделия к отрицательному полюсу дает **обратную полярность**. Изменение полярности влияет на распределение тепла и перенос электродного металла в дуге. При питании дуги переменным током полярность периодически изменяется в соответствии с частотой тока.

При наблюдении за дугой она представляется ярко светящимся однородным шнуром. В действительности, дуга постоянного тока имеет основные, четко выраженные зоны (рисунок 3.4):

- 1) **катодную** (вблизи отрицательного электрода);
- 2) **анодную** (вблизи положительного электрода) области;
- 3) **столб дуги**, расположенный между катодной и анодной областями.

Каждая область характеризуется определенным падением напряжения на ней.

В процессе горения дуги на катоде и аноде наблюдаются **активные пятна**, называемые катодным и анодным соответственно, которые представляют собой наиболее нагретые участки электрода и основного металла.

Столб дуги расположен между катодной и анодной областями, протяженность которых вдоль оси дуги не превышает 1...10 мкм, т. е. на столб дуги приходится основная часть длины дуги. По длине дуги температура распределяется неравномерно. **Наибольшее значение – около 5000...7000 °С она имеет в столбе дуги.**

Приэлектродные области, несмотря на малую протяженность их, играют основную роль в нагреве и плавлении электро-

да и изделия. Распределение тепла в различных зонах сварочной дуги также неодинаково.

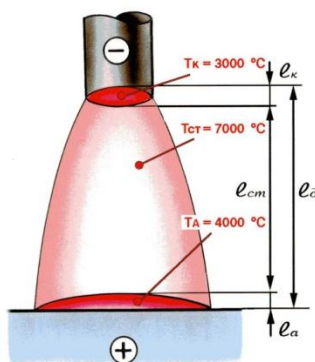


Рисунок 3.4 – Строение и свойства сварочной дуги

При питании дуги постоянным током наибольшее количество тепла (**около 43 %**) выделяется в анодной области. В катодной области выделяется примерно **36 %** тепла и около **21 %** приходится на столб дуги. По этой причине при сварке на прямой полярности глубина проплавления основного металла оказывается больше, чем на обратной полярности.

3.4 Виды сварочных дуг

По наиболее важным техническим признакам различают следующие основные группы сварочных дуг (таблица 3.1).

Входящие в группы виды сварочных дуг характеризуются следующими основными особенностями.

1. В дугах **прямого действия** (рисунок 3.5, а) подлежащие нагреву или плавлению металлы являются электродами разряда, и им передается кинетическая и потенциальная энергия заряженных частиц. Поэтому электроды интенсивно нагреваются и плавятся.

Таблица 3.1 – Виды сварочных дуг

1	2	3	4	5	6	7
Дуги прямого действия	Дуги с плавящимися электродами	Дуги в парах металлов	Свободные дуги	Установившиеся дуги	Открытые дуги	Дуги постоянного тока
Дуги косвенного действия	Дуги с неплавящимися электродами	Дуги в газах	Сжатые дуги	Неустановившиеся дуги	Закрытые дуги	Дуги переменного тока

Используется:

- 1) при дуговой сварке покрытыми электродами;
- 2) при сварке неплавящимся электродом в защитных газах;
- 3) при сварке плавящимся электродом под флюсом или в защитных газах.

Дуги *косвенного действия* (рисунок 3.5, б) располагаются у поверхностей, подлежащих нагреву или плавлению. Электродами таких дуг служат стержни из графита или вольфрама, не соединенные электрически со свариваемыми изделиями. Нагрев и плавление изделий происходит лишь за счет кинетической энергии сталкивающихся с ними частиц газа. Обычно такой нагрев мало эффективен и применяется в тех случаях, когда требуется небольшая теплопередача от дуги к изделию.

Используется:

– при специальных видах сварки и атомно-водородной сварке и наплавке.

Комбинированная дуга (рисунок 3.5, в) – это сочетание дуги прямого и косвенного действия. Примером комбинированной дуги служит трехфазная дуга, у которой две дуги электрически связывают электроды с изделием, а третья горит между двумя электродами, изолированными друг от друга.

2. В дугах с **плавящимися электродами** (рисунок 1.6, а) оба электрода расплавляются, поставляя металл в общую ванну. Если один из электродов **тугоплавкий** (*вольфрам, графит*) не поставляет металл в общую ванну, то дуга **называется дугой с неплавящимся электродом** (рисунок 3.6, б). При увеличении тока дуги тугоплавкий электрод также может расплавиться, поэтому разновидности дуг этой группы определяются не только материалами электродов, но и режимом их горения.

3. Большинство плавящихся электродов дуги интенсивно испаряется. Образующиеся пары почти полностью оттесняют из области разряда другие газы и определяют ее основные свойства, что и обусловило их название. Когда используют неплавящиеся электроды (*слабо испаряющиеся*) свойства сварочной дуги определяют **защитные газы**: аргон, гелий, водород, CO_2 и др. С ростом тока интенсивность испарения электродов может значительно увеличиться, а дуга может стать **«дугой в парах»**.

4. Дуга считается свободной (рисунок 3.7, а), если ее развитие в пространстве не ограничено до пределов, определяемых ее естественными свойствами. При наличии таких ограничений дуга называется сжатой (рисунок 3.7, б). Дугу сжимают, ограничивая размеры электродов, обдувая струями газов, воздействием магнитного поля.

5. Дуга считается установившейся, если длительность ее существования заметно превышает время протекания в ней переходных процессов и параметры уже не меняются во времени. Для неустановившихся дуг характерно изменение силы тока, состава атмосферы, расстояния между электродами, положения в пространстве и т. д.

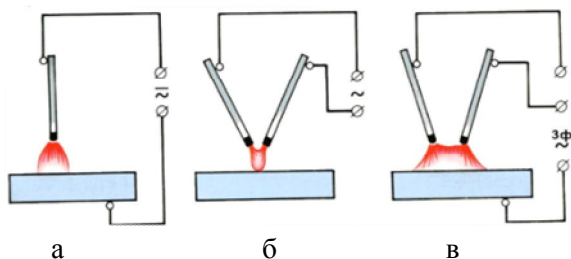


Рисунок 3.5 – Классификация дуг по подключению к источнику питания:

*а – прямого действия; б – косвенного действия;
в – комбинированная дуга*

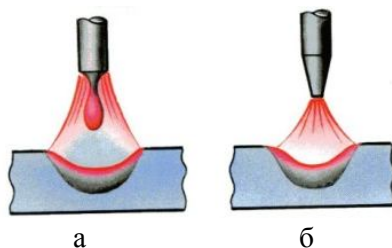


Рисунок 3.6 – Классификация дуг по применяемым электродам:

а – плавящийся электрод; б – неплавящийся электрод

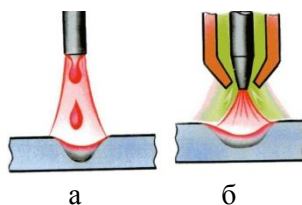


Рисунок 3.7 – Классификация дуг по степени сжатия дуги:

а – свободная; б – сжатая

6. Дуга считается **открытой**, если вокруг нее отсутствуют преграды, кроме самих электродов, исключаящие или затруд-

няющие циркуляцию газа в околосварочном пространстве, или задерживающие ее излучение. В случае полного ограждения дуги от окружающего пространства она становится **закрытой** (дуга под флюсом).

7. **По длине дуги**: 2...4 мм – короткая; 4...6 мм – нормальная; свыше 6 мм – длинная.

8. **По роду тока**. Для дуг **постоянного тока** характерны неизменность направления тока и, как правило, небольшие колебания его силы, обусловленные процессами в дуге.

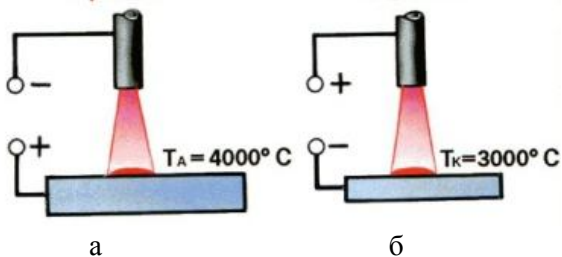
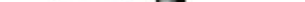
В дугах **переменного тока** происходят непрерывные изменения направления и силы тока в соответствии с изменениями э.д.с. источника и процессами в дуге. Такие дуги угасают каждый раз при переходе тока через нуль и возобновляются снова в начале каждого полупериода питающего их переменного тока.

9. Дуги постоянного тока **по полярности** – **прямая и обратная** (рисунок 3.8).

Дуга постоянного тока. На постоянном токе горение сварочной дуги более стабильно, сварные швы получаются более качественными, легче поддерживаются пониженные значения сварочных токов. Дуга постоянного тока горит значительно устойчивее. Однако она имеет существенный недостаток – **магнитное дутье**. Ток, проходя по сварочным проводам, электроду и дуге, создает вокруг дуги и в свариваемом металле магнитные поля. Когда эти поля расположены несимметрично относительно оси дуги, они могут отклонять дугу как гибкий проводник тока. А это затрудняет сварку и даже может привести к обрыву дуги.

Кроме того, некоторые типы электродов, например, для сварки нержавеющей стали, требуют только постоянного тока. Обычные же электроды, предназначенные для переменного тока, нормально работают и на постоянном токе.

При сварке на постоянном токе дуга может питаться током **прямой или обратной полярности**. При прямой полярности



а – прямая; б – обратная;

температура анода T_k – температура

Ток обратной полярности применяют в тех случаях, когда нужно уменьшить выделение тепла на свариваемом изделии: при сварке тонкого или легкоплавкого металла, чувствительных к перегреву легированных, нержавеющей и высокоуглеродистых сталей и т. д., а также при использовании некоторыми видами электродов (*например, с фтористокальциевым покрытием типа УОНИ-13 и др.*).

Дуга переменного тока. При питании дуга переменным током полярность электрода и изделия, а также условия существования дугового разряда периодически изменяются. Так, дуга переменного тока промышленной частоты 50 Гц гаснет и вновь возбуждается 100 раз в секунду, или дважды за каждый период. Поэтому особо возникает вопрос об устойчивости горения дуги переменного тока. В первую очередь устойчивость горения такой дуги зависит от того, насколько легко происходит повторное возбуждение дуги в каждом полупериоде. Это определяется ходом физических и электрических процессов в дуговом промежутке и на электродах в отрезки времени между каждым погасанием и новым зажиганием дуги. Снижение тока сопровождается соответствующим уменьшением температуры в столбе дуги и степени ионизации дугового промежутка. При переходе тока через нуль и перемене полярности в начале и конце каждо-

го полупериода дуга гаснет. Одновременно падает и температура активных пятен на аноде и катоде. Падение температуры несколько отстает по фазе при переходе тока через нуль, что связано с тепловой инерционностью процесса. Особенно интенсивно падает температура активного пятна, расположенного на поверхности сварочной ванны, в связи с интенсивным отводом теплоты в массу детали. В следующий за погасанием дуги момент меняется полярность напряжения на дуговом промежутке. Одновременно изменяется и направление движения заряженных частиц в дуговом промежутке. В условиях пониженной температуры активных пятен и степени ионизации в дуговом промежутке повторное зажигание дуги в начале каждого полупериода происходит только при повышенном напряжении между электродами, называемом пиком зажигания или напряжением повторного зажигания дуги. Пик зажигания всегда выше напряжения дуги, соответствующего стабильному режиму ее горения. При этом величина пика зажигания несколько выше в тех случаях, когда катодное пятно находится на основном металле. Величина пика зажигания существенно влияет на устойчивость горения дуги переменного тока. Деионизация и охлаждение дугового промежутка возрастают с увеличением длины дуги, что приводит к необходимости дополнительного повышения пика зажигания и влечет снижение устойчивости дуги. Поэтому затухание и обрыв дуги переменного тока при прочих равных условиях всегда происходят при меньшей ее длине, чем для постоянного тока. *При наличии в дуговом промежутке паров легко ионизирующихся элементов пик зажигания уменьшается и устойчивость горения дуга переменного тока повышается.* Устойчивость горения дуги в значительной степени зависит от количества ионизированных частиц в дуговом промежутке. Чем больше их количество, тем устойчивее горит дуга. Для повышения устойчивости горения дуги переменного тока в покрытия электродов и сварочные флюсы вводят элементы с **низким потенциалом ионизации** (это минимальная энергия, которую надо затратить для удаления электрона из атома): калий, натрий и кальций, которые облегчают возбуждение дуги после

того, как ток уменьшается до нуля и одновременно изменяет свое направление на противоположное.

С увеличением силы тока физические условия горения дуги улучшаются, что также приводит к снижению пика зажигания и повышению устойчивости дугового разряда. Таким образом, величина пика зажигания является важной характеристикой дуги переменного тока и оказывает существенное влияние на ее устойчивость. Чем хуже условия для повторного возбуждения дуги, тем больше разница между пиком зажигания и напряжением дуги. Чем выше пик зажигания, тем выше должно быть напряжение холостого хода источника питания дуги током.

3.5 Технологические свойства дуги

Под технологическими свойствами сварочной дуги понимают совокупность ее теплового, механического и физико-химического воздействия на электроды, определяющие интенсивность плавления электрода, характер его переноса, проплавление основного металла, формирование и качество шва. К технологическим свойствам дуги относятся также ее ***пространственная устойчивость и эластичность***. При проведении сварки необходимо учитывать длину дуги, используемой при сварке, т. к. от неё напрямую зависит такая важная характеристика как эластичность. Для получения качественного сварного шва необходимо бесперебойное горение сварочной дуги, которое характеризуется эластичностью сварной дуги. Говорят, что ***дуга достаточно эластична, если сварочный процесс остается устойчивым при увеличении длины сварной дуги***.

Технологические свойства дуги взаимосвязаны и определяются параметрами режима сварки.

Важными технологическими характеристиками дуги являются зажигание и стабильность горения дуги. Условия зажигания и горения дуги зависят от рода тока, полярности, химического состава электродов, межэлектродного промежутка и его длины. Для надежного обеспечения процесса зажигания дуги необходимо подведение к электродам достаточного напряжения холостого хода источника питания дуги, но в то же время без-

опасного для работающего. Для сварочных источников напряжение холостого хода не превышает **80 В на переменном токе и 90 В на постоянном**. Обычно напряжение зажигания дуги больше напряжения горения дуги на переменном токе в 1,2...2,5 раза, а на постоянном токе – в 1,2...1,4 раза. Время установления дугового разряда составляет $10^{-5} \dots 10^{-4}$ с. Поддержание непрерывного горения дуги будет осуществляться, если приток энергии в дугу компенсирует ее потери. Таким образом, **первым условием** для зажигания и устойчивого горения дуги является наличие специального источника питания электрическим током.

Вторым условием является наличие ионизации в дуговом промежутке. Степень протекания этого процесса зависит от химического состава электродов и газовой среды в дуговом промежутке. Степень ионизации выше при наличии в дуговом промежутке легко ионизирующихся элементов. Горящая дуга может быть растянута до определенной длины, после чего она гаснет. Чем выше степень ионизации в дуговом промежутке, тем длиннее может быть дуга.

Максимальная длина горячей без обрыва дуги характеризует ее важнейшее технологическое свойство – стабильность.

Стабильность дуги зависит от целого ряда факторов: температуры катода, его эмиссионной способности, степени ионизации среды, длины дуги и др.

К технологическим характеристикам дуги относятся также пространственная устойчивость и эластичность. Под этим понимают способность сохранения дугой неизменности пространственного положения относительно электродов в режиме устойчивого горения и возможность отклонения и перемещения без затухания под воздействием внешних факторов. Такими факторами могут быть магнитные поля и ферромагнитные массы, с которыми дуга может взаимодействовать. При этом взаимодействии наблюдается отклонение дуги от естественного положения в пространстве. Отклонение столба дуги под действием магнитного поля, наблюдаемое в основном при сварке постоянным током, называют **магнитным дутьем**.

3.6 Статическая вольтамперная характеристика сварочной дуги

Сопротивление дуги не является постоянным вследствие того, что число заряженных частиц в ней и площадь поперечного сечения столба изменяются при изменении силы тока.

Зависимость напряжения дуги от силы тока в ней при постоянной длине дуги называют **статической вольтамперной характеристикой дуги**.

В зависимости от силы тока вольтамперная характеристика имеет различный характер: **падающая** при малых токах, **пологая** (почти жесткая) в области средних токов и **возрастающая** при больших токах (рисунок 3.9).

Из рисунка видно, что напряжение дуги существенно зависит от силы тока в ней только при малых и больших токах.

В области **малых токов** (до 60...70 А) сопротивление дуги вследствие высокой интенсивности роста степени ионизации (увеличения числа заряженных частиц) и увеличения сечения столба дуги уменьшается в большей степени, чем увеличивается ток и поэтому напряжение уменьшается, а характеристика **падающая**.

В области средних токов сила тока и сопротивление по тем же причинам изменяются практически в одинаковой степени, поэтому напряжение дуги почти не зависит от силы тока, а характеристика становится полой и даже близкой к жесткой.

Наконец, в области больших токов сопротивление стабилизируется, напряжение от силы тока принимает линейную зависимость, а характеристика становится возрастающей.

Падающая и полая характеристики типичны для дуги при ручной дуговой сварке и сварке в защитных газах (ГЭ), а также для сварки вообще при малых плотностях тока. Для дуги, горячей при повышенных плотностях тока (дуга под флюсом – ДФ, ГЭ), вольтамперная характеристика возрастающая.

Из рисунка 3.10 следует, что напряжение дуги от ее длины зависит всегда (вольтамперные характеристики дуг разной длины не пересекаются и не сливаются в одну линию).

Точка пересечения вольтамперной характеристики дуги и внешней характеристики источника питания называется **«рабочая точка»**.

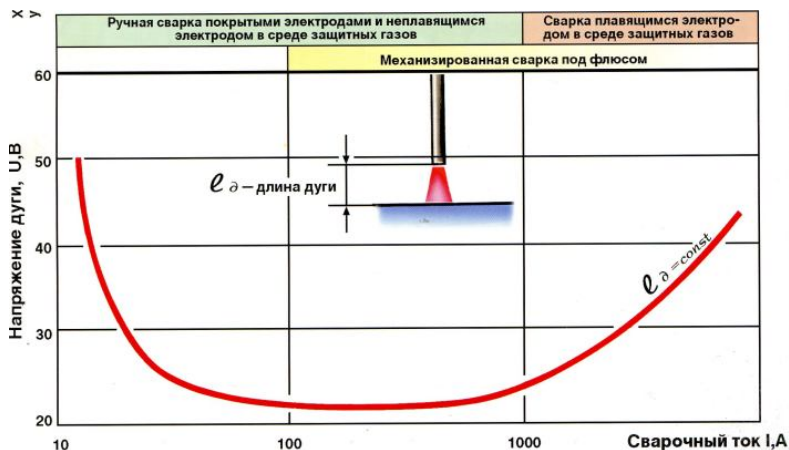


Рисунок 3.9 – Статическая вольтамперная характеристика дуги

Совместный анализ ВАХ дуги и внешних характеристик источника питания позволяют определить **точки устойчивого режима горения дуги** (рисунок 3.10).

Как следует из рисунка 3.10, чем круче будет падение внешней характеристики источника питания (*в рабочей области*), тем меньше изменится ток дуги I при колебаниях ее длины l , т. е. тем выше эластичность дуги.

При установке (*настройке*) параметров режима сварки, когда используются источники питания с падающей внешней характеристикой, ток дуги I_d задается настройкой источника питания, формирующего семейство падающих внешних характеристик. Напряжение дуги U_d при ручном ведении процесса задается сварщиком путем поддержания определенной длины дуги l_d . Сварщик, таким образом, визуально контролируя длину дуги (*поддерживая ее в среднем постоянной*) сохраняет напряжение дуги в среднем неизменным. Поддерживая при сварке длинную дугу, сварщик задает высокое напряжение дуги, и наоборот.

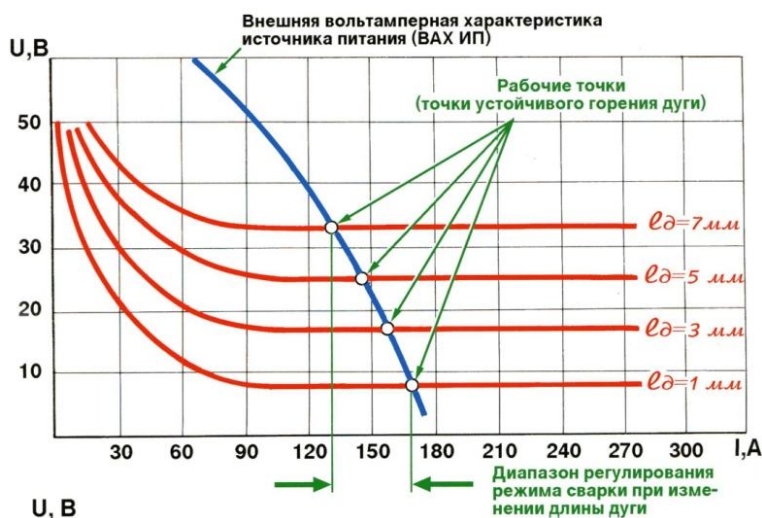


Рисунок 3.10 – Зависимость вольтамперной характеристики дуги от ее длины

Устойчивость горения дуги и стабильность режима сварки зависят как от физических условий существования дугового разряда, так и от свойств и параметров источника питания.

Установившийся режим системы, состоящей из источника питания и потребителя энергии – сварочной дуги, определяется равенством напряжений и токов в них. Источник питания для дуговой сварки должен отвечать следующим основным требованиям:

- 1) обеспечивать надежное возбуждение сварочной дуги;
- 2) поддерживать ее устойчивое горение;
- 3) способствовать благоприятному переносу электродного металла;
- 4) обеспечивать настройку на заданный режим;
- 5) быстро реагировать на происходящие в дуге изменения (иметь хорошие динамические свойства).

Требования электрической сварочной дуги, выраженные ее вольтамперной характеристикой, должны удовлетворяться соответствующими вольтамперными характеристиками источников питания.

Каждая внешняя характеристика источника соответствует вполне определенному положению его токорегулирующего устройства: изменением положения этого устройства получают семейство подобных характеристик источников питания.

Полная тепловая мощность сварочной дуги зависит от тока и напряжения дуги и определяется их произведением. Тепловая мощность дуги расходуется на нагрев и плавление основного и электродного металла, электродного покрытия, а часть ее рассеивается в окружающую среду. Количество тепла, вводимого дугой в изделие за единицу времени (*за вычетом потерь в окружающую среду*), называют **эффективной тепловой мощностью**. Энергию же, затраченную на единицу длины сварного шва при сварке плавлением, называют **погонной энергией**. Численное значение ее определяется делением эффективной тепловой мощности на скорость сварки.

Погонная энергия дуги является одной из основных характеристик сварочного процесса и имеет важное значение при определении оптимального режима сварки.

3.7 Магнитное дутье при сварке

Дуга является газообразным проводником, сравнительно слабо связанным с жидкими или твердыми электродами. Эта особенность дуги, с одной стороны, предопределяет возможность управления положением ее в пространстве с помощью небольших по величине сил и, с другой – заставляет тщательно оберегать ее от случайных возмущений столь же малыми силами.

Известно, что вокруг проводника с током возникает магнитное поле, которое воздействует на этот проводник (рисунок 3.11). Не является в этом плане исключением и сварочная дуга.

Магнитное поле характеризуется определенной направленностью магнитных силовых линий, определяемой направлением вектора магнитной индукции. В зависимости от направления этого вектора магнитное поле по отношению к оси столба дуги может быть продольным и поперечным.

Ток дуги практически всегда имеет радиальную составляющую. Взаимодействие радиальных составляющих тока дуги с продольным магнитным полем является причиной вращения столба вокруг оси.

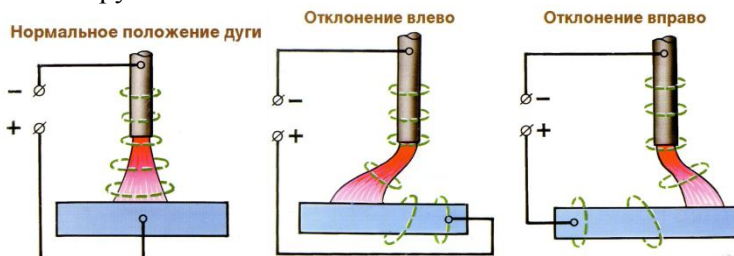


Рисунок 3.11 – Отклонение дуги в зависимости от схемы подключения

Если на дугу постоянного тока наложить переменное магнитное поле, то столб дуги будет попеременно отклоняться в противоположные стороны с частотой переменного магнитного поля.

Магнитное поле в зоне дугового разряда создается также собственным током, текущим по сварочной цепи. Поле взаимодействует с элементами тока столба дуги и обуславливает силу, направленную к его центру – **пинч-эффект**. Ток, текущий по участку цепи может создавать по отношению к току дуги поперечное магнитное поле, которое вызывает отклонение столба.

Магнитное дутье сильно проявляется в дуге постоянного тока и усиливается с его увеличением, вследствие чего силу сварочного тока приходится ограничивать. Действие магнитного дутья значительно ослабляется при сварке на переменном токе. Отклонение дуги можно регулировать и углом наклона электрода к поверхности изделия.

Отклонения дуги, относимые также к магнитному дутью, могут быть вызваны наличием вблизи дуги значительных ферромагнитных масс (рисунок 3.12).

Через ферромагнитную массу, благодаря ее высокой магнитной проницаемости, стремятся замкнуться магнитные силовые линии, вследствие чего магнитное давление со стороны ферромагнитной массы снижается, и дуга отклоняется в ее сторону.

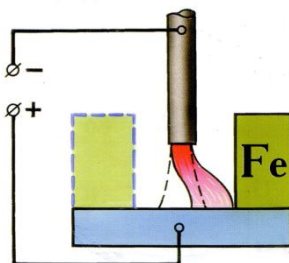


Рисунок 3.12 – Влияние ферромагнитной массы на отклонение дуги

В практике отклонение дуги под действием ферромагнитной массы может наблюдаться в сторону заваренного шва, или от кромки в сторону основной массы изделия. Влияние ферромагнитных масс можно исключить или уменьшить путем их уравнивания относительно оси столба дуги (*оси шва*), помещая соответствующую массу с противоположной стороны.

На отклонение дуги может также оказывать влияние несимметричность обмазки электрода (рисунок 3.13) и химическая неоднородность свариваемой стали.

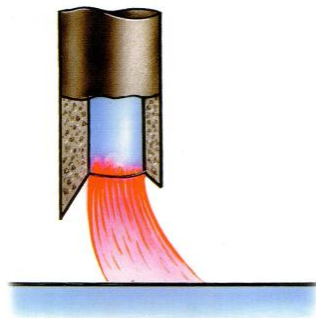


Рисунок 3.13 – Несимметричность обмазки электрода

Магнитное дутье резко повышает разбрызгивание электродного металла, ухудшает качество сварных швов (*возможны непровары и т.п.*), снижает производительность сварочного процесса и значительно затрудняет работу сварщика. Особенно существенно оно при сварке на постоянном токе.

Описанные явления отклонения столба дуги в результате действия магнитных полей или ферромагнитных масс при сварке согласно ГОСТ 2601–74 называют **магнитным дутьем**.

Таким образом, магнитное дутье – это отклонение дуги от своей оси под действием магнитных полей, ферромагнитных масс или других факторов.

Для уменьшения отрицательного влияния магнитного дутья рекомендуется принимать следующие меры:

- 1) в процессе сварки поддерживать предельно короткую дугу;
- 2) в зависимости от величины отклонения дуги изменять угол наклона электрода, при этом конец электрода направлять в сторону отклонения дуги (рисунок 3.14);
- 3) временно размещать симметричные ферромагнитные массы вблизи места сварки;
- 4) присоединять сварочный провод к изделию в непосредственной близости к дуге. При сварке длинных швов токоподвод к изделию можно осуществлять при помощи двух проводов

(в начале и в конце шва) и даже трех (в начале, середине и в конце шва) и т.п.

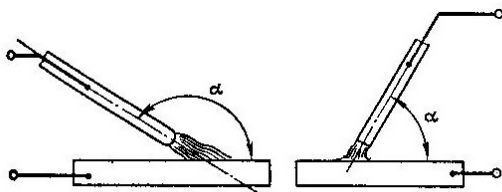


Рисунок 3.14 – Влияние наклона электрода на отклонение дуги

3.8 Перенос металла в сварочной дуге

При сварке плавящимся электродом температуру катодной и анодной областей принимают близкой или равной температуре испарения электродов (около 2750°C для железа). Температура металла в сварочной ванне на $100\ldots 600^{\circ}\text{C}$ превышает температуру плавления металла. В капле на торце электрода температура выше, чем в сварочной ванне.

Металл сварочной ванны формируется из расплавленных кромок основного металла и электродного металла, который в виде капель переходит в сварочную ванну.

Различают несколько видов переноса:

- 1) **крупнокапельный** с замыканиями дугового промежутка (ручная дуговая сварка);
- 2) **мелкокапельный** с замыканиями дугового промежутка (механизированная сварка в CO_2);
- 3) **мелкокапельный без замыканий дугового промежутка** (сварка под флюсом);
- 4) **струйный** (сварка в инертных газах тонкой проволокой);
- 5) **парами металла** (при всех видах сварки плавящимися электродами – как дополнение к другим видам переноса).

Характер переноса оказывает значительное влияние на устойчивость процесса формирования шва, разбрызгивание ме-

талла и на металлургические процессы между шлаком и металлом как в капле, так и в ванне. В большинстве случаев более желателен мелкокапельный без короткого замыкания или струйный перенос.

Перенос металла происходит под влиянием различных сил, действующих на каплю. В процессе формирования и переноса капли на нее действуют сила тяжести, сила поверхностного натяжения, электродинамические силы, реактивное давление паров электродов, газовые и плазменные потоки и др.

Анализ взаимодействия этих сил затруднителен, поэтому вводятся некоторые допущения:

- 1) столб дуги неподвижен и соосен с электродом;
- 2) все дуговые процессы во времени стабильны.

Силы тяжести способствуют переносу металла при сварке в нижнем положении и препятствуют при сварке в потолочном. Они оказывают наибольшее влияние на перенос электродного металла при сварке на малых токах, когда электродинамические силы еще сравнительно невелики.

Силы поверхностного натяжения придают каплям жидкости сфероидальную форму, удерживают капли на «потолке», втягивают капли металла в жидкую сварочную ванну.

Соприкосновение жидкого металла с газами и шлаками может изменить его поверхностное натяжение. Например, кислород снижает поверхностное натяжение стали, поэтому при сварке в инертных газах в смесь добавляют до 5 % кислорода.

Электродинамические силы пинч-эффекта сильно влияют на перенос металла, особенно при больших токах, когда они способствуют появлению плазменных потоков от мест сужения столба дуги. При этом возникают как продольные, так и поперечные составляющие этих сил. Однако результирующая сила всегда направлена в сторону отрыва капли. В основном под действием этих сил происходит перенос металла при сварке в по-

ложениях, отличных от нижнего (*потолочные и вертикальные швы*).

Поэтому, например, в «*слаботочных*» дугах, где эти силы малы, преобладает крупнокапельный перенос, а в «*сильноточных*» – струйный. Появлению струйного переноса способствует также, перегрев капель, который достаточно велик при сварке, особенно на обратной полярности.

Струйный перенос сопровождается образованием конуса жидкого металла на конце электрода. При этом средний размер капель монотонно уменьшается с увеличением тока. При некотором значении тока, называемом критическим, которое при сварке на обратной полярности ниже, чем на прямой, капельный перенос металла переходит практически в струйный. Охват дугой конца электрода способствует струйному переносу с анода.

Реактивное давление паров электрода зависит от материала электрода и параметров приэлектродных областей. Эти силы направлены в сторону, противоположную силе тяжести и до определенного значения силы тока, называемого критическим, способствуют росту капель, после чего наблюдается резкое уменьшение их величины. Они обычно противодействуют начальному отрыву капли. Если реактивные силы имеют взрывной характер, то они могут сильно затруднить переход к струйному переносу.

Электростатические силы возникают вследствие большого градиента потенциала (*напряженности поля*) в переходных областях дуги, особенно у катода. В столбе дуги создается разность давлений, которая может деформировать металл ванны, вытягивая его в виде конуса от катода к аноду при обратной полярности.

При РДС покрытыми электродами возникает **сила давления газовых потоков**, которая направлена в сварочную ванну и способствует отрыву капли. Эта сила является одной из причин возникновения кратера в конце шва.

Рассмотренные ранее газовые потоки в дуге могут затруднять перенос металла и даже вызывать сдвиг капли в сторону и подъем ее над уровнем торца электрода.

Величина большинства сил зависит от параметров режима сварки. С увеличением силы тока возрастают электродинамические силы, уменьшаются силы поверхностного натяжения (*т. к. повышается температура металла*). Изменяются и другие силы. Таким образом, ***изменяя силу тока, можно изменить характер переноса.***

Для того чтобы сделать перенос металла мелкокапельным или струйным, обычно требуются большие токи, особенно при сварке на прямой полярности. Подавая периодически кратковременные импульсы увеличенного тока, можно обеспечить мелкокапельный перенос металла порциями с частотой воздействия импульсов. Импульсное управление переносом металла позволяет влиять также и на металлургию процесса, регулируя выгорание отдельных элементов.

Вопросы для самопроверки

1. Что такое газовый разряд?
2. Назовите зоны дуги и отметьте их основные особенности.
3. Назовите основные способы возбуждения дуги.
4. Что такое вольтамперная характеристика дуги? Опишите ее основные особенности.
5. В чем сущность ионизации газа?
6. Назовите основные виды эмиссии электронов.
7. Опишите основные процессы в катодной области дуги.

4 КЛАССИФИКАЦИЯ И ОБОЗНАЧЕНИЕ СТАЛЕЙ [5-7, 11]

4.1 Основы классификации и принципы обозначения (маркировки) сталей

Металлами называются вещества, атомы которых располагаются в определённом геометрическом порядке, образуя при этом кристаллы.

Им присущ специфический металлический блеск. Кроме того, металлы обладают хорошей пластичностью, высокой теплопроводностью и электропроводностью. Это дает возможность обрабатывать их под давлением (*прокатка, ковка, штамповка, волочение*). Металлы обладают хорошими литейными свойствами, а также свариваемостью. Они способны работать при низких и высоких температурах. Металлические изделия и конструкции легко соединяются с помощью болтов, заклепок и сварки. Наряду с этим металлы обладают и существенными недостатками: имеют большую плотность, при действии различных газов и влаги, корродируют, а при высоких температурах значительно деформируются.

Существует такое определение как «*чистый металл*» оно является условным, т. к. любой чистый металл содержит примеси, а потому его следует рассматривать как сплав. Под термином «*чистый металл*» всегда понимается металл, содержащий примеси от 0,01 до 0,001 %. Современная металлургия позволяет получать металлы высокой чистоты (99,999 %). Однако, примеси даже в малых количествах могут оказывать существенное влияние на свойства металла.

Чистые металлы обладают высокой пластичностью и низкой прочностью, что не обеспечивает требуемых физико-химических и технологических свойств. Поэтому их применение в строительстве и технике в качестве конструкционных материалов сильно ограничено. Наиболее широко используют сплавы, обладающие более высокой прочностью, твердостью и износостойкостью и т. д.

Сплавы – это системы, состоящие из нескольких металлов или металлов и неметаллов. Так, например, прочность техниче-

ского железа составляет примерно 250 МПа, при введении в железо углерода в количестве 0,9 мас.% прочность повышается до 980 МПа. Все металлы и образованные из них сплавы делят на две группы: **черные и цветные**.

К **черным** металлам относятся железо и сплавы на его основе – стали и чугуны, остальные металлы являются цветными. В строительстве в основном применяют черные металлы – чугуны и стали для каркасов зданий, мостов, труб, кровли, арматуры в бетоне и для других металлических конструкций и изделий.

К **цветным** металлам относятся все металлы и сплавы на основе алюминия, меди, цинка, титана. Цветные металлы являются более дорогостоящими и дефицитными.

Чугун получают в ходе доменного процесса, основанного на восстановлении железа из его природных оксидов коксом при высокой температуре. Чугуны в зависимости от состава и структуры подразделяются на серые (*углерод в виде цементита и свободного графита*) и белые (*углерод в виде цементита*). В зависимости от формы графита и условий его образования различают: **серый, высокопрочный и ковкий чугуны**.

Сталью называют сплав железа с углеродом и другими элементами с содержанием углерода до 2,14 % (рисунок 4.1).

Стали можно подразделить на две основные группы – углеродистые и легированные.

Углеродистые стали – основной конструкционный материал, который используется в различных областях промышленности. Они дешевле легированных и проще в производстве. В углеродистой стали свойства зависят от количества углерода, поэтому эти стали классифицируются на **низкоуглеродистые, средне- и высокоуглеродистые**.

Углеродистые стали относятся к железоуглеродистым сплавам с содержанием углерода от 0,05 до 1,35 %. Углеродистые **конструкционные** стали содержат до 0,65 % С, **инструментальные** – более 0,65 % С.

Кроме вышеуказанной классификации, углеродистые стали подразделяются по содержанию углерода, по структуре, по назначению.

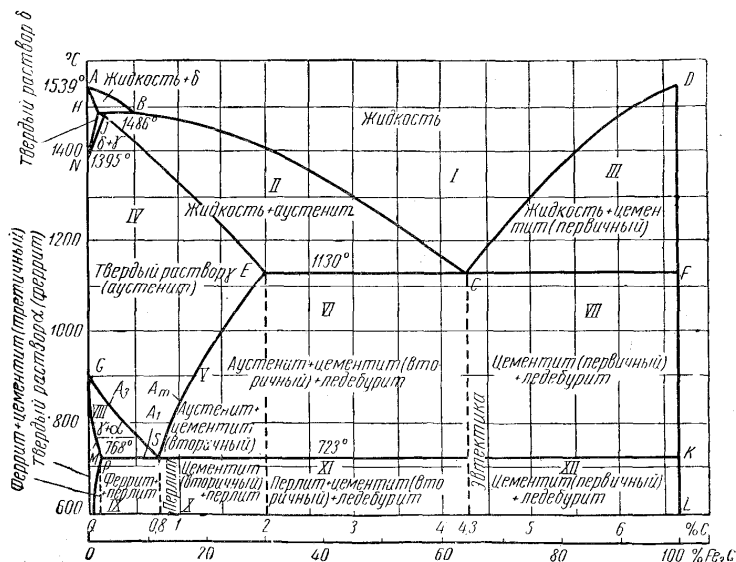


Рисунок 4.1 – Диаграмма состояния железо-углерод

По содержанию углерода углеродистые стали делятся:

- 1) низкоуглеродистые до 0,25 % C;
- 2) среднеуглеродистые – 0,3...0,45 % C;
- 3) высокоуглеродистые – > 0,45 % C.

По структуре стали подразделяются на:

- 1) **доэвтектоидные** – до 0,8 % C (Стали, располагающиеся на диаграмме железоуглеродистых сплавов левее эвтектоидной точки S. Для углеродистых сталей это стали с концентрацией углерода до 0,8 %. Такая сталь имеет структуру феррита и перлита);
- 2) **эвтектоидные** – 0,8 % C (Эвтектоидная сталь содержит 0,8 % углерода (точка S) и состоит из перлита);
- 3) **заэвтектоидные** – более 0,8 % C (Стали с концентрацией углерода свыше 0,8 %. В структуре этих сталей при комнатной температуре можно заметить перлит, и на фоне этой темной структурной составляющей отчетливо просматрива-

ется светлая сетка цементита. Все заэвтектоидные стали являются инструментальными сталями.).

Углерод является важнейшим элементом, определяющим структуру и свойства углеродистой стали. Даже при малом изменении содержания углерод оказывает заметное влияние на свойства стали.

С ростом содержания углерода увеличивается твердость и прочность, однако уменьшается вязкость и пластичность стали. Рост прочности происходит при содержании углерода от 0,8 до 1,0 %. При увеличении содержания углерода более 0,8 % уменьшается не только пластичность, но и прочность стали. Это связано с образованием сетки хрупкого цементита вокруг перлитных колоний, легко разрушающейся при нагружении.

Углерод оказывает также существенное влияние на технологические свойства стали – **свариваемость, обрабатываемость резанием и давлением.**

Легированные стали – это стали, в которые специально вводят химические элементы для получения заданных служебных свойств.

4.1.1 Классификация и маркировка легированных сталей

Классификация по химическому составу предполагает разделение легированных сталей (в зависимости от вводимых элементов) на хромистые, марганцовистые, хромоникелевые, хромоникельмолибденовые и т. д. Согласно той же классификации, стали подразделяют по общему количеству легирующих элементов в них:

- 1) на низколегированные (до 2,5 % легирующих элементов);
- 2) легированные (от 2,5 до 10 %);
- 3) высоколегированные (более 10 %).

Разновидностью классификации по химическому составу является классификация по качеству. **Качество стали** – это комплекс свойств, обеспечиваемых металлургическим процессом, таких как однородность химического состава, строения и свойств стали, ее технологичность. Эти свойства зависят от со-

держания газов (*кислород, азот, водород*) и вредных примесей – серы и фосфора. По качеству легированные стали подразделяют на:

- 1) качественные (*до 0,04 % S и до 0,035 % P*);
- 2) высококачественные (*до 0,025 % S и до 0,025 % P*);
- 3) особовысококачественные (*до 0,015 % S и до 0,025 % P*).

По назначению стали подразделяются на три группы: **конструкционные, инструментальные и с особыми свойствами.**

Конструкционные углеродистые стали содержат углерод в количестве 0,02...0,7 %. К ним относятся и строительные стали, содержащие до 0,3 % углерода. Низкое содержание углерода обусловлено тем, что строительные конструкции соединяются сваркой, а углерод ухудшает свариваемость.

Инструментальные стали, содержащие углерод в пределах 0,7...1,5 %, используют для изготовления режущего и ударного инструмента.

К группе сталей и сплавов с **особыми свойствам** относятся коррозионностойкие, нержавеющие и кислотоупорные, жаропрочные и жаростойкие стали и т. д.

4.1.2 Влияние примесей на свойства сталей

На свойства стали значительное влияние оказывают постоянные (*нежелательные*) примеси (*сера, фосфор, газы*), а также технологические добавки (*кремний, марганец и др.*). Примеси могут попадать в сплав из природных соединений и руд, а также при переработке металлолома. Основным элементом сплава, по отношению к которому все остальные элементы – примеси, является тот, чья атомная решетка определяет кристаллографическое строение всего сплава. Пока содержание элементов в стали таково, что кристаллографическое строение сплава определяется решеткой железа, сплав называется легированной сталью. Когда содержание элементов достигает таких значений, что строение сплава определяется решеткой добавочных элементов, а не железа, то говорят уже о сплаве (*титановом, никелевом и др.*).

Углерод оказывает основное влияние на свойства углеродистой стали, находится в ее составе главным образом в связанном состоянии в виде цементита. В свободном состоянии в виде графита содержится в чугунах. С увеличением содержания углерода повышаются твердость и прочность, уменьшаются пластичность и вязкость.

Сера является нежелательной примесью, образует с железом сульфид железа FeS , который находится в стали в виде **эвтектики Fe–FeS** с температурой плавления 985°C .

При нагреве стали до температуры $1000\ldots 1200^\circ\text{C}$ для горячей обработки давлением эвтектика плавится, сера кристаллизуется на границах зерен, что приводит к нарушению связи между зернами, повышению хрупкости, разрушению при деформации вследствие образования внутренних трещин и надрывов. Это явление называют **красноломкостью** (*горячие трещины*). Содержание серы в стали не должно превышать $0,06\%$.

Фосфор ухудшает пластичность стали и вызывает явление **хладноломкости** (*холодные трещины*), является нежелательной примесью, содержание которой в сталях должно быть менее $0,08\%$.

Азот, кислород присутствуют в сплавах в составе оксидов, нитридов – хрупких неметаллических соединений (*включений*), которые создают дефекты кристаллической структуры. Они являются концентраторами напряжений и могут понизить механические свойства (*прочность, пластичность*).

Водород поглощается сталью в атомарном состоянии. При охлаждении сплава растворимость водорода снижается, он накапливается в микропорах, создавая в них высокое давление. Это может привести к образованию в материале внутренних напряжений и, как следствие, трещин.

Марганец и кремний – полезные примеси. Их добавляют в сталь при выплавке. Марганец существенно снижает красноломкость, увеличивает твердость, прочность и износостойкость стали. При его содержании более $1,5\%$ снижается пластичность стали.

Кремний понижает склонность стали к хладноломкости, способствует получению более однородной структуры, положительно сказывается на упругих характеристиках.

Обычное содержание кремния в углеродистой стали – не более 0,4 %, марганца – 0,8 %.

Конструкционные стали применяют для изготовления деталей машин и конструкций; инструментальные – режущих, измерительных инструментов, штампов и т. д.

К сталям и сплавам с **особыми свойствами** относят жаропрочные, коррозионностойкие, магнитные и др. Они нашли широкое применение в приборостроении, в т. ч. в медицинской технике.

По качеству различают:

- 1) стали обыкновенного качества;
- 2) качественные;
- 3) высококачественные;
- 4) особовысококачественные.

Стали обыкновенного качества имеют повышенное содержание нежелательных примесей – до 0,06 % серы и до 0,08 % фосфора, их механические свойства ниже, чем у сталей других групп.

Углеродистую сталь обыкновенного качества подразделяют на три группы:

А – поставляемую по механическим свойствам (*Ст0, Ст1 и др.*);

Б – поставляемую по химическому составу (*БСт0, БСт1 и др.*);

В – поставляемую по механическим свойствам и химическому составу для деталей, подвергаемых сварке (*ВСт1, ВСт2 и др.*).

Сталь углеродистая качественная конструкционная по видам обработки при поставке делится: на горячекатаную и кованую, калиброванную, круглую со специальной отделкой поверхности – сербрюнку.

Согласно ГОСТ 380–94 конструкционные стали обыкновенного качества обозначаются (*маркируются*) буквами, символами и цифрами:

1) Символ **«Ст»** – сокращенное наименование стали.
2) Цифра, следующая за символом – условный номер марки стали.

3) Символы **«кп»**, **«пс»** и **«сп»** обозначают степень раскисления стали: кипящая, полуспокойная и спокойная.

4) Цифра обозначает категорию качества (*т. е. нормируемые показатели свойств стали в группе, от 1 до 6*).

Пример обозначения: **Ст3сп5**, **Ст3пс**.

Конструкционные углеродистые **качественные стали** поставляются по ГОСТ 1050–88 двух групп:

1) с нормальным содержанием марганца;

2) с повышенным содержанием марганца.

Их обозначают (*маркируют*) следующим образом:

1) **«Сталь»** – полное наименование материала.

2) Двухзначное число, обозначающее среднее содержание углерода в сотых долях процента.

3) Буква **«Г»**, обозначающая повышенное содержание марганца.

4) Символы, обозначающие степень раскисления.

Пример обозначения: **Сталь 05**, **Сталь 08кп**, **Сталь 15Г**.

Низколегированные и среднелегированные стали поставляются и маркируются по ГОСТ 19281–79, 19282–73 и по специальным Техническим условиям производителей (ТУ). Порядок их маркировки следующий:

1) Двухзначное число, обозначающее среднее содержание углерода в сотых долях процента.

2) Буква, условно обозначающая название химического элемента, являющегося легирующим компонентом.

3) Цифра за буквой, обозначающая среднее содержание легирующего элемента в процентах.

4) Буква **«А»** в конце марки стали, обозначающая повышенный уровень качества, т. е. пониженное содержание серы и фосфора ($S < 0,035 \%$).

Большая часть низколегированных сталей с целью повышения уровня механических свойств поставляется в термически обработанном (*улучшенном*) состоянии. Эта группа сталей поставляется по ГОСТ 4543–71. Сюда же относят судостроитель-

ные стали (ГОСТ 5521–76) и теплостойкие стали (ГОСТ 5520–79, ГОСТ 20072–74) и др.

Пример обозначения: **09Г2С, 15ХСНД, 12МХ, 16Г2АФ, 30ХМА.**

Отдельная группа низко- и среднелегированных сталей для сварных конструкций, поставляемых по ГОСТ 4543–71, термически обрабатывается на высокий уровень прочности. Эта группа сталей получила условное название высокопрочных.

Пример обозначения: **14ХГ2МР, 30ХГСНА, 42Х2ГСНМА.**

Высоколегированные стали и сплавы, часто называемые в литературе специальными, поставляются по ГОСТ 5632–72, ГОСТ 10835–75 и многочисленным ТУ производителей. В основу их обозначения положен принцип указания химического состава. Все они относятся к качественным или особокачественным. Дополнительными информационными признаками для них является разделение по назначению (*коррозионностойкие, жаростойкие, жаропрочные, хладостойкие и т. п.*) и структуре в состоянии поставки (*мартенситные, мартенситно-ферритные, ферритные, аустенитно-ферритные и аустенитные*).

Мартенситная сталь – легированная сталь, основной структурой которой после нормализации является мартенсит.

Мартенситно-ферритные стали. К этому классу относят стали, в которых при температурах $>600\text{ }^{\circ}\text{C}$ при низкой скорости охлаждения возможно образование ферритной составляющей структуры.

Ферритная сталь – это сталь со структурой легированного феррита с некоторым количеством карбидов. Ферритная сталь образуется при низком содержании углерода и большом количестве легирующего элемента (08Х13, 08Х17Т).

Аустенитная-ферритная сталь – это высоколегированная сталь, основу структуры которой составляют две фазы: аустенит и феррит. Количество каждой из них обычно от 40 до 60 %.

Аустенитная сталь. К аустенитному классу относятся высоколегированные стали, образующие при кристаллизации преимущественно однофазную аустенитную.

Качественные стали содержат серу и фосфор в концентрации $\leq 0,035$ % каждого элемента. Высококачественные стали, выплавляемые в электропечах, содержат менее 0,025 % и серы, и фосфора. Особовысококачественные стали, подвергнутые электрошлаковому переплаву с вакуумированием, содержат серу и фосфор в концентрации, не превышающей 0,015 %.

Марки углеродистой стали.

В зависимости от химического состава различают стали углеродистые и легированные.

Для сварных конструкций основное применение находят низкоуглеродистые стали.

К сталям обыкновенного качества относятся стали марок Ст0; Ст1; Ст2; Ст3; Ст4; Ст5; Ст6. **Цифра** в маркировке таких сталей указывает на **порядковый номер** марки стали и не связана с её химическим составом.

По степени раскисления сталь марок Ст1; Ст2; Ст3; Ст4 выплавляют спокойной, полуспокойной и кипящей, сталь марок Ст5 и Ст6 – полуспокойной и спокойной. Сталь марки Ст0 по степени раскисления не разделяют.

Спокойная сталь полностью раскислена марганцем, кремнием и алюминием и содержит 0,15...0,30 % кремния.

Кипящая сталь раскислена не полностью (*только марганцем*) и содержит не более 0,05 % кремния.

Стали обыкновенного качества являются наиболее дешевыми и широко применяются в тех случаях, когда к материалу не предъявляются повышенные требования. По сравнению с качественными сталями они содержат больше серы, фосфора, неметаллических включений вследствие менее тщательной очистки в процессе выплавки.

Промежуточное положение по раскислению и качеству занимает полуспокойная сталь, которая раскислена марганцем и кремнием не полностью и содержит 0,05...0,15 % кремния и до 1 % марганца.

К качественным углеродистым сталям относятся стали марок 08; 10; 15; 20; 25; 30; 35; 40; 45; 50; 55 и т. д. до 85. Цифры указывают на среднее содержание в них углерода в сотых долях процента.

Все примеси, содержащиеся в сталях, делят на четыре группы:

- 1) постоянные или обыкновенные (*кремний, марганец, алюминий*);
- 2) скрытые (*кислород, водород, азот*);
- 3) случайные (*попадающие из шихтовых материалов*);
- 4) легирующие элементы (*вводят в сталь специально с целью изменения её строения и свойств*).

Стали, в которые для получения требуемых свойств специально вводят легирующие элементы, называют **легированными сталями**.

В зависимости от состава легированные стали классифицируются как кремнемарганцовистые, никелевые, хромистые, хромоникелевые, хромоникель-молибденовые и тому подобные. Классификационным признаком при этом служит наличие в стали тех или иных легирующих элементов.

Для обозначения марок стали разработана система, принятая в государственных стандартах. Обозначение состоит из цифр и букв, указывающих на примерный состав стали. Каждый легирующий элемент обозначается определенной буквой:

А – азот; **Б** – ниобий; **В** – вольфрам; **Г** – марганец; **Д** – медь; **Е** – селен; **К** – кобальт; **М** – молибден; **Н** – никель; **П** – фосфор; **Р** – бор; **С** – кремний; **Т** – титан; **Ф** – ванадий; **Х** – хром; **Ц** – церий; **Ч** – редкоземельные металлы; **Ю** – алюминий. (*Углерод буквой не обозначают.*)

Первые цифры в обозначении показывают среднее содержание углерода в сотых долях процента. Цифры, идущие после буквы, указывают на примерное содержание данного легирующего элемента в целых процентах. При содержании элемента менее 1 % цифра отсутствует, при содержании около 1 % – цифра 1, около 2 % – цифра 2 и т. д.

Для того, чтобы показать, что в стали ограничено содержание вредных примесей (*серы и фосфора*) – $S < 0,03 \%$; $P < 0,03 \%$, а также, что соблюдены все условия металлургического производства высококачественной стали, в конце обозначения марки ставят букву **А**, например 10ХСНДА. Для обозначения особо высококачественных сталей – две буквы **АА** – 12Х18Н9ТАА.

Буква **А** в середине марочного обозначения указывает на наличие азота, специально введённого в сталь.

Нестандартные стали обозначают различными способами, например, буквой **И** (*исследовательские*), **П** (*пробные*) и порядковым номером (*ЭИ 179, ЭП 398 и т. п.*).

К углеродистым качественным конструкционным сталям предъявляются повышенные требования по химическому составу и механическим свойствам.

Углеродистые инструментальные стали маркируют следующим образом: впереди ставят букву **У**, затем цифру – среднее содержание углерода, выраженное в десятых долях процента. Например, сталь марки У9 содержит в среднем 0,9 % С, сталь У11 – 1,1 % С.

В странах Европы и Америки часто используются и другие классификационные признаки. Это затрудняет взаимное пользование технической документацией, справочными данными, мешает кооперации в разработке и реализации совместных проектов, технологий и т. д.

4.2 Группы материалов, применяемых при изготовлении, монтаже и ремонте технических устройств опасных производственных объектов

В соответствии с Федеральным Законом «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» от 21 июля 1997 г. № 116–ФЗ и Положением о Госгортехнадзоре России, утвержденным указом Президента РФ от 18.02.93 г. №234 в РФ проводится аттестация сварочных материалов, сварочного оборудования и технологий. Аттестация дает право предприятиям, проводящим изготовление, ремонт, монтаж и реконструкцию, право проведения сварочных работ на опасных технических объектах. В связи с этими положениями Национальное Агентство Контроля Сварки (НАКС) разработало классификацию основных материалов, используемых при изготовлении и аттестации сварочных технологий (таблицы 4.1–4.2).

Таблица 4.1 – Группы свариваемых материалов

Группа	Материалы
M01	Углеродистые и низколегированные конструкционные стали перлитного класса с пределом текучести до 360 МПа
M02	Низколегированные теплоустойчивые хромомолибденовые и хромомолибденованадиевые стали перлитного класса
M03	Низколегированные конструкционные стали перлитного класса с пределом текучести свыше 360 МПа
M04	Высоколегированные (высокохромистые) стали мартенситного, мартенситно-ферритного и ферритного классов с содержанием хрома от 10 % до 30 %
M05	Легированные стали мартенситного класса с содержанием хрома от 4 % до 10 %
M06	Чугуны
M07	Арматурные стали железобетонных конструкций
M11	Высоколегированные стали аустенитно-ферритного и аустенитного классов
M21	Чистый алюминий и алюминиево-марганцевые сплавы
M22	Не термоупрочняемые алюминиево-магниевые сплавы
M23	Термоупрочняемые алюминиевые сплавы
M31	Медь
M32	Медноцинковые сплавы
M33	Медноникелевые сплавы
M34	Бронзы
M41	Титан и титановые сплавы
M51	Никель и никелевые сплавы

Таблица 4.2 – Группы типичных марок основных металлов

Группа материалов	Марки материалов
1	2
М01	Ст2кп, Ст2пс, Ст2сп, Ст3кп, Ст3пс, Ст3сп, Ст3Гпс, Ст3Гсп, Ст4кп, Ст4пс, Ст4сп, 08, 08Т, 08ГТ, 10, 15, 15Г, 18, 18Г, 20, 20Г, 25, 15К, 16К, 18К, 20К, 22К, 15Л, 20Л, 25Л, 20ЮЧ, 09Г2, 10Г2, 14Г2, 16ГМЮЧ, 12ГС, 12ГСБ, 12Г2С, 13ГС, 13ГС-У, 15ГС, 16ГС, 17ГС, 17Г1С, 17ПС-У, 20ГСЛ, 20ГМЛ, 08ГБЮ, 09Г2С, 09Г2СА, 09Г2С-Ш, 10Г2С, 10Г2С1, 10Г2С1Д, 14ХГС, 09Г2СЮЧ, 09ХГ2СЮЧ, 09ХГ2НАБЧ, 07ГФБ-У, 15ХСНД, 14ГНМА, 16ГНМА, 10ГН2МФА, 10ГН2МФАЛ, 15ГНМФА, судостроительные стали категорий А32, D32, E32, трубные стали класса прочности K50, K52, K54.
М02	12МХ, 12ХМ, 15ХМ, 20ХМ, 20ХМА, 20ХМЛ, 10Х2М, 10Х2М-ВД, 20Х2МА, 1Х2М1, 12Х2М1, 10Х2М1А, 10Х2М, 12Х1МФ, 15Х1М1Ф, 20ХМФЛ, 15Х1М1ФЛ, 12Х2МФСР, 12Х2МФБ, 12Х2МФА, 15Х2МФА.
М03	13Г2АФ, 14Г2АФ, 15Г2АФД, 16Г2АФ, 18Г2АФ, 09ГБЮ, 09Г2ФБ, 10Г2Ф, 10Г2ФБ, 10Г2СФБ, 10Г2ФБЮ, 09Г2БТ, 10Г2БТ, 15Г2СФ, 12Г2СМФ, 12Г2СБ, 12ГН2МФАЮ, 10ХСНД, 10ХН1М, 12ХН2, 12ХН3А, 10Х2ГНМ, 30ХГСА, 10Х2ГНМА-А, 30ХМА, 15Х2НМФА, 15Х2НМФА-А, 18Х2МФА, 25Х2МФА, 12Х2Н4А, 18Х3МВ, 20Х3МВФ, 25Х3МФА, 15Х3НМФА, 15Х3НМФА-А, 20ХН3Л, 38ХН3МФА, Х-60, Х-65, Х-70, судостроительные стали категорий А36, В36, Е36, А40, О40, Е40, трубные стали класса прочности К55-К60, Х60, Х65, Х70.

Продолжение таблицы 4.2

1	2
M04	20X13, 08X14MФ, 20X17H2, 12X13, 12X11B2MФ (1X12B2MФ), 08X13, 5X25, 15X25T, 15X28, 05X12H2M, 06X12H3ДЛ.
M05	15X5, 15X5M, 15X5M-У, 15X5ВФ, X8, 12X8, 12X8ВФ, X9M, 20X5МЛ, 20X5ВЛ, 20X5ТЛ, 20X8ВЛ.
M06	СЧ 12-28, СЧ 15-32, СЧ 18-36, СЧ 21-40, СЧ 24-44, СЧ 28-48, КЧ 38-8, КЧ 35-10, КЧ 37-12, КЧ 45-6, КЧ 50-4. ВЧ 60-2. ВЧ 38-17.
M07	18Г2С, ЮГТ, 35ГС, 25Г2С, 32Г2Рпс, 80С, 20ХПЦ, 23Х2Г2Т, 22Х2Г2АЮ, 22Х2Г2Р, 20Х2Г2СР, 27ГС, 20ГС. 28С, Ст5пс, Ст5сп, 25Г2С, 35ГС.
M11	12Х21Н5Т, 07Х16Н6, 08Х22Н6Т, 08Х21Н6М2Т, 10Х21Н6М2Л, 07Х13АГ20 08Х18Г8Н2Т

Вопросы для самопроверки

1. Чем в основном определяются свойства углеродистых сталей?
2. По каким признакам классифицируются конструкционные стали и стали с особыми свойствами?
3. Какие стали называют низколегированными?
4. Как маркируются углеродистые качественные стали?
5. Как по химическим признакам по EN классифицируются стали?
6. Как маркируются низколегированные стали?
7. По какому принципу маркируются высоколегированные стали?
8. Что называется сталью?
9. Чем качественная сталь отличается от стали обыкновенного качества?

5 ОЦЕНКА СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ И СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ [11]

5.1 Основные характеристики механических свойств сталей и сварных соединений

Оценка механических характеристик сталей и сварных соединений проводится с целью определения их фактического состояния и соответствия его нормативным требованиям.

Твердость – это свойство материала оказывать сопротивление упругой и пластической деформации участков его поверхности при местных контактных воздействиях со стороны другого более твердого материала. Наиболее распространенными методами замера твердости являются методы:

Виккерса – **HV** (ГОСТ 2999–75), основанный на вдавливании в поверхность металла алмазного индентора в форме четырехгранной пирамиды с углом при вершине $\approx 136^\circ$;

Бринелля – **HB** (ГОСТ 9012–59), основанный на вдавливании в металл стального шарика определенного диаметра;

Роквелла – **HRC** (ГОСТ 9013–59), основанный на использовании в качестве индентора алмазного конуса с углом при вершине 120° и радиусом закругления 0,2 мм или стального шарика диаметром 1,5875 мм.

Выбор метода определения твердости зависит от различных факторов: твердости материала, размеров и формы образца (*детали*), толщины измеряемого слоя.

При определении твердости структурных составляющих (*зерен твердого раствора, карбидов, нитридов, неметаллических включений*) пользуются понятием **микротвердости** (**H_μ**).

Предел прочности (**σ_b** , МПа) – напряжение разрушения образца при одноосном растяжении, определяемое как отношение нагрузки, при которой происходит разрушение, к начальной площади поперечного сечения рабочей части образца.

Предел текучести (**$\sigma_{0,2}$** , МПа) (*условный предел текучести*) – напряжение, при котором остаточная деформация в образце (*остаточное удлинение*) достигает 0,2 %. Определяется как отношение нагрузки на образец при одноосном растяже-

нии, вызывающей деформацию 0,2 %, к начальной площади поперечного сечения в рабочей части образца.

Прочностные характеристики металлов и сварных соединений определяют по результатам статических испытаний на растяжение (*ГОСТ 1497–84 для основного металла и ГОСТ 6996–66 для сварных соединений*).

Процесс постепенного накопления повреждений в материале под действием циклических нагрузок, приводящий к изменению его свойств, образованию трещин и разрушений, называется **усталостью**. Свойство противостоять усталости называется **выносливостью**.

Предел выносливости (σ_{-1} , МПа) – основная характеристика усталостной прочности материала. Это наибольшее значение максимального напряжения цикла, которое выдерживает металл без разрушения при повторении заданного числа циклов нагружения. Оценка предела выносливости производится по ГОСТ 25.502-79 и ГОСТ 25.504-84.

Прочностные расчеты сварных элементов и конструкций производятся на основе учета механических свойств металлов и сплавов. Основными из этих свойств являются **прочность, пластичность, вязкость и твердость**.

Как известно, по характеру воздействия на объект нагрузки разделяются на **статические и динамические**, а температуры эксплуатации условно в технике можно расчленить на **низкие** (включая криогенные) (от -60 до -250 °C), **нормальные** (от -60 до $+350$ °C), **повышенные** (от 350 до 500 °C) и высокие (более 500 °C). В зависимости от температуры эксплуатации изменяются стандартные характеристики материалов, например, прочность, пластичность металла, ползучесть и др. Среда эксплуатации и температура могут существенно снижать время работы объекта до разрушения.

Условно все среды эксплуатации можно разделить на:

1) **нормальные**, т. е. не ускоряющие процессы разрушения поверхности металла и сварного соединения;

2) **коррозионные**, т. е. ускоряющие процессы разрушения металлов и сварных соединений за счет химического или электрохимического взаимодействия металла со средой;

3) **радиационные**, т. е. ускоряющие процессы разрушения металла и сварных соединений за счет изменения их структурного состояния и свойств под влиянием γ -излучения.

Численные значения механических, химических и физических характеристик сталей и технических сплавов определяются проведением испытаний в стандартных условиях.

По характеру прилагаемых нагрузок во времени различают **статические, динамические и усталостные испытания**.

Статические испытания осуществляют путем плавного и постепенно возрастающего нагружения стандартных образцов до их разрушения. Сюда относятся испытания на *растяжение, сжатие, изгиб, кручение, сдвиг или срез*. В качестве специальных методов статических испытаний можно отметить испытание на ползучесть.

Динамические (ударные) испытания определяют способность материала за счет пластической деформации поглощать механическую энергию быстро изменяющихся во времени внешних сил. Это дает возможность оценить склонность металла или сварного соединения к хрупкому или вязкому разрушению.

Усталостные испытания позволяют оценить сопротивляемость разрушению в процессе накопления повреждений в металле или сварном соединении под действием знакопеременной или пульсирующей нагрузки за заданный промежуток времени.

Испытанием на твердость оценивают сопротивление деформации металла, сварного соединения или отдельной его зоны на поверхности или по сечению и осуществляют путем вдавливания в металл специальных стандартных инденторов (*наконечников*). Схемы испытаний на твердость представлены на рисунке 5.1. Косвенно эти испытания позволяют судить о механических характеристиках объекта испытания, в частности, о величине сопротивления на разрыв.

Для определения способности материала или сварного соединения выдерживать определенные величины деформации без разрушения, вызываемые технологической обработкой, проводят испытания, называемые технологическими пробами.

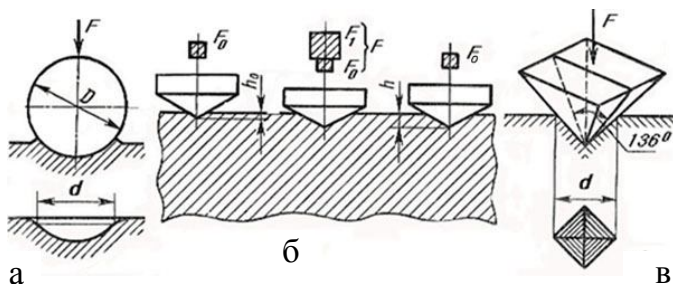


Рисунок 5.1 – Схемы испытаний на твердость.
 а – по Бринеллю; б – по Роквеллу; в – по Виккерсу

Методики и оборудование для всех указанных выше испытаний, отвечающие современному уровню техники, устанавливаются в каждой стране государственными стандартами (ГОСТ, DIN, NF, EN и т. д.).

Учитывая специфику сварного соединения как единого целого различных по составу, структуре и свойствам участков металла, для комплексного определения его механических характеристик предусмотрен ГОСТ 6996–66. Согласно этому стандарту предусмотрено проведение следующих видов испытаний:

- 1) *на статическое (кратковременное) растяжение* металла различных участков сварного соединения и наплавленного металла;
- 2) *на ударный изгиб* металла различных участков сварного соединения и наплавленного металла;
- 3) *на стойкость против старения* металла различных участков сварного соединения;
- 4) *на твердость* различных участков сварного соединения и наплавленного металла;
- 5) *на статическое растяжение* сварного соединения в целом;
- 6) *на статический изгиб (загиб)* сварного соединения;
- 7) *на ударный изгиб* сварного соединения в целом.

На рисунке 5.2 представлены схемы образцов для проведения механических испытаний.

Указанные механические характеристики сталей и сварных соединений, а также иные свойства, определенные по другим

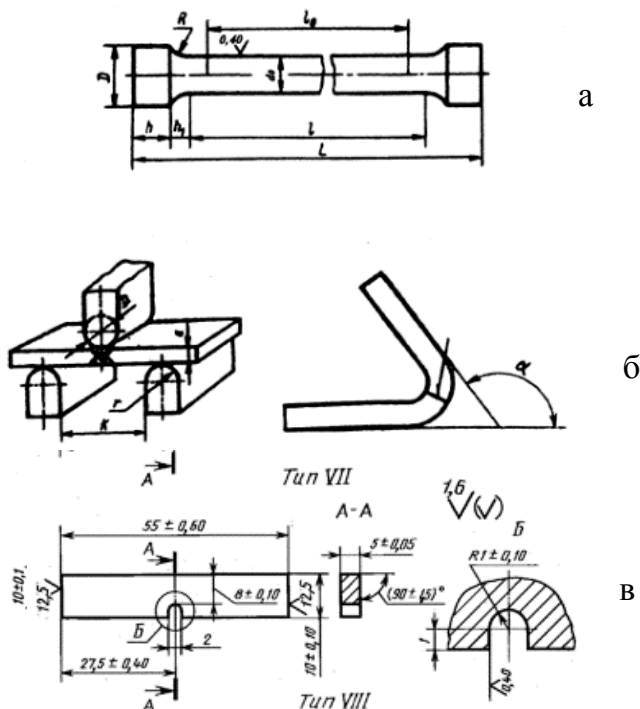


Рисунок 5.2 – Образцы для испытаний

а – на растяжение; *б* – статический изгиб; *в* – ударный изгиб

стандартам (*ползучесть, усталость, длительная прочность и др.*), вводятся в действующую нормативно-техническую документацию (ГОСТы, ТУ, РТМ и т. п.) для выбора марки основного металла и сварочных материалов при проектировании сварных изделий и технологии их изготовления.

Вопросы для самопроверки

1. Какие испытания металлов относятся к статическим?
2. Какое свойство металла определяют динамические испытания?
3. Что оценивается испытанием на твердость?
4. Какие виды испытаний сварных соединений предусмотрены ГОСТ 6996–66?

6 ОСНОВЫ ФИЗИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ МЕТАЛЛОВ И ЕГО ЗНАЧЕНИЕ ДЛЯ СВАРКИ [1, 2, 12, 13]

6.1 Краткие сведения о диаграмме состояния железо–углерод

Сталь – это сплав железа с углеродом и другими легирующими элементами. Содержание углерода в сталях не превышает 2,14 %.

Сплавы на основе железа обладают способностью изменять свое кристаллическое строение при определенных температурах, т. е. претерпевают *полиморфные* или *аллотропические* превращения (*аллотропия – свойство некоторых химических элементов существовать в виде двух или более простых веществ, различных по своему строению и свойствам*).

Диаграмма состояния железо – углерод (рисунок 4.1) рассматривает превращения, имеющие место в сплавах с концентрациями углерода от чистого железа до цементита (6,67 % C). Сплавы с большим содержанием углерода практического применения не имеют.

Диаграмма позволяет определить для каждого сплава стали и чугуна температуру его плавления, все превращения, испытываемые сплавом при охлаждении и нагревании, и структуру сплава при любой температуре. По горизонтальной оси диаграммы откладывается содержание углерода в процентах, а по вертикальной оси – температура. Каждая точка на диаграмме представляет собой определенный сплав при определенной температуре.

Температуры, при которых в сталях протекают полиморфные превращения, называются *критическими точками*.

По горизонтальной оси диаграммы отложено содержание углерода от 0 до 6,67 % или цементита (Fe_3C) от 0 до 100 %, а по вертикальной оси – температура. Каждая точка на диаграмме характеризует определенный состав сплава при определенной температуре.

Железо известно в двух аллотропических модификациях: α и γ ;

α -железо существует при температурах ниже $910\text{ }^{\circ}\text{C}$ и выше $1401\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Полиморфные превращения, происходящие в сталях при нагреве и охлаждении, способствуют формированию различных фаз и структур.

Фаза – это однородная по химическому составу и строению часть стали, отделенная от других ее частей поверхностью раздела (*границей*), при переходе через которую скачкообразно меняются химический состав, строение и свойства.

Под **структурой** понимают совокупность имеющихся в сталях фаз с учетом их количества, взаимного расположения, формы и размеров. Для однофазных сталей понятие структуры и фазы идентично. В стали имеются следующие фазы: жидкая, цементит, феррит, аустенит.

Основными фазами в сталях являются:

Аустенит – твердый раствор углерода и других примесей в $\gamma\text{-Fe}$. Предельная растворимость углерода в $\gamma\text{-Fe}$ – $2,14\%$. Аустенит обладает высокой пластичностью, ударной вязкостью, при относительно невысоких пределах текучести и прочности. Микроструктура аустенита – полиэдрические зерна (рисунк 6.1).

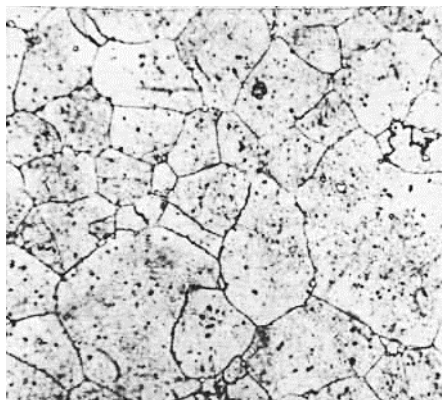


Рисунок 6.1 – Микроструктура аустенита, x500

Феррит – твердый раствор углерода и других легирующих элементов в **α -железе**. В одном аустенитном зерне образуется несколько ферритных зерен. В зависимости от скорости охлаждения металла и содержания углерода могут значительно изменяться размеры образовавшихся из аустенита кристаллов феррита.

В структуре стали и сварных соединений феррит может появляться в виде:

- 1) однородных полиэдрических зерен (рисунок 6.2, а);
- 2) цепочки зерен, расположенных по границам аустенитного зерна (рисунок 6.2, б). Феррит имеет объемноцентрированную кубическую (ОЦК) решетку.

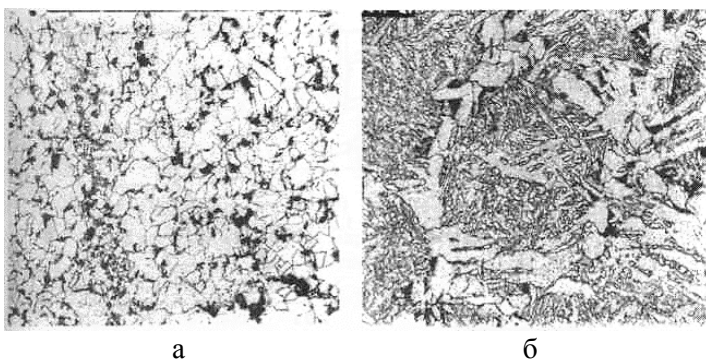


Рисунок 6.2 – Разновидности феррита $\times 100$

а – полиэдрические зерна; б – цепочки зерен, расположенные по границам аустенитных зерен

Цементит (Fe_3C) – химическое соединение железа с углеродом, содержащее 6,67% С (*карбид железа*) Fe_3C . Он имеет высокую твёрдость ($> \text{HB } 800$), но чрезвычайно низкую пластичность, поэтому с увеличением в стали содержания углерода твёрдость и прочность повышаются, а пластичность снижается.

Механическая смесь феррита и цементита образует структуру стали, называемую **перлитом**. Перлит по своим механическим свойствам занимает промежуточное положение между ферритом и цементитом. Сталь с содержанием углерода 0,83 % имеет чистую перлитную структуру.

Ледебурит – представляет собой эвтектику (*эвтектика – это смесь двух или более твердых фаз, одновременно кристаллизовавшихся из расплава, характеризующаяся постоянным составом*), состоящую в момент образования из цементита и аустенита, предельно насыщенного углеродом.

Таким образом, все стали после окончания процесса первичной кристаллизации состоят из аустенита, а чугуны – из ледебурита и первичных кристаллов избыточного или цементита.

Продуктом распада аустенита при охлаждении является феррито–цементитная смесь, содержащая 0,81 % углерода и названная **перлитом**, само превращение называется **эвтектоидным**, а сталь – **перлитной**. Стали делят на **доэвтектоидные** ($C < 0,81\%$), **эвтектоидные** ($C = 0,81\%$) и **заэвтектоидные** ($C > 0,81\%$) рисунок 4.4, а чугуны соответственно делятся на **доэвтекктические** ($C < 4,3\%$), **эвтекктические** ($C = 4,3\%$) и **заэвтекктические** ($C > 4,3\%$).

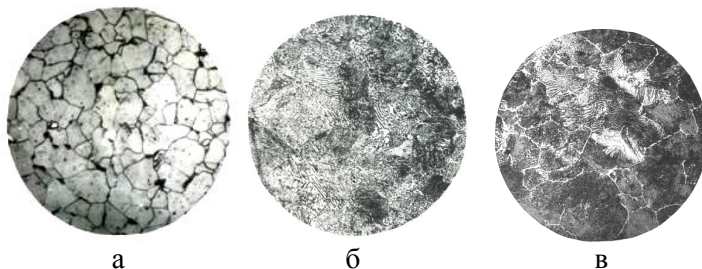


Рисунок 6.3 – Микроструктура стали

*а – доэвтектоидная; б – эвтектоидная; в – заэвтектоидная,
x500*

Структура большинства доэвтектоидных сталей после медленного охлаждения состоит из двух фаз – феррита и перлита. С увеличением количества углерода уменьшается количество феррита и возрастает количество перлита. Твердые и хрупкие частицы цементита уменьшают пластичность и вязкость. Углерод также оказывает существенное влияние на технологические свойства стали: свариваемость, обрабатываемость давлением, резанием.

Учитывая, что любая сталь является многокомпонентным сплавом, содержащим кроме углерода и ряд других элементов, кратко обозначим влияние этих элементов на свойства сплава.

Кремний и марганец – упрочняют феррит, несколько снижая пластичность, а марганец понижает температуру **красноломкости** стали.

Сера при сварке нарушает связь между зернами и способствует образованию надрывов и трещин (**красноломкость**). Одновременно сера снижает пластичность, усталостную прочность, ухудшает свариваемость и коррозионную стойкость. Ее содержание в сталях ограничивается в пределах 0,03...0,06 %.

Фосфор повышает жидкотекучесть, но охрупчивает сталь, уменьшая пластичность и вязкость. Его содержание ограничивается в пределах 0,025...0,08 %.

Азот, кислород и водород присутствуют в сталях как в газообразном виде (*в раковинах, порах, микротрещинах и т. п.*), так и в виде твердых растворов внедрения и хрупких неметаллических включений. Неметаллические включения, располагаясь по границам зерен, снижают ударную вязкость и предел выносливости сталей. Водород, накапливаясь в микропустотах, вызывает появление пор и часто способствует образованию пор и холодных **«замедленных, водородных»** трещин.

В условиях неравновесного (**ускоренного**) охлаждения, характерного для процессов сварки,ковки, прокатки, как правило, образуются пересыщенные твердые растворы углерода, кислорода и азота в железе. Постепенное выделение O_2 и N_2 из пересыщенных растворов при нормальной или повышенной рабочей температуре приводит к изменению свойств сталей. Этот процесс называется **термическим старением**. Как правило, оно повышает прочность стали и снижает ударную вязкость, повышая порог **хладноломкости**. Старение возможно и после холодной пластической деформации (*если она проводится ниже температуры рекристаллизации*). Такой процесс называется **деформационным старением**.

Таким образом, диаграмма состояния сплавов железо – углерод позволяет качественно оценить изменения структуры и

свойств стали при технологических воздействиях, связанных с нагревом, охлаждением или деформацией.

6.2 Кристаллическое строение металлов

Общее свойство металлов и сплавов – их кристаллическое строение, характеризующееся определенным закономерным расположением атомов в пространстве. Для описания атомно–кристаллической структуры используют понятие кристаллической решетки, являющейся воображаемой пространственной сеткой с ионами (*атомами*) в узлах (рисунок 6.4).

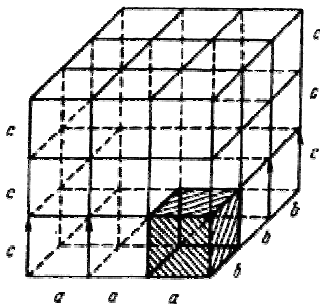


Рисунок 6.4 – Схема кристаллической решетки металла

Точки, где располагаются атомы, называются **узлами решетки**. Расстояния **a**, **b** и **c** между центрами атомов, находящихся в соседних узлах решетки, называют **параметрами** решетки.

В узлах кристаллической решётки расположены **положительные ионы** металла. Между ними беспорядочно, подобно молекулам газа, движутся **электроны**. Электроны и ионы взаимодействуют между собой, образуя кристаллическую решетку. Электроны удерживаются ионами в пределах кристаллической решётки и без дополнительного воздействия не могут её покинуть. Свободно движущиеся электроны обуславливают высокую электро- и теплопроводность. Характер закономерного

расположения атомов определяет вид пространственной кристаллической решетки.

Построение той или иной кристаллической решетки следует рассматривать как закономерное расположение атомов – ионов. Многократное повторение такого элемента построения создает кристалл того или иного металла. Атомы в таких решетках на расстояниях, *определяемых равнодействующими сил взаимодействия* между положительными зарядами ионов, отрицательными зарядами оставшихся оболочек и взаимодействия положительных зарядов ионов с отрицательно заряженным электронным газом.

Расстояние между центрами атомов зависит от закономерности их расположения, т. е. с изменением типа решетки одного и того же вещества расстояние между центрами атомов будет меняться.

На рисунке 6.5 показаны три типа элементарных ячеек кристаллических решеток, наиболее характерные для металлов: *объемноцентрированная кубическая (ОЦК); гранецентрированная кубическая (ГЦК) и гексагональная плотноупакованная (ГП)*, а также схемы упаковки в них атомов.

В кубической гранецентрированной решетке атомы расположены в вершинах куба и в центре каждой грани (рисунок 6.5, а).

В кубической объемноцентрированной решетке атомы расположены в вершинах куба, а один атом – в центре его объема (рисунок 6.5, б).

В гексагональной плотноупакованной решетке атомы расположены в вершинах и центре шестигранных оснований призмы, а три атома – в средней плоскости призмы (рисунок 6.5, в).

Температура превращения одной кристаллической модификации в другую называется *температурой полиморфного превращения*.

При полиморфном превращении меняются форма и тип кристаллической решетки (рисунок 6.6). Это явление называется *перекристаллизацией*. При нагреве выше 911 °С атомы решетки ОЦК перестраиваются, образуя решетку ГЦК. На явлении полиморфизма основана термическая обработка.

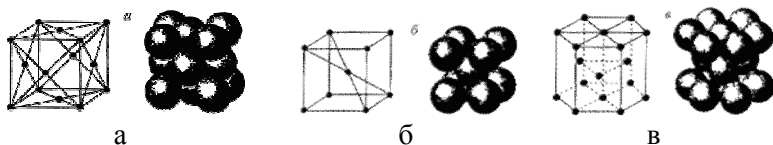


Рисунок 6.5 – Типы элементарных ячеек кристаллических решеток металлов и схемы упаковки в них атомов:
а – *границентрированная кубическая (ГЦК)*; *б* – *объемноцентрированная кубическая (ОЦК)*; *в* – *гексагональная плотноупакованная (ГП) решетка*

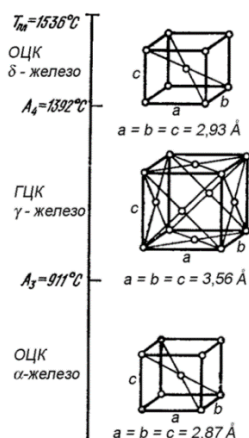


Рисунок 6.6 – Изменение кристаллической решетки металла в зависимости от температуры

При переходе из одной полиморфной формы в другую меняются свойства, в частности плотность и соответственно объем вещества. **Например, плотность Fe_γ на 3 % больше плотности Fe_α , а удельный объем соответственно меньше.** Эти изменения объема необходимо учитывать как при сварке, так и при термообработке.

Большинство технических литых металлов, затвердевших в обычных условиях, имеют поликристаллическое строение.

Они состоят из большого числа кристаллов или зерен (рисунок 6.7, а). Различная ориентировка отдельных зерен приводит к тому, что в целом свойства поликристаллического металла являются усредненными.

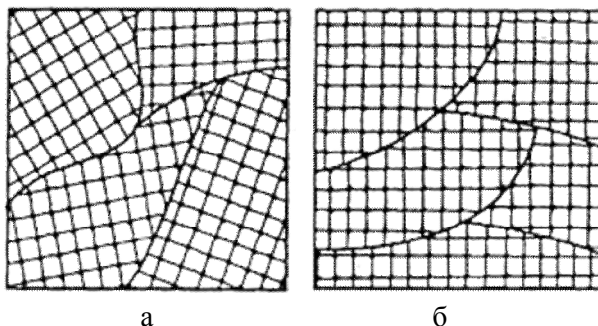


Рисунок 6.7 – Ориентировка кристаллических решеток:
а – в зернах литого металла; б – после обработки давлением

При обработке давлением (*прокатке, ковке*), особенно, если она ведется без нагрева, большинство зерен металла приобретает примерно одинаковую ориентировку – так называемую текстуру (рисунок 6.7, б).

Граница между зернами представляет собой узкую переходную зону с нарушенным порядком расположения атомов. В граничной зоне кристаллическая решетка одного зерна переходит в решетку другого (рисунок 6.8). Неупорядоченное строение переходного слоя усугубляется **скоплением в этой зоне повышенной концентрации примесей**.

Границы зерен оказывают существенное влияние на механические свойства металла.

Под **размером зерна** принято понимать величину его среднего диаметра, выявляемого в поперечном сечении.

Размер зерна оценивается в баллах по специальной стандартизованной шкале и характеризуется числом зерен, приходящихся на 1 мм^2 поверхности шлифа при увеличении в 100 раз (рисунок 6.9).

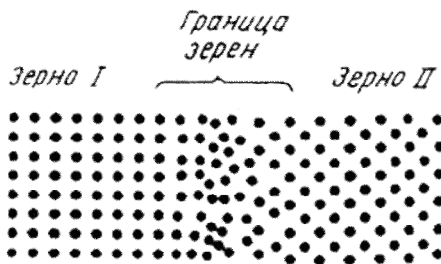


Рисунок 6.8 – Схема строения зерен и границ между ними

Чем мельче зерно, тем выше предел текучести и прочность металла. Одновременно при измельчении зерна увеличиваются пластичность и вязкость металла. Последнее особенно важно для металлических изделий, работающих при низких температурах. Повышенные пластичность и вязкость обусловлены более однородным составом и строением мелкозернистого металла, отсутствием в нем крупных скоплений, структурных несовершенств, способствующих образованию трещин.

Помимо перечисленных дефектов в металле имеются макродефекты объемного характера: поры, газовые пузыри, неметаллические включения, микротрещины и т. д. Эти дефекты снижают прочность металла.

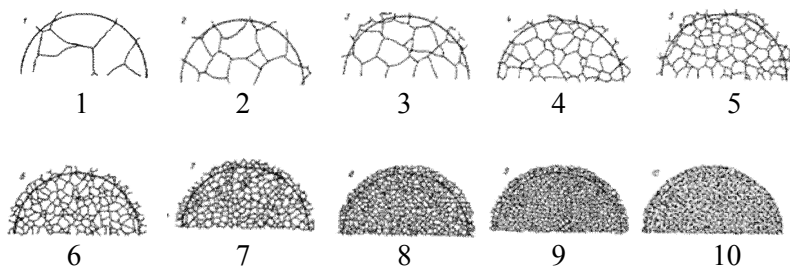


Рисунок 4.10 – Шкалы для определения величины зерна
(ГОСТ 5639–82)

Процесс зарождения и роста кристаллов твердой фазы из жидкого состояния называют **первичной кристаллизацией**.

Для затвердевания необходимо образование центров кристаллизации (*зародышей*) и их последующий рост за счет контактирующей жидкости (рисунок 6.10–6.11).

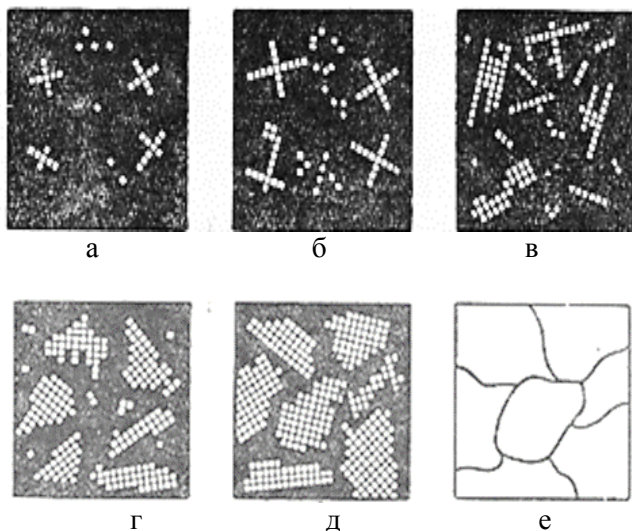


Рисунок 6.10 – Модель процесса кристаллизации

Кристаллизация начнется лишь тогда, когда система будет переохлаждена ниже $T_{пл}$ (линия солидус на диаграмме железо – углерод).

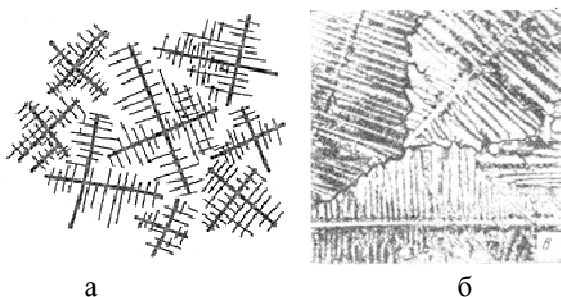


Рисунок 6.11 – Дендритная кристаллизация:
а – схема дендритного кристалла; б – схема его роста

Растворимость углерода в железе существенно зависит от модификации железа (*формы кристаллической решётки*). Растворимость углерода в α – железе очень мала (*менее 0,02 %*), а в γ – железе примерно в сто раз больше (*около 2 %*).

Все металлы в жидком состоянии растворяются один в другом в любых соотношениях. В результате растворения образуется однородный жидкий раствор с равномерным распределением атомов одного металла среди атомов другого металла.

6.3 Основные представления о первичной кристаллизации и формировании структуры наплавленного металла шва

В реальных условиях кристаллы в сварочной ванне растут перпендикулярно к поверхности охлаждения в направлении, обратному отводу тепла. Однако, если на боковой поверхности растущего кристалла возникает бугорок, то кристалл приобретает способность расти и в боковом направлении. В результате образуется древовидный кристалл, получивший название **дендрит** (рисунок 6.12).

После первичной кристаллизации литые металлы (*в т. ч. и сварной шов из наплавленного металла*) имеют дендритную структуру.

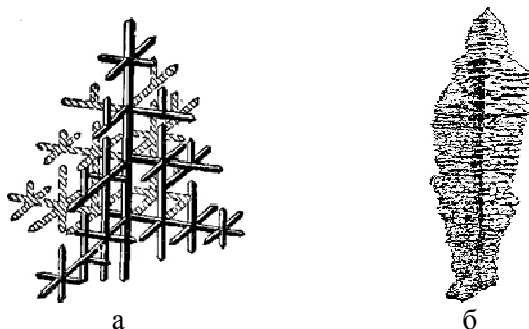


Рисунок 6.12 – Дендрит
а – схема дендрита; б – кристалл Чернова

При сварке плавлением металл в месте нагрева доводится до жидкого состояния энергией, выделяемой дугowym зарядом. Расплавленный основной и электродный металл сливается в общую сварочную ванну, которая под действием магнитогидродинамического давления дуги находится в состоянии непрерывного движения и перемещения. По мере продвижения дуги расплавленный металл, вследствие отвода тепла в холодный основной металл и в окружающее пространство, кристаллизуется с образованием по границам сплавления общих кристаллов (рисунок 6.13, а). После полного затвердевания обеспечивается прочное соединение основного металла со швом.

При сварке металлов больших сечений, например, сварке под слоем флюса, формируется ванна жидкого металла достаточно большого объема. В этом случае в центральной части шва образуется зона равновесных кристаллов, возникающих в условиях естественной кристаллизации (рисунок 6.13, б). При многослойной сварке кристаллы каждого предыдущего слоя становятся основой для кристаллизации последующих слоев (рисунок 6.13, в).



Рисунок 6.13 – Кристаллическое строение сварных швов в поперечном сечении:

а – при малой ванне жидкого металла и быстрой ее кристаллизации; б – при большой ванне и медленной ее кристаллизации; в – при многослойной сварке

На рисунках 6.14 – 6.18 представлены микро- и макро-структуры сварных швов, полученных различными способами сварки. Первичная структура литого металла характеризуется столбчатым строением. При этом, как показано на рисунках 6.14 – 6.16 столбчатые кристаллы растут от линии сплавления к центру шва.

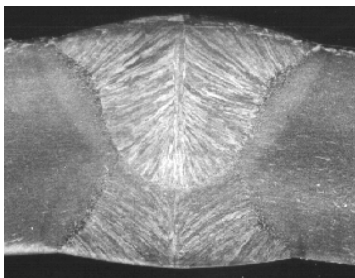


Рисунок 6.14 – Макроструктура сварного шва, с подваркой
корня шва, $\times 5$

При многослойной сварке (рисунок 6.17) кристаллы могут расти от поверхности предыдущего слоя.

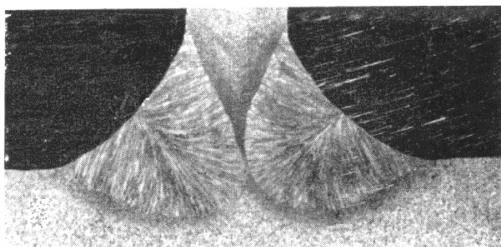


Рисунок 6.15 – Макроструктура. Угловое соединение, $\times 10$

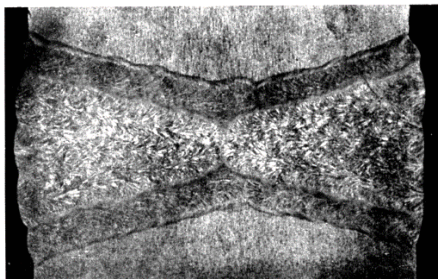


Рисунок 6.16 – Макроструктура сварного шва при
двухсторонней сварке, $\times 5$



Рисунок 6.17 – Макроструктура многослойного сварного шва, $\times 20$

Для некоторых способов сварки плавлением поверхность сварного шва имеет чешуйчатое строение (рисунок 6.18). Размеры чешуек зависят от объема ванны жидкого металла, скорости кристаллизации и других факторов. Кристаллы основного металла явились центрами кристаллизации расплава.

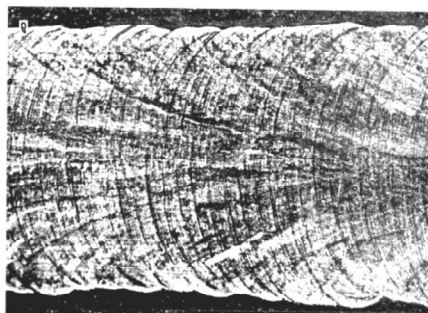


Рисунок 6.18 – Внешний вид поверхности сварного шва с чешуйчатым строением, $\times 5$

6.4 Структура и свойства сварных швов углеродистых сталей

Сварные швы, полученные сваркой плавлением, можно разделить на несколько зон, отличающихся химическим составом, микроструктурой и свойствами (рисунок 6.19). К ним отно-

ются шов наплавленного металла, зона сплавления наплавленного металла с основным, зона термического влияния и основной металл. Шов наплавленного металла характеризуется литой структурой.

Зона сплавления наплавленного металла с основным – это зона сварного соединения, где происходит совместное сплавление присадочного (*электродного*) и основного металла. В нее входит узкий участок сварного шва, расположенный непосредственно у линии сплавления, а также участок с частично оплавленными зернами, который в процессе сварки нагревался до температур, близких к температуре плавления.

В зависимости от способа сварки ширина зоны сплавления колеблется от сотых долей мм до десятых.

Зона термического влияния – участок основного металла, примыкающий к сварному шву, в пределах которого вследствие теплового воздействия сварочного источника нагрева протекают фазовые и структурные превращения.

В зоне термического влияния можно выделить:

1) околошовный участок, который характеризуется крупнозернистой структурой в результате перегрева аустенитных зерен (рисунок 6.20);

2) участок мелкого зерна, который в результате нагрева выше температуры A_{C3} претерпел полную фазовую перекристаллизацию (рисунок 6.21);

3) участок неполной перекристаллизации. Структура данного участка состоит из мелких зерен перлита и сравнительно крупных зерен феррита (рисунок 6.22);

4) участок основного металла (рисунок 6.23).

Если перед сваркой основной металл имел равновесную структуру, то при его нагреве до первой критической температуры в нем никаких структурных изменений не произойдет, она останется такой, какой была перед сваркой.

В литом шве и околошовной зоне сварного соединения из доэвтектоидных малоуглеродистых сталей очень часто образуется так называемая **видманштеттова структура**. Структурно-свободный феррит выделяется в виде пластинок и игл в теле зерен перлита (рисунок 6.24). Видманштеттова структура выра-

жена особенно четко после быстрого охлаждения сварного шва малоуглеродистой стали с очень сильным перегревом.

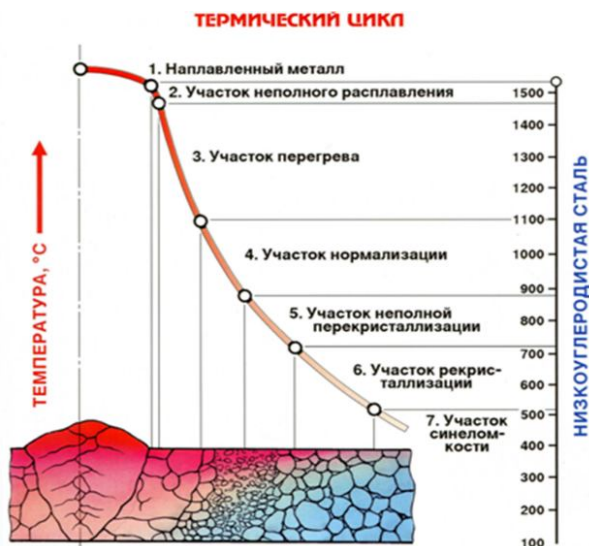


Рисунок 6.19 – Характерные зоны сварного шва:

1 – металл шва с дендритной структурой; 2 – зона сплавления с частично оплавленными зёрнами; 3 – участок перегрева с крупнозернистой структурой; 4 – участок нормализации с мелкозернистой структурой; 5 – участок неполной перекристаллизации с разнотернистой структурой; 6 – участок рекристаллизации; 7 – участок синеломкости

Видманштеттова структура в сварном шве обычно формируется при **электрошлаковой сварке**, когда металл шва и околошовной зоны сильно перегревается до высоких температур и длительно выдерживается при этой температуре. Образование видманштеттовых структур в участках перегрева характерно и для дуговой сварки под слоем флюса углеродистых сталей больших толщин, а также сталей кипящих и полуспокойных плавок.

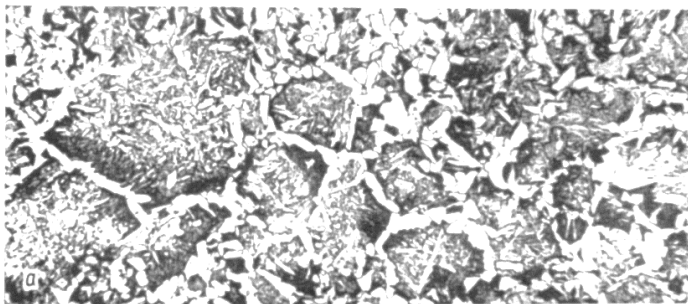


Рисунок 6.20 – Участок перегрева околошовной зоны сварного соединения из стали 15ХСНД, $\times 300$

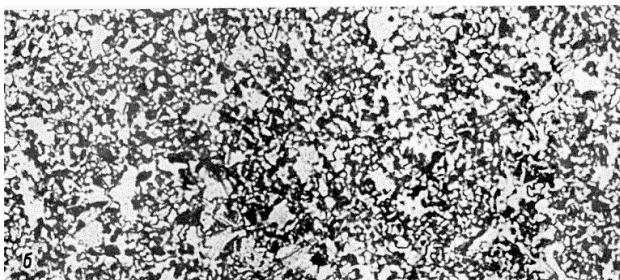


Рисунок 6.21 – Участок полной перекристаллизации, $\times 300$

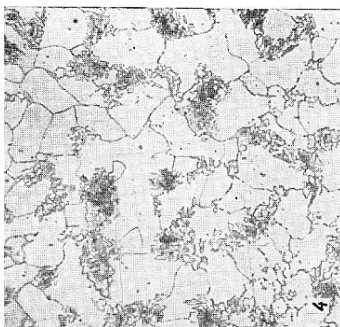


Рисунок 6.22 – Участок неполной перекристаллизации,
 $\times 200$

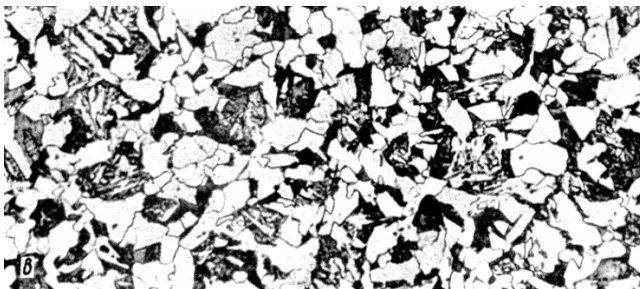


Рисунок 6.23 – Структура основного металла, $\times 200$

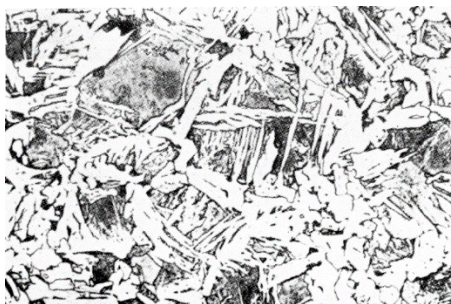


Рисунок 6.24 – Видманштеттовая структура с игольчатым ферритом в теле зерна перлита, $\times 500$

При *электронно-лучевой сварке*, вследствие быстрого нагрева и охлаждения, формируется мелкодисперсная феррито-перлитная структура с высоким комплексом механических свойств рисунок 6.25.

Многопроходная сварка наиболее благоприятно влияет как на структуру самого шва, так и на структуру околошовной зоны. В результате теплового воздействия последующего прохода в предыдущем валике протекают фазовые превращения, приводящие к измельчению зерна. Отсутствуют крупные зерна и в околошовной зоне. Все это благоприятно влияет на механические свойства сварного соединения.

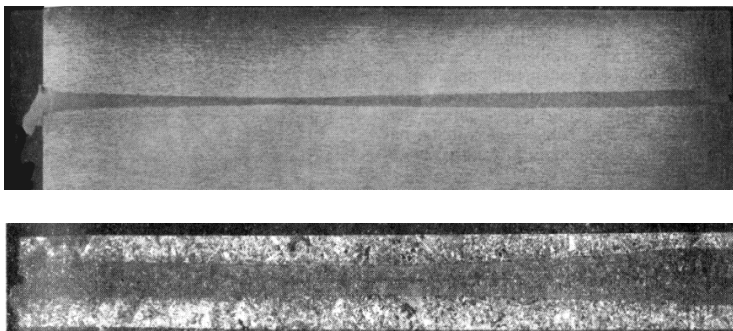


Рисунок 6.25 – Макроструктура поперечного сечения шва, полученного электронно-лучевой сваркой (узкое и глубокое проплавление)

Вопросы для самопроверки

1. Что такое сталь?
2. Как может изменяться кристаллическое строение сплавов на основе железа?
3. Какую информацию можно получить, используя диаграмму железо – углерод?
4. Что такое фаза?
5. Назовите и дайте характеристику основным фазам в сталях.
6. Какое влияние оказывают химические элементы, находящиеся в стали, на ее свойства?
7. Охарактеризуйте типы элементарных ячеек кристаллических решеток, наиболее характерных для металлов.
8. Что такое размер зерна металла? Как он влияет на его свойства?
9. Как происходит кристаллизация металла в сварных швах?
10. В чем заключаются особенности структуры металла в зоне термического влияния?

7 ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ И МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ СВАРКЕ ПЛАВЛЕНИЕМ [1, 2, 3, 4]

Металлургические процессы при сварке плавлением протекают в более сложных условиях по сравнению с условиями выплавки сплавов, поскольку для сварки плавлением характерны:

1) аномально высокая температура ($T > T_{\text{кпл}}$) перегрева металла;

2) взаимодействие с газовой средой и флюсами, обладающими высокой химической активностью в условиях дугового разряда;

3) кратковременность существования металла в жидком реакционно способном состоянии, ограничивающая эффективность типовых металлургических методов обработки металла для сохранения его качества;

4) одновременность процессов **окисления, раскисления, легирования и рафинирования** в сварочной ванне;

5) специфичность процессов направленной кристаллизации сварочной ванны, усиливающих ликвацию в металле шва и его структурную неоднородность.

Сварочная металлургия отличается от других металлургических процессов **высокими температурами термического цикла сварки и малым временем существования сварочной ванны в жидком состоянии**, т. е. в состоянии, доступном для металлургической обработки металла сварного шва. Кроме того, специфичны процессы кристаллизации сварочной ванны, начинающиеся от границы плавления, и образования измененного по своим свойствам металла зоны термического влияния. Наличие в зоне сварки сложных по составу фаз и высокие температуры способствуют взаимодействию между этими фазами. Результаты такого взаимодействия иногда приводят к нежелательным последствиям, т. е. к снижению свойств металла сварных соединений. Так, взаимодействие сварочной ванны с азотом и кислородом воздуха окрупчивает металл шва.

Химические реакции между расплавленным металлом и окружающими его газами и шлаком развиваются на торце плавящегося электрода в процессе образования и перехода капель

жидкого металла и в сварочной ванне. Эти важнейшие стадии сварочного процесса называются **стадией капли и стадией ванны**.

Возможны реакции между компонентами сварочных материалов (*покрытий, флюсов*) до расплавления, на стадии нагрева при сварке. Эта стадия является подготовительной, а стадии капли и ванны – основными стадиями протекания металлургических реакций при сварке.

Перечисленные условия изменяются в широких пределах в зависимости от вида сварочного процесса, режима сварки и т. п.

В каплях физико-химические условия следует считать более благоприятными для развития и протекания реакций, которые получают преимущественное развитие при повышении температуры.

Основным отличием стадий капли и ванны является различие в концентрациях. Стадия капли – начальная стадия процесса. Здесь система наиболее удалена от равновесия и скорость реакций – максимальна. В ванну же поступает электродный металл и шлак в стадии приближенной к равновесию, химический состав металла капель приближается к химическому составу наплавленного металла.

Понятие о кинетике реакций при сварке. Химические реакции при сварке обычно не достигают равновесия. К тому же многие реакции, например, окисления металла газовой фазой относятся к числу необратимых, т. е. могут теоретически протекать до полного исчерпания реагентов.

Реакция протекает обратимо, когда химические превращения возможны в прямом и обратном направлениях. **Истинная скорость и направление реакции определяется разностью скоростей прямой и обратной реакций.** Если концентрация исходных веществ больше равновесной концентрации, реакция протекает в прямом направлении. По мере исчерпания реагентов и увеличения массы продуктов скорость прямой реакции уменьшается, а обратной – увеличивается. Когда скорости в обоих направлениях становятся равными, наступает **динамическое равновесие**, и **реакция по существу прекращается**. Но если продукты реакции удаляются из системы и протекание реакции в

обратном направлении невозможно, то реакция протекает необратимо до полного исчерпания реагентов.

При сварке реагирующие вещества находятся обычно в разных фазах, например, в металле и шлаке или в металле и газе, и реакции протекают на межфазной поверхности. Такие реакции называются **гетерогенными**. Любая гетерогенная реакция обязательно включает стадии подвода реагентов к месту взаимодействия и отводов продуктов реакции. Скорость такой реакции определяется скоростью самой **медленной ее стадии**.

Скорость **превращения** быстро увеличивается с повышением температуры, в то время как скорость транспорта (*подвода и отвода*) реагентов в жидких средах изменяется с повышением температуры значительно медленнее. Вследствие этого скорость гетерогенных реакций лимитируется скоростями транспортировки реагентов, а не истинной скоростью реакции на поверхности.

Реакции в ванне. В процессе сварки образуется расплавленный участок, называемый **сварочной ванной**. Различают сварочные ванны двух типов:

- 1) образующиеся при естественном охлаждении и формировании шва;
- 2) образующиеся при использовании искусственного охлаждения и принудительного формирования шва.

Сварочная ванна образуется в результате расплавления основного и присадочного металлов. Металл ванны, затвердевая, образует металл шва, так, что форма ванны по существу обуславливает форму шва. Сварочная ванна в начале процесса образуется не мгновенно, а в течение некоторого времени, называемого **переходным периодом**, в течение которого размеры и масса ванны увеличиваются от нуля до некоторого предельного значения, определяемого условиями подвода и отвода теплоты.

Для различных участков ванны время пребывания металла в жидком состоянии различно. Наиболее долго в расплавленном виде находятся объемы металла, расположенные на продольной оси ванны, тогда как у ее краев металл кристаллизуется сразу же после расплавления. Передний участок ванны, который находится под непосредственным воздействием дуги, нагрет значительно выше температуры плавления металла, в то время как пери-

ферийные участки и задняя часть ее имеют температуру, близкую к точке плавления.

7.1 Анализ состава газовой фазы в зоне столба дуги

Температура газов и паров в столбе дуги достигает 6000 К, что чрезвычайно усиливает их химическую активность и интенсифицирует процессы взаимодействия с металлами и между собой отдельных компонентов газовой среды. Кроме того, активация взаимодействия газов с металлом обусловлена высокой температурой металла в месте сваривания. Принято различать две зоны (рисунок 7.1): зона 1 высоких температур, достигающих температуры кипения, и зона 2 пониженных температур, приближающихся к температуре плавления.

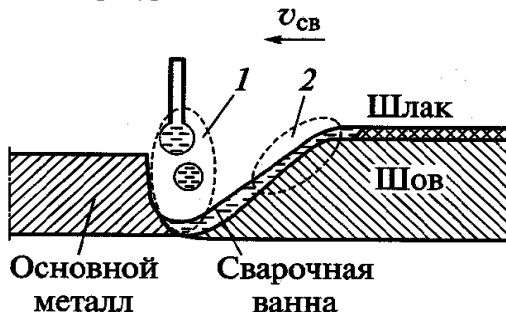


Рисунок 7.1 – Распределение температур в зоне столба дуги:
1 – зона высоких температур ($T \leq T_{\text{кин}}$); 2 – зона низких температур ($T \geq T_{\text{крист}}$)

В высокотемпературную зону входят:

- 1) капля на электроде;
- 2) капля, проходящая столб дугового разряда;
- 3) активное пятно на передней стенке сварочной ванны.

Кроме того, взаимодействие металла с газами в зоне дуги усиливается электрическим потенциалом между анодом и катодом и движением заряженных газовых частиц в электрическом поле дуги.

Чрезвычайно важную роль играет и интенсивное перемешивание жидкого металла сварочной ванны (рисунок 7.2), увеличивающее площадь соприкосновения газа с жидким металлом и его распределение по объему в зоне пониженных температур.

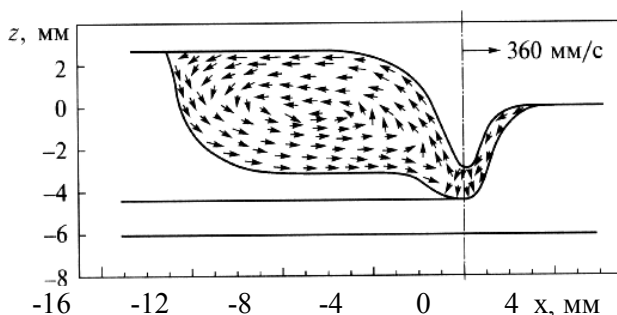


Рисунок 7.2 – Схема движения металла в продольном сечении сварочной ванны

Физико-химические процессы в металле, протекающие с участием газовой среды, оказывают большое влияние на качество сварных соединений. Важнейшими из этих процессов являются диссоциация и ионизация газов, растворение газов в жидком металле, различные химические реакции в самой газовой среде и при ее взаимодействии с металлом.

7.1.1 Распад и образование соединений между компонентами газовой смеси

Высокая температура газов в зоне сварки создает условия для распада газовых молекул – диссоциации газов. Эти процессы сопровождаются поглощением теплоты Q диссоциации, т. е. являются эндотермическими, быстроразвивающимися при высоких температурах.



Отсюда следует, что поскольку энергия Q_3 , затрачиваемая на диссоциацию молекулы азота, имеет наибольшее значение, его молекула – самая прочная. Азот должен диссоциировать в меньшей степени, чем кислород и водород в тех же условиях.

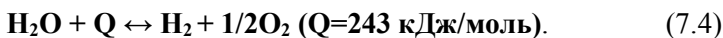
Диссоциация двухатомных газов в зоне сварки имеет большое значение по следующим причинам:

1) в атомарном состоянии газы приобретают высокую химическую активность и легко взаимодействуют с расплавленным металлом капель и сварочной ванны;

2) атомы газа в зоне столба дуги после диссоциации претерпевают термическую ионизацию. Они становятся ионами и перемещаются в соответствии со своими зарядами к аноду или катоду, т. е. к электроду или к сварочной ванне, что усиливает их растворимость в металле;

3) параллельно с диссоциацией газов, протекающей в зоне высоких температур с поглощением тепла, вблизи сварочной ванны, где температура значительно ниже, идет обратный процесс образования молекул из ионов атомов, сопровождающийся выделением тепла. Благодаря этим двум процессам осуществляется своеобразное регулирование теплового состояния в зоне сварки – перенос тепла от участка высоких температур столба дуги к жидкому металлу сварочной ванны, имеющему меньшую температуру.

Аналогично диссоциации двухатомных газов протекает диссоциация трехатомных газов, которые в сварочных процессах обычно представлены водяным паром и углекислым газом, входящими в состав атмосферы. Водяной пар диссоциирует по реакции:



Приняв во внимание, что одновременно при диссоциации выделяются водород и кислород, можно заключить, что диссоциация водяных паров в зависимости от условий протекания реакции (7.4) без участия атмосферного кислорода будет создавать для различных металлов *окислительный или восстановительный характер среды*.

С повышением температуры степень диссоциации водяных паров увеличивается и при 5000 К приближается к единице.

Наряду с диссоциацией простых и сложных молекулярных газов для высоких температур сварки плавлением характерно образование молекул газа в эндотермических реакциях при взаимодействии кислорода и водорода с другими газами: азотом, водородом и фтором. Например, азот N_2 и кислород O_2 при $T = 3500$ К взаимодействуют с образованием оксида азота NO по реакции, которая сопровождается поглощением тепла:



Образующийся оксид азота в контакте с металлом ванны при температурах 1800...1900 К распадается и играет существенную роль как окислитель. Он передает атомы кислорода и азота на поверхность жидкого металла.

7.1.2 Насыщение расплавленного металла газами в капле и сварочной ванне

В жидком металле капля и сварочной ванны происходят процессы растворения газов столба дуги. В сварочной ванне эти процессы протекают менее интенсивно, чем в каплях, по следующим причинам:

- 1) температура жидкого металла в сварочной ванне ниже, чем в каплях, где она приближается к температуре кипения металла;
- 2) для сварочной ванны отношение поверхности реакции к объему значительно меньше, чем для капель.

Количество растворяющегося в металле газа для большинства металлов увеличивается с ростом температуры.

С увеличением температуры металла повышается и содержание растворенного в нем газа, причем в каплях оно может быть значительным.

Процесс растворения газов в жидком металле состоит из отдельных, протекающих последовательно стадий:

- 1) адсорбции атомов газа поверхностью металла капли и сварочной ванны;
- 2) взаимодействия адсорбированного газа в поверхностном слое с металлом, т. е. образования растворов и химических соединений (*этот процесс называется хемосорбцией*);

3) отвода продуктов хемосорбции вглубь жидкого металла.

Адсорбция и хемосорбция протекают с очень большими скоростями – практически мгновенно. Отвод продуктов хемосорбции вглубь жидкого металла происходит с меньшей скоростью. На этой стадии процесса растворения газов в жидком металле большую роль играет механическое перемешивание. При сварке оно проявляется довольно значительно вследствие интенсивного турбулентного движения расплава (*из головной части сварочной ванны в хвостовую, см. рисунок 7.2*), обусловленного давлением дуги на жидкий металл. Наибольшее насыщение металла газом происходит в каплях. Оно зависит от длительности пребывания капли на торце электрода и времени ее пролета через столб дуги, а также от температуры капли.

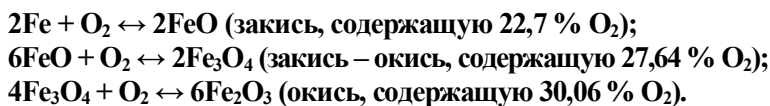
Максимальное насыщение газов в твердом или жидком металле достигается в равновесном состоянии.

При электродуговой сварке наличие электрического поля создаст возможность **электрического поглощения газов металлом**. Оно наблюдается только у поверхности катода в области активного пятна, куда внедряются положительные ионы газов, переносящие заряды столба дуги. Наличие у поверхности катода слоя положительных ионов повышенной концентрации приводит к их перемещению в объем металла диффузионным путем вследствие выравнивания разности концентраций. Поэтому при сварке на **обратной полярности** («+» на электроде) в капле растворяется меньше водорода. Это снизит концентрацию H_2 и в ванне. Степень развития электрического поглощения газов металлом зависит также от значения катодного падения потенциала, состава газовой среды, силы тока и других факторов.

7.2 Влияние атмосферных газов на свойства стали и сплавов при сварке

7.2.1 Влияние кислорода на свойства стали

Кислород растворяется во многих металлах, в том числе и в железе. Железо с кислородом образует три оксида в результате следующих реакций:



Из этих трех оксидов только закись железа **FeO** растворима в железе и поэтому наиболее сильно влияет на его свойства в составе свариваемого металла. Остальные оксиды в железе не растворяются, могут в нем присутствовать только в виде отдельных включений и легко разлагаются при высоких температурах.

При температуре 845 К закись **FeO**, находящаяся в железе вне твердого раствора, разлагается с образованием закиси-окиси:



Таким образом, при комнатной температуре кислород находится в железе как в твердом растворе **Fe_α**, так и в виде включений **Fe₃O₄**.

Наличие легирующих элементов в стали также влияет на растворимость кислорода. Наиболее сильно снижают растворимость кислорода в железе элементы ***углерод и кремний***, которые являются самыми активными раскислителями, связывающими **O₂** в оксиды **CO** и **SiO₂**. Ввод таких элементов в металл шва относится к физико–химическим способам его защиты.

Присутствие кислорода в сталях наряду с окислением железа вызывает непосредственное окисление ряда легирующих элементов.

Наличие кислорода в стали ухудшает все свойства свариваемого металла. С увеличением содержания кислорода резко уменьшаются пределы прочности **σ_в** и текучести **σ_т**, относительное удлинение **δ** и ударная вязкость **КСУ**, причем особенно значительно снижается ударная вязкость.

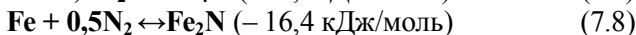
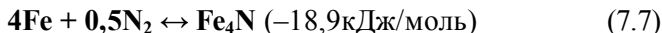
Наряду с этим при увеличении содержания кислорода в стали происходит следующее:

- 1) уменьшается стойкость против коррозии;
- 2) обнаруживается склонность к старению;

- 3) при содержании кислорода более 0,08 % появляется склонность к хладно- и красноломкости;
- 4) усиливается рост зерен при нагреве;
- 5) ухудшается способность к обработке резанием и ковке;
- 6) понижается магнитная проницаемость и увеличивается электрическое сопротивление.

7.2.2 Влияние азота на свойства стали

Атомарный азот растворяется преимущественно в тех металлах, с которыми он может образовывать химические соединения – нитриды. При растворении в стали азот образует нитриды как с железом, так и с большинством примесей. С железом азот взаимодействует по эндотермическим реакциям и образует два типа нитридов:



Для сварки большее значение имеет нитрид Fe_4N .

С легирующими элементами стали азот также образует нитриды, часто значительно более стойкие, чем нитриды железа. Особенно стойкими в области высоких температур являются нитриды кремния и титана.

Содержащиеся в стали нитриды азота сильно влияют на ее свойства. С увеличением содержания азота в металле повышаются пределы прочности (σ_b) и текучести (σ_T). Этим влияние азота на свойства стали принципиально отличается от влияния кислорода. Вместе с тем по аналогии с кислородом снижаются пластические свойства и особенно резко – ударная вязкость стали. Наряду с этим происходят и другие нежелательные изменения:

- 1) появляется склонность металла к старению и хладноломкости;
- 2) увеличивается склонность к закалке;
- 3) понижается магнитная проницаемость;
- 4) увеличивается электрическое сопротивление металла.

Этим влияние азота на свойства стали принципиально отличается от влияния кислорода. Вместе с тем, по аналогии с кислородом снижаются пластические свойства и особенно резко – ударная вязкость стали.

Итак, для углеродистых и низколегированных сталей **азот – нежелательная примесь** в металле шва, особенно при действии на него динамической нагрузки.

При сварке легированных сталей осуществляют микролегирование азотом с целью частичной замены углерода и увеличения пластичности и прочности сталей.

При сварке деталей из высоколегированных сталей аустенитного класса азот вводится специально, т. к. он повышает устойчивость аустенита и выступает как легирующая добавка, способная заменить некоторое количество углерода и никеля. В таких сталях азот улучшает механические свойства, а также может вызвать и эффект упрочнения чугуна.

В условиях сварки деталей из меди азот применяют в качестве инертного защитного газа, не взаимодействующего с медью.

7.2.3 Влияние водорода на свойства стали

Водород может оказывать на металл **двойное влияние**:

1) с одной стороны, он защищает его от насыщения кислородом и азотом, предупреждает окисление (*связывая кислород*), восстанавливает металл из оксидов, препятствует образованию нитридов железа;

2) с другой стороны, водород растворяется в металле и становится причиной появления существенных **дефектов** в шве – **пористости и трещин**.

Атомарный водород растворяется **как в твердом, так и в жидком железе**. Растворимость водорода в железе с повышением температуры растет. При переходе железа из твердого состояния в жидкое наблюдается резкое возрастание растворимости водорода, достигающей максимального значения при температуре ~ 2700 К. Таким образом, наиболее значительное насыщение металла водородом при сварке происходит в процессе формирования и переноса капель с электрода в сварочную ванну.

Степень насыщения жидкого металла водородом зависит от наличия в газовой среде элементов, способных связывать водород в химические соединения, не растворимые в жидком металле.

Насыщение водородом жидкого металла отрицательно сказывается на его свойствах. При достаточно быстром охлаждении металла сварочной ванны не весь растворенный в ней водород успевает выделиться. Особенно много водорода задерживается при снижении температуры превращения $\gamma - \alpha$. Оставшийся в металле атомарный водород задерживается в ветвях зарождающихся и растущих дендритов, у поверхности кристаллов, у мест расположения посторонних включений, а также в дефектах кристаллического строения. В этих местах атомы водорода соединяются в молекулы. Непрерывно образующийся молекулярный водород создает значительные давления, т. к. сам он не диффундирует через металл и практически не растворим в нем. Кроме того, водород может окисляться и образовывать водяной пар, который в металле не растворяется. В связи с тем, что давление направлено во все стороны, в металле возникает объемное напряженное состояние, приводящее к снижению его пластических свойств, а иногда — к хрупкому разрушению и *закально-водородным трещинам*.

Следовательно, хотя водород и не образует с металлом шва соединений, отрицательно влияющих на прочность сталей, он усиливает вредное влияние макро- и микронесплошностей, способствует резкому снижению пластических свойств и хрупкому разрушению закаленных сталей.

7.2.4 Влияние CO_2 , CO и паров H_2O на свойства стали

Оксиды углерода CO_2 и CO в тех или иных количествах всегда есть в газовой среде. Степень диссоциации и окислительная способность CO_2 при температурах дугового разряда значительны. В отличие от CO_2 окись углерода CO не диссоциирует в дуговом разряде. Кроме того, CO не растворяется в жидком металле и поэтому непосредственной опасности для него не представляет. В то же

время CO может создавать защитную атмосферу у поверхности жидкого металла, связывая кислород по реакции



Иную роль играет окись углерода, образующаяся в самом металле при взаимодействии углерода с кислородом или углерода с оксидами металлов. В этом отношении наиболее характерна реакция между углеродом и закисью железа:



Наблюдающееся кипение металла (*выделение пузырей образующейся окиси углерода*) способствует удалению посторонних включений. Однако если в металле шва в момент его кристаллизации нет нужных раскислителей (*например, Si, Mn*), способных подавить реакцию дальнейшего образования окиси углерода, то кипение металла сварочной ванны может продолжаться до окончания кристаллизации и привести к нежелательному снижению содержания углерода, а также к образованию пор в металле шва.

7.3 Взаимодействие металла с защитными флюсами при сварке

Сварочные флюсы представляют собой сплавы различных оксидов, солей или сплавы солей и оксидов. Они имеют пониженные (*по сравнению с соответствующим жидким металлом*) температуру плавления и плотность. При взаимодействии сварочных флюсов с жидким металлом изменяется их химический состав, и они превращаются в шлак, который располагается в основном на поверхности сварочной ванны и защищает ее от непосредственного контакта с атмосферой. Однако при высоких температурах, развивающихся во время сварки, флюсы-шлаки переходят в реакционно-способное состояние и вступают в обменные реакции с металлом, что может снижать качество швов.

Шлаки, богатые основными оксидами, называются **основными шлаками**, а при большом содержании кислотных оксидов – **кислыми шлаками**.

Сварочные флюсы применяют для выполнения следующих задач:

- 1) защиты жидкого металла от непосредственного контакта с воздухом;
- 2) проведения процессов **раскисления, легирования и рафинирования** металла;
- 3) улучшения теплового режима сварки путем снижения скорости охлаждения;
- 4) поддержания устойчивости дугового разряда;
- 5) высококачественного формирования металла шва и особенно создания плавной зоны перехода к основному металлу, зависящей от смачиваемости твердого металла жидким металлом и растекаемости жидкого металла на поверхности соединения.

Химические свойства флюса и образующегося из него шлака в значительной мере определяются **степенью кислотности** или обратной ей величиной – **степенью основности (В)**.

Степенью кислотности n называют отношение сумм молекулярных долей основных и кислотных оксидов данного шлака, выраженных в процентах и не связанных в комплексы:

$$n = \frac{1}{B} = \frac{\sum \%M_{\text{кисл}}}{\sum \%M_{\text{осн}}}. \quad (7.11)$$

Если степень кислотности больше единицы, шлак считается кислым, если меньше – основным.

Химические свойства сварочных шлаков следует рассматривать в совокупности с их физическими свойствами.

Физические свойства шлаков характеризуются следующими величинами:

- 1) тепловыми константами (*температурой плавления и размягчения, теплоемкостью и скрытой теплотой плавления шлака*);

- 2) вязкостью в жидком состоянии и ее изменением с температурой;
- 3) газопроницаемостью;
- 4) плотностью в жидком состоянии;
- 5) показателями, определяющими *отделяемость* шлака от металла шва в твердом состоянии.

Точно определить температуру плавления шлаков трудно, т. к. соответствующие критические точки превращения выражены не всегда отчетливо, а иногда и вовсе отсутствуют. Для шлаков характерно наличие некоторого температурного интервала плавления, лежащего между температурами начала размягчения шлака и его перехода в жидкое состояние, соответствующее полному расплавлению. Температурный интервал плавления у кислых шлаков обычно больше, чем у основных.

Активность жидких шлаков при взаимодействии с металлом сильно зависит от их вязкости, зависящей от температуры. В зависимости от вязкости шлаки делят на *«короткие»*, у которых вязкость почти постоянна в пределах 1473...1873 К, и *«длинные»*, более густые шлаки, вязкость которых медленно снижается в интервале 1573...1673 К. Такие шлаки постепенно переходят сначала из жидкого состояния в *густое*, потом – в *тестообразное*, а затем – в *твердое*, и поэтому трудно установить температуру начала их затвердевания.

«Длинные», медленно затвердевающие шлаки менее активны по отношению к металлу и отличаются худшими формирующими свойствами: *смачиваемостью и растекаемостью*.

От вязкости шлака зависит его газопроницаемость, т. е. способность пропускать выделяющиеся из металла газы. Известно, что скорость выделения газов из металла зависит от их давления над поверхностью металла. Если у шлаков плохая газопроницаемость, то на поверхности металла создается повышенное давление газов, препятствующее их дальнейшему выделению. В этом случае в шве могут образоваться поры, а на по-

верхности шва — *мелкие вмятины, шероховатость, побитость*.

Густые шлаки обладают плохой газопроницаемостью, а маловязкие, жидкоподвижные шлаки — высокой газопроницаемостью. В жидкоподвижных шлаках быстрое выделение газов из металла сопровождается попутным захватом частиц шлаковых включений и более полным очищением металла шва.

Для сварки более желательны маловязкие, легкоподвижные, а затем быстро затвердевающие шлаки. Этому условию больше всего удовлетворяют «короткие» (*основные*) шлаки.

После затвердевания шлаки должны быть удалены с поверхности шва. На поверхности металла образуется оксидная пленка шлака, состоящая главным образом из FeO . Кубическая кристаллическая решетка FeO строится на базе кубической кристаллической решетки уже закристаллизовавшегося шва. Изоморфность этих двух контактирующих фаз обеспечивает хорошее сцепление (*когезию*) шлака и металла, но является главной причиной плохой отделимости шлаковой корки.

Ввод в шлак SiO_2 способствует лучшей отделимости шлаковой корки, т. к. при этом не образуется промежуточных соединений между шлаком и металлом.

7.4 Массообмен между расплавленным металлом, газовой средой и шлаком

Одной из важнейших функций флюсов или электродных покрытий, применяемых при электродуговой сварке, является металлургическая обработка металла шва: его *раскисление, легирование, модифицирование и рафинирование*.

Вследствие активного развития окислительных процессов при дуговой сварке практически всегда есть потребность раскисления металла. Однако, чтобы получить наплавленный металл требуемого состава с определенными свойствами, одной операции раскисления недостаточно, т. к. металл теряет некоторые полезные примеси в результате не только окисления, но и прямого испарения под действием высоких температур. Для компенсации этих потерь, а также для введения в наплавленный металл специальных добавок различ-

ных элементов (с целью повышения качества металла) параллельно с раскислением осуществляют легирование и модифицирование металла. Одновременно необходимо рафинировать металл, т. е. очищать его от вредных примесей (*серы и фосфора*).

Для улучшения структуры первичной кристаллизации, ее измельчения и упорядочения в металл шва вводят небольшие количества зародышей кристаллитов специальных тугоплавких добавок – *модификаторов*. Наиболее сильные из них – ниобий **Nb**, титан **Ti**, цирконий **Zr**, ванадий **V**.

7.5 Расплавление электрода и перенос капель в ванну

Размеры капель металла, переходящих с электрода в сварочную ванну, существенно влияют на степень развития физико-химических процессов при взаимодействии металлической, шлаковой и газовой фаз. В зависимости от защитной среды перенос металла происходит через газовую или шлаковую среду.

Через газовую среду электродный металл переносится в виде капель разного размера – диаметром от 7 мм до тысячных долей миллиметра, а также в виде паров. Установлено, что независимо от способа сварки и положения шва в пространстве металл всегда переходит с электрода на изделие. При сварке одновременно образуются капли различных размеров, но в зависимости от условий сварки преобладает тот или иной размер. Можно отметить такие главные формы переноса:

- 1) крупно- и мелкокапельный с короткими замыканиями дугового промежутка;
- 2) капельный без коротких замыканий;
- 3) струйный;
- 4) перенос металла в виде паров.

Схема процесса переноса электродного металла дана на рисунке 7.3. Механизм переноса в общем случае включает в себя следующие моменты:

- 1) нагрев дугой торца электрода и образование капли диаметром d_k ;
- 2) появление шейки на стыке жидкого металла с твердым металлом электрода;

- 3) соприкосновение капли с поверхностью сварочной ванны;
- 4) разрыв образованного «мостика».

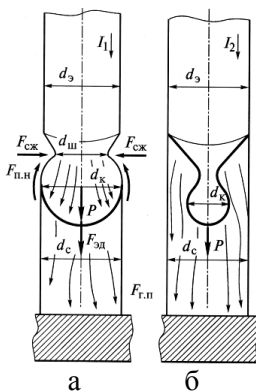


Рисунок 7.3 – Схема крупно- (а) и мелкокапельного (б) переноса материала в ванну

Если в период существования «мостика» через него протекает ток дуги, то «мостик» нагревается до температуры кипения, затем следует его взрыв и разбрызгивание. Для подавления взрыва и разбрызгивания целесообразно не допускать замыкания дуги каплей и сокращать время нахождения капли в столбе дуги.

Сила тяжести $\mathbf{P}$ и электродинамические силы $\mathbf{F}_{\text{эд}}$ способствуют отрыву капли от торца электрода, а сила поверхностного натяжения $\mathbf{P}_{\text{п.н}}$ удерживает ее на электроде. Электродинамические силы $\mathbf{F}_{\text{эд}}$ являются результатом наличия вокруг электрода (*при протекании по нему тока*) магнитного силового поля, оказывающего сжимающее действие на электрод – **пинч-эффект**, в результате которого появляются силы, сжимающие шейку капли.

Электродинамические силы возрастают с увеличением тока и уменьшением диаметра электрода.

Капля, отрывающаяся от торца электрода, как правило, отклоняется в сторону, противоположную направлению сварки под действием сил давления газового потока и реактивных сил, создаваемых газом, выделяющимся из капли. Это приводит к возникновению потока жидкого металла по оси сварочной ванны, который движется в хвостовую часть ванны и там разделяется на

левый и правый боковые потоки, частично возвращающие металл в сторону дуги и перемешивающие металл сварочной ванны (см. рисунок 7.2). Размер капли определяется соотношением сил, удерживающих ее на торце электрода, и сил, стремящихся ее оторвать. Для измельчения капель снижают силу поверхностного натяжения или отрывают их механически или кратковременными импульсами повышенного тока, не допуская укрупнения. На силу отрыва капли влияют поверхностно-активные вещества, входящие в соприкосновение с жидким металлом.

Увеличение сварочного тока приводит к росту всех сил, вызывающих отрыв капли, а значит, к измельчению капель и переходу к струйному переносу без коротких замыканий.

При ручной дуговой сварке электродом с толстым покрытием на больших токах наблюдается преимущественно мелкокапельный перенос металла с редкими замыканиями дугового промежутка.

При сварке под флюсом применяются еще более высокие сварочные токи. Силы отрыва, особенно электродинамические силы, резко возрастают. Увеличивается воздействие газового потока $F_{г.л.}$, усиливаются процессы газообразования в капле, а также испарения. В результате этого при сварке под флюсом наблюдается мелкокапельный перенос металла без коротких замыканий, а также перенос в виде паров.

Установлено значительное влияние на размер переносимых капель не только силы, но и **плотности тока**, которые возрастают при малых диаметрах электрода. При некотором критическом значении плотности тока капельная форма переноса переходит в струйную. Подобная форма переноса наблюдается при сварке в защитных газах.

Размер переносимых капель оказывает существенное влияние на ход металлургических процессов. Чем мельче капли, тем больше суммарная поверхность соприкосновения их с окружающей средой, а значит, полнее взаимодействие с этой средой (*растворение газов, процессы легирования элементами из покрытий и флюсов, их окисления, испарения легирующих элементов и др.*). Однако нельзя забывать, что в таком случае время существования капель уменьшается, а потому снижается и полнота протекания реакций.

Развитие реакций в каплях особенно сильно зависит от длины дуги.

При сварке с участием флюсов во время перехода через газовую среду капли частично или полностью покрываются оболочкой расплавленного шлака, в результате чего значительно активизируются реакции между ним и жидким металлом. Возможно также перемешивание металла со шлаком в результате бурного выделения газов из капли, что способствует сохранению легко испаряющихся легирующих элементов и уменьшению пористости.

7.6 Источники водорода при сварке под флюсом

Сварка под флюсом, выполняемая в изолированной от атмосферы газовой полости, обеспечивает надежную защиту металла шва лишь от азота, входящего в состав атмосферы. Среднее содержание азота в швах, полученных при сварке низкоуглеродистых сталей, обычно составляет 0,02 %. Такой уровень азота не играет серьезной роли в металлургических процессах, в т. ч. при образовании пористости швов. Более существенным является присутствие в шве водорода и кислорода, которые попадают в зону сваривания разными путями:

1) с атмосферной влагой;

2) с влагой флюса, входящей в состав его соединений, адсорбированной на поверхности зерен, а также внутри них в результате мокрой грануляции флюса (*дробления жидкого флюса струями воды*);

3) с влагой в составе ржавчины или других поверхностных оксидов ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$);

4) с основным металлом и сварочными материалами, содержащими некоторое количество водорода ($0,5 \dots 3 \text{ см}^3/100 \text{ г}$).

В зависимости от температуры газовой фазы водород может находиться в молекулярном, атомарном или ионизированном состояниях.

В расплавленных флюсе и шлаке водород содержится в виде ионов **ОН**.

Основной источник водорода – водяной пар. Учитывая зависимость растворимости от температуры, полагают, что поглощение водорода происходит на стадии капли. В сварочной ванне, наоборот, идет дегазация.

Кроме того, на растворимость водорода в железе влияют легирующие элементы. *Титан, ниобий, цирконий повышают* ее, т. к. образуют с водородом прочные гидриды. Другие элементы – раскислители: *марганец, никель, хром* косвенно влияют на растворимость водорода в железе.

Особенно велика концентрация водорода при многопроходной дуговой сварке под флюсом в условиях максимального перегрева металла. В твердом металле шва остаточная концентрация водорода достигает $10 \text{ см}^3/100 \text{ г}$, а основная масса водорода успевает выделиться из металла в условиях замедленной скорости охлаждения шва под шлаковой коркой.

Возникновение при охлаждении молекулярного водорода, не растворимого в металле, является главным фактором появления пор в шве.

Для обычных условий охлаждения сварочной ванны наиболее вероятно образование мельчайших пор у линии сплавления, где средняя скорость роста кристаллитов минимальна. Это чаще всего наблюдается при сварке алюминия, меди и их сплавов.

Таким образом, тщательная прокатка флюсов, их хранение в герметичной таре, очистка поверхности металла и электродной проволоки от ржавчины и масла способствуют уменьшению водородного насыщения швов, а также предотвращению пористости.

7.7 Окисление металла шва флюсом

Присутствие кислорода в газовой фазе флюсовой полости обусловлено в основном тем, что:

1) на поверхности металла свариваемых кромок имеются оксиды (*окалина и ржавчина*), диссоциирующие при дуговом нагреве (*с выделением свободного кислорода*);

2) во флюсе есть воздух и влага, диссоциирующая при сварке и взаимодействующая с жидким железом;

3) при дуговой сварке происходит выделение на аноде кислорода, а на катоде – водорода;

Кроме того, кислород попадает в жидкий металл ванны при прямом взаимодействии железа с химически активными оксидами жидких шлаков.

Таким образом, в шлаке возникает закись железа **FeO**, которая растворима в жидком железе.

Если в электродном металле содержатся легирующие элементы с большим сродством к кислороду (*сродство – это функция состояния, характеризующая способность веществ вступать в химическое взаимодействие*), чем у железа, то происходит их необратимое окисление при взаимодействии с **SiO₂** и **MnO**. Поэтому при сварке легированных и высоколегированных сталей недопустимо применение кремнемарганцевых флюсов, которые хотя и имеют хорошие сварочно-технологические свойства, но производят окисление легирующих элементов в обменных реакциях.

7.8 Переход вредных примесей из флюса в металл шва

Под воздействием шлака в шве изменяется количество *вредных примесей – серы и фосфора*. Источниками серы во флюсе являются шихтовые минералы.

Наибольшее количество серы переходит в металл шва, когда она находится в соединении **FeS**, хорошо растворимом в жидком железе.

При многопроходной сварке с увеличением высоты шва концентрация серы, фосфора и кислорода значительно повышается по сравнению с их содержанием в электродной проволоке. Вредное влияние серы могут усиливать и другие легирующие элементы, например, углерод.

Присутствие в металле шва как серы, так и фосфора усиливает склонность металла шва к образованию горячих трещин вследствие резкого увеличения температурного интервала хрупкости швов в твердожидком состоянии, а также к охрупчиванию швов, т. е. соответственно к *горячеломкости и хладноломкости*.

7.9 Раскисление металла при сварке

При всех способах сварки возможны следующие *три основных вида окисления* составляющих сплава шлаком:

- 1) прямое окисление;
- 2) окисление низших оксидов до высших;
- 3) окисление на основе обменных реакций.

При прямом окислении происходит непосредственное окисление элемента свободным кислородом с образованием оксида.

«*Поставщиками*» свободного кислорода в зону сварки помимо воздушной атмосферы могут быть двуокись углерода, пары воды, карбонаты и высшие оксиды, диссоциирующие при нагреве и выделяющие свободный кислород.

Наиболее интенсивно окисление происходит на поверхности открытой сварочной ванны.

7.9.1 Виды раскислительных процессов

Для обеспечения восстановительного характера обменных реакций нужно применять элементы, которые обладают повышенным сродством к кислороду и в определенных условиях способны энергично связывать кислород, освобождая металл из оксида к кислороду. Такие элементы называются *раскислителями*, а сам процесс восстановления металла из оксида – *раскислением*.

Раскисление стали с получением конденсированных продуктов реакции (осадочное раскисление). Возможность реализации этого метода заключается в том, что металлы очень ограниченно растворяют свои оксиды и сульфиды, а оксиды и сульфиды других металлов практически не растворяют. К раскислителям, образующим такие оксиды, относятся **Ti, Si, Mn, Al**.

Кремний при окислении образует не растворимый в металле кислотный оксид SiO_2 . Силикаты железа всплывают на поверхность металла и переходят в шлак, вследствие чего раскисляющая способность кремния повышается. С повышением концентрации кремния в металле уменьшается содержание в нем закиси железа.

Раскисляющая способность кремния заметно увеличивается с повышением температуры.

Марганец Mn при окислении превращается в закись **MnO** – относительно сильный основной оксид, не растворимый в металле. Как и для кремния, с увеличением содержания марганца в металле уменьшается концентрация в нем закиси железа.

Титан Ti относится к числу сильных раскислителей, более сильных, чем кремний и марганец. Образующийся кислотный оксид **TiO₂** не растворим в металле, легко переходит в шлак. Титан активно реагирует с азотом, образуя прочные нитриды, не растворимые в металле. Вместе с тем он сильный модификатор, т. е. элемент, способствующий измельчению зерна в металле.

Алюминий Al является наиболее сильным раскислителем в этой группе. Он образует амфотерный оксид **Al₂O₃**, раскисление жидкого металла алюминием сопровождается значительным выделением теплоты, обеспечивающим дополнительный подогрев металла сварочной ванны, что способствует более интенсивному протеканию сварочных процессов. Однако не все количество оксида алюминия всплывает на поверхность сварочной ванны, частично он остается в металле шва в виде включений. Это одна из причин ограниченного применения алюминия как раскислителя при сварке сталей. Кроме того, как и титан, алюминий склонен образовывать с азотом стойкие нитриды, снижающие пластичность швов.

Большой *недостаток процесса* раскисления осаждением – образование в металле *шлаковых* включений. Они являются концентраторами напряжений и снижают как прочность, так и пластичность. Поэтому вводят одновременно два или три раскислителя, чтобы их оксиды понижали температуру плавления и включения имели *не игольчатую, а глобулярную форму*.

Диффузионное раскисление основано на частичном переходе закиси железа в шлак. При диффузионном раскислении кислород в составе окислов удаляется из металла с помощью сварочного шлака специального состава (*Диффузионное раскисление – это направленная диффузия окисла из жидкого металла в шлак. Направление диффузии определяется меньшей концентрацией окисла в шлаке.*). Для развития процесса диффузионно-

го раскисления важно, чтобы концентрация свободной закиси железа в шлаке постоянно уменьшалась, тогда скорость диффузии будет поддерживаться примерно на одном уровне. Это достигается различными способами:

- 1) связыванием **FeO** в комплексные соединения кислотными оксидами (*образованием силикатов, титанатов*);
- 2) проведением раскислительных обменных реакций;
- 3) разбавлением шлаков нейтральными в химическом отношении добавками.

При диффузионном раскислении закись железа удаляется из металла в шлак путем диффузии, поэтому ванна жидкого металла находится в спокойном состоянии, а все химические процессы совершаются на границе металл – шлак и в самом шлаке. Однако, само раскисление протекает медленно. Процесс диффузионного раскисления наиболее заметен при образовании капли на электроде и ее переносе, т. к. ему способствует достаточно высокая температура, энергичное перемешивание металла капли и непрерывный контакт свежих порций металла со шлаком. В сварочной ванне диффузионное раскисление протекает слабо и преимущественно лишь в верхнем тонком слое металла, прилегающем к шлаку.

Вследствие отмеченных особенностей диффузионное раскисление в сварочных процессах обычно не играет большой роли.

Раскисление стали с помощью кислых и основных шлаков протекает при контакте шлаковой и металлической фаз как на основе обменных реакций, так и путем диффузионного раскисления.

Сварочный шлак образуется при сварке на поверхности расплавленного металла и предохраняет металл от действия кислорода и азота воздуха. Шлак также растворяет в себе закись железа, замедляет процесс охлаждения шва, улучшает структуру и механические свойства металла шва, а при наличии стабилизирующих и легирующих компонентов повышает устойчивость горения дуги и способствует легированию металла шва.

Основные свойства шлаков:

- 1) температура плавления выше температуры образования окислов;

2) хорошая вязкость, обеспечивающая высокое качество шва и легкость отделения шлака от металла;

3) способность быстрого перехода из жидкого состояния в твердое;

4) способность растворять металлы, сульфиды и другие соединения, связывать окислы в нерастворимые соединения, также раскислять железо;

5) в твердом состоянии способность легко отделяться от наплавленного металла шва;

6) в жидком состоянии плотность ниже плотности жидкого металла.

Раскисление металла кислыми шлаками, в которых есть оксид кремния. В таких шлаках наблюдается реакция связывания **FeO** в комплексы – силикаты железа, не растворимые в металле:



Связывание закиси **FeO** в силикаты вызовет дополнительный переход ее из металла в шлак.

Таким образом, при использовании кислых шлаков для уменьшения содержания закиси железа в металле шва следует увеличить содержание кислотного оксида **SiO₂** в шлаке.

Раскисление металла основными шлаками, в которых в отличие от кислых шлаков есть избыток основных оксидов, наиболее сильным из них является **CaO**. Такие шлаки не обладают способностью к диффузионному раскислению, т. к. имеющиеся в них незначительные количества **SiO₂** или **TiO₂** сразу же будут связываться в комплексные соединения с основными оксидами шлака, т. е.



и шлак не будет извлекать **FeO** из металла. Для раскисления металла с сохранением в нем полезных легирующих элементов в основные шлаки вводят специальные добавки – раскислители. Они ведут себя так же, как при осадочном раскислении металла шва, но продукты раскисления переходят в шлак.

Отсюда следует, что для того чтобы снизить содержание FeO в стали, нужно увеличить в шлаке количество раскислителя и уменьшить содержание оксида раскислителя в шлаке. Продукты раскисления перейдут в шлак, который в результате обогащения этими оксидами, потеряет свою раскисляющую способность.

Проведение раскислительных процессов хотя и снижает содержание кислорода в металле до минимума, но не восполняет целиком потерю полезных элементов вследствие их частичного выгорания и испарения. Вместе с тем, раскисление не дает возможности обогатить металл специальными легирующими элементами, чтобы придать ему особые (*служебные*) свойства. Эти задачи выполняют во время другой металлургической операции – легирования, осуществляемой одновременно с раскислением металла сварочной ванны.

7.9.2 Легирование наплавленного металла

Легирование наплавленного металла осуществляется с соблюдением следующих важных требований:

- 1) в качестве легирующих следует применять элементы, сродство которых к кислороду меньше, чем сродство раскисляющих элементов;
- 2) наряду с легирующим элементом целесообразно вносить в зону сварки и его оксид, наличие которого предохраняет легирующий элемент от выгорания.

Принципиально возможно осуществить легирование металла *двумя путями*: через металлическую фазу и через шлаковую.

При легировании через металлическую фазу легирующий элемент вводят в электродный стержень или присадочную проволоку, а также применяют проплавление легированного основного металла, сопровождающееся переходом соответствующих элементов в сварочную ванну.

Легирование через шлаковую фазу предполагает введение легирующих элементов в электродное покрытие или флюсы.

Первый путь легирования (*через металлическую фазу*) более эффективен, т. к. при этом потери легирующего элемента незначительны и переход легирующего элемента в сварочную ванну оказывается достаточно высоким.

Легирование металла шва происходит во всех участках зоны сварки и на всех ее этапах, однако энергичнее и полнее – в процессе каплеобразования.

Наиболее эффективен метод легирования сварочной ванны путем ввода легирующих элементов, минуя стадию капли, в составе дополнительной легирующей присадочной проволоки при сварке с дополнительной горячей присадкой.

7.10 Рафинирование сварочной ванны и модифицирование металла шва

Третья важная металлургическая операция, протекающая в сварочной ванне одновременно с раскислением и легированием металла, – его рафинирование, т. е. очищение от вредных примесей – серы и фосфора. Полное удаление этих примесей при плавке и сварке стали невозможно. Однако для рафинирования металла шва по содержанию серы условия сварочного процесса в общем более благоприятны, чем в сталеплаильном производстве. Наиболее существенными из них являются следующие:

1) более высокая температура металла и шлака, особенно на стадии образования капель ($T_k = 3000$ К), что способствует диссоциации сернистых и фосфорных соединений, ослабляет их химические связи и тем самым облегчает удаление серы и фосфора из металла шва в шлак;

2) интенсивное перемешивание металла со шлаком в кипящих каплях и в сварочной ванне увеличивает относительную массу шлака в 100...1000 раз по сравнению с относительной массой шлака при плавке стали;

3) использование специальных рафинирующих компонентов: кальция **Ca**, церия **Се**, лантана **La**, иттрия **I** и других в электродных покрытиях или сварочных флюсах позволяет провести удаление или связывание вредных примесей.

Таким образом, несмотря на кратковременность взаимодействия металла со шлаком, при сварке плавлением есть возможность получать металл шва с меньшим содержанием серы и фосфора, чем в основном металле.

7.10.1 Влияние серы на структуру и свойства шва

Источниками поступления серы и фосфора в зону сварки служат: флюсы и электродные покрытия, в состав которых входят компоненты, содержащие примеси серы, например, марганцевые руды, а также расплавленные основной и электродный металлы.

Содержание серы в металле в количестве, превышающем допустимые нормы, резко снижает его механические свойства и является причиной *красноломкости* металла, а при сварке приводит к появлению в шве *кристаллизационных трещин*.

Механизм влияния примесей серы на наплавленный металл состоит в следующем. В сталях сера образует с железом сульфид железа FeS , температура плавления которого составляет 1468 К, т. е. ниже температуры плавления стали на ~300 К. Сульфид железа почти не растворяется в твердом железе.

При кристаллизации шва FeS выделяется из него и соединяется с другими примесями в виде *легкоплавкой сернистой эвтектики* или в виде отдельных включений разного вида.

В процессе направленной кристаллизации металла шва, протекающем в интервале температур ликвидус – солидус, эти легкоплавкие сернистые эвтектики оттесняются растущими кристаллитами металла шва к границам между кристаллитами и к месту их стыка (*в центральной части сварочной ванны*) и становятся частью, так называемых, межкристаллитных прослоек. К моменту окончания кристаллизации металла шва, такие межкристаллитные прослойки могут быть еще в жидком состоянии ($T_c < T_s$). Если возникнут растягивающие напряжения от усадки шва и временных сварочных деформаций в шве, то возможно появление на этих участках горячих трещин кристаллизационного типа (рисунок 7.4).

Участки швов с сернистыми эвтектиками, не разрушившиеся при кристаллизации, имеют пониженные механические

свойства и потенциально склонны к разрушению как при высоких, так и при низких температурах.



*Горячая
трещина*

Рисунок 7.4 – Макроструктура центра шва (x200) в зоне срастания кристаллитов передними гранями
(в правой части – горячая трещина)

7.10.2 Десульфатация сварочной ванны

Для снижения содержания серы в металле шва нужно вводить в сварочную ванну такие элементы, которые имели бы к сере большее сродство, чем железо. Кроме того, образующиеся сульфиды этих элементов должны удовлетворять следующим требованиям: обладать более высокой, чем у железа или никеля, температурой плавления и не создавать сульфидных легкоплавких эвтектик.

По степени возрастания химической прочности образующихся сульфидов элементы, вводимые для десульфатации сварочной ванны, располагаются в следующей последовательности: **Al, Ca, Na, Mn, Mg**. Из числа перечисленных элементов наибольший интерес с этой точки зрения представляет *марганец*, поскольку:

- 1) он имеет сравнительно высокое сродство к сере;
- 2) как правило, он присутствует в свариваемых сталях в сравнительно больших количествах (0,5...0,65 %);

3) **Mn** мало растворим в **Fe** и образует тугоплавкий и пластичный сульфид шаровидной формы, равномерно распределяющийся преимущественно в объемах зерен;

4) при концентрации марганца в стали более 0,6 %, он способствует переходу серы из **FeS** в **MnS**, т. е. в шлак.

Марганец полезен главным образом как элемент, переводящий серу в более благоприятную форму существования в стали. Кроме того, сульфид марганца слабо растворим в металле и хорошо – в шлаке, поэтому он в значительном количестве переходит в шлак. Оставшийся в металле **MnS** распределяется в мелкодисперсном виде достаточно равномерно в объеме зерен и не образует легкоплавких эвтектик.

Вторым элементом – десульфатором служит кальций.

Ввод кальция дает следующие положительные результаты:

1) газообразный кальций активно реагирует одновременно с серой и кислородом расплавленной стали, образуя свойственные только ему специфические соединения оксисульфиды.

2) при использовании кальция возможно связывание серы известью **CaO**. Эта реакция приводит к образованию прочного и тугоплавкого сульфида кальция, практически не растворимого в металле.

Введение в шлак окиси кальция будет способствовать уменьшению содержания **FeS** и обеспечивать лучшее раскисление металла. Увеличение содержания **CaO** в шлаке обеспечивает более полный переход серы из металла в шлак.

7.10.3 Снижение содержания фосфора в металле шва

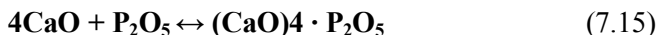
Фосфор, как и сера, является вредной примесью, ухудшающей механические свойства стали, особенно при пониженной температуре, т. е. вызывающей ее *хладноломкость*. Это объясняется тем, что в сталях фосфор образует частично растворимые в феррите фосфиды **Fe₃P** или **Fe₂P**.

Удаление фосфора из сварочной ванны основано на его окислении в составе фосфидов и последующем связывании фосфорного ангидрида **P₂O₅** в прочное комплексное соединение, лег-

ко переходящее в шлак. Окисление фосфора развивается в сварочной ванне в соответствии со следующей реакцией:



Затем идет процесс связывания фосфорного ангидрида.



Полнота его удаления в шлак будет зависеть от содержания в шлаке следующих соединений:

- 1) свободных оксидов **CaO** и **FeO**, с увеличением содержания которых интенсифицируется очищение металла от фосфора;
- 2) комплексного соединения, связывающего фосфор, например, **(CaO)₄·P₂O₅**.

Уменьшение содержания свободных оксидов и комплексных соединений в шлаке способствует очищению металла от фосфора. Этого достигают *разбавлением шлаков* соответствующими нейтральными добавками, например, плавиковым шпатом, который одновременно разжижает шлак, а также повышает его общую реакционную способность.

Таким образом, основные шлаки могут обеспечить необходимое очищение металла шва от фосфора. Кислые шлаки значительно хуже удаляют фосфор из металла.

При сварке в среде защитных газов удаление фосфора из металла шва связано с большими трудностями. Главным фактором сохранения высоких значений механических свойств является предельное снижение фосфора в основном металле, а в шве – предотвращение образования структуры линейной формы путем управления схемой кристаллизации. В легированных и высоколегированных сталях содержание фосфора снижается до 0,002...0,003 %.

7.10.4 Модифицирование металла шва

Модифицирование металла шва направлено на измельчение кристаллитов шва. Оно осуществляется введением в жидкий ме-

талл зародышей, т. е. твердых частиц, на гранях которых могут оседать атомы металла. Чем больше таких активных частиц, тем больше число зарождающихся кристаллитов и тем меньше их размеры. В качестве зародышей служат атомы тугоплавких металлов или их соединения, обладающие *изоморфностью*, т. е. таким же, как у металла шва, типом кристаллической решетки и близкими размерами.

Наиболее часто модифицируют сталь *титаном и цирконием*. В алюминиевых сплавах наилучшим модификатором является скандий Sc.

7.11 Дефекты металлургического происхождения в сварных швах

7.11.1 Поры в металле шва

Расплавленный металл капель и сварочной ванны может сильно насыщаться газами в результате химических реакций, протекающих между металлом, газовой и шлаковой фазами. Растворимость водорода, азота и кислорода в нагретом до высоких температур жидком металле значительно выше, чем в твердом металле при температуре его кристаллизации. Поэтому в период кристаллизации металла сварочной ванны в затвердевающей части может начаться интенсивное газовыделение, обусловленное значительным снижением растворимости газов. Особенно резко снижается растворимость водорода в кристаллизующихся алюминии и его сплавах, а после их затвердения растворимость в них водорода близка к нулю.

Поры могут быть вызваны как растворимыми в металле газами (H_2 , N_2), так и нерастворимыми, образующимися в самом металле (CO , H_2O , OH). Появлению пор в металле шва способствует загрязненность металла ржавчиной. При сварке металла, покрытого ржавчиной, оксид углерода CO (*продукт реакции между углеродом и кислородом в жидком металле*) может образовать поры. Водород при этом лишь увеличивает размеры образующихся газовых пузырьков, диффундируя в них и переходя в молекулярную форму. Причиной возникновения пор может быть и водород, а также азот,

интенсивно растворяющиеся в жидком металле и не успевающие в момент кристаллизации полностью выделиться из него.

Для борьбы с пористостью, вызываемой образованием окиси углерода, нужно сохранять в сварочной ванне достаточное количество раскислителей, способных подавить реакцию окисления углерода в момент кристаллизации металла сварочной ванны.

Технологические способы борьбы с порами предусматривают применение соответствующих режимов, замедляющих кристаллизацию металла сварочной ванны (*например, повышение погонной энергии $q/V_{св}$*) и мер, снижающих поглощение газов расплавленным металлом, особенно при его переносе через газовую фазу, например, применение короткой дуги. Рекомендуется зачищать свариваемые кромки металла и присадочную проволоку от ржавчины и других загрязнений.

При сварке под флюсом форма сварочной ванны более благоприятна для получения плотного шва. Это объясняется следующими причинами:

- 1) растворение газов в жидком металле ограничено, т. к. нет непосредственного контакта его с газовой средой;
- 2) металлическая ванна обычно имеет чашеобразную форму и при **перемещении фронта кристаллизации снизу вверх** создают благоприятные условия для удаления растворенных газов;
- 3) замедленное охлаждение металла сварочной ванны.

7.11.2 Шлаковые включения в металле шва

Шлаковые включения в металле шва (*различные оксиды и частично сульфиды*) образуются в самой сварочной ванне. Шлаковые включения могут располагаться в междендритных пространствах, на границах столбчатых кристаллитов, а также в местах их стыка по оси шва.

Состав шлаковых включений может быть различным в зависимости от характера шлака. Включения, образующиеся при сварке с применением кислых шлаков, имеют мелкодисперсный характер. Основные шлаки дают более крупные включения с меньшим содержанием силикатов. Число и размеры шлаковых включений в металле

при данном составе шлака и металла зависят от следующих важных факторов:

- 1) способности шлаковых частиц к коагуляции, т. е. к укрупнению путем слияния;

- 2) скорости всплывания шлаковых частиц в жидком металле.

Способность шлаковых частиц к коагуляции зависит от температуры металла, поверхностного натяжения на границе шлаковая частица – жидкий металл, от вязкости как включений, так и жидкого металла и др. Чем выше температура металла и поверхностное натяжение шлака, чем меньше их вязкость – тем легче протекает их коагуляция. Тугоплавкие включения в виде комплексов, имеющие повышенную вязкость, плохо коагулируют и поэтому распределяются в металле в дисперсном виде.

Скорость всплывания шлаковых частиц зависит от их размера, вязкости металла, разности плотностей шлаковых частиц и металла и др.

Скорость всплывания частиц тем больше, чем крупнее частица и чем меньше ее плотность и вязкость металла, в котором она движется.

На скорость всплывания шлаковых частиц заметно влияют наличие **конвективных потоков** в металле, выделение из металла пузырей, перемешивающих металл и увлекающих шлаковые частицы к поверхности сварочной ванны. Значительная часть шлаковых частиц выталкивается к поверхности сварочной ванны растущими кристаллитами металла шва.

Форма и размер шлаковых включений оказывают заметное влияние на механические и физические свойства металла шва. Крупные остроугольные включения (*более 5 мкм*) снижают выносливость металла шва – пределы усталости. Мелкие включения (*менее 5 мкм*) округлой формы не влияют на предел прочности и пластичности при статических испытаниях сварной конструкции, а также на предел усталости металла, но их увеличение сопровождается некоторым снижением ударной вязкости и повышением склонности швов к кристаллизационным трещинам.

7.11.3 Ликвационная неоднородность в металле шва

Ликвацией называется возникающее при неравновесной кристаллизации неравномерное распределение элементов, химических соединений и других составляющих в металле.

К числу сильно ликвирующих элементов относятся кислород, углерод, сера и фосфор.

В металле шва наблюдаются преимущественно два вида ликвации – *дендритная и зональная*. В свою очередь, дендритная ликвация может быть двух видов: *внутрикристаллитная и межкристаллитная*.

В первую очередь кристаллизуется металл вдоль осей будущих кристаллов; он содержит минимальное количество примесей и близок по составу к исходному. При снижении температуры оси будущих кристаллов обрастают кристаллизующимся металлом, и эти участки постепенно обогащаются примесями, которые особенно сильно насыщают последние порции кристаллизующегося металла.

Межкристаллитная ликвация является результатом отеснения к границам растущих кристаллов различных легкоплавких эвтектик и примесей, создающих межкристаллитные прослойки. Особую опасность представляют располагающиеся здесь легкоплавкие эвтектики типа сернистых и силикатных, вызывающие горячие микротрещины.

Зональная ликвация вызывается неодновременной кристаллизацией периферийной и центральной частей шва. По мере роста кристаллитов остающаяся жидкость отесняется в центральную область шва и оказывается наиболее загрязненной различными вредными примесями. Этот участок шва называют зоной «*слабины*». Она выявляется при ударной нагрузке.

Очень заметна зональная ликвация в однослойных швах большого сечения в глубоких сварочных ваннах, где возникает плоская схема кристаллизации.

Ликвация в сварных швах снижает механические свойства металла, т. к. ослабляет связь между кристаллитами, и служит одной из причин появления кристаллизационных трещин.

Для уменьшения химической неоднородности и повышения стойкости металла к образованию кристаллизационных трещин следует оптимизировать соотношение между глубиной H и шириной B сварочной ванны. Коэффициент формы ванны зависит от многих факторов: способа и режима сварки, состава металла, сварочных материалов и т. д.

$$\psi = \frac{B}{H}. \quad (7.16)$$

Узкая глубокая сварочная ванна ($\psi < 2$) создает неблагоприятную схему кристаллизации металла, когда кристаллы, растущие по нормали к поверхности охлаждения, срастаются передними гранями в центральной части шва.

Вопросы для самопроверки

1. Под действием каких сил осуществляется перенос электродного металла в сварочную ванну?
2. Назовите виды переноса электродного металла через дуговой промежуток.
3. От каких факторов зависит размер электродных капель?
4. Что влияет на время существования капель?
5. К чему приводит диссоциация в зоне столба дуги?
6. Каков механизм насыщения жидкого металла газами?
7. В чем проявляется различное влияние азота и кислорода на свойства стали?
8. Как влияет водород на свойства стали?
9. Как влияет окисление углерода на свойства металла шва?
10. Назовите требования к сварочным флюсам.
11. На чем основаны молекулярная и ионная теории шлаков?
12. Как оценивают кислотность или основность шлаков?
13. В чем различие «длинных» и «коротких» шлаков?
14. Укажите главные компоненты, входящие в состав сварочных флюсов.
15. Назовите три основные системы сварочных флюсов.
16. Перечислите металлургические функции шлаков.

17. Что такое коэффициент эффективности массообмена и как его определяют?
18. Назовите виды раскислительных процессов при сварке.
19. Почему обычно применяют несколько раскислителей?
20. Каков механизм диффузионного раскисления стали шлаком?
21. Как легируют металл шва?
22. Что такое коэффициент перехода элемента?
23. Каков механизм уменьшения содержания серы и фосфора в стали?
24. Каков механизм возникновения пор в металле шва?
25. Какие газы могут быть причиной пористости сварных швов?
26. Каковы причины образования шлаковых включений в металле шва?
27. Что усиливает ликвацию и как она влияет на качество металла шва?

8 ОСОБЕННОСТИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ СВАРКЕ ПЛАВЛЕНИЕМ [1-5, 8-10, 12]

Сварка плавлением является высокотемпературным процессом, при котором возможны существенные изменения состава металла сварного соединения (*следовательно, и его механических свойств*) в результате взаимодействия с окружающей средой. Металлы, имеющие высокую химическую активность, при контакте с атмосферой могут образовывать оксиды, нитриды и гидриды, а при контакте с флюсом – терять ценные легирующие элементы. Скорость химических реакций и диффузионных процессов при температурах сварочного цикла настолько высока, что даже за малый промежуток времени могут произойти существенные и нежелательные изменения состава металла шва.

Современные физические и физико-химические методы защиты металла при сварке реализуются в различных сочетаниях при всех способах сварки плавлением, известных в настоящее время. Широко применяются четыре основных вида защиты металла в зоне сварки: 1) шлаковая защита; 2) газовая защита; 3) вакуумная защита; 4) газосшлаковая защита.

8.1 Шлаковая защита при дуговой сварке под флюсом

8.1.1 Формирование шлаковой защиты сварочной ванны при дуговой сварке

Шлаковая защита сварочной ванны реализуется при автоматической и механизированной дуговой сварке под слоем флюса (рисунок 8.1), а также при электрошлаковой сварке.

Электрический дуговой разряд, возникающий между деталью и электродной проволокой, перемещаемой вдоль свариваемого шва механическим устройством, поддерживается в замкнутой полости под расплавленным флюсом и флюсом в вязком полужидком состоянии. Образующиеся при этом газы дуговой атмосферы – пары металла и компонентов флюса – **создают давление** внутри флюсовой полости выше, чем давление окру-

жающей атмосферы. Это обеспечивает защиту зоны сваривания от воздуха.

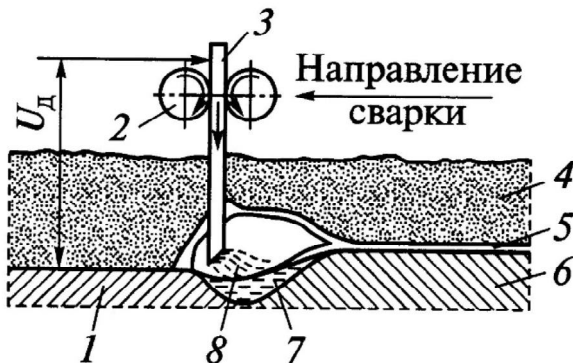


Рисунок 8.1 – Схема флюсовой защиты металла при сварке:

- 1 – свариваемый металл; 2 – подающие ролики;
- 3 – электрод; 4 – слой гранулированного флюса;
- 5 – расплавленный флюс; 6 – шов; 7 – сварочная ванна;
- 8 – дуга в газовой полости

Кроме того, в местах контакта жидкого флюса с металлом электрода и сварочной ванны происходят все основные реакции металлургических процессов раскисления, легирования, рафинирования. Продукты этих реакций, не растворимые в металле, имеют меньшую плотность, объединяются с расплавленным флюсом в легкоплавкие комплексы – шлаки, которые сосредотачиваются над жидким металлом ванны и после затвердевания легко отделяются от металла шва. Дуговая сварка под флюсом обеспечивает хорошее формирование геометрии сварного шва и высокое качество металла. Она применима для большинства конструкционных сплавов на основе железа, никеля, меди, титана и алюминия.

Однако для получения сварных соединений высокого качества из различных сталей и сплавов необходим обоснованный выбор составов сварочного флюса, электродной проволоки и режимов сварки.

8.1.2 Способы изготовления сварочных флюсов

При механизированной дуговой сварке под флюсом используются различные флюсы:

1) плавные, получаемые сплавлением входящих в них компонентов в электрических или пламенных печах и последующим дроблением на гранулы;

2) керамические, получаемые гранулированием сырой массы тонкоизмельченных компонентов, соединенных между собой жидким стеклом.

В отличие от плавных флюсов керамические флюсы могут содержать металлические порошки – раскислители и легирующие компоненты, т. к. в процессе изготовления керамические флюсы не подвергаются нагреву до высокой температуры и расплавлению.

Наибольшее распространение в производстве получили **плавные флюсы** различных марок. Плавные флюсы по своему составу и назначению делятся на кремнемарганцевые, предназначенные для сварки низколегированных сталей различных марок, и фторидные, предназначенные для сварки высоколегированных сталей, титановых сплавов и других активных металлов. Кремнемарганцевые флюсы имеют различные составы в зависимости от того, стали каких марок подвергаются сварке, т. к. при взаимодействии со шлаком состав металла сварочной ванны может изменяться. Флюсы разделяются также и по своим физическим свойствам: по структуре гранул они делятся на **стекловидные и пемзовидные**, по характеру изменения вязкости – на «длинные» и «короткие», по характеру взаимодействия с металлом – на **активные и пассивные**, которые применяются при сварке среднелегированных сталей.

Керамические флюсы классифицируют по назначению и химическому составу.

По назначению различают флюсы для сварки и наплавки углеродистых и легированных сталей, цветных металлов и сплавов.

По химическому составу шлакообразующей массы флюсы могут быть отнесены к кислым, нейтральным и основным.

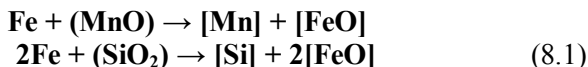
8.1.3 Особенности металлургических процессов при дуговой сварке под слоем плавленных и керамических флюсов

При дуговой сварке под флюсом следует различать:

1) **высокотемпературную зону**, где металл нагревается до температуры, близкой к кипению. Она охватывает переднюю стенку сварочной ванны, плавящийся торец электрода, капли металла, проходящие дуговой промежуток, а также активное пятно дугового разряда на дне сварочной ванны;

2) **низкотемпературную зону**, включающую хвостовую часть сварочной ванны, где температура приближается к температуре кристаллизации металла и происходят процессы кристаллизации, обменные реакции между шлаком и металлом, их конвективное перемешивание, выделение газов и пр. Главная особенность процесса – обратимость реакций в обеих зонах.

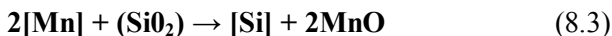
В высокотемпературной зоне под флюсом, содержащим **MnO** и **SiO₂**, интенсивно развиваются реакции, приводящие к легированию капель железа кремнием и марганцем и одновременно к их окислению компонентами флюса (*в результате образования закиси железа, растворяющейся в каплях*):



В этой же зоне может происходить окисление углерода стали оксидами железа:

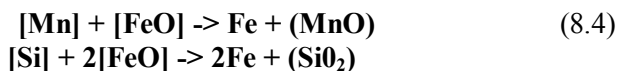


Обычно материал электродных проволок имеет пониженное содержание углерода, поэтому реакция (8.2), приводящая к выделению газа – оксида углерода **CO** – из капли, не происходит. Кроме того, окислению углерода препятствует кремний, который восстанавливается марганцем из **SiO₂** при высоких температурах:



В шлаке **FeO** переходит в соответствующие комплексы, например, в силикаты ($\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$).

Обогащенный кремнием и марганцем металл в виде капли попадает в низкотемпературную зону сварочной ванны. При понижении температуры, реакции (8.1) идут в обратном направлении, т. е. эти элементы (*кремний и марганец*) начинают раскислять металл и их концентрации в металле шва снижаются, приближаясь к исходным:



Поскольку основная часть **FeO** извлечена шлаком, то металл шва после раскисления, согласно реакциям (8.4), будет содержать больше **Si**, чем его исходное содержание. Часть **Mn** при этом расходуется на восстановление **Si**; следовательно, имеет место легирование при сварке.

При автоматической сварке, для более эффективного легирования, в сварочную ванну подают дополнительную присадочную проволоку в нагретом состоянии. Такой процесс называют *сваркой с дополнительной горячей присадкой*. Металл присадочной проволоки расплавляется теплом жидкого металла в глубине сварочной ванны. Поэтому он не взаимодействует с газами дуги, не перегревается, не проходит стадию капли и не насыщается водородом. Кроме того, он практически не взаимодействует со шлаком, что позволяет сохранить в полной мере все содержащиеся в проволоке легирующие элементы, химически активные модификаторы и рафинирующие элементы (*итрий, церий, лантан и др.*).

Керамические, или неплавленные, флюсы для сварки металлов позволяют сохранять все преимущества механизированной сварки под слоем плавного флюса (*малые потери металла, высокая производительность, высокое качество сварных соединений*), но в то же время позволяют легировать и раскислять металл сварочной ванны в очень широких пределах, используя осадочное легирование при вводе ферросплавов в составе флюса.

Высокая раскислительная способность керамических флюсов позволяет вести сварку даже по окисленным кромкам (*при монтажных работах в строительстве, в судостроении*). Керамические флюсы используют для сварки сталей различного легирования и для сварки цветных металлов: меди и ее сплавов, алюминия и его сплавов и др. Основной недостаток керамических флюсов состоит в том, что они обладают **повышенной гигроскопичностью**, не допускают высокотемпературной прокалки ($T \leq 873 \text{ K}$), что приводит к повышенному содержанию водорода в сварных швах. Кроме того, для хранения керамических флюсов требуется герметичная тара и перед сваркой их нужно прокаливать.

8.1.4 Влияние параметров режима сварки на развитие металлургических процессов при сварке под флюсом

Главными параметрами режима сварки являются напряжение на дуге (напряжение дуги) U_d , связанное с длиной дуги, сила сварочного тока I_d и скорость сварки $V_{св}$. Вместе они определяют вложение энергии при сварке, которое выражается **погонной энергией** $q/V_{св}$. Однако эти параметры по-разному влияют на металлургические процессы формирования металла шва. Наибольшее влияние имеет напряжение на дуге, увеличение которого усиливает окислительно-восстановительные процессы на границе раздела металл – шлак.

Повышение разности потенциалов на дуге увеличивает длину дуги и, следовательно, «*растягивает*» высокотемпературную область сварки, а также увеличивает температуру перегрева капель металла, проходящих через дуговой промежуток. Повышение температуры также способствует переходу **Mn** из шлака в металл.

Сварочный ток почти не влияет на процессы легирования и раскисления металла.

8.1.5 Снижение содержания водорода в металле шва при сварке под флюсом

Содержание водорода в сварочной ванне в процессе сварки может быть существенно снижено следующими способами:

1) прокалкой сварочных материалов (*флюсов, присадочных проволок*). Температура прокалики флюса зависит от состава флюса и может изменяться от 627 до 1232 К;

2) проведением операции сушки перед прокалкой при температуре 373...627 К;

3) сокращением времени между прокалкой и сваркой (*для пемзовидных не более 4 ч, а для стекловидных не более 8 ч*).

Керамические флюсы просушивают в интервале 313...363 К, а прокаливают при 873 К. Более высокая температура прокалики (1232 К), применяемая для плавленных флюсов, не допустима для керамических флюсов, т. к. приводит к окислению металлических добавок, входящих в состав флюса. Поэтому, при прочих равных условиях, применение керамических флюсов приводит к повышению содержания водорода в металле шва по сравнению с его содержанием при применении плавленных флюсов;

4) очисткой свариваемых кромок от ржавчины, окалины и масляных пленок;

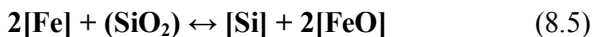
5) применением постоянного тока обратной полярности (*вместо переменного*), препятствующего электростатическому притяжению положительно заряженных ионов H_2^{2+} к аноду.

8.1.6 Принципы выбора состава флюсов для сварки сталей и сплавов. Флюсы для сварки низкоуглеродистых сталей

При сварке низкоуглеродистых сталей (*Ст3сп, сталь 20*) необходимо сохранить углерод как единственный упрочнитель. Для этого применяют кислые флюсы и электродные проволоки двух систем.

В отечественной практике применяют высокомарганцовистый флюс – силикат ($MnO+SiO_2$) в сочетании с низкоуглеродистой проволокой Св–08А или Св–08АА. В зарубежной практике применяют безмарганцевый высококремнистый флюс в сочетании с высокомарганцовистой проволокой. Общим в обеих практиках являются легирование капли и сварочной ванны кремнием за счет кремневосстановительного процесса и легирование ме-

талла сварочной ванны марганцем через флюс или проволоку. Реакция в капле имеет вид:



Для кипящих сталей, практически не содержащих **Si**, она имеет особо важное значение, т. к. только при содержании кремния в жидкой сварочной ванне не ниже 0,2 %, можно предотвратить в ней реакцию окисления углерода.

Ввод кремния позволяет сохранить прочность шва и одновременно исключить образование пор при выделении из сварочной ванны оксида углерода **CO**. Наличие в каплях и сварочной ванне при высоких температурах значительного количества **FeO** способствует обогащению ванны кислородом, который связывает водород и препятствует образованию других (*водородных*) пор. При отсутствии кремния углерод выгорает. Наряду с защитой углерода и железа, кислые флюсы обеспечивают легирование металла шва элементами **Si** и **Mn**. Кислые флюсы способствуют *рафинированию* сварочной ванны с помощью **Mn** и **MnO**, связывающих серу в тугоплавкие соединения (*MnO выводит серу в шлак*).

Наибольшее распространение получили плавленые флюсы АН-348А, ОСЦ-5, ФЦ-6, ФЦ-3, ФЦ-9, АН-60, а также керамические АНК-25, FB-106, SPSMn-35/100.

Флюсы для сварки низколегированных сталей. Низколегированные стали содержат в сумме не более 5 % легирующих элементов, причем содержание каждого из них не превышает 2 % (*10ХСНД, 09Г2С, 16Г2АФ и др.*).

Такие стали являются металлургически законченными продуктами, т. е. в них прошли все реакции раскисления, легирования, модифицирования и рафинирования. Основная задача при их сварке сводится к *сохранению их механических свойств* путем защиты сварочной ванны от влияния атмосферы и взаимодействия с флюсом. При выборе флюсов следует руководствоваться предельно низкими значениями коэффициента химической активности флюса в зависимости от эквивалента углерода при сохранении высокого уровня ударной вязкости металла

шва в исходном, т. е. без термической обработки, состоянии ($KCV > 100 \text{ Дж/см}^2$).

Сюда относятся плавленые флюсы на базе шлаковой системы $\text{CaO-MnO-CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ следующих марок: ФЦ-11, ФЦ-15, ФЦ-16, ФЦ-22, АН-15, АН-42, АН-43, АН-47, FB-10, FB-20, ФВТ-1, F-202 и F-302. Их температура плавления составляет 1573...1623 К. Применяют и керамические флюсы АНК-47, АНК-44, АНК-30, АНК-57, FC-60, FC-40. Они обеспечивают уровень ударной вязкости до 200 Дж/см при 293 К и рекомендуются для сварки конструкций, работающих в условиях Крайнего Севера.

Флюсы для сварки среднелегированных сталей.

Среднелегированные стали содержат от 5 до 10 % легирующих элементов. К ним относятся стали марок 30ХГСНА, Х5М, 18ХН4МДА, 15ХНМФА, 30Х4НМФА и другие, имеющие наиболее высокие механические свойства ($\sigma_{\text{в}}$ до 1800 МПа). Поэтому их называют также высокопрочными. Как правило, они содержат до 0,30 % углерода наряду с другими легирующими элементами. **Основные проблемы** при сварке высокопрочных сталей заключаются в том, чтобы исключить образование горячих и холодных трещин, предотвратить загрязнение серой, фосфором и другими элементами и сохранить химический состав сталей, а, следовательно, и их свойства. Для решения этих проблем применяют флюсы, содержащие в качестве основы **СаО** и CaF_2 , что позволяет понизить уровень водорода в зоне сваривания, уменьшить его химическую активность, усилить рафинирующее действие (*очистить швы от серы и фосфора*).

Для сварки сталей рассматриваемой группы рекомендуются малоактивные и пассивные флюсы. К ним относятся флюсы АН-15, АН-15М, АВ-5 и АВСМ2, входящие в шлаковую систему $\text{CaO-CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$.

Более сложные шлаковые системы имеют флюсы АН-45, АН-17М и ФИМС-20П. Эти флюсы обеспечивают снижение содержания в шве диффузионного водорода, что позволяет использовать их для сварки высокопрочных сталей, склонных к закально-водородным (*холодным*) трещинам. Флюс НФ-18М

применяют для сварки среднелегированных сталей типа 15ХНМФА.

Флюсы для сварки высоколегированных коррозионно-стойких сталей. При сварке таких сталей решают две главные задачи:

1) сохранение коррозионной стойкости в зонах шва и термического влияния;

2) предотвращение образования горячих трещин.

Применяют пассивные флюсы на основе $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-CaF}_2$, с добавкой SiO_2 для улучшения отделяемости шлаковой корки.

Для сохранения в шве хрома **Cr** – главного элемента, обеспечивающего коррозионную стойкость, в состав флюсов (например, ФЦ–19, ФЦ–17, F–624) вводят его оксид Cr_2O_3 , что препятствует окислению хрома в ванне.

Для подавления вредного влияния серы и фосфора во флюсах (например F–624) должно содержаться много **MnO** (8... 11 %), очищенного от фосфора и серы. К таким флюсам относятся плавленные флюсы ОФ–6М, ОФ–6, F–624, F–402, АН–26С, АН–18, ФЦ–17, ФЦ–19. Возможно также применение керамических флюсов, изготовленных из порошков: CaO , CaF_2 , MgO , ферросплавов (раскислителей и легирующих элементов, скрепленных жидким стеклом). К ним относятся керамические флюсы SPS/375, АНК–45, ФЦК и ФЦК–С.

Флюсы для сварки никеля и его сплавов. Основные проблемы сварки этих сплавов связаны с их большой чувствительностью к вредным примесям серы и фосфора, растворенным газам, которые вызывают образование пор и горячих трещин. Поэтому активные плавленные флюсы непригодны для сварки никеля НП–1, НП–2 и его сплавов типа ХН77ТЮ. Положительные результаты получены при дуговой сварке под фторидным и высокоосновным флюсом АНФ–5 на базе $\text{CaF}_2\text{-NaF}$, имеющим температуру плавления 1223... 1423 К и оказывающим модифицирующее действие натрием. Эффективен также флюс ИМЕТФ на базе $\text{CaF}_2\text{-BaCl}_2$ с добавками фторидов NaF и SrF_2 . Флюс АНФ–22 позволяет легировать шов бором до 0,6 %, что предотвращает образование горячих трещин.

Возможно применение керамических флюсов ФЦК, а также ЖН-1, который легирует металл шва элементами Mn, Ti и Al и обеспечивает его раскисление, рафинирование и модифицирование.

Флюсы для сварки меди и медных сплавов. Главное достоинство меди – сочетание хорошей электропроводности, теплопроводности и высокой коррозионной стойкости. Сохранение чистоты меди в швах необходимо для обеспечения указанного комплекса ее свойств.

При окислении меди образуется Cu_2O , не растворимый в твердой меди, но растворимый в жидкой меди. При кристаллизации Cu_2O образование паров воды и углекислого газа, которые не могут выделиться из металла диффузионным путем, что может привести к образованию пор и трещин (*«водородная болезнь» меди*).

Вследствие малой химической активности меди и ряда ее сплавов при сварке применяют следующие стандартные плавильные флюсы: ОСЦ-45, АН-348, АН-60, ФЦ-10, АН-26, АН-22, АН-20, разработанные для сварки сталей. Для сохранения в шве чистоты меди применяют низкремнистые флюсы АН-20, а также специальные флюсы для меди АНМ-1, АНМ-2 и электродную проволоку из бескислородной меди **М1** или **МБ**. Для сварки листов меди большой толщины применяется флюс АН-26.

Для сварки латуней ($\text{Cu}+\text{Zn}$) применяют флюсы АН-20, АНФ-5 и МАТИ-53, ФУ-10. Для сварки меди применяют также специальные керамические флюсы ЖМ-1 и К-13МВТУ. Шлаковая система флюса ЖМ-1 включает: $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{CaF}_2$ с добавкой раскислителей: углерода и буры ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot \text{MgO}$). Роль углерода состоит в превращении окислителя CO_2 в газовой среде в восстановительный газ CO по реакции $\text{C} + \text{CO}_2 = 2\text{CO}$.

Флюсы для сварки титана и сплавов на его основе. Титан обладает высокой химической активностью и при нагревании активно взаимодействует с O_2 , N_2 , H_2 , С. Основная проблема свариваемости **Ti** и его сплавов связана с получением пластичных сварных соединений. Потеря пластичности – результат отрицательного влияния растворенных газов, примесей и струк-

турных превращений. Окисление титана начинается при нагреве выше 700 К. До этой температуры он защищен оксидно-нитридной пленкой, которая имеет аналогичную структуру и прочно удерживается на поверхности.

Главное требование, предъявляемое к флюсам – надежная защита от воздуха и загрязнений компонентами шлака. Этому требованию удовлетворяют бескислородные флюсы на основе фторидов и хлоридов щелочных и щелочноземельных металлов: АНТ–1, АНТ–3, а также АНТ–5 и АНТ–7. Однако ударная вязкость швов при сварке под флюсом не достигает значений, получаемых при сварке в аргоне неплавящимся электродом. Более эффективна комбинированная флюсогазовая защита.

Флюсы для сварки алюминия и его сплавов. Плавные флюсы для сварки алюминия состоят из хлоридов и фторидов щелочных и щелочно-земельных металлов. Вследствие высокой электропроводности расплавленный флюс АН–А1 и другие шунтируют дугу, что препятствует ее устойчивому горению. Сварка ведется по слою флюса полуоткрытой дугой.

Для сварки самых распространенных алюминиевых сплавов, легированных магнием, флюсы АН–А1 и УФОК–А1 непригодны, т. к. натрий из флюса частично восстанавливается магнием и поступает в шов, вызывая образование пор, горячих трещин и снижая пластичность металла. Для сварки этих сплавов применяют флюсы МАТИ–10 и 48–АФ–1 на основе $\text{BaCl}_2\text{--KCl}$. Керамические флюсы для сварки алюминия (*например, ЖА–64*) позволяют выполнять сварку закрытой дугой. Они содержат повышенное количество криолита, снижающего электропроводность расплава.

8.1.7 Особенности металлургических процессов при электрошлаковой сварке и переплаве металлов

Электрошлаковая сварка (ЭШС) первоначально использовалась только для сварки стальных конструкций большой толщины (*станины прессов, толстостенные сосуды*), но затем она была трансформирована в самостоятельный процесс – электрошлаковый переплав металлов с целью повышения их качества

(удаление серы, растворенных газов, легирование и т. д.). Общая схема процесса электрошлаковой сварки представлена на рисунке 8.2.

При ЭШС защитная газовая атмосфера отсутствует, и все металлургические процессы идут на границе металл – шлак, причем влияние электрохимических процессов в этом случае сильнее, чем при автоматической сварке под флюсом.

Процессы взаимодействия металла со шлаком в основном не отличаются от рассмотренных ранее, но, в связи с пониженной температурой, они идут с меньшими скоростями. При электрошлаковом процессе нужно организовать смену флюса, т. к. в отличие от дуговой сварки под флюсом состав шлака непрерывно меняется в результате увеличения содержания в нем оксида железа **FeO**. Кроме того, возможно окисление **FeO** на границе шлак – воздух, также повышающее окислительную способность шлака. Если шлак не менять, то шов будет иметь различный состав по длине, т. к. изменяется состав шлака.

Обычно раскислители вводят через электродные проволоки, используя их широкий ассортимент. Углерод выгорает при электрошлаковой сварке слабее, чем в дуговом процессе (*поскольку при электрошлаковой сварке температура ниже*).

Для сварки легированных сталей, содержащих легкоокисляющиеся компоненты, используют флюсы с минимальной окислительной способностью. Такие флюсы имеют основу флюорит **CaF₂**, к которому добавляют для понижения электропроводности **Al₂O₃** и **CaO**. Эти флюсы также активно понижают содержание серы. Длительное пребывание жидкого металла в контакте со шлаком дает возможность подавать в шлаковую ванну легирующие элементы, входящие в электродные проволоки или пластины различного состава, для их переплава.

Таким способом проводят легирование сварочной ванны и улучшают свойства полученного металлического слитка в результате снижения содержания серы, фосфора, неметаллических включений (*FeO и др.*).

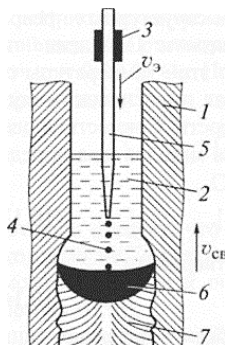


Рисунок 8.2 – Схема защиты металла при электрошлаковой сварке:

*1 – основной материал; 2 – жидкий шлак; 3 – токопровод;
4 – капли расплавленного электрода; 5 – плавящийся электрод;
6 – ванна расплавленного металла; 7 – твердый шов*

8.2 Дуговая сварка в защитных газах и смесях

В конце 40-х гг. XX в., когда появилась необходимость сварки активных металлов, таких как алюминий и его сплавы, а позднее – титан и его сплавы, для защиты зоны сварки стали применять инертные газы – аргон и гелий. При сварке чистой меди оказалось возможным применять азот высокой чистоты, т. к. медь не дает с ним соединений, устойчивых в условиях дуговой сварки.

Однако для сварки низкоуглеродистых и низколегированных сталей применять дорогие и дефицитные инертные газы было экономически нецелесообразно, поэтому был разработан метод сварки в углекислом газе, который можно легко получить в любом количестве и в баллонах доставить к месту сварки.

В настоящее время этот метод сварки получил широкое применение при изготовлении конструкций из низкоуглеродистых и низколегированных сталей с высоким качеством сварных соединений. В последние годы разработаны способы газовой защиты с применением различных газовых смесей ($\text{Ar}+\text{He}$; $\text{Ar}+\text{O}_2$; $\text{Ar}+\text{CO}_2$; CO_2+O_2 и др.), что расширяет сварочно-

технологические и металлургические возможности данного метода сварки. Наиболее широко применяют струйную защиту. Более качественную защиту обеспечивают камеры с контролируемой атмосферой.

К газовой защите можно также отнести вакуумную защиту, которая используется при дуговой и электроннолучевой сварке высокоактивных металлов (*титан, цирконий, молибден и т. д.*).

8.2.1 Формирование газовой струйной защиты

Сварку в струе защитного газа осуществляют с помощью специальной сварочной горелки, подающей в зону сварки защитный газ и электродную проволоку. Схема процесса представлена на рисунке 8.3.

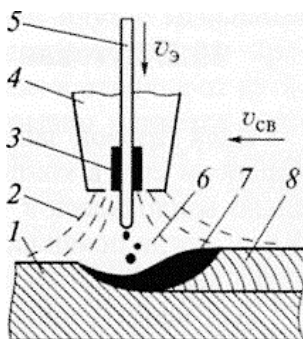


Рисунок 8.3 – Схема струйной газовой защиты металла при сварке:

1 – основной материал; 2 – струя защитного газа;
3 – токоподвод; 4 – сопло, формирующее струю защитного газа; 5 – электрод; 6 – дуга; 7 – сварочная ванна; 8 – шов

С помощью сопла создается поток защитного газа, омывающий зону дугового разряда и вытесняющий из зоны сварки воздушную атмосферу (N_2 , O_2). Качество сварных швов зависит не только от чистоты, но и от расхода защитного газа и характера его истечения из сопла под небольшим давлением, обеспечивающим спокойное (*ламинарное*) истечение, без завихрений.

8.2.2 Металлургические процессы при сварке сталей в струе CO₂

Углекислый газ CO₂ хорошо вытесняет воздух, плотность которого ниже. Углекислый газ в области высоких температур диссоциирует на CO и O₂. В условиях высоких и быстроменяющихся температур состав продуктов диссоциации CO₂ в разных точках дугового разряда будет изменяться. На оси столба дуги происходит резкое повышение температуры и диссоциация CO₂. С каплями электродного металла, проходящими через дуговой промежуток, будет соприкасаться атмосфера, состоящая из 66,6 % CO и 33,3 % O₂.

По отношению к металлу она окислительная:



Поэтому CO₂ называют *активным защитным газом*. Он защищает зону дуги от компонентов воздуха и, прежде всего, от азота и водорода. Чтобы предотвратить окисление металла значительным количеством кислорода, образующегося в атмосфере дуги, необходим дополнительный ввод в сварочную проволоку раскислителей. Обычно применяют кремний (*около 1 %*) и марганец (*около 2 %*). Поэтому для сварки низкоуглеродистых сталей применяют специальные сварочные проволоки (Св–08ГС, Св–08Г2С). При сварке легированных сталей необходимо использовать специальные сварочные проволоки Св–08ХЗГ2СМ, Св–10ХГ2СМА, Св–08Г2СДЮ, также содержащие раскислители (*марганец и кремний*), которые предохраняют от окисления легирующие элементы, входящие в состав стали и сварочной проволоки. Раскисляющие добавки, содержащиеся в каплях электродного металла, растворяются в жидком металле сварочной ванны и задерживают окисление железа и растворенных в нем элементов. Выделение теплоты на периферийных участках дугового разряда увеличивает глубину проплавления и ширину шва. При сварке в струе углекислого газа металл поглощает водород в меньших количествах, чем при других видах сварки.

При вводе **Si** и **Mn** в сварочную проволоку эти элементы, попадая в сварочную ванну, будут связывать кислород, растворенный в металле, т. е. раскислять металл шва:



В хвостовой части сварочной ванны шлак всплывает на поверхность металла, но обычно его недостаточно, чтобы создать сплошной защитный слой на поверхности шва. Металл, наплавленный при сварке в струе CO_2 , чище (*содержит меньше шлаковых включений*), и поэтому его пластические свойства несколько выше, чем при сварке под слоем флюса. Главный недостаток сварки в струе CO_2 – разбрызгивание металла электрода (*до 12 %*). Его сводят к минимуму, добавляя 3 % кислорода к CO_2 . Это позволяет перейти к струйному переносу металла электрода.

8.3 Металлургические процессы при сварке в инертных газах и их смесях

Из инертных газов наиболее широко используют при сварке аргон (**Ar**), а также гелий (**He**). Плотность аргона составляет $1,783 \text{ кг/м}^3$, т. е. значительно больше воздуха, и это облегчает получение струйной защиты. Гелий в 10 раз легче аргона, и для использования при сварке требуется больший его расход, чем аргона, что повышает стоимость сварочного процесса. Аргон и гелий не образуют химических соединений с металлами и не растворяются в них, что обусловлено заполненностью внешних электронных оболочек атомов у этих газов. Однако при сварке имеют место процессы окисления, азотирования, наводороживания, а также растворения газов и вредных примесей в сварочной ванне. Эти процессы связаны с несовершенством газовой защиты зоны сварки и прониканием в нее атмосферного воздуха. Кроме того, неизбежное присутствие даже небольших концентраций вредных примесей в инертных газах, наличие окис-

ленных поверхностных слоев на кромках металла и сварочной проволоки способствуют образованию оксидов, нитридов и других веществ, заметно ухудшающих физико-механические свойства сварных соединений из высокоактивных металлов.

Чистота аргона, поставляемого для сварки, достаточно высока. Различают аргон высшего сорта и первого сорта. В зависимости от сорта аргона в нем содержится различное количество вредных примесей (H_2O , CO_2 , N_2 , O_2). Это необходимо учитывать при сварке различных легированных сталей или цветных сплавов, содержащих те или иные легирующие добавки. Для повышения чистоты применяемого аргона его пропускают стружку титана, нагретую до 770 К. Таким образом можно удалить из аргона следы влаги, кислорода и азота.

8.4 Особенности сварки различных сталей и сплавов в инертных газах

Сварку стальных *деталей малой толщины* осуществляют обычно аргонодуговой сваркой неплавящимся W-электродом с присадочной проволокой, что обеспечивает наиболее высокое качество сварных соединений. При сварке не полностью раскисленных низкоуглеродистых сталей, особенно кипящих, металл шва получается пористым, вследствие окисления углерода содержащейся в стали закисью железа и выделения CO из ванны по реакции:



которая идет за счет кислорода, накопленного в сталях во время их выплавки, но может возникнуть при наличии примесей к аргону, а также за счет влажности газа и содержащегося в нем кислорода.

Для подавления реакции (8.9) в сварочной ванне нужно иметь достаточное количество раскислителей (Si , Mn , Ti), т. е. использовать сварочные проволоки Св-08ГС или Св-08Г2С.

Можно снизить пористость путем добавки к Аг до 5 % O_2 , который, вызывая интенсивное кипение сварочной ванны, способствует удалению CO до начала кристаллизации.

Среднелегированные стали содержат в своем составе достаточное количество активных легирующих компонентов для подавления пористости, вызываемой окислением углерода. При сварке W-электродом в среде аргона уровень водорода, вызывающего образование водородных пор, незначителен. Для увеличения глубины проплавления применяют активирующие флюс-пасты на основе CaF_2 , наносимые на кромки перед сваркой.

Аустенитные коррозионно-стойкие и жаропрочные стали марок 12X18H10T, X23H18 и др., сваривают в среде аргона неплавящимся электродом с присадочным материалом. Эти стали очень чувствительны к влиянию водорода, который сильно охрупчивает металл шва и обуславливает его замедленное разрушение в виде холодных трещин. В этих случаях требуется осушка аргона или добавка к нему фторидов SiF_4 , которые связывают водород в атмосфере дуги и уменьшают поглощение водорода металлом.

Сварку стальных конструкций повышенной толщины (*от 10 до 20 мм*) выполняют более производительным плавящимся электродом на постоянном токе обратной полярности. При этом в аргон добавляют 20 % CO_2 или 5 % O_2 либо их тройные смеси с целью обеспечения мелкокапельного переноса. Капли металла окисляются с поверхности, что снижает поверхностное натяжение и ускоряет их отрыв. В сварочной ванне оксиды металла восстанавливаются раскислителями, введенными в состав электродного металла. Добавка кислорода к аргону позволяет обеспечить мелкокапельный или струйный перенос капель в ванну.

При сварке цветных сплавов на основе **Al, Mg, Ti** и **Cu** требуется аргон повышенной чистоты, а также тщательная подготовка свариваемых кромок, присадочной и электродной проволоки вследствие опасности появления пористости сварных соединений.

Сложность металлургических процессов сварки алюминия и его сплавов (*Al – Mg; Al – Cu и др.*) в защитных газах неплавящимся и плавящимся электродами обусловлена наличием оксидных пленок Al_2O_3 с температурой плавления около 2300 К. Оксиды алюминия способствуют образованию пор в металле

шва и снижают пластичность шва. Оксид Al_2O_3 может гидратировать, т. е. соединяться с парами воды, и, при попадании в сварочную ванну, он будет обогащать ее водородом, что приведет к пористости в сварном соединении. Поэтому перед сваркой кромки изделия травят в щелочных растворах, механически защищают металл и обезжиривают. Электродная проволока подвергается травлению и механической зачистке. Наилучшим способом подготовки электродной или присадочной проволоки является электрохимическая полировка. Полированная проволока может долго храниться в кассетах с плотной рядовой намоткой и не требует никакой предсварочной обработки.

Сварка магниевых сплавов (MA2 , MA8 , MA2-1) в основном похожа на сварку алюминиевых сплавов.

Основные дефекты при сварке алюминиевых и магниевых сплавов – пористость и наличие оксидных включений в металле шва. Оксиды Al_2O_3 и MgO обладают большей плотностью, чем жидкий металл, не растворяются в сварочной ванне и не всплывают на ее поверхность.

Металлургические процессы сварки титана и его сплавов осложнены исключительной химической активностью титана. Титан и его наиболее распространенные сплавы (BT1 , BT5 , BT15 , OT4) реагируют с кислородом, азотом, углеродом, водородом. Наличие этих соединений приводит к резкой потере пластичности металла сварного шва. Титан особенно чувствителен к водороду, с которым он образует гидриды типа TiH_2 , разлагающиеся при высокой температуре, а при кристаллизации образующие игольчатые кристаллы, которые нарушают связь между металлическими зернами титана, вызывая склонность швов к замедленному разрушению. Перед сваркой необходимо контролировать содержание водорода в титане.

Для сварки употребляется аргон высшего сорта, прошедший дополнительную очистку. Сварку предпочтительно вести вольфрамовым электродом с применением флюс – паст на основе CaF_2 , для сжатия дуги и увеличения глубины проплавления. При сварке титана защищают не только сварочную ванну, но и весь шов до температуры $\approx 773 \text{ K}$, т. е. необходимо создавать зону аргона перед дугой и обдувать аргоном кристаллизующий-

ся и остывающий шов. Кроме того, аргон следует подавать снизу шва для защиты обратной стороны шва.

Сварку особо ответственных конструкций и изделий выполняют в камерах с контролируемой атмосферой.

Трудности при **сварке меди** и ее сплавов в защитных газах обусловлены наличием в исходном металле закиси меди Cu_2O , ее образованием при сварке, а также высокой растворимостью водорода в шве. Для получения качественного шва (*без пор*), сохраняющего уникальные физические свойства: высокую электропроводность и теплопроводность.

Сварку меди и ее сплавов выполняют в инертных защитных газах: аргоне, гелии и их смесях, а также в чистом азоте, который по отношению к меди проявляет свойства инертного газа. Сварку ведут неплавящимися электродами – вольфрамовым и угольным (*не для всех марок меди*) – на постоянном токе прямой полярности с подачей присадочной проволоки, а также – плавящимся электродом. Кроме того, аргонодуговую сварку меди осуществляют с применением специальной флюс-пасты, содержащей раскислители: ферромарганец, ферросилиций, феррофосфор, ферротитан и редкоземельные элементы. Флюс наносят на присадочную проволоку или в канавку на подкладке под корень шва.

В том случае, когда в качестве защитного газа используют азот, особые требования предъявляют к его чистоте по отношению к кислороду. Он может повысить окисленность металла шва и существенно снизить стойкость вольфрамового электрода. Более эффективен угольный электрод в азоте. Он создает дополнительную защиту в виде CO .

8.5 Металлургические особенности вакуумной защиты сварочной ванны

Применение в авиакосмической и ракетной технике новых конструкционных материалов на основе титана, молибдена, ванадия и других химически активных и тугоплавких металлов потребовало разработки принципиально новых методов сварки и более эффективных способов защиты зоны сварки.

Значительные трудности дуговой сварки указанных металлов обусловлены тем, что наличие в шлаковой и газовой фазах кислорода, азота, водорода и их соединений вызывает охрупчивание, появление пор и резкое ухудшение физико-механических свойств сварных швов.

Получение высококачественных сварных соединений из химически активных металлов оказалось возможным только после разработки оборудования и технологического процесса сварки электронным лучом в вакуумной камере. При давлении в сварочной камере $p \leq 1,3 \cdot 10^{-1}$ Па уже обеспечивается содержание кислорода и азота значительно ниже концентрации этих вредных примесей в аргоне высшего сорта, используемого для защиты сварочной ванны при атмосферном давлении.

Металлургические особенности образования шва при электронно-лучевой сварке во многом обусловлены чрезвычайно высокой плотностью энергии, выделяемой в пятне нагрева (*примерно $5 \cdot 10^6$ Вт/см²*), и физическими условиями плавления металла в вакууме. Это обеспечивает следующие преимущества:

1) благодаря весьма высокой интенсивности и сосредоточенности такого источника нагрева, как электронный луч, достигается исключительно узкое и глубокое проплавление металла в вакууме с весьма незначительной по протяженности околошовной зоной, что обеспечивает сокращение объема высокотемпературного нагрева металла и растворенных в нем газов;

2) кратковременность пребывания сварочной ванны в расплавленном состоянии, ее малый объем и незначительные размеры зоны сплавления способствуют также уменьшению отрицательного влияния диффузионных процессов, вызывающих пористость металла шва;

3) положительное влияние вакуума на качество сварных соединений выражается в том, что значительно ускоряются и облегчаются процессы диссоциации оксидов газов не только в поверхностных, но и во внутренних слоях металла. Так, при сварке меди, кобальта, никеля обеспечивается практически полная диссоциация оксидов этих металлов в камере и удаление кислорода из сварочной ванны;

4) высокая степень разрежения, которая может быть достигнута в вакуумной камере при сварке электронным лучом, способствует разрушению поверхностных загрязнений и оксидных пленок, которые, как правило, препятствуют получению качественного сварного соединения при дуговых способах сварки.

8.6 Металлургия газопламенной обработки

При газопламенной обработке металла, включающей в себя сварку, пайку, наплавку и резку металла, используют теплоту горения горючих газов и паров.

Газовая сварка. Этот особый случай сварки металлов в активных газах характеризуется тем, что источником теплоты является газовое пламя, а сварка происходит в струе продуктов сгорания – ацетилена C_2H_2 в кислороде (рисунок 8.3). В качестве горючих газов наряду с ацетиленом используются также смеси различных газообразных или жидких углеводородов.

Считают, что пламя имеет окислительный, нормальный или восстановительный характер, в зависимости от соотношения объемов O_2 и C_2H_2 (рисунок 8.4):

$$\beta = \frac{V_{O_2}}{V_{C_2H_2}}. \quad (8.10)$$



Рисунок 8.3 – Строение газового пламени

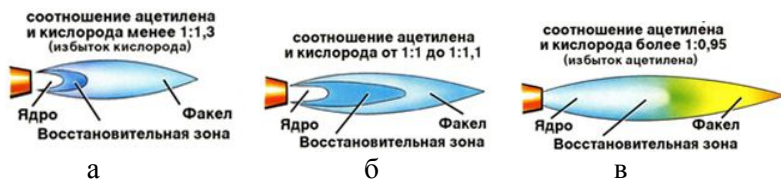


Рисунок 8.4 – Виды газового пламени

а – окислительное; б – нормальное; в – восстановительное

При значении $\beta < 1$ в пламени образуется избыток H_2 и оксида углерода CO – восстановителя. Это препятствует окислению железа и способствует его раскислению.

При значении $\beta = 1,1 \dots 1,2$ в результате полного сгорания углерода кислород связывается в CO :



В результате реакции (8.11) получается нейтральное или так называемое *нормальное пламя*. Максимальная температура достигается в рабочей зоне около ядра пламени. Однако состав продуктов реакции и температура пламени меняются по длине факела.

При сварке углеродистых и низколегированных сталей защитных свойств пламени достаточно для получения высококачественных сварных соединений преимущественно тонколистового металла.

При сварке цветных сплавов, а также при пайке для рафинирования металла сварочной ванны используют флюсы.

Так, при сварке медных сплавов, и особенно латуней, применяют жидкий флюс. Он подается в пламя горелки инъекцией вместе с ацетиленом и, сгорая, образует B_2O_3 , который закрывает тонкой жидкой пленкой зеркало сварочной ванны, извлекает из нее оксиды меди и замедляет испарение цинка. Также применяют и твердые флюсы в виде пасты, нанося их на кромки свариваемого металла.

8.7 Формирование защиты металла при сварке электродами с покрытием и порошковой проволокой

Для получения качественного соединения необходимо предотвратить химическое взаимодействие металла с воздухом. Это достигается при сварке электродами с защитно-легирующим покрытием (рисунок 8.5).

Электродный стержень плавится с опережением плавления покрытия, что приводит к образованию конусного углубления – *втулки*. Она направляет поток защитных газов, выделяемых при нагреве покрытия, и капли металла в сварочную ванну. Это препятствует доступу воздуха в зону сваривания. Капли металла проходят через дуговой промежуток, будучи уже закрытыми тонким слоем шлака, образованного при одновременном плавлении покрытия. Металл сварочной ванны также защищен слоем взаимодействующего с ним жидкого шлака.

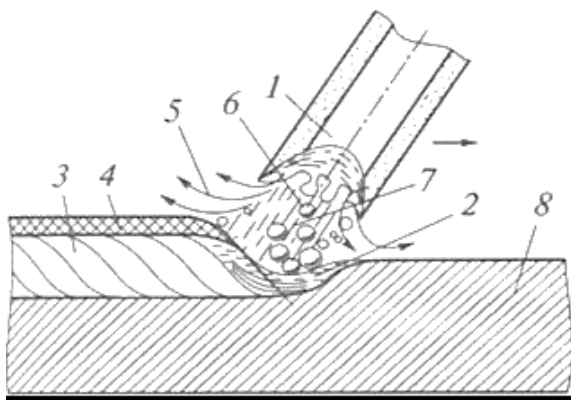


Рисунок 8.5 – Схема газослаковой защиты металла при сварке электродами с покрытием:

- 1 – стержень электрода; 2 – сварочная ванна; 3 – шов;
4 – шлак; 5 – защитный газ; 6 – капли электродного металла;
7 – дуга; 8 – свариваемый металл

8.7.1 Назначение и основные элементы электродных покрытий

Состав электродного покрытия определяется функциями, которые оно должно выполнять:

- 1) защита зоны сварки от кислорода, водорода и азота воздуха;
- 2) раскисление металла сварочной ванны;
- 3) легирование сварочной ванны заданными компонентами;
- 4) стабилизация дугового разряда;
- 5) обеспечение вязкости шлака, препятствующей его стеканию (*при сварке на вертикальной поверхности и в потолочном положении*);
- 6) легкая отделимость шлаковой корки;
- 7) экологичность процесса.

Электродные покрытия состоят из целого ряда компонентов, которые условно можно разделить на *шлакообразующие, газообразующие, ионизирующие, раскисляющие, легирующие и связующие*. Некоторые компоненты могут выполнять несколько функций одновременно.

Шлакообразующими компонентами служат оксиды и минералы: мел, мрамор CaCO_3 , магнезит MgCO_3 , полевой шпат $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 - 6\text{SO}_2$; глинозем Al_2O_3 , флюорит CaF_2 , рутил TiO_2 кварцевый песок SiO_2 и гематит Fe_2O_3 . При сплавлении эти компоненты образуют шлаки различного состава и основности.

Газообразующие компоненты – это вещества, разлагающиеся при нагреве с выделением большого объема защитного газа, вытесняющего атмосферный газ, главным образом, – азот. К ним относятся соли угольной кислоты – карбонаты, а также органические вещества: декстрин, крахмал, целлюлоза, которые, сгорая в электрической дуге, дают много газообразных продуктов: CO_2 , CH_4 , CO , H_2 , H_2O .

Ионизирующие компоненты – это соединения, при нагреве выделяющие атомы щелочных металлов с малым потенциалом ионизации: **Na, K, Ca, Ba**. Ионы этих элементов снижают электрическое сопротивление дугового промежутка и делают дугу устойчивой.

Раскислителями и легирующими компонентами служат металлические порошки или порошки ферросплавов (*сплавы железа с другими элементами: ферромарганец, ферросилиций, феррохром, ферротитан, ферровольфрам и др.*). Они сохраняют легкоокисляющиеся элементы при нагреве и быстро растворяются в жидкой стали. Только медь и никель вводят в виде порошка металла, т. к. они при сварке почти не окисляются. Раскисляющие компоненты, в отличие от легирующих, могут не входить в состав шва.

Связующими компонентами могут быть силикаты натрия и калия Na_2SiO_3 и K_2SiO_3 , т. е. жидкое стекло или полимеры. Они соединяют порошки, упомянутых выше компонентов, в пластичную массу, которая напрессовывается на подготовленный металлический стержень в особых прессах.

У всех компонентов, идущих на изготовление покрытий, следует строго контролировать содержание таких вредных примесей, как сера и фосфор.

8.7.2 Металлургические процессы при сварке электродами с различными покрытиями

Все защитно-легирующие покрытия, несмотря на их различный состав, работают по одной и той же схеме. В результате горения дуги, плавления электрода и покрытия практически одновременно идут процессы формирования сварочной ванны, ее газовой и шлаковой защиты от насыщения азотом, а также от окисления кислородом воздуха. Затем идут процессы нейтрализации водорода, раскисления, легирования и модифицирования, рафинирования жидкого металла, его кристаллизации, связывания продуктов всех реакций в шлаковую фазу и отделения шлаковой корки. Однако в разных типах покрытия указанные процессы осуществляются по различным физико-химическим реакциям.

Сварка электродами с рудно-кислым покрытием (А). Рудно-кислые покрытия создают значительное количество газов (CO_2 , CO , H_2 , H_2O), что и обеспечивает хорошую защиту от атмосферного воздуха. Кроме того, при нагреве Fe_2O_3 выделяется

кислород, связывающий водород в нерастворимый пар H_2O . Для противодействия окислению металла кислородом в покрытия этого типа требуется ввести значительное количество раскислителей, главным образом ферромарганца. В этом случае образуется много продуктов раскисления – оксидов. Часть из них не выходит из шва и создает неметаллические включения, снижающие ударную вязкость и пластичность швов.

Сварка электродами с рутиловым покрытием (Р). Иначе организованы те же процессы при сварке электродами с рутиловым покрытием **Р**. Газовую защиту образует CO и CO_2 при распаде карбоната MgCO_3 , а также CO , CH и H_2 при распаде декстрина. Связывание водорода в OH путем окисления выполняют рутил и полевой шпат. Шлаковую защиту создает TiO_2 и SiO_2 (из полевого шпата).

Рутил является слабым окислителем. Раскислителем в этом покрытии служит FeSi . Электроды с покрытием такого типа обладают высокими технологическими свойствами и обеспечивают достаточную устойчивость горения дуги на переменном токе, хорошее формирование шва и отделяемость шлаковой корки, возможность сварки в любом пространственном положении шва. Рутиловые электроды малотоксичны и обеспечивают высокие механические свойства наплавленного металла.

Сварка электродами с основным покрытием (Б). В основном электродном покрытии типа Б газообразующим является CaCO_3 , окислителями – CO_2 и SiO_2 , раскислителями – FeTi и FeSi , а рафинирующим элементом – CaO . Одновременно CaO , CaF_2 и SiO_2 создают шлак, связывающий продукты раскисления.

Газовую защиту зоны сварки осуществляет CO_2 вследствие разложения мрамора CaCO_3 . Атмосфера сварочной дуги преимущественно состоит из CO , CO_2 и H_2O в виде паров воды, выделяющихся из покрытия. Чтобы снизить уровень водяного пара и водорода в зоне сварки, эти электроды перед сваркой необходимо прокалывать при высокой температуре: 600...790 К. Покрытие содержит несколько раскислителей, что позволяет получить мало окисленный и хорошо восстановленный металл с малым содержанием H_2 . Поэтому электроды с таким покрытием

называют *низководородными*. Присутствующий в шлаке оксид **CaO** хорошо рафинирует металл, что снижает склонность к образованию горячих и холодных трещин.

При сварке *коррозионно-стойких и жаростойких* сталей применяют тот же тип покрытия, но с пониженным содержанием **CaCO₃** (15...20 %), увеличивая содержание **CaF₂** (60...80 %). В этом случае удастся предотвратить науглероживание сварочной ванны и обеспечить содержание углерода в металле шва на уровне 0,05...0,02 %, как это требуется по техническим условиям.

Недостаток электродов с покрытием **Б** – малая устойчивость дугового разряда, что ограничивает выполнение сварки лишь на постоянном токе обратной полярности. Таким образом, технологические возможности электродов с покрытием **Б**, несколько ниже, чем электродов с покрытиями **А** и **Р**. Кроме того, повышенное содержание **CaF₂** вызывает образование токсичных соединений и требует создания надежной вентиляции рабочей зоны.

Сварка электродами с целлюлозным покрытием (Ц). Целлюлозные покрытие **Ц** содержит в своем составе до 50 % органических веществ (*древесная мука, целлюлоза*). При их разложении и окислении выделяется большое количество газа, содержащего водород, окись углерода и др., что обеспечивает хорошую газовую защиту от воздушной среды при малом количестве шлака.

Для предотвращения водородной хрупкости или образования пор введены выделяющие кислород окислители: **TiO₂**, **FeO**, **MnO₂**. Для связывания водорода в **HF** в покрытия вводят также плавиковый шпат **CaF₂**. Технологические свойства электродов с покрытием **Ц** довольно высокие, что позволяет их применять при сварке в различных пространственных положениях. Электроды с целлюлозным покрытием имеют в наплавленном металле высокое содержание водорода. Они предназначены для сварки в монтажных условиях неповоротных стыков труб из незакаливающихся, низкоуглеродистых и низколегированных сталей. Наплавленный металл соответствует типам Э42 и Э46. В таком металле, не склонном к закалке, водород не опасен, т. к. в про-

цессе вылеживания выходит из металла по диффузионному механизму.

8.7.3 Сравнительные характеристики защитных свойств покрытий

Основное различие защитных свойств покрытий заключается в получении разного содержания водорода в шве.

Так, в покрытии Б в результате протекания реакции H_2O с CaF_2 и SiO_2 выделяются фтор и SiF_4 , которые связывают водород в нерастворимое соединение HF . Благодаря этому, содержание водорода в наплавках в 7...9 раз меньше, чем при применении электродов с другими покрытиями. Еще одно преимущество покрытия Б – малое количество раскислителей, что позволяет получать чистый (*по шлаковым включениям*) металл шва, обладающий высокой ударной вязкостью и хладностойкостью. Это позволяет применять покрытие Б для сварки всех высоколегированных сталей, содержащих хром, титан и другие активно окисляющиеся элементы.

К недостаткам покрытия Б следует отнести науглероживание шва при сварке коррозионностойких сталей, в которых углерод рассматривают как вредную примесь. Другим недостатком покрытия Б является чувствительность к влаге, ржавчине, вызывающей образование пор, а также непригодность к сварке переменным током вследствие деионизирующего влияния фтора, образующего отрицательно заряженный ион. Он связывает положительно заряженные ионы в нейтральные молекулы, не способные переносить электрические заряды в дуге.

Более технологичны электроды с рутиловым покрытием Р. Однако они ограничены по назначению: пригодны лишь для сварки низколегированных сталей, для которых временное высокое содержание водорода не опасно благодаря отсутствию зон с закаленными структурами, где водород усиливает склонность к холодным трещинам.

Важные показатели качества металла сварных швов – содержание газов и неметаллических включений, влияющих на прочностные свойства сварных соединений.

Электроды с основным покрытием Б имеют существенные преимущества по содержанию водорода, а также других газов и включений перед другими покрытиями. Поэтому электроды с покрытием Б рекомендуются для сварки ответственных конструкций из сталей повышенной прочности ($\sigma_B \geq 500$ МПа), работающих при низких температурах и ударных нагрузках.

Металлургические процессы при сварке электродами сильно зависят от характера переноса электродного металла, что, в свою очередь, зависит от плотности тока на электроде. При малых плотностях тока капли электродного металла крупные, долго находятся на торце электрода и при коротком замыкании между каплей и сварочной ванной переходят в нее лишь частично (40...30 % объема капли). Разрыв металлического «мостика» сопровождается разбрызгиванием. При больших плотностях тока (800... 1000 А на 1 мм диаметра электрода) наблюдается мелкокапельный перенос металла и капли пролетают дуговой промежуток с большой скоростью. Это влияет на интенсивность протекания металлургических процессов при сварке.

8.7.4 Особенности легирования металла шва при сварке электродами с покрытием

При сварке электродами с покрытием металл шва образуется из основного металла, электродной проволоки и покрытия. Легирование металла шва осуществляется несколькими способами:

- 1) введением в покрытие электрода порошкообразных металлических добавок или ферросплавов: марганца, кремния, титана и др. Они входят в состав капель, а затем – в металл шва;
- 2) восстановлением на стадии капли оксидов, входящих в состав покрытия;
- 3) предварительным вводом легирующих элементов в состав электродного стержня;
- 4) расплавлением основного металла, содержащего необходимые элементы (*применяется при сварке высокопрочных и теплоустойчивых сталей*).

При определении степени легирования металла шва при сварке электродами следует учитывать потери легирующих элементов, возникающие вследствие испарения, разбрызгивания металла и окислительно-восстановительных реакций со шлаком в зоне сварки.

8.7.5 Особенности металлургических процессов при сварке порошковой проволокой

Порошковые проволоки нашли промышленное применение для механизированной сварки и наплавки в чистом CO_2 , в его смесях с Ar или без защитного газа (*т. е. с использованием самозащитной порошковой проволоки*). Они изготавливаются двумя способами – **вальцовкой и волочением**. В первом способе стальная лента толщиной 0,2...0,5 мм постепенно сворачивается в трубку на специальных вальцах. На определенной стадии вальцовки в еще не закрытую полость электрода засыпают высокодисперсные порошкообразные компоненты: шлако- и газообразующие (*при сварке в CO_2 газообразующие компоненты не применяются*), раскислители, а в ряде случаев и специальные легирующие добавки, а также железный порошок для обеспечения электрической проводимости сердечника. При этом исключаются связующие, пластификаторы и другие технологические добавки, которые, как правило, снижают качество шва. После этого трубку вместе с порошковым материалом дополнительно обжимают волочением, очищают от следов смазки и свертывают в бухты. Поперечные сечения вальцованных и волоченых сварочных проволок приведены на рисунке 8.6.

Диаметр порошковой проволоки колеблется от 1,6 до 3 мм.

Шлаковой и газовой защиты зоны сварки при применении порошковой проволоки недостаточно, поэтому для сварки ответственных конструкций требуется дополнительная газовая защита (CO_2 , Ar).

Недостаточная защита при применении порошковых проволок, по сравнению с использованием электродов с покрытием, обусловлена процессом плавления проволоки в дуговом электрическом разряде. Компоненты порошкового сердечника, име-

ющего малую электропроводность, получают меньшее количество энергии от дуги, замкнутой на стальную оболочку снаружи, поэтому задерживается процесс их плавления и замедляется металлургическая обработка сварочной ванны.

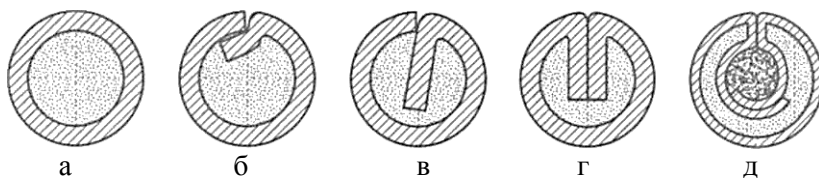


Рисунок 8.6 – Поперечные сечения порошковой проволоки, полученной волочением (а) и вальцовкой (б, в, г, д)

Главное отличие швов, полученных с применением порошковых проволок – малое содержание неметаллических включений, что обеспечивает высокие показатели ударной вязкости, достаточные для эксплуатации соединений при низких температурах, вплоть до $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Порошковые проволоки используют для сварки малоуглеродистых, низколегированных и высокопрочных сталей. Они обеспечивают необходимые механические свойства металла шва, причем более высокие, чем при сварке электродами с покрытием.

По типу сердечника порошковые проволоки разделяют на карбонатно-флюоритные и рутиловые, содержащие в качестве основы TiO_2 (ПП-АМ8, ПП-АН2, ПП-АН10 и др.), а также рутил-флюоритные на основе TiO_2 и CaF_2 (ПП-АН4, ПП-АН9, ПП-АН20 и др.). Для сварки открытой дугой, т. е. без защиты углекислым газом, применяют порошковые проволоки карбонатно-флюоритного типа, которые содержат газообразующие компоненты CaCO_3 и MgCO_3 , а также плавиковый шпат, алюмосиликаты, раскислители. Такие проволоки называют самозащитными (ПП-АН2, ПП-АН6 и др.). Они применяются при сварке в атмосфере и под водой.

Порошковые проволоки используют также и для наплавочных работ с целью упрочнения поверхностных слоев. Они обес-

печивают наиболее высокие уровни механизации и качество наплавов.

Вопросы для самопроверки

1. Как снизить уровень водорода в металле шва при сварке под флюсом?
2. Почему сера, входящая в состав металла и флюсов, не окисляется при сварке?
3. Какой компонент флюса облегчает удаление шлаковой корки?
4. Почему окислитель – активный газ CO_2 считают для Fe защитным?
5. Почему инертные газы не образуют поры в металле шва?
6. Почему основное электродное покрытие считают универсальным?
7. В чем преимущества металла швов, полученных с применением порошковых проволок? Что такое ферросплавы и как их получают?

9 ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В МЕТАЛЛАХ ПРИ СВАРКЕ [1, 3, 8]

9.1 Понятие свариваемости материалов

9.1.1 Физическая и технологическая свариваемость

В сварочной практике используют понятия *физической и технологической свариваемости*.

Физическая свариваемость характеризует принципиальную возможность получения монолитных сварных соединений и главным образом относится к разнородным материалам.

Физическая свариваемость материалов зависит от степени их растворимости друг в друге как в жидком, так и в твердом состояниях. Материалы, нерастворимые в жидком состоянии, не способны образовывать монолитные соединения, т. е. не обладают физической свариваемостью.

Приняты три степени свариваемости:

1) *хорошая* – полная растворимость в твердом состоянии, т. е. в соединении образуются твердые растворы, имеющие прочные внутрикристаллические и межфазные связи (*железо и никель, железо и хром и др.*);

2) *удовлетворительная* – ограниченная растворимость в твердом состоянии, т. е. в соединении образуются твердые растворы и хрупкие интерметаллидные соединения (*Интерметаллид – химическое соединение двух или более металлов. Интерметаллиды, как и другие химические соединения, имеют фиксированное соотношение между компонентами, обладают, как правило, высокой твердостью и высокой химической стойкостью. Очень часто интерметаллиды имеют более высокую температуру плавления, чем исходные металлы*), имеющие ослабленные внутрикристаллические и межфазные связи (*железо и титан, железо и медь и др.*);

3) *плохая* – материалы нерастворимы в твердом состоянии, т. е. кристаллические соединения не образуются, имеют место слабые межфазные связи (*железо и алюминий, железо и магний и др.*).

Технологическая свариваемость рассматривается как свойство материалов, характеризующее их реакцию на **сварочный термомодеформационный цикл**. Степень этой реакции оценивают по отношению отдельных механических свойств металла сварных соединений к одноименным свойствам основного металла (*например, твердости, ударной вязкости и др.*).

Соответствующее определение понятия свариваемости дано в ГОСТ 26001–84: **«Свариваемость – свойство металлов или сочетания металлов образовывать при установленной технологии сварки соединение, отвечающее требованиям, обусловленным конструкцией и эксплуатацией изделий»**.

Согласно этому определению, свариваемость зависит, с одной стороны, от материала, технологии сварки, конструктивного оформления соединения, с другой – от требуемых эксплуатационных свойств сварной конструкции, которые определяются предъявляемыми к ней техническими требованиями. Это может быть одно свойство или комплекс свойств в зависимости от назначения сварной конструкции.

9.1.2 Показатели свариваемости

Традиционно принято различать несколько качественных степеней технологической свариваемости: **хорошая, удовлетворительная, ограниченная и плохая**.

Для сварных соединений, выполняемых из углеродистых и легированных сталей, принимают следующие показатели свариваемости:

- 1) сопротивляемость образованию горячих трещин;
- 2) сопротивляемость образованию холодных трещин;
- 3) значения основных механических свойств шва и зоны термического влияния;
- 4) сопротивляемость хрупкому разрушению;
- 5) сопротивление развитию трещиноподобных дефектов.

Достаточными показателями свариваемости материала считаются те, которые равны или выше нормативных значений требуемых свойств согласно техническим условиям на эксплуатацию данного типа сварных конструкций.

Наряду с экспериментальными используются расчетные методы определения показателей свариваемости, в т. ч. специальные компьютерные программы, учитывающие химический состав, тип соединения, способ и режимы сварки и другие факторы.

9.2 Дефекты кристаллической решетки в металлах при сварке

9.2.1 Понятие о дефектах кристаллической решетки

В процессе кристаллизации, технологических тепловых и механических воздействий в металле возникают дефекты кристаллической решетки, т. е. нарушается правильность кристаллического строения. Дефекты оказывают существенное влияние на прочность, пластичность, деформационную способность металлов, их коррозионную стойкость, склонность к хрупким разрушениям, на технологическую прочность при сварке и многие другие механические и физические свойства металлов.

Можно выделить *четыре основных вида* дефектов кристаллической решетки: *точечные, линейные, поверхностные и объемные*.

К *точечным дефектам* (рисунок 9.1) относятся:

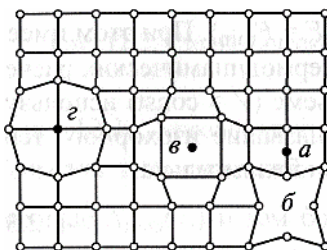


Рисунок 9.1 – Точечные дефекты кристаллической решетки:
a – дислоцированный атом; *б* – незаполненный узел (вакансия);
в, г – инородные атомы соответственно внедрения и замещения

1) междоузельные атомы – дислоцированные атомы, перешедшие в результате больших флуктуаций кинетической энергии из узлов решетки в междоузельные пространства;

2) вакансии – незаполненные узлы решетки.

Как точечные дефекты могут рассматриваться инородные (*примесные*) атомы внедрения (*в междоузлиях*), радиусы атомов которых соответственно меньше или больше радиуса атомов основного металла.

К **поверхностным дефектам** кристаллического строения относятся искажения кристаллической решетки у поверхности металла, границы зерен, блоков, структурных составляющих.

Объемные дефекты кристаллов представляют собой микроскопические поры, трещины, инородные включения.

9.2.2 Распределение дефектов кристаллического строения в металле сварного соединения

Процесс сварки сопровождается интенсивным термомоформационным воздействием на металл. Высокие температуры нагрева, неравновесные условия кристаллизации шва, высоко- и низкотемпературная пластическая деформация, значительная химическая неоднородность металла шва оказывают большое влияние на образование и перераспределение дефектов кристаллического строения в шве и зоне термического влияния.

Основной источник вакансий в свариваемых металлах – тепловое воздействие. Влияние на образование и перераспределение вакансий в околошовной зоне могут оказать упругопластические сварочные деформации.

В различных зонах сварного соединения плотность дислокаций может достигать значений, аналогичных полученным в процессе закалки. Характер распределения плотности дислокаций в сварном соединении может сильно меняться в зависимости от химического состава и предварительной термической обработки свариваемого металла, от способа и параметров режима сварки, от условий охлаждения изделия.

9.3 Фазовые и структурные превращения в металлах при сварке

Под **фазовыми превращениями** понимают превращения с образованием новых фаз, отличающихся от исходных атомно-кристаллическим строением, часто составом, свойствами и разграниченных с ними поверхностями раздела (*межфазными границами*). Фазовое превращение обычно сопровождается изменением плотности, выделением или поглощением теплоты.

В металлах и сплавах при технологических воздействиях (*термообработке, сварке, литье и др.*) фазовые превращения происходят при изменении агрегатного состояния (*переход из жидкого в твердое состояние*), полиморфных превращениях, растворении или выделении фаз из твердых растворов в связи с изменением взаимной растворимости компонентов.

Под **структурными превращениями** понимают изменения формы, размеров и тонкой структуры существующих фаз, которые сопровождаются перераспределением легирующих элементов, примесей и дефектов кристаллической решетки.

9.3.1 Особенности превращений в металлах при сварке

Особенность фазовых и структурных превращений при сварке, по сравнению со многими процессами термической обработки, заключается в том, что они протекают в условиях нагрева вплоть до температур ликвидуса, при высоких скоростях нагрева и охлаждения и в условиях одновременного развития сварочных деформаций и напряжений. Это приводит к сохранению части исходной фазы при определенной степени перегрева или переохлаждения. Характер и кинетика превращений зависят от состава сплава, максимальной температуры нагрева, а их завершенность определяется скоростными и деформационными параметрами сварочного цикла.

9.3.2 Химическая неоднородность сварных соединений

Формирование сварного соединения при сварке плавлением сопровождается сложными диффузионными процессами в жидкой и твердой фазах, которые приводят к изменению химического состава в различных зонах сварного шва, выделению или перераспределению примесей и легирующих элементов. По мере увеличения количества затвердевшего металла состав остающегося расплава так же, как и состав образующейся твердой фазы, будет постоянно изменяться. Поэтому при неизменности общего количества примесей в кристаллизующемся объеме сварочной ванны содержание их в различных участках шва неодинаково, что может приводить как к изменению прочностных характеристик, так и к снижению показателей свариваемости.

При равновесной кристаллизации имеется достаточно времени для диффузионного выравнивания концентрации в жидкой и твердой фазах. Поэтому после завершения кристаллизации наблюдается равномерное распределение примеси в твердой фазе. Равновесная кристаллизация на практике реализуется очень редко.

В реальных неравновесных условиях кристаллизации сварных швов, даже в случае сварки на «мягких» режимах, диффузия в твердой фазе не получает полного развития. Также не получает полного развития процесс отвода примеси от фронта кристаллизации в жидкую фазу. Степень концентрации примеси может увеличиваться по мере роста объема твердой фазы. Последние порции жидкости могут быть настолько обогащены примесью, что ее концентрация в расплаве достигнет эвтектической. Оттесняемая гранями растущих кристаллитов, она затвердевает последней, образуя обогащенные примесью межкристаллитные прослойки, характеризующиеся пониженными механическими свойствами и более низкой температурой плавления (*так называемые легкоплавкие эвтектики*).

Наличие зон с увеличенной концентрацией примеси приводит к ***существенному снижению температуры окончания затвердевания сплава.***

Перераспределение примесей и легирующих элементов в сплавах происходит в период их пребывания при температурах, при которых существует заметная диффузионная подвижность примесей и этих элементов. Возможны два противоположных процесса: **гомогенизация** (выравнивание концентраций элементов по объемам зерен) и **сегрегация** (накопление элементов на отдельных составляющих структуры, границах зерен и скоплениях дефектов кристаллической решетки).

Перераспределение элементов между объемом зерен и их границами зависит от температуры. Заметное развитие гомогенизации получает в области температур выше $0,8T_{пл}$ как в процессе нагрева, так и при охлаждении.

9.4 Фазовые превращения в металлах в твердом состоянии

Ряд металлов (*Fe, Ti, Co и др.*) имеет несколько модификаций кристаллических структур при различных температурах.

Полиморфные превращения (переход из одной модификации кристаллической решетки в другую) в зависимости от условий охлаждения могут иметь **диффузионный** или **мартенситный** характер.

Фазовые превращения диффузионного типа аналогичны процессу кристаллизации жидкой фазы. Кинетика фазовых превращений в сталях при различных степенях переохлаждения описывается **С-образной** диаграммой изотермического превращения (рисунок 9.2).

Фазовое превращение в условиях непрерывного охлаждения или нагрева подчиняется тем же основным закономерностям, что и изотермическое превращение. Чем быстрее меняется температура, тем меньшее количество новой фазы успевает образоваться. Кинетика фазового превращения описывается термокинетической диаграммой превращения (рисунок 9.3).

При относительно высоких скоростях охлаждения (w'') исходная фаза может претерпевать только частичное фазовое превращение диффузионного типа.

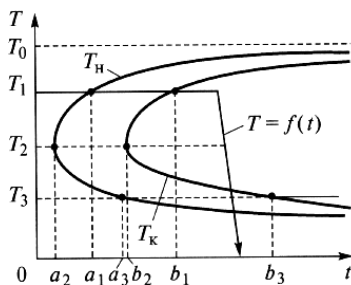


Рисунок 9.2 – С-образная диаграмма изотермических фазовых превращений

(T_n и T_k – температура начала и конца превращения диффузионного типа; T_0 – равновесная температура начала фазовых превращений)

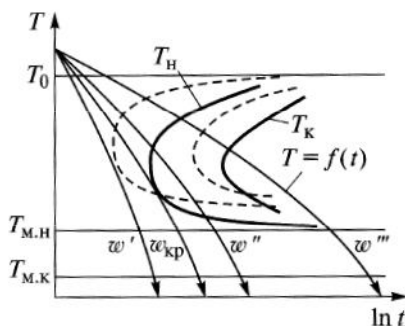


Рисунок 9.3 – Термокинетическая диаграмма фазового превращения:

T_0 – равновесная температура начала фазовых превращений; w' , w'' , w''' – скорости непрерывного охлаждения; $w_{кр}$ – критическая скорость охлаждения; $T_{м.н.}$ и $T_{м.к.}$, T_n и T_k – температуры начала и конца превращений соответственно мартенситного и диффузионного типов; штриховые линии – кривые изотермического превращения; t – время по логарифмической шкале

При очень высоких скоростях, превышающих критическую ($w' > w_{кр}$), фазовое превращение диффузионного типа не успевает начаться и сплав переохлаждается до температур,

при которых превращение не может развиваться из-за чрезвычайно низкой скорости диффузионных процессов.

В сварочной практике применяют диаграммы, преобразованные в вид *(по сравнению с материаловедческими)*, удобный для практического использования при выборе теплового режима сварки.

Во-первых, нагрев соответствует сварочному термическому циклу с максимальной температурой, близкой к температуре солидуса сплава.

Во-вторых, тип и температура превращений даются в зависимости от скорости охлаждения при сварке.

В диаграммах для сталей принято использовать скорость охлаждения в диапазоне 600...500 °C ($w_{6/5}$, °C/c) или время охлаждения от 800 до 500 °C ($t_{8/5}$, с). Такие диаграммы получили название **анизотермических** диаграмм распада аустенита при сварке – АРА.

Превращениями диффузионного типа являются **ферритное и перлитное** превращения при **распаде аустенита** в условиях медленного охлаждения углеродистых и низколегированных сталей.

Ферритное превращение начинается при некотором переохлаждении ниже A_{F3} . Зародыши ферритной фазы возникают на границах аустенитных зерен. Этому процессу предшествует **диффузионный отвод углерода** во внутренние части зерна аустенита. При непрерывном охлаждении количество ферритной фазы, как правило, не достигает равновесного значения. При $T < A_{F1}$ происходит перлитное превращение оставшейся части аустенита. При этом образуется перлит с содержанием углерода $C < 0,8$, а температура превращения может быть существенно ниже A_{F1} (до 550 °C). При большем переохлаждении (до 400 °C) возможно образование сорбита, троостита – разновидностей перлита.

В сталях с крупным аустенитным зерном (*сварной шов, перегретая околошовная зона*) при относительно высоких скоростях охлаждения возможно образование **видманистеттовой** структуры, приводящей к снижению пластичности.

Перлитное превращение характерно для среднеуглеродистых сталей. Оно происходит при сравнительно невысоких скоростях охлаждения.

Характеристикой перлитной структуры также служит окончательный размер перлитных зерен. Чем меньше размер бывших аустенитных зерен и ниже температура превращения, тем меньше размер перлитных зерен. С уменьшением их размера повышаются прочностные свойства структуры.

Мартенситное превращение характерно для среднеуглеродистых и легированных сталей при больших скоростях охлаждения. Превращение происходит *бездиффузионно* при переохлаждении аустенита до температур, при которых диффузионные перемещения атомов железа практически прекращаются, а атомов углерода существенно замедляются. Оно начинается и заканчивается при постоянных для сталей данного состава температурах $T_{\text{м.н.}}$ и $T_{\text{м.к.}}$, не зависящих от скорости охлаждения.

По внутреннему строению различают следующие типы мартенсита: *пластинчатый* и *пакетный*. Пластинчатый мартенсит также называют игольчатым и низкотемпературным. Он образуется в среднеуглеродистых легированных сталях. В зависимости от размеров зерна аустенита пластинчатый мартенсит может быть *крупноигольчатым, мелкоигольчатым или бесструктурным*.

Тип мартенсита определяет его механические и технологические свойства. Например, пластинчатый мартенсит в околошовной зоне более склонен к образованию холодных трещин, чем пакетный.

Бейнитное превращение, называемое также промежуточным, характерно для сварки большинства углеродистых и легированных сталей. Оно происходит в интервале температур от 500 °С до $T_{\text{м.н.}}$. Бейнитному предшествует диффузионное перераспределение углерода в аустените, в результате чего образуются участки, обедненные и обогащенные углеродом.

Верхний бейнит имеет пониженную прочность и невысокие пластичность и ударную вязкость вследствие относительно большого размера зерна.

Нижний бейнит, наоборот, обладает благоприятным сочетанием указанных свойств.

9.5 Фазовые и структурные превращения в сталях при сварке

При сварке сталей металл зоны термического влияния претерпевает последовательно целый ряд фазовых и структурных превращений на этапах нагрева и охлаждения сварочного термического цикла.

На этапе нагрева сварочного термического цикла на участке полной перекристаллизации (*участок зоны термического влияния, нагреваемый выше $A_{с3}$*) в металле проходят процессы аустенитизации, роста зерна и перераспределения легирующих элементов и примесей.

Аустенитизация – это переход $Fe_{\alpha}(C) \rightarrow Fe_{\gamma}(C)$.

При нагреве до температур начала аустенитизации сталь, как правило, имеет структуру феррито-перлитокарбидной смеси в пределах бывших аустенитных зерен, сформировавшихся при предыдущих технологических обработках.

Рост зерна аустенита характерен для околошовной зоны, нагреваемой до высоких максимальных температур. Интенсивный рост начинается после достижения некоторой критической температуры. Различают стали **природно-крупнозернистые и природно-мелкозернистые**. Критическая температура для этих сталей составляет соответственно ~ 1000 и ~ 1100 °С. Критическая температура зависит от состава стали, наличия примесей и метода раскисления при ее выплавке.

Одновременно с перераспределением элементов по телу зерна возможна их **сегрегация** (*неоднородность*) на границах зерен. Обогащение границ примесями – одна из причин хрупкого межкристаллического разрушения в околошовной зоне.

На этапе охлаждения сварочного термического цикла основным процессом в сталях, окончательно определяющим микроструктуру и свойства металла сварных соединений, является превращение аустенита.

Анализ превращений в сталях при охлаждении в процессе сварки выполняют с помощью **анизотермических диаграмм превращения (распада) аустенита** (АРА) применительно к термическим условиям сварки (рисунок 9.4).

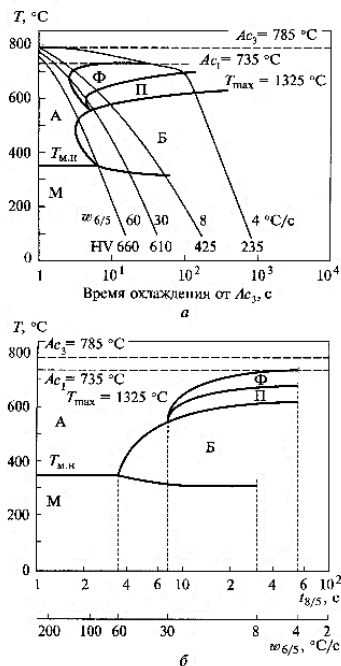


Рисунок 9.4 – Диаграмма превращений в стали 45 в координатах температура – время (диаграмма ТДК) (а) и температура – скорость охлаждения (диаграмма АРА) (б):

А, Ф, П, Б и М – соответственно аустенит, феррит, перлит, бейнит и мартенсит; t – время охлаждения от 800 до 500 °C; $w_{6/5}$ – скорость охлаждения в диапазоне 60...500 °C

Их строят с помощью экспериментальных методов исследований структуры металла. Наибольший интерес представляет структура зоны термического влияния и особенно ее околошовного участка, которые во многих случаях являются «слабым» местом сварных соединений с позиций прочности и образования дефектов.

На диаграмме АРА фиксируются критические значения скорости охлаждения в диапазоне 600...500 °C ($w_{6/5}$), соответствующие появлению 5 % мартенсита (W_{M1}), образованию 90 % мартенсита (W_{M2}), появлению 5 % феррита + перлита

($W_{\text{фп1}}$) и образованию 100 % феррита + перлита ($W_{\text{фп2}}$). При наличии данных о параметрах сварочного термического цикла, задавая тип и размеры сварного соединения, способ и режим сварки, можно определить состав структуры околошовной зоны однослойного соединения или время охлаждения от 800 до 500 °С ($t_{8/5}$). При наличии данных о параметрах сварочного термического цикла, задавая тип и размеры сварного соединения, способ и режим сварки, можно определить состав структуры околошовной зоны однослойного соединения.

9.6 Физические основы формирования сварочных деформаций и напряжений в различных металлах и сплавах

Тепловая «нагрузка» на металл при сварке, в отсутствие внешних силовых воздействий, приводит к возникновению собственных сварочных деформаций и напряжений. Причины образования сварочных деформаций и напряжений рассмотрим на примере сварки относительно узкой пластины продольным стыковым швом (*случай одноосного напряженного состояния*).

1) **Неравномерный разогрев** с максимальной температурой нагрева в зоне шва приводит к различным значениям термического линейного расширения шва и слоев металла, параллельных шву. Однако прочная связь между слоями ограничивает расширение наиболее нагретых слоев (*обуславливает их сжатие*) и дополнительно увеличивает размер менее нагретых слоев (*их растяжение*). Эти деформации и напряжения являются временными. Если по каким-либо причинам деформации были упругими, то после охлаждения деформации и напряжения исчезают.

2) **Высокотемпературные пластические деформации укорочения** возникают в наиболее нагретых слоях (*шва и зоны термического влияния*). В них сжимающие напряжения достигают значений предела текучести, соответствующих максимальной температуре нагрева, что приводит к пластическому течению металла. После охлаждения слои, претерпевшие пластическую деформацию укорочения, в силу прочной связи со слоями основного металла оказываются растянутыми, а периферийные слои основного металла – сжатыми. Эти деформации и напря-

жения являются остаточными. Сварное соединение получает продольную ($A_{пр}$) и поперечную ($A_{поп}$) сварочную усадку, а сварная пластина – соответственно перемещение торцев и боковых граней в сторону уменьшения ее длины и ширины.

На практике часто сварочные деформации понимают буквально как изменения формы и размеров сварных изделий: продольная и поперечная усадка, деформация изгиба, угловая деформация и др. Эти деформации являются перемещениями заданной точки (*плоскости*) изделия по отношению к определенной его точке (*плоскости*), принятой за нулевую.

При анализе напряженно-деформированного состояния в различных зонах сварного изделия рассматривают деформационные процессы в пределах локальной базы в этих зонах при сварке. Размер базы выбирают по возможности минимальным, чтобы можно было принять значения деформаций и напряжений в ее пределах постоянными.

Разные металлы и сплавы имеют подобные по физическому характеру схемы кинетики развития составляющих деформации и напряжений. Различие этих схем связано с разной зависимостью коэффициента термического расширения от температуры и с наличием полиморфных и фазовых превращений. В сталях временные напряжения могут менять знак, остаточные напряжения могут быть растягивающими и сжимающими и достигать предела текучести.

Напряженно-деформированное состояние в высокотемпературной области (*шов, зона термического влияния*) в процессе охлаждения оценивают деформационными параметрами, одним из которых является *темп деформации*:

$$\alpha_{\partial} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial T}. \quad (9.1)$$

При увеличении габаритов свариваемых листов (*ширины, толщины*) напряженное состояние может быть плоским (*двухосным*) и объемным (*трехосным*). Так, при сварке тонкого широкого листа появляется поперечная составляющая собственных

сварочных напряжений σ_y , обусловленная поперечной сварочной усадкой $\Delta_{\text{поп}}$

Знак и распределение напряжения σ_y (по поперечной оси Oy) в центральной части листа имеют тот же характер, что и у продольного напряжения σ_x . Однако значение поперечной составляющей σ_y существенно меньше значения продольной составляющей σ_x и зависит от ширины листа и длины шва. Их различие имеет место на концевых участках сварного шва, где $\sigma_y < 0$.

Темп линейной деформации поперек оси шва также имеет свою особенность, определяемую расположением сечения по центру и концевым участкам шва. В центральной части листа на этапе охлаждения темп деформации обусловлен линейной поперечной усадкой и монотонно возрастает с увеличением ширины листа. В начале шва, при условии сварки по зазору или полного проплавления листа, темп деформации может иметь весьма высокое значение (если отсутствуют или не приварены входные технологические планки). Это объясняется тем, что к действию линейной поперечной усадки добавляется действие изгибающих моментов, раскрывающих кромки еще не затвердевшего шва на этапе завершения его кристаллизации. Изгибающие моменты $M_{\text{изг}}$ возникают вследствие продольного удлинения близлежащих относительно сварочной ванны слоев металла в результате их нагрева движущимся впереди источником нагрева. При этом, чем больше неравномерность распределения максимальных температур нагрева в поперечном направлении, а, следовательно, больше разница в удлинении рядом лежащих слоев, тем больше значение изгибающего момента. Раскрытие кромок ограничивается «жесткостью» листа, т. к. менее нагретые периферийные зоны листа оказывают сопротивление действию изгибающих моментов. При применении входной и выходной планок, прочно приваренных к торцам листов и исключающих раскрытие кромок, темпы деформации на разных участках шва становятся практически одинаковыми.

Сварка листов в незакрепленном, свободном состоянии выполняется при изготовлении сварных заготовок, которые в даль-

нейшем используются при монтаже сложных по форме сварных конструкций. В этом случае часто сварными швами соединяют жестко закрепленные элементы. При этом собственные напряжения заготовок дополняются напряжениями, возникающими в швах при их сварке. Эта составляющая зависит от жесткости закрепления свариваемых элементов и удельной погонной энергии и может иметь большие значения, равные пределу текучести материала.

Вопросы для самопроверки

1. Что понимают под физической и технологической свариваемостью? Какими критериями и показателями оцениваются свариваемость в зависимости от назначения сварной конструкции?

2. Какие виды дефектов кристаллической решетки, их свойства и роль в развитии физических и механических процессов образуются при технологической обработке металлов, в том числе при сварке?

3. Что понимают под фазовыми и структурными превращениями в металлах при технологических воздействиях? Какие виды превращений имеют место в сталях при сварке?

4. Какими закономерностями оценивают процесс кристаллизации чистых металлов и сплавов? Укажите особенности кристаллизации металла сварных швов.

5. Что понимают под схемой кристаллизации сварных швов? Перечислите параметры процесса кристаллизации и поясните их влияние на склонность к образованию дефектов и на механические свойства сварных швов.

6. Какова кинетика видоизменения зерен в зоне термического влияния сварных соединений сталей при многослойной сварке?

7. Каковы физические основы и причины образования сварочных деформаций и напряжений, кинетика формирования собственных сварочных напряжений в сталях при сварке в процессе охлаждения?

10 ДЕФЕКТЫ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ [8, 9, 10]

10.1 Типичные дефекты и их классификация

Качество сварных соединений в значительной мере определяет эксплуатационную надежность и экономичность конструкций. Наличие в сварных соединениях дефектов – *отклонений от заданных свойств, формы и сплошности шва, свойств и сплошности околошовной зоны* – может привести к нарушению герметичности, прочности и других эксплуатационных характеристик изделия, а при некоторых обстоятельствах вызвать аварию его в процессе изготовления, монтажа или работы.

Дефекты, появляющиеся в сварных соединениях, различаются *по месту расположения (наружные и внутренние)* и *причинам возникновения*. В зависимости от причин возникновения их можно разделить на две группы.

К *первой группе* относятся дефекты, появляющиеся в процессе образования, формирования и кристаллизации сварочной ванны и остывания сварного соединения. Это кристаллизационные и холодные трещины в металле шва и околошовной зоне, поры, шлаковые каналы, флокены, зона несплавления, утяжины, отклонения от необходимых прочностных и пластических свойств металла шва и сварного соединения, а также неблагоприятные изменения свойств металла околошовной зоны.

Ко *второй группе* дефектов, которую назовем дефектами формирования швов, относятся непровары, подрезы, наплывы, прожоги, кратеры, несимметричность расположения угловых швов, уменьшение размеров швов и др. Возникновение подобных дефектов обычно обусловлено неправильным технологическим процессом, нарушением режима сварки, неисправностью оборудования, низкой квалификацией рабочих, плохой подготовкой и сборкой под сварку элементов конструкции, неточным расположением конца электрода по отношению к свариваемым кромкам, недоступностью места сварки и возникающим из-за этого неудобством выполнения сварочных манипуляций, а также другими причинами, связанными с культурой производства.

10.2 Технологическая прочность материалов при сварке

Понятие технологической прочности. Технологическая прочность металлов и сплавов – это способность сохранять сплошность в процессе технологических тепловых и силовых воздействий при изготовлении изделий (*сварке, литье, обработке давлением и других процессах*). Технологическая прочность – это «*кинетический*» параметр, непрерывно изменяющийся с течением времени в зависимости от температуры, агрегатного состояния, фазового состава структуры, скоростных характеристик технологических нагрузок и других факторов. Для суждения о технологической прочности необходимо в процессе всего технологического цикла сопоставлять прочностные и пластические свойства материала с параметрами напряженно-деформированного состояния, создаваемого технологическими нагрузками.

Условием обеспечения технологической прочности является следующее: в каждый текущий момент технологического цикла значения параметров деформационной способности или сопротивления материала разрушению должны превышать значения соответствующих параметров напряженно-деформированного состояния. Нарушение этого условия приводит к разрушению материала, например, при сварке – к образованию различного типа трещин: горячих, холодных, ламелярных и др.

Одной из основных задач испытаний, проводимых при определении технологической свариваемости материала, является оценка его технологической прочности при том, или ином способе сварки, т. к. с увеличением технологической прочности повышается вероятность получения качественного сварного соединения.

10.3 Горячие трещины при сварке

Трещины в изделиях являются одним из наиболее опасных видов дефектов.

По размерам и влиянию на прочность металла различают две категории трещин:

1) **микротрещины** (*размеры их соизмеримы с размерами параметров кристаллической решетки; имеются практически всегда в реальных кристаллах*);

2) **макротрещины**, возникающие в сварном соединении в процессе сварки или эксплуатации изделия (*являются опасным дефектом – причиной разрушения конструкции*).

Образование макротрещин становится возможным тогда, когда пластические деформации, возникавшие в металле при неравномерном нагреве и охлаждении, исчерпают его деформационную способность и напряжения, возрастая, достигнут значений предела прочности, т. е. только в том случае, когда величина собственных напряжений в шве достигнет значений предела прочности металла при данной температуре.

Величина и характер пластических деформаций при кристаллизации шва зависят от относительного изменения объема металла:

$$\Delta V = \frac{V_T - V_{\text{ж}}}{V_{\text{ж}}}. \quad (10.1)$$

Объем металла с уменьшением температуры уменьшается (рисунок 10.1), во время структурного превращения аустенита в мартенсит (*перлит*) увеличивается, а при переходе металла из жидкого состояния в твердое – уменьшается скачкообразно.

Если бы сокращение объема металла происходило в свободном состоянии, то в металле не возникало бы никаких напряжений и деформаций. Однако в условиях сварки изменение объема металла в зоне сварного шва сдерживается окружающими участками основного металла.

Определение фактических деформаций кристаллизующегося и остывающего металла шва имеет существенное значение для оценки вероятности появления горячих трещин, т. к. последние могут образоваться только в том случае, если в металле

шва возникнут деформации растяжения, превышающие деформационную способность материала при данной температуре.

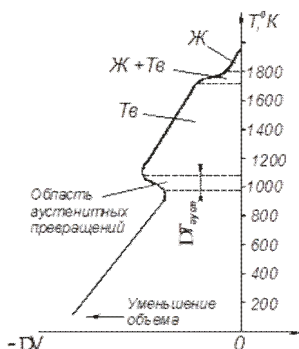


Рисунок 10.1 – Схема относительного изменения объема стали при охлаждении

Так как металл шва связан с основным металлом, который препятствует его свободной усадке при остывании, то фактическая деформация шва может существенно отличаться от температурных деформаций, происходящих при остывании металла в свободном состоянии.

Под действием сварочного источника тепла температура основного металла также изменяется, причем некоторые участки его в данный момент времени остывают и в связи с этим укорачиваются, но с другой скоростью, чем остывающий металл шва, а более удаленные участки продолжают нагреваться и, следовательно, расширяются.

Необходимым условием возникновения горячих трещин является наличие существенной разницы между фактическими деформациями кристаллизующегося и остывающего металла шва и теми тепловыми деформациями, которые имели бы место в том случае, если бы металл шва претерпевал укорочение, пропорциональное снижению температуры в процессе его охлаждения.

Установлено, что сжатие шва имеет место только в начальный период кристаллизации. К моменту окончания затвердевания и все последующее время наблюдаются значительные де-

формации растяжения, обуславливающие в этом случае наибольшую вероятность образования горячих трещин.

Отсюда следует, что величина пластической деформации металла при сварке пропорциональна температуре его нагрева.

Следовательно, скорость изменения пластической деформации металла пропорциональна скорости его охлаждения. Поэтому, с увеличением скорости охлаждения металла, повышается вероятность образования кристаллизационных трещин.

Деформационная способность металла и его сопротивление деформациям зависят от агрегатного состояния, которое в процессе кристаллизации и остывания металла проходит последовательно такие стадии: *жидкую, твердожидкую и твердую*. Металлы в жидком состоянии оказывают очень небольшое сопротивление сдвиговым деформациям. Именно поэтому они обладают высокой пластичностью при таких деформациях. В то же время, жидкий металл имеет достаточно высокое сопротивление отрыву.

Образование горячих трещин связано с характером кристаллизации и с возникновением в процессе кристаллизации и остывания напряжений и деформаций, способных разрушить металл на определенных стадиях кристаллизации.

Горячие трещины при сварке (рисунок 10.2, 10.3) представляют собой хрупкие межкристаллические (*по границам зерен*) разрушения металла шва и зоны термического влияния, возникающие в твердо–жидком состоянии при завершении кристаллизации (*кристаллизационные трещины*), а также в твердом состоянии при высоких температурах (*подсолидусные трещины*).

Горячие трещины имеют межкристаллитный характер, т. е. проходят по границам между кристаллами. В зависимости от ориентации по отношению к оси шва горячие трещины бывают продольными и поперечными. Продольные трещины могут располагаться по оси шва в месте стыка столбчатых кристаллитов или между соседними кристаллитами, поперечные трещины – между соседними кристаллитами. Иногда наблюдаются дефекты, являющиеся комбинацией продольных и поперечных трещин.

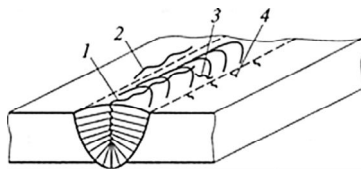


Рисунок 10.2 – Виды горячих трещин в шве и околошовной зоне:

1 и 2 – продольные; 3 и 4 – поперечные

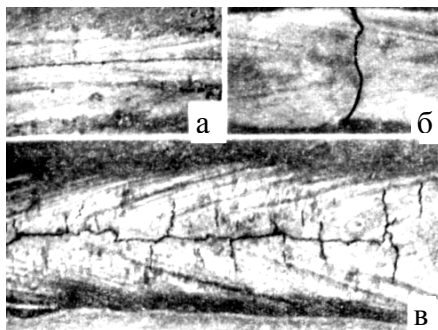


Рисунок 10.3 – Кристаллизационные трещины в металле шва:
а – продольная; б – поперечная; в – продольная и поперечные

При дуговой сварке горячие трещины выходят (рисунок 10.4, а; 10.5, а) или не выходят (рисунок 10.4, б; 10.5, б) на поверхность шва.

При электрошлаковой сварке трещины образуются, как правило, в середине сечения шва и не выходят на его поверхность (рисунок 10.6, а, б). Поверхности трещин, выходящих наружу шва, обычно окрашены в *цвета побежалости*, т. к. покрыты тонкой пленкой окислов (рисунок 10.6, а). Поверхность не выходящих наружу трещин имеет серо-белый цвет без металлического блеска (рисунок 10.6, б), что обусловлено отсутствием окисляющего действия воздуха на металл.

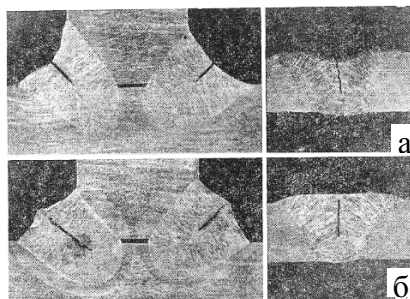


Рисунок 10.4 – Расположение кристаллизационной трещины по сечению шва (дуговая сварка):

*а – трещина, выходящая на поверхность шва;
б – трещина, не выходящая на поверхность шва*

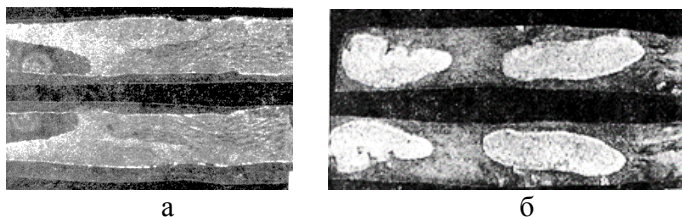


Рисунок 10.5 – Кристаллизационные трещины в изломе шва:

*а – трещины, выходящие на поверхность шва;
б – трещины, не выходящие на поверхность шва*

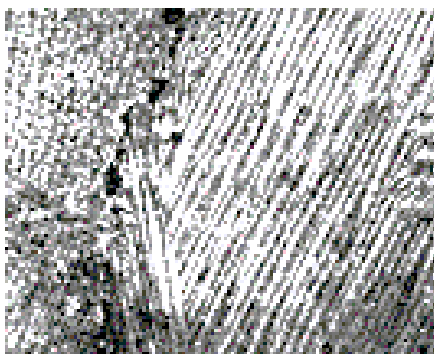


Рисунок 10.6 – Кристаллизационная трещина (электрошлаковая сварка)

Трещины, выходящие на поверхность шва, обнаруживаются при внешнем осмотре и с помощью магнитного порошка. Трещины, не выходящие на поверхность шва, обнаруживаются просвечиванием швов рентгеновскими или гамма-лучами, проверкой швов ультразвуком, при разрушении шва по его излому или по макро- и микрошлифам.

Трещины, в подавляющем большинстве случаев, являются недопустимым дефектом, т. к. могут послужить причиной (*очагом*) хрупкого, усталостного и коррозионного разрушения конструкции или детали в процессе изготовления, а также эксплуатации. Горячие трещины являются одним из основных видов брака при сварке.

Механизм образования горячих трещин сводится к следующему. В области нагрева до температур, близких к температуре равновесного солидуса (T_S), прочность и пластичность сплавов резко падают. Пластичность остается на низком уровне в некотором интервале температур, а затем опять повышается. Такое неоднозначное изменение свойств можно объяснить, рассмотрев процесс кристаллизации металла из жидкого состояния.

Исследуемый металл, нагретый до расплавления, охлаждается и, начиная с **температуры ликвидуса T_L** , в нем образуются зародыши твердой фазы. До тех пор, пока количество твердой фазы невелико, металл находится в жидко-твердом состоянии. Пластичность расплава практически не отличается от пластичности жидкости, т. к. кристаллы твердой фазы свободно перемещаются в жидкости, не ограничивая ее способность перетекать и занимать любую форму (рисунок 10.7, а).

Прочность такого жидко-твердого агрегата близка к нулю, т. е. сопротивление деформированию практически отсутствует. Начиная с некоторой температуры, названной **температурой верхней границы интервала хрупкости (T_B)**, металл переходит в стадию твердожидкого состояния, характеризующегося таким увеличением количества твердой фазы, при котором возможность жидкости перетекать между затвердевшими зернами резко уменьшается (рисунок 10.7, б).

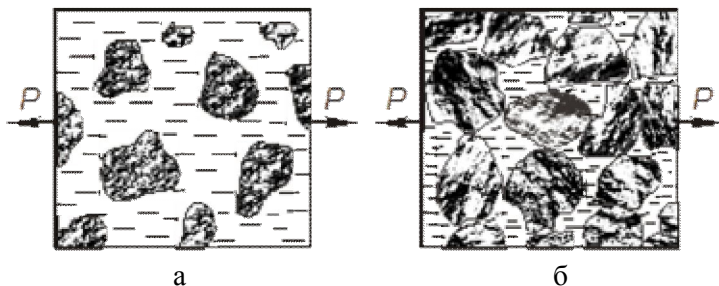


Рисунок 10.7 – Схема, иллюстрирующая механизм деформирования сплава:

а – в жидко-твердом; б – твердо-жидком состоянии

При деформировании происходит заклинивание образовавшихся зерен металла и дальнейший процесс становится возможным только в случае пластической деформации самих зерен либо смещения их друг относительно друга. Обычно оба эти процесса протекают одновременно. Деформация такого двухфазного агрегата при условии сохранения сплошности в направлении действия сил P возможна только при смятии отдельных точек контакта зерен, поворота прилегающих зерен и их деформации. В ранней стадии такого деформирования не исключена возможность некоторого перетекания жидкости в межзеренные пространства. В случае, если циркуляция жидкости между зернами нарушена, необходимо, чтобы существующие между ними жидкие прослойки сами воспринимали растягивающие напряжения. Вероятность такого явления в этой стадии затвердевания велика, т. к. сопротивление разрушению малых замкнутых объемов жидкости может быть значительным. Оно зависит от поверхностного натяжения, температуры и вязкости жидкости. Однако прочность закристаллизовавшейся твердой фазы в этот период намного больше и поэтому, если наступает разрушение, оно происходит по границам зерен, т. е. имеет межкристаллический характер. Пластичность металла, находящегося на такой стадии затвердевания, очень мала – доли процента.

В то же время сопротивление пластическим деформациям с возникновения явления заклинивания зерен и ограничения циркуляции жидкой фазы начинает возрастать. Если значение де-

формации в металле, находящемся в таком состоянии, превысят его деформационную способность, произойдет хрупкое разрушение по жидким прослойкам.

С дальнейшим снижением температуры возрастает объемная прочность жидкости, уменьшается ее объем, увеличивается число контактов между зернами. Одновременно с этим повышается и прочность самих границ зерен. При некоторой температуре границы упрочняются настолько, что разрушение начинает проходить не по ним, а по телу самих зерен. При этом пластические свойства материала возрастают, т. к. деформация уже не концентрируется по малым прослойкам между зерен, а воспринимается всем агрегатом в достаточной степени равномерно. Температура резкого возрастания пластических свойств находится ниже температуры равновесного солидуса и носит название *нижней границы хрупкости* (T_n). Интервал температур, заключенный между верхней и нижней температурной границами хрупкого состояния металла, называется *температурным интервалом хрупкости или сокращенно ТИХ*.

Размер ТИХ определяется химическим составом сплавов. Минимальная пластичность в ТИХ определяется структурой и свойствами металла в твердожидком состоянии на завершающем этапе кристаллизации: формой и размерами кристаллитов, количеством и распределением жидкой фазы в междокристаллитных пространствах, свойствами жидкой фазы (*жидкотекучестью, вязкостью, прочностью*).

Сопrotивляемость сварного соединения образованию горячих трещин определяется следующими основными факторами:

- 1) пластичностью металла в температурном интервале хрупкости;

- 2) величиной этого интервала и характером (*темпом, скоростью*) нарастания деформаций в этом интервале;

- 3) деформационной способностью металла шва в температурном интервале образования горячих трещин.

В сварных швах в зоне образования продольных кристаллизационных горячих трещин по оси шва эти параметры зависят от следующих основных факторов:

- 1) характера кристаллизации (*равноосная, столбчатая*);

2) типа кристаллизации (*дендритный, ячеисто-дендритный и ячеистый*);

3) угла схождения осей противоположно растущих кристаллитов (*срастание кристаллитов боковыми гранями или их вершинами*);

4) размера поперечных сечений элементов кристаллитов – (*мелко- и крупно кристаллитные швы*);

5) количества и состава жидкой эвтектической фазы в период завершения затвердевания (*полностью или частично заполняющей межкристаллитные пространства*);

6) распределения высокотемпературных деформаций по поперечному сечению шва (*относительное равномерное или сконцентрированное в зоне срастания кристаллитов в центре шва*).

Разрушению способствует скопление в участках, затвердевающих последними, большого количества примесей (*в основном серы и фосфора*), а также напряжения, возникшие в результате искажения параметра кристаллической решетки в поверхностных объемах кристаллитов. Скопления примесей тем больше, чем медленнее охлаждается сплав. Степень такой неоднородности для различных случаев сварки может меняться, поскольку она зависит от ряда технологических факторов (*продолжительности пребывания металла шва при температурах в интервале кристаллизации, расстояния, на которые могут переместиться атомы разных элементов в твердой и жидкой фазах при соответствующих температурах и продолжительностях с учетом их взаимовлияния на скорости диффузии и пр.*).

В сварочной ванне, при мало отличающихся температурах, на границе металл – шлак идут процессы удаления серы и фосфора, окисления углерода, восстановления и перехода в металл кремния и марганца. Все эти процессы определяются теми же условиями перемещения атомов элементов в ванне жидкого металла, что и образование ликвационной неоднородности при кристаллизации.

Таким образом, наличие ликвационных зон по границам зерен является одной из металлургических причин склонности к

кристаллизационным трещинам. Отрицательная роль ликвационных зон на границах кристаллитов усугубляется тем, что они совпадают с местами наибольшей плотности несовершенств кристаллического строения металла.

Горячие трещины могут быть не только кристаллизационными, они могут возникать межкристаллитно и несколько ниже температуры кристаллизации.

Возможно также образование горячих трещин в твердом состоянии при высоких температурах. Потенциальную склонность к образованию горячих трещин имеют все конструкционные сплавы при любых видах сварки плавлением, а также при некоторых видах сварки давлением, сопровождающихся нагревом металла до подсолидных температур.

10.3.1 Влияние растягивающих напряжений

В реальных условиях сварки практически невозможно полностью устранить влияние растягивающих напряжений на кристаллизующийся металл сварочной ванны. Поэтому задача сводится к уменьшению величины этих напряжений, к отдалению момента возрастания их до значения, которое может вызвать пластическую деформацию металла шва, приводящую к его разрушению. Это может быть достигнуто путем рационального конструирования узлов и элементов, уменьшения количества и сосредоточения швов, выбора оптимальной формы разделки кромок, устранения излишней жесткости узлов и других мер.

Уменьшение влияния растягивающих напряжений, за счет технологических мер, достигается путем предварительного подогрева, рационального порядка наложения швов и выбора способов и режимов сварки, обеспечивающих минимальную величину этих напряжений. Положительное влияние подогрева обусловлено отдалением момента возникновения растягивающих напряжений и снижением скорости их нарастания в период, когда металл шва обладает пониженной пластичностью.

Предварительный подогрев является эффективной мерой повышения стойкости металла шва против горячих трещин при сварке конструкционных и других сталей. Температура предва-

рительного подогрева, при которой не наблюдается образования трещин, зависит от химического состава металла шва, конструкции и сечения деталей, а также других факторов и обычно изменяется в пределах 150...500 °С.

При рациональном порядке наложения швов возможна сварка деталей с оптимальным их закреплением, что приводит к снижению растягивающих напряжений. На практике достаточно часто, особенно при сварке под флюсом низколегированных и среднелегированных сталей, наблюдается образование трещин в участках шва, непосредственно прилегающих к сборочным прихваткам, и у планок, служащих для вывода начала и конца шва за пределы соединения (рисунок 10.8).

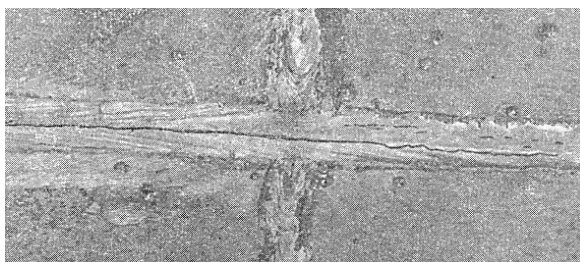


Рисунок 10.8 – Продольная трещина у выводной планки

При расплавлении сборочной прихватки зазор между свариваемыми кромками стремится увеличиться, в результате чего создаются значительные растягивающие напряжения. Эти напряжения и приводят в некоторых случаях к образованию трещин в не успевшем закристаллизоваться участке шва. Для устранения этого рекомендуется ставить прихватки со стороны, обратной наложению первого слоя (*при двусторонней сварке*), или уменьшать расстояние между прихватками.

Образование трещин в начале и конце шва обусловлено тем, что нежесткие выводные планки не могут удерживать концы листов от расхождения. Радикальной мерой предотвращения таких трещин является надежное закрепление концов свариваемых

мых деталей в приспособлении или увеличение жесткости выводящих планок.

10.3.2 Влияние химического состава металла шва

Химический состав металла шва оказывает первостепенное влияние на его стойкость против кристаллизационных трещин. Все элементы, входящие в состав металла шва, условно могут быть отнесены к трем основным группам.

Первая группа – элементы, присутствие которых снижает стойкость металла шва против горячих трещин. Такие элементы принято называть *вредными*.

Вторая группа – элементы, которые в зависимости от их сочетания и концентрации оказывают положительное (*полезные примеси*) или отрицательное (*вредные примеси*) влияние на стойкость металла шва против горячих трещин.

Третья группа – элементы, присутствие которых не оказывает влияния на стойкость металла шва против горячих трещин.

Сера – вредная примесь. Повышение содержания серы в металле шва резко снижает его стойкость против горячих трещин. Сера практически нерастворима в твердом железе, а поэтому находится в швах на стали в виде неметаллических сульфидных включений. Непосредственной причиной образования кристаллизационных трещин от серы являются легкоплавкие сульфидные прослойки, располагающиеся по границам кристаллитов металла шва. Для швов на углеродистых сталях наибольшее влияние на образование трещин кроме серы оказывают также углерод и марганец. Снижение содержания углерода приводит к снижению вредного влияния серы.

Фосфор часто оказывает вредное влияние на стойкость металла шва против горячих трещин и приводит к резкому снижению ударной вязкости металла, особенно при пониженных температурах. Так как растворимость фосфора в аустените меньше, чем в феррите, опасность образования горячих трещин от фосфора значительно больше в аустенитных швах. Наиболее опасен фосфор для швов с чисто аустенитной структурой.

Влияние фосфора и серы на образование горячих трещин взаимно усиливается тем, что места ликвации этих элементов в металле шва совпадают. Углерод также усиливает вредное влияние фосфора.

Углерод является важнейшим элементом, определяющим структуру и свойства металла шва, его прочность и поведение при эксплуатации. Вместе с тем углерод оказывает резко отрицательное влияние на стойкость металла шва против горячих трещин. В швах из углеродистых и низколегированных сталях углерод усиливает вредное действие серы. При сварке высоколегированных сталей углерод способствует образованию по границам кристаллитов легкоплавких пленок карбидного происхождения, что снижает стойкость швов против кристаллизационных трещин.

Кремний способствует образованию горячих трещин в швах на углеродистых сталях. Однако его вредное действие в этом отношении значительно слабее, чем углерода. В чисто аустенитных хромоникелевых швах кремний более опасен в отношении образования горячих трещин, чем в швах углеродистой стали.

Никель при небольших концентрациях в металле шва не оказывает влияния на стойкость его против возникновения горячих трещин. При высоких концентрациях (*свыше 1...2 %*) никель усиливает вредное влияние серы, способствуя этим образованию кристаллизационных трещин. Это влияние никеля обусловлено образованием легкоплавких включений сульфида никеля.

Никель является ценным легирующим элементом. Растворяясь в феррите, он повышает прочность и ударную вязкость металла шва при обычных и пониженных температурах при сохранении высокой пластичности.

Марганец уменьшает вредное влияние серы, повышая стойкость шва на углеродистых, низколегированных и хромоникелевых аустенитных сталях против образования горячих трещин. Марганец обладает более высоким, по сравнению с железом, химическим сродством к сере. При достаточно высокой его концентрации в металле шва сера связывается в тугоплавкий

сульфид марганца, включения которого менее опасны в отношении возникновения трещин, чем включения сульфида железа.

При высоком содержании марганца в металле шва в присутствии углерода возможно возникновение кристаллизационных трещин, вызванных легкоплавкой карбидной эвтектикой.

Марганец является постоянной составляющей стали; растворяясь в феррите, он повышает его прочность.

Хром уменьшает вредное влияние серы, повышая стойкость швов против образования горячих трещин. Обладая более высоким, чем железо, химическим сродством к сере, хром связывает ее в тугоплавкий сульфид хрома. Растворяясь в феррите, хром повышает прочность металла. При высоком содержании хрома и повышенном содержании углерода возможно образование кристаллизационных трещин по легкоплавким карбидным прослойкам.

Кислород повышает стойкость швов против образования горячих трещин, вызываемых серой. Вместе с тем повышение содержания кислорода снижает ударную вязкость металла шва на углеродистых и низколегированных конструкционных сталях и уменьшает пластичность аустенитных швов.

10.3.3 Методы снижения образования горячих трещин

Одним из наиболее широко применяемых технологических методов повышения стойкости шва против образования горячих трещин является уменьшение в нем содержания вредных и увеличение полезных элементов. Этого обычно достигают применением дополнительного металла с низкой концентрацией вредных примесей и содержащего полезные легирующие элементы, уменьшением доли участия основного металла в металле шва, а также выбором типа покрытия или флюса, при металлургическом взаимодействии которых с металлом сварочной ванны происходит очищение его от вредных и легирование полезными элементами.

Долю основного металла в шве уменьшают за счет применения соответствующих методов и режимов сварки (*сварки на малых токах, двумя дугами, по присадочной проволоке и т. п.*).

Для конструкций, работающих при повышенных температурах, необходимо стремиться к тому, чтобы металл шва по химическому составу был близок к основному металлу. Следует избегать различного легирования шва и основного металла, могущего привести в результате протекающих при этих температурах процессов диффузии к образованию в сварном соединении зоны с измененными свойствами (*например, обезуглероженной зоны*). Наличие структурной неоднородности может вызвать резкую концентрацию напряжений и преждевременный выход конструкции из строя.

10.3.4 Влияние формы сварочной ванны

Изменение способа и режима сварки приводит к изменению формы сварочной ванны (*формы шва*) и, как следствие, к изменению направления роста столбчатых кристаллитов и характера их взаимного срастания. Конфигурация шва характеризуется **коэффициентом формы – отношением ширины шва к глубине проплавления**. При узком и глубоком проваре (*коэффициент формы шва 0,8...1,2*) кристаллиты растут навстречу друг другу и встречаются между собой торцами под углом 180° или близким к нему (рисунок 10.9, а). При чашеобразной форме провара кристаллиты растут под острым углом друг к другу и встречаются торцами или боковыми гранями (рисунок 10.9, б). При широком и неглубоком проваре (*коэффициент формы шва более 5*) кристаллиты растут параллельно друг другу и, не встречаясь, выходят на поверхность шва (рисунок 10.9, в).

Влияние формы шва на стойкость его против образования горячих трещин наблюдается при дуговой, электрошлаковой и электроннолучевой сварке. Увеличение коэффициента формы шва до определенного предела (*примерно 6*) приводит к повышению стойкости металла шва против образования кристаллизационных трещин. Дальнейшее увеличение коэффициента формы шва снова приводит к снижению стойкости металла шва против образования горячих трещин. Швы с таким большим значением коэффициента формы встречаются главным образом

при наплавке, выполняемой электродной лентой, и при сварке последнего прохода многослойного шва.

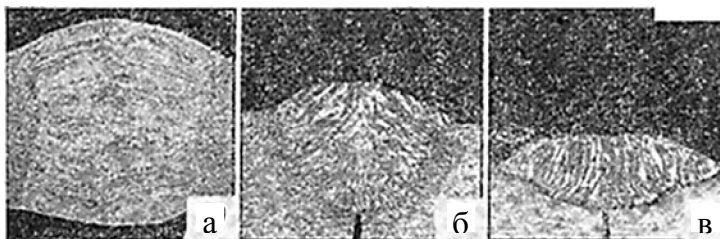


Рисунок 10.9 – Направление роста кристаллитов в зависимости от формы провара:

а – узкая; б – чашеобразная; в – плоская

Неблагоприятные условия в отношении формы сварочной ванны создаются при сварке первого слоя многослойного шва и углового шва с разделкой кромок, где требование обеспечения провара вершины угла предопределяет необходимость применения швов с малым коэффициентом формы (рисунок 10.10, а, б).

Из практики известно, что подобные швы обладают пониженной стойкостью против образования горячих трещин. Для улучшения условий формирования первого слоя многослойных швов увеличивают угол разделки и уменьшают величину приотупления.

Неблагоприятные условия для кристаллизации металла шва создаются при сварке стыковых односторонних швов с полным проваром на флюсовой подушке. При этом в результате ограниченного теплоотвода от основания сварочной ванны столбчатые кристаллиты растут навстречу друг другу, что определяет большую вероятность появления трещин (рисунок 10.11).

Изменение формы провара – один из широко применяемых технологических методов повышения стойкости металла шва против образования кристаллизационных трещин.

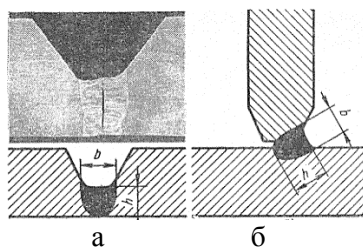


Рисунок 10.10 – Первый слой многослойного шва:
а – стыкового; б – углового с разделкой кромок



Рисунок 10.11 – Трещина в одностороннем шве

Более высокое значение коэффициента формы шва, наряду с другими факторами, определяет большую стойкость против образования горячих трещин швов, выполненных дуговой сваркой покрытыми электродами и электрошлаковой сваркой, по сравнению со швами, сваренными под флюсом. При типичных для первых двух способов режимах сварки коэффициент формы шва изменяется в пределах 2,5...5,0 против 1,0...2,5 при сварке под флюсом. Повышению стойкости швов против образования горячих трещин при ручной дуговой сварке способствует снижение доли основного металла в металле шва, а при электрошлаковой сварке – и наличие сопутствующего подогрева.

Стойкость металла шва против образования горячих трещин может быть повышена путем *измельчения первичной структуры* металла шва и изменения характера первичной кристаллизации.

Измельчение первичной структуры способствует уменьшению степени химической неоднородности, т. е. уменьшению концентрации вредных примесей по границам кристаллитов.

Измельчение первичной структуры металла шва может быть достигнуто за счет *увеличения скорости кристаллизации*.

Для этого уменьшают погонную энергию сварки путем снижения силы сварочного тока, повышения скорости сварки, увеличения числа проходов. Однако при этом снижается производительность сварочных работ. Указанного недостатка лишен способ введения дополнительного металла с присадочной проволокой, приводящей к охлаждению металла сварочной ванны и уменьшению размеров кристаллитов.

Измельчению первичной структуры металла шва способствует мелкозернистая структура основного металла, т. к. рост столбчатых кристаллитов начинается с оплавленной поверхности основного металла. Измельчение зерен основного металла достигается в процессе его производства. Наклёп кромок деталей перед сваркой также замедляет рост зерен основного металла под влиянием сварочного нагрева. Положительный эффект может быть достигнут и при соответствующей наплавке кромок перед сваркой.

Измельчение первичных кристаллитов и дезориентированное строение металла шва могут быть достигнуты введением в сварочную ванну модификаторов.

Модификаторами называют вещества, присутствие малых количеств которых изменяет процесс кристаллизации. Модификаторы могут быть двух типов. К *первому* типу относятся поверхностно-активные модификаторы, молекулы которых, адсорбируясь на гранях растущих кристаллитов металла, задерживают их рост и изменяют форму. Модификаторы *второго* типа образуют в жидком металле мельчайшие тугоплавкие частицы, являющиеся зародышами кристаллитов. Эти частицы должны иметь кристаллическую структуру, близкую к таковой модифицируемого металла. Эффект модифицирования при сварке стали наблюдается, например, при введении титана через керамический флюс или через электродное покрытие. Измельчить

первичную структуру металла шва можно путем механических колебаний сварочной ванны в процессе ее кристаллизации, механической вибрации электрода, электромагнитных колебаний и т. п. Подобный эффект дает также наложение ультразвуковых колебаний. Все эти способы вызывают дробление кристаллитов и перемешивание расплава, в результате чего первичная структура измельчается.

10.3.5 Горячие трещины в околошовной зоне

В околошовной зоне сварных соединений конструкционных сталей и сплавов иногда наблюдаются горячие трещины, проходящие по границам зерен основного металла (рисунок 10.12). Эти трещины могут распространяться в металл шва или другие участки околошовной зоны.

Горячие трещины образуются в околошовной зоне в процессе сварки при температурах ниже точки плавления основного металла. При этом на границах зерен собираются поверхностно-активные элементы, в том числе вредные примеси. В результате на межзеренных границах образуются легкоплавкие включения и прослойки. Величина взаимного проскальзывания зерен и относительное количество межзеренных границ, по которым оно происходит, значительно снижаются с уменьшением размера зерен. Поэтому при мелкозернистом основном металле стойкость против образования трещин в околошовной зоне больше, чем при крупнозернистом. В связи с этим катаные и кованые стали и сплавы по способности противостоять возникновению и развитию горячих трещин превосходят литые стали и сплавы.

Под воздействием процесса сварки неметаллические включения основного металла также претерпевают существенные изменения, сопровождающиеся образованием опасных в отношении возникновения горячих трещин пленообразных включений сульфидов и фосфидов.

Снижение опасности образования горячих трещин может быть достигнуто путем рационального легирования стали или сплава, совершенствования методов их изготовления, использо-

вания способов и режимов сварки с минимальным выделением теплоты.

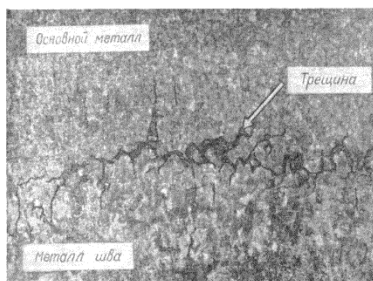


Рисунок 10.12 – Горячая трещина в околошовной зоне

В основном металле следует ограничивать содержание вредных примесей, в особенности серы и фосфора, прибегать к связыванию этих элементов в тугоплавкие соединения, а также способствовать измельчению и равномерному распределению их в основном металле.

10.3.6 Трещины повторного нагрева

Повторный нагрев – это термообработка сварных конструкций. Образующиеся при таких условиях трещины иногда относят к горячим, но часто выделяют в самостоятельный вид, и тогда одной из причин их образования является низкая пластичность тела зерна.

Известно, что деформация может проходить как по телу зерна, так и по границе зерен. В общем случае она проходит там, где сопротивление деформации меньше. Поэтому упрочнение тела зерна вследствие различных процессов приводит к тому, что деформации развиваются по границам зерен, либо в приграничных зонах. Вследствие этого и трещины всех видов чаще всего зарождаются на границах зерен. Не являются исключением и трещины повторного нагрева, которые характерны для стали, легированной сильными карбидообразующими элементами (*Vo*, *Mo*). В практике часто приходится сталкиваться с ни-

ми при сварке теплоустойчивых сталей марок 12ХМ, 12Х1МФ, 15Х1МФ, 15ХМ.

Изделия из таких сталей работают при $T=500...550\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ХМ); $T=550...580\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ХМФ).

Образование таких трещин связано с тем, что при длительном нахождении в интервале $600...700\text{ }^{\circ}\text{C}$ образуются и в теле зерна выпадают мелкодисперсные карбиды Vо и Мо, значительно упрочняющие тело зерна. В этом случае деформации протекают по границам зерен, что приводит к перемещению и повороту зерен относительно друг друга и на стыке трех зерен возможно зарождение трещины.

Меры предупреждения образования трещин:

- 1) уменьшение степени легирования Vо и Мо до допустимого уровня;
- 2) снижение содержания углерода в основном и присадочном металлах;
- 3) кардинальной мерой является повышение температуры отпуска выше $700\text{ }^{\circ}\text{C}$.

10.4 Образование холодных трещин

В отличие от горячих, холодные трещины (ХТ) образуются в сварных соединениях при относительно невысоких температурах (*ниже $200\text{ }^{\circ}\text{C}$*), когда металл шва и околошовной зоны приобретает высокие упругие свойства.

Холодные трещины являются типичным дефектом сварных соединений из среднелегированных и высоколегированных сталей перлитного и мартенситного классов. Значительно реже они возникают в соединениях из низколегированных ферритно–перлитных сталей и высоколегированных сталей аустенитного класса. Ввиду преимущественного возникновения холодных трещин в соединениях из восприимчивых к закалке мартенситных и перлитных сталей трещины этого типа иногда называют **закалочными**. Холодные трещины наиболее часто поражают околошовную зону и реже – металл шва.

Холодные трещины – локальные хрупкие разрушения материала сварного соединения, возникающие под действием соб-

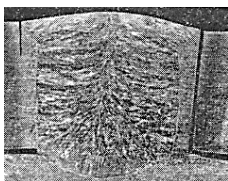
ственных сварочных напряжений. Размеры холодных трещин соизмеримы с размерами зон сварного соединения. По внешнему виду холодные трещины отличаются от кристаллизационных и горячих трещин меньшей шириной.

Холодные трещины – один из случаев замедленного разрушения «свежезакаленной» стали.

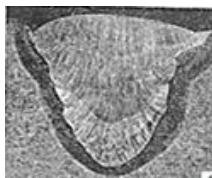
Закономерности замедленного разрушения следующие:

- 1) разрушение носит межкристаллический характер;
- 2) разрушение происходит через некоторый инкубационный период после приложения нагрузки при условии деформирования с малыми скоростями, или действия постоянного усилия;

В зависимости от расположения в сварном соединении различают продольные и поперечные трещины, залегающие в металле шва и околошовной зоне (рисунок 10.13). Особо выделяют продольные трещины, залегающие в зоне сплавления шва с основным металлом (рисунок 10.13, б), которые называют **отрывами**. Продольные трещины, расположенные в околошовной зоне, называют **отколами** (рисунок 10.13, а). Часто встречаются также поперечные и продольные трещины, переходящие из околошовной зоны в шов. Переход трещин из шва в околошовную зону встречается значительно реже. Поперечные трещины, зародившиеся в околошовной зоне и перешедшие в шов, показаны на рисунке 10.14. Трещины отмеченных видов могут выходить и не выходить на поверхность свариваемого металла. В зависимости от этого их называют наружными или внутренними трещинами.



а



б

Рисунок 10.13 – Холодные трещины
а – продольные околошовные (отколы); б – продольные
в зоне сплавления (отрывы)

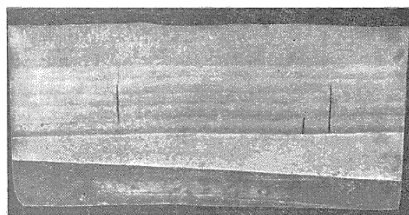


Рисунок 10.14 – Поперечные трещины, развивающиеся в направлении шва

Отколы являются наиболее общим и частым дефектом сварных соединений.

Отрывы встречаются, как правило, в сварных соединениях из закаливающихся сталей, в которых металл шва имеет аустенитную структуру. Такую структуру получают путем соответствующего легирования швов с целью придания им высоких пластических свойств и обеспечения высокой сопротивляемости околосшовной зоны образованию отколов.

Поперечные трещины в околосшовной зоне встречаются редко и, как правило, только при сварке многослойных швов.

Холодные трещины в шве образуются, главным образом, при повышенном содержании в металле шва углерода и легирующих элементов, близком к содержанию их в основном металле. Это бывает редко, т. к. с целью повышения стойкости металла шва против образования горячих трещин содержание углерода в шве обычно устанавливают более низким, чем в основном металле.

Основным видом холодных трещин в сварных соединениях являются околосшовные трещины.

Кроме температуры возникновения, внешнего вида и расположения в соединении важнейшей отличительной чертой холодных трещин является их **задержанное зарождение и замедленное развитие**. Они возникают по истечении некоторого времени после окончания сварки и затем медленно, на протяжении нескольких часов и даже суток, распространяются в металле.

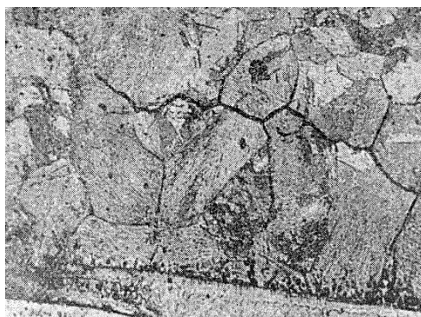
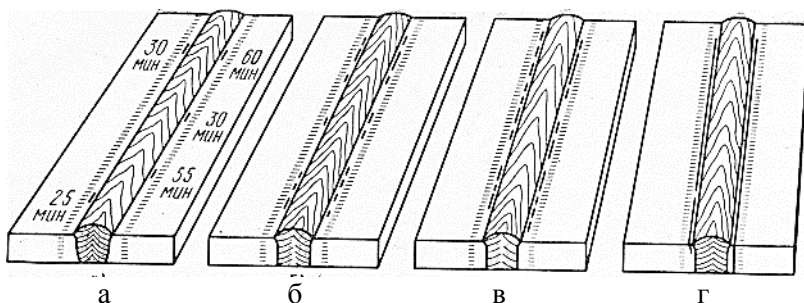
Типичный пример зарождения и развития продольной трещины в околошовной зоне однослойного стыкового соединения схематически показан на рисунке 10.15.

Первая зародышевая микротрещина появилась через 25 мин после сварки при температуре около 130 °С. На протяжении первого часа после сварки появилось еще несколько микротрещин (рисунок 10.15, а) на границах зерен, выходящих на поверхность свариваемых листов. Они отчетливо обнаруживались с помощью ультразвука и под микроскопом, но были невидимы невооруженным глазом. В дальнейшем появились новые и развивались ранее возникшие микротрещины (рисунок 10.15, б, в). Этот процесс происходил медленно – макроскопическая трещина образовалась лишь на третьи сутки (рисунок 10.15, г). Если начальное развитие холодных трещин идет по границам зерен, то в дальнейшем оно может проходить как по границам, так и по телу зерна (рисунок 10.15, д).

Описанная выше картина зарождения и развития холодных трещин может существенно изменяться в зависимости от химического состава основного металла, размеров и толщины соединяемых деталей, условий их закрепления перед сваркой, способов и режимов сварки и других факторов. Факторы, понижающие сопротивляемость сварных соединений образованию холодных трещин, ускоряют их зарождение и развитие, а факторы, повышающие эту сопротивляемость, замедляют.

Холодные трещины чаще всего развиваются прерывисто (*скачкообразно*), причем одновременно может развиваться несколько микротрещин. Если же в соединении при сварке накопилась большая энергия упругой деформации, то после начального периода замедленного развития холодная трещина растет мгновенно (*взрывообразно*) и со значительным звуковым и механическим эффектом распространяется на все сечение соединения. Отдельные детали при этом расходятся в стороны.

Установлено, что **основными факторами**, определяющими их возникновение и развитие в сварных соединениях, являются закалочные явления и водород, поступающий в околошовную зону из металла шва.



д

Рисунок 10.15 – Схема зарождения и развития холодных околошовных трещин в стыковом соединении стали:

- а – зарождение первых микротрещин; б – зарождение новых микротрещин и развитие ранее возникших через 6 часов после сварки; в – наличие микротрещин через 18 ч после сварки; г – образование сквозных микротрещин через 72 ч после сварки; д – зарождение микротрещин по границам зерен; $\times 100$*

Попадающий при сварке в металл шва водород диффундирует в околошовную зону. Здесь, скапливаясь в микропустотах и несовершенствах атомной решетки и превращаясь из атомарного в молекулярный, он создает громадное давление, под действием которого и происходит разрушение металла, т. е. образование трещин.

Водород не является главным и тем более единственным фактором, определяющим образование холодных трещин в сварных соединениях. Его влияние на их образование необхо-

димо рассматривать совместно с действием других факторов, обусловленных преимущественно закалочными явлениями в околошовной зоне и сварочными напряжениями

Механизм образования холодных трещин можно описать следующим образом. В процессе охлаждения в околошовной зоне сварного соединения закаливающихся сталей образуется характерная мартенситная структура металла и напряженное состояние, обусловленное суммированием сварочных и структурных напряжений. Характерной и отличительной особенностью напряженного состояния сварных соединений закаливающихся сталей является возникновение продольных сварочных напряжений. Это распределение характеризуется наличием сравнительно высоких напряжений сжатия в участке зоны на границе со швом и высоких напряжений растяжения в соседнем участке этой зоны, а также в сварном шве. Такое распределение продольных напряжений обусловлено значительным увеличением объема металла околошовной зоны, непосредственно граничащего со швом, вследствие мартенситного превращения.

В результате на границе раздела шов – основной металл появляются большие скалывающие напряжения, способствующие замедленному разрушению закаленной стали и образованию холодных трещин типа отколов.

Типичная структура закаленной стали, склонной к замедленному разрушению, наблюдается в участке перегрева околошовной зоны (рисунок 10.16).

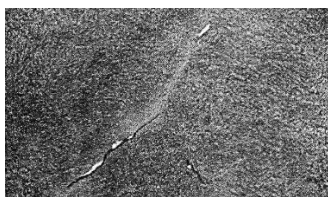
Она характеризуется крупным зерном и соответственно крупными мартенситными иглами, выходящими своими торцами на границы зерен. В результате изменений в пограничных объемах зерен искажается атомное кристаллическое строение металла.

В реальных металлах образование зародышей трещин, связано с наличием неметаллических включений. Последние могут располагаться в металле по границам и телу зерен. Зародышами холодных трещин могут стать неметаллические включения при их неблагоприятных форме, химическом составе и расположении, а также горячие трещины – надрывы, возникающие в участке крупного зерна околошовной зоны.

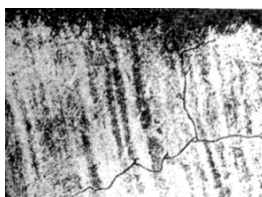


Рисунок 10.16 – Структура металла околошовной зоны, участок перегрева

На рисунке 10.17 показаны примеры зарождения холодных трещин от пленообразного неметаллического включения и от горячих трещин – надрывов.



а



б

Рисунок 10.17 – Зарождение холодной трещины в участке перегрева с развитой высокотемпературной неоднородностью от пленообразного неметаллического включения (а) и надрыва (б)

Решающее влияние на стойкость сварных соединений среднелегированных сталей против образования холодных трещин оказывают перегрев в околошовной зоне, температурный интервал мартенситного превращения в этой зоне, а также в металле шва и скорость охлаждения околошовной зоны и металла шва в этом интервале. Чем меньше перегрев, выше температура мартенситного превращения и медленнее охлаждение, тем меньше нарушается атомное строение на границах зерен и соответственно затрудняется зарождение трещин. Кроме того, чем

выше пластичность мартенсита, тем выше его сопротивляемость развитию трещин.

Наиболее простой и эффективный способ борьбы с холодными трещинами заключается в регулировании термического цикла сварки путем выбора соответствующих методов и режимов сварки, а также использования в необходимых случаях предварительного подогрева.

Термический цикл, обеспечивающий наивысшую стойкость против образования холодных трещин, приведен на рисунке 10.18.

Для сравнения на этом же рисунке показаны обычные термические циклы для электроннолучевой и электродуговой сварки. Медленное охлаждение снижает вероятность закалки металла сварного соединения, что повышает сопротивляемость стали замедленному разрушению и стойкость против образования холодных трещин.

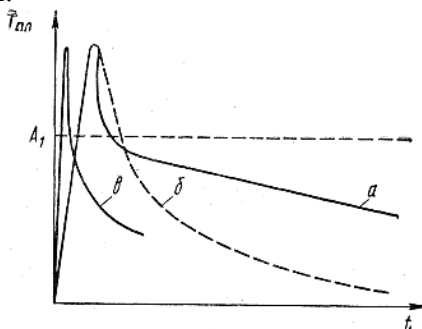


Рисунок 10.18 – Сварочные термические циклы:

a – идеальный, обеспечивающий наивысшую сопротивляемость соединений образованию холодных трещин; b – при электродуговой сварке; $в$ – при электроннолучевой сварке

Кроме отмеченных выше основных факторов, оказывающих решающее влияние на стойкость сварных соединений против образования холодных трещин, имеются дополнительные факторы, которые также могут оказывать влияние на эту стойкость. К ним относятся содержание углерода и легирующих элементов в основном металле и шве, качество основного ме-

талла, деформационный цикл сварки, термообработка после сварки и др.

Различают методы качественной и количественной оценки стойкости сварных соединений против образования холодных трещин, а также ***расчетные методы***.

Качественную оценку проводят при помощи технологических проб на сварных образцах, в которых создают условия, способствующие образованию холодных трещин. На рисунке 10.19 в качестве примера, представлена сварочная технологическая проба «Тэккен» (ГОСТ 26388–84), которая представляет собой плоский прямоугольный образец толщиной 12...40 мм с продольной прорезью в центре, оформленной в виде V-образной разделки.

Образец сваривают в свободном состоянии и выдерживают после сварки в течение 20 ч. Трещины образуются в корневой части сварного соединения в результате действия высоких усадочных напряжений. Обязательное условие работы пробы – наличие непровара в корне шва, который служит концентратором напряжений. Внешним осмотром и по макрошлифам устанавливают наличие или отсутствие в контрольном шве технологической пробы холодных трещин, определяют их вид и протяженность.

По этим показателям приблизительно предполагают, будут ли в реальных сварных соединениях возникать трещины и какие, т. е. определяют пригодность тех или иных марок стали, сварочных материалов, методов, режимов и других условий сварки для изготовления конкретной сварной конструкции. При образовании трещин в качестве дополнительного сравнительно–количественного показателя склонности к образованию холодных трещин принимают процентное отношение суммарной длины трещины к длине шва или относительной площади трещины к площади продольного сечения шва. За количественный показатель стойкости против трещин также принимают температуру подогрева, при которой трещины уже не образуются.

Количественная оценка стойкости металла против образования холодных трещин основана на испытаниях сварных соединений путем замедленного разрушения.

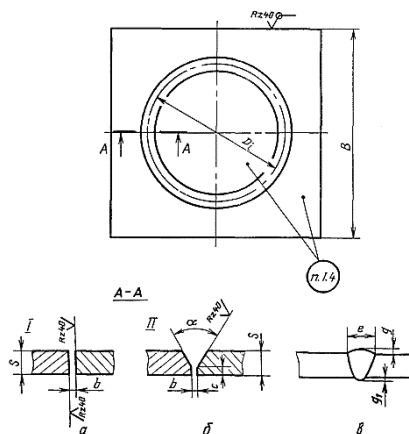


Рисунок 10.19 – Сварочная технологическая проба
«Гэккен»
(при толщине $\delta=12; 16; 20$ мм и высоте сварочного валика
 $h=6$ мм и $h=8$ мм)

Расчетные методы позволяют оценивать склонность к образованию холодных трещин по химическому составу стали без испытания сварных соединений.

Рассмотрим уравнения для расчета **эквивалента углерода** (в процентах), которые используются в настоящее время применительно к углеродистым и низколегированным сталям. Различными исследователями предложено несколько соотношений:

1) Британской исследовательской академией сварки:

$$C_{\text{экв}} = C + \frac{\text{Mn}}{20} + \frac{\text{Cr} + \text{Mo} + \text{V}}{10} + N \frac{\text{Ni}}{15} \quad (10.2)$$

2) Международным институтом сварки:

$$C'_{\text{экв}} = C + \frac{\text{Si}}{24} + \frac{\text{Mn}}{6} + \frac{\text{Cr} + \text{Mo} + \text{V}}{5} + \frac{\text{Ni} + \text{Cu}}{15} \quad (10.3)$$

3) по ГОСТ 27772-88:

$$C_{\text{экв}} = C + \frac{\text{Si}}{24} + \frac{\text{Mn}}{6} + \frac{\text{Cr}}{5} + \frac{\text{Mo}}{4} + \frac{\text{Ni}}{40} + \frac{\text{Cu}}{13} + \frac{\text{V}}{14} + \frac{\text{P}}{2} \quad (10.4)$$

Принято для сталей оценивать степень потенциальной возможности образования холодных трещин в зависимости от значений $C_{\text{экв}}$ (по ГОСТ 27772–88):

1-я группа сталей ($C_{\text{экв}} < 0,45 \%$) – сталь не склонна к образованию холодных трещин при сварке;

2-я группа сталей ($C_{\text{экв}} = 0,45 \dots 0,6 \%$) – при определенных конструктивно–технологических условиях возможно образование холодных трещин;

3-я группа сталей ($C_{\text{экв}} > 0,6 \%$) – высокая вероятность образования холодных трещин; сварка выполняется со специальными технологическими мероприятиями.

Эквивалент углерода $C_{\text{экв}}$ является обобщенным параметром состава стали, характеризующим ее прокаливаемость. Если значение $C_{\text{экв}} > 0,45 \%$, то при сварке становится возможным образование закалочных структур в металле сварного соединения, что при условии насыщения металла водородом и высоких сварочных напряжениях может привести к образованию холодных трещин. Значение $C_{\text{экв}}$ вне связи с этими условиями не может служить показателем сопротивляемости сварного соединения образованию холодных трещин.

Влияние водорода на процесс образования холодных трещин классифицируют как проявление водородной хрупкости стали.

10.4.1 Способы повышения сопротивляемости сварных соединений легированных сталей образованию холодных трещин

Способы предотвращения холодных трещин в сварных соединениях направлены на уменьшение или устранение отрицательного действия основных факторов путем:

- 1) регулирования структуры металла сварных соединений;
- 2) снижения концентрации диффузионного водорода в шве;

3) уменьшения уровня сварочных напряжений.

В соответствии с этим различают способы: **металлургические, технологические и конструкционные.**

Металлургические способы предотвращения холодных трещин направлены на регулирование структуры металла сварных соединений путем рационального выбора химического состава основного металла и сварочных материалов. Желательно иметь в их составе минимальное содержание углерода и легирующих элементов, повышающих прокаливаемость сталей, одновременно обеспечивая требуемые механические свойства шва и зоны термического влияния. Ориентиром для этого могут служить выражения (10.2–10.4) для расчета $C_{\text{кв}}$.

Технологические способы предотвращения холодных трещин предусматривают регулирование структуры металла сварных соединений путем рационального выбора теплового режима сварки. Для этого используют индивидуально или совместно следующие методы:

1) повышение удельной погонной энергии $q/(V_{\text{св}})$ до максимально допустимого значения (*при условии качественного формирования шва с размерами, соответствующими стандартам*);

2) предварительный ($T_{\text{пп}}$) и сопутствующий ($T_{\text{сп}}$) подогревы; послесварочный нагрев ($T_{\text{пн}}$); термическую обработку – высокий отпуск.

При многослойной сварке целенаправленно используют автоподогрев и автоотпуск, т. е. влияние минимальной температуры, до которой охлаждаются предыдущие валики при укладке последующих (*она называется межпроходной температурой*).

При однослойной сварке выбирают тепловой режим, обеспечивающий значения скорости охлаждения, при которых образование мартенсита в структуре сварного соединения полностью исключается или его содержание снижается до допустимого.

На практике, особенно при затруднениях в проведении металлографического анализа структуры зоны термического влияния, структурное состояние оценивают значением твердости. Как правило, в технических условиях на сварку изделий указывают допустимое значение твердости.

Для предотвращения холодных трещин в послесварочный период проводят нагрев (200...300 °С) сварных узлов непосредственно после сварки. Для предотвращения холодных трещин в ряде случаев (*изделия из мартенситных сталей небольших толщин*) достаточен местный кратковременный отпуск с нагревом до 700 °С в течение 2...3 мин.

Насыщение сварных соединений водородом. При сварке водород в металл сварного соединения попадает из атмосферы дуги в результате его растворения в жидком металле и путем термодиффузии из менее нагретых зон основного металла. Вследствие быстрого изменения температуры в зоне сварки возможно некоторое пересыщение жидкого металла водородом. При сварке покрытыми электродами или в атмосфере защитных газов возможен подсос влажного воздуха в зону дуги, а также попадание в нее водорода из воздуха в результате диссоциации влаги в периферийных частях столба дуги и перемещения его в центральные части дуги путем термодиффузии.

Существенное значение имеют также факторы, зависящие от рода и полярности тока и характера переноса металла в дуге.

Пересыщение твердого раствора водородом может привести к значительной локальной деформации кристаллической решетки, затрудняя пластическую деформацию. Ослабляя межатомные связи, водород способствует раскрытию субмикротрещин, вызывая хрупкое разрушение металла.

При автоматической сварке под флюсом концентрация водорода в металле шва уменьшается при снижении сварочного тока, при переходе от переменного тока к постоянному, а при постоянном токе – от прямой полярности к обратной. Напряжение дуги при сварке под основным флюсом на постоянном токе не оказывает влияние на содержание водорода в наплавке, однако при сварке под кислым флюсом повышение напряжения дуги (*соответственно увеличение ее длины*) ведет к уменьшению его содержания.

При ручной сварке электродами с основным покрытием увеличение напряжения дуги (*и ее длины*) также снижает содержание водорода в наплавке. Повышение содержания кислорода в атмосфере дуги путем введения в состав флюсов и покрытий

электродов прокатной окалины низкоуглеродистых сталей и применения смесей защитных газов с кислородом заметно снижает содержание водорода в наплавленном металле.

Насыщение водородом происходит преимущественно при прохождении каплей электродного металла через дугу. Поэтому его концентрация в наплавленном металле *зависит от размера каплей*: с уменьшением размера каплей степень насыщения возрастает, а с переходом к струйному переносу – уменьшается.

Вследствие малости размеров атомов водорода их диффузионная подвижность в железе выше, чем других элементов внедрения (*углерода и азота*).

Способы снижения концентрации водорода в металле сварных швов главным образом основаны на устранении источников, снабжающих атмосферу дуги водородом. Это проковка электродов, осушение защитных газов силикагелем, очистка свариваемых кромок и сварочной проволоки от ржавчины, масла и других загрязнений.

В ряде случаев предусматривают связывание водорода в атмосфере дуги в не растворимые в жидком железе соединения. В этом отношении эффективны основные покрытия электродов и флюсы с максимально возможным содержанием CaF_2 а также содержащие прокатную окалину FeO .

Конструкционные способы предотвращения холодных трещин направлены на снижение уровня сварочных напряжений.

10.5 Поры в сварных швах

Порами называют заполненные газом полости в швах, имеющие округлую, вытянутую или более сложную форму. Они возникают при первичной кристаллизации металла сварочной ванны в результате выделения газов. Поры располагаются по оси шва или по его сечению, а также вблизи от границы сплавления. При дуговой сварке поры выходят или не выходят на поверхность шва (рисунок 10.20, а, б), располагаются цепочкой по оси шва (рисунок 10.20, а) или отдельными группами (рисунок

10.20, б). Поры, выходящие на поверхность шва, иногда называют свищами



Рисунок 10.20 – Поры в металле шва:

а – выходящие на поверхность шва; б – не выходящие на поверхность шва

При электрошлаковой сварке и дуговой сварке с принудительным формированием поры не выходят на поверхность шва, что обусловлено более ранним затвердеванием примыкающей к формирующим устройствам части металла сварочной ванны.

Поры могут быть микроскопическими (*несколько микрометров*) и крупными (*4...6 мм в поперечнике*). Выходящие на поверхность поры выявляются при внешнем осмотре. Поры, не выходящие на поверхность, выявляются теми же методами, что и не выходящие на поверхность трещины. Поры – **недопустимый дефект** сварных швов. Для ряда конструкций поры не являются столь серьезным дефектом, как трещины. Однако наличие пор при всех условиях нежелательно.

Основной причиной возникновения пор при сварке стали являются водород, азот и окись углерода. Роль остальных газов (H_2O , CO_2 и др.) незначительна. Если образование и выделение газов при сварке происходит в период, когда металлическая ванна находится в жидком состоянии, и протекает интенсивно, то пузырьки газов успевают полностью выделиться. Если же образование и выделение газов происходит в период затвердевания ванны и проходит вяло, пузырьки газа не успевают всплыть и остаются в металле в виде пор.

Уменьшить растворение водорода в металле сварочной ванны можно ограничением доступа водорода и водяного пара в зону сварки, снижением растворимости водорода в жидком металле вследствие окисления или легирования последнего,

уменьшением растворения водорода в металлической ванне технологическими способами (*применением постоянного тока, изменениями режима сварки, применением соответствующих сварочных материалов и т. п.*), увеличением времени удаления водорода из металлической ванны.

Азот поступает в зону сварки, а из нее – в сварочную ванну из окружающей атмосферы, а также из расплавляемых основного и дополнительного металлов. Растворение азота в металле ограничивают применением газовой или шлаковой защиты зоны сварки от доступа воздуха.

К металлургическим способам предупреждения пористости от азота принадлежит также дегазация жидкого металла при его кипении. Для этого иногда используют сварочную проволоку с повышенным содержанием углерода.

Среди кислородных соединений **окись углерода и водяной пар** отличаются тем, что при температурах существования жидкой стали они находятся в газообразном состоянии. В связи с этим одной из важнейших задач раскисления сварочной ванны является предупреждение образования этих газов во время затвердевания металла. Для этого в зону сварки вводят элементы с высоким химическим сродством к кислороду (*Si, Mn, Al, Ti*), образующие твердые или жидкие окислы. Соединяясь с кислородом, эти элементы тормозят реакции образования окиси углерода и водяного пара. Образующиеся окислы этих элементов выводятся в шлаковую ванну.

На пористость швов существенно влияет скорость кристаллизации сварочной ванны. При большой скорости кристаллизации металла рост кристаллитов обгоняет рост и всплывание пузырька газа, и пузырек запутывается в металле, в результате чего образуется пора. Снижение скорости сварки, увеличение объема сварочной ванны, уменьшение теплоотвода в основной металл и увеличение его начальной температуры снижают скорость кристаллизации металла и уменьшают пористость швов. Некоторое влияние оказывает и форма сварочной ванны. Повышение значения коэффициента формы шва приводит к уменьшению вероятности возникновения пор, т. к. при этом улучша-

ются условия для всплывания пузырьков в результате выдавливающего действия растущих дендритов.

10.6 Неметаллические включения в сварных швах

Неметаллические включения не относятся к числу дефектов сварных швов, но оказывают заметное влияние на их качество и свойства. Рассмотрим различные типы неметаллических включений, встречающихся в сварных швах на стали.

Оксидные включения. В металле шва может содержаться до 0,1 % кислорода, находящегося в виде неметаллических оксидных или смешанных включений. Химический и минералогический составы этих включений зависят от химического состава металла шва.

Оксидные включения и силикатные пленки снижают ударную вязкость и хладостойкость металла шва на углеродистых и низколегированных сталях. В аустенитных швах силикатные пленки уменьшают пластичность металла шва при испытаниях на растяжение и изгиб, не влияя, однако, на величину ударной вязкости.

Сульфидные включения. В сварных швах на стали обычно содержится 0,02...0,04 % S, образующей сульфидные включения. Размер включений сильно возрастает в направлении от границы сплавления металла шва с основным металлом к середине шва. Наиболее крупные включения наблюдаются в середине верхней части шва. Выявляются также сульфидные пленки и цепочки мелких сульфидных включений, расположенные по границам кристаллитов металла шва. Наиболее опасными в отношении образования кристаллизационных трещин в сварных швах являются сульфидные пленки и цепочки.

Фосфоросодержащие включения. В швах на углеродистых и низколегированных сталях фосфор преимущественно находится в твердом растворе, а не в виде неметаллических включений. Вредное влияние фосфора на свойства сварных соединений заключается в снижении стойкости к образованию горячих трещин вследствие ослабления межкристаллитных границ (*при выделении легкоплавких включений*) и в ухудшении ме-

ханических свойств швов при нормальной и низких температурах. Для среднелегированных сталей вредное влияние фосфора и серы в отношении образования кристаллизационных трещин усиливается тем, что места ликвации этих элементов совпадают. Обогащенные фосфором участки феррита лежат по границам первичных кристаллитов, где скапливаются и сульфидные включения.

Нитридные включения. Нитридные включения в сварных швах встречаются значительно реже, чем оксидные или сульфидные. Это обусловлено низким содержанием азота в швах и меньшей стойкостью нитридов при высоких температурах. В основном нитридные включения выделяются в процессе охлаждения или термообработки сварных соединений. Для их образования необходимо наличие в металле шва сравнительно высокой концентрации азота, что возможно, например, при сварке открытой дугой без защиты или же при повышенном содержании азота в основном металле.

В швах низкоуглеродистой стали с повышенным содержанием азота иногда обнаруживаются иголки нитрида железа Fe_4N и железонитридный эвтектоид, так называемый, браунит. Нитридные иголки наблюдаются лишь в швах, сваренных на воздухе голым электродом или электродом с тонким покрытием.

10.7 Прочие дефекты сварных соединений

Шлаковые каналы. Дефект представляет собой заполненную шлаком несплошность (рисунок 10.21, а, б). Канал, как правило, не выходит на поверхность шва. Ширина канала совпадает с шириной зазора между свариваемыми кромками (рисунок 10.21, а). Образуются шлаковые каналы, главным образом, при сварке под флюсом в первом проходе двусторонних стыковых швов, выполняемых на флюсовой или флюсомедной подкладках. Иногда наблюдаются при сварке односторонних швов с полным проваром кромок, значительно реже – при сварке угловых швов.

Вероятность образования дефектов возрастает с увеличением зазора. При зазоре до 3 мм дефекты подобного типа наблю-

даются редко. После наложения шва со второй стороны канал при малом его проникновении в толщу первого прохода полностью заваривается, а при более глубоком залегании частично остается в металле шва в виде округлого (рисунок 10.21, в) или вытянутого по высоте слоя шлакового включения.

На практике для снижения вероятности появления шлаковых каналов обычно прибегают к тем же средствам, что и для предупреждения образования пор.

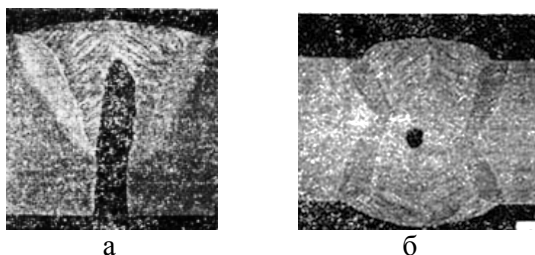


Рисунок 10.21 – Шлаковые каналы:

а – после сварки с одной стороны; б – после сварки с двух сторон

Флокены. После разрушения образцов, вырезанных из металла шва и испытанных на растяжение или изгиб, в изломе иногда обнаруживают серебристые пятна круглой или овальной формы, называемые флокенами, и имеющие более крупнокристаллическое строение, чем остальная часть излома. В большинстве случаев посередине флокена находится пора или шлаковое включение, являющееся центром зарождения дефекта (рисунок 10.22).

Такой дефект получил название «рыбий глаз». Образование флокенов связано со снижением пластичности металла шва под влиянием водорода. Наличие флокенов приводит к некоторому снижению пластических свойств металла образцов при статических испытаниях. Флокены могут быть устранены путем нагрева образца перед испытанием до температуры 150...250 °С, что способствует более полному удалению водорода из металла. Тот же эффект достигается при длительном вылеживании образцов перед испытанием.

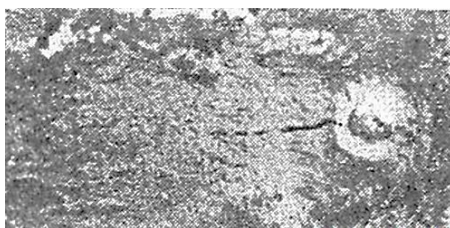


Рисунок 10.22 – Флокен

Флокены образуются только в процессе разрушения образцов, испытываемых непосредственно после сварки. Следовательно, нет основания предполагать, что при статическом нагружении в реальной конструкции могут создаваться условия для образования в металле шва флокенов.

Зона несплавления. При дуговой и электрошлаковой сварке в некоторых условиях образуется дефект, именуемый зоной несплавления. Он характерен отсутствием сплавления между основным металлом и металлом сварочной ванны по части периметра, а иногда и по всему периметру шва (рисунок 10.23).



Рисунок 10.23 – Зона несплавления при дуговой сварке

Несплавление наблюдается при оплавлении кромок основного металла и достаточном объеме металла сварочной ванны.

Образование зоны несплавления тесно связано с формированием сварочной ванны. Последнее может быть условно разделено на две стадии: образование канавки в основном металле и

последующее заполнение ее металлом сварочной ванны. Если пленка расплавленного металла, покрывающая поверхность канавки, к моменту ее заполнения жидким металлом успела затвердеть, а запас теплоты, накопленный в сварочной ванне, недостаточен для повторного расплавления основного металла, смачивание металлом сварочной ванны основного металла не происходит и образуется зона несплавления.

Для предотвращения появления подобных дефектов прибегают к мерам, обеспечивающим уменьшение разрыва по времени между образованием и заполнением канавки (*сварка на спуск, сварка наклонным электродом углом вперед, сварка двумя и тремя дугами, сварка с подогревом и др.*), а также получение благоприятной формы провара. Обычно коэффициент формы шва, при котором не наблюдается образование зоны несплавления, увеличивается с возрастанием скорости сварки.

Утяжины. При сварке под флюсом на больших скоростях двумя и более дугами наблюдается образование своеобразных дефектов, получивших название утяжин. Утяжины представляют собой расположенные друг от друга на расстояниях, примерно равных длине сварочной ванны, усадочные рыхлости (*трещины*), распространяющиеся на 2...3 мм вглубь шва и на 5...8 мм вдоль его оси. Строение утяжин совпадает со строением усадочных рыхлостей, образующихся в кратере шва.

Непровары. Непроваром называют местное отсутствие сплавления между свариваемыми элементами, между металлом шва и основным металлом или отдельными слоями при многослойном шве. В зависимости от расположения и характера различают непровар по толщине основного металла (рисунок 10.24, а).

При сварке стыковых швов с разделкой кромок и угловых швов с разделкой и без разделки кромок наблюдается непровар вершины угла (рисунок 10.24, б).

При многослойной сварке швов всех типов изредка встречается непровар между отдельными слоями. Место непровара в большинстве случаев заполнено шлаком, который, благодаря жидкотекучести и более низкой температуре плавления, заполняет образовавшуюся при непроваре несплошность.

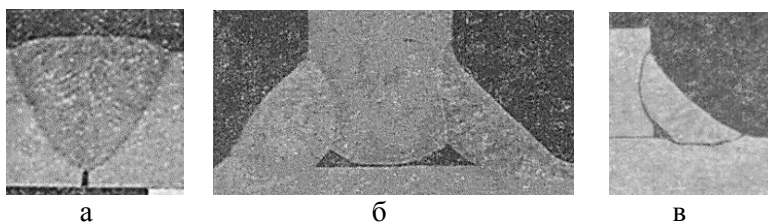


Рисунок 10.24 – Непровар:

*а – однослойный односторонний стыковой шов;
б, в – непровары вершины угла*

Непровар уменьшает сечение шва и вызывает значительную концентрацию напряжений, что иногда может привести к образованию трещин. Непровар по толщине свариваемого металла может быть вызван неправильным выбором режима сварки, не предусматривающим достаточный запас глубины проплавления, или нарушением режима сварки в процессе выполнения данного шва (*главным образом уменьшением силы тока*). Причиной непровара может также служить недостаточно точное направление конца электрода по месту сопряжения кромок (рисунок 10.25).

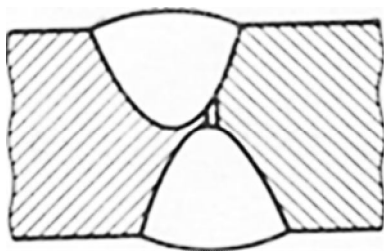


Рисунок 10.25 – Непровар, возникший из-за неточного направления дуги по оси соединения

Довольно часто непровары наблюдаются в начале и в конце шва. Это связано с тем, что глубина провара на этом участке, вследствие неустойчившегося теплового процесса, падает.

Неправильное возобновление процесса после его перерыва, вызванного сменой электродов и сварочной проволоки или другими причинами, так же приводит к непровару. При правильном возобновлении процесса сварки, обеспечивающем достаточное перекрытие прерванного шва последующим, непровар в большинстве случаев не наблюдается. Для того чтобы предотвратить непровар в начале и в конце шва, сварку следует начинать и заканчивать на специальных выводных (*концевых*) планках или применять особые приемы.

Во всех случаях основной металл не расплавляется, в результате чего образуется непровар.

Подрезы. Подрезом называют местное уменьшение толщины основного металла у границы шва. Подрез приводит к резкой концентрации напряжений в тех случаях, когда он расположен перпендикулярно к направлению главных напряжений, действующих на сварное соединение. Для конструкций, работающих при вибрационных нагрузках, подрез существенно снижает прочность сварного соединения. Наиболее часто подрезы возникают при сварке угловых швов и первых слоев многослойных стыковых швов (рисунок 10.26).

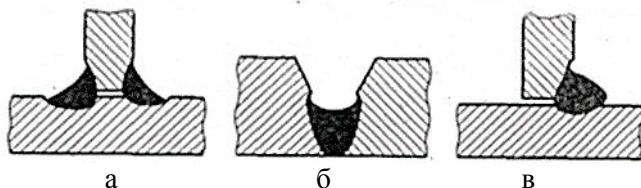


Рисунок 10.26 – Подрезы:

а – двусторонний при сварке углового шва; б – двусторонний при сварке первого слоя многослойного стыкового шва; в – односторонний с наплывом на вторую кромку при сварке углового шва

Значительно реже подрезы образуются при сварке однослойных стыковых швов с разделкой и без разделки кромок. Подрезы могут быть двусторонними, т. е. располагаться с двух

сторон шва, или односторонними, т. е. располагаться с одной стороны шва. Типичными являются двусторонние подрезы. При сварке угловых швов наклонным электродом или с оплавлением кромки иногда наблюдается односторонний подрез с наплывом металла на горизонтально расположенную деталь (рисунок 10.26, в).

В большинстве случаев подрез является следствием излишне высокого напряжения дуги или недостаточно точного ведения электрода по оси соединения. В первом случае часть канавки, выплавленной дугой в основном металле, не заполняется металлом сварочной ванны. Если же ширина канавки меньше, чем ширина шва, который может сформироваться при данном количестве дополнительного металла, образуется выпуклый шов (рисунок 10.27).

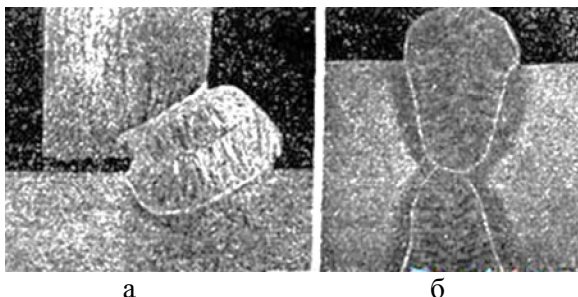


Рисунок 10.27 – Выпуклый шов:
а – угловой; б – стыковой $\times 100$

При неточном ведении электрода происходит более глубокое проплавление одной из кромок и металла сварочной ванны не хватает для полного заполнения образовавшейся канавки. При сварке наклонным электродом или вертикальным электродом с оплавлением кромки образование подреза облегчается стеканием металла на горизонтально расположенную деталь. Образование подрезов при сварке стыковых швов без разделки кромок связано также с плохим растеканием металла.

Если размеры подреза превосходят допускаемые, острую грань его следует сглаживать механическим путем для создания плавного перехода от основного металла к металлу шва. Если глубина подреза превосходит 1...2 мм (*в зависимости от толщины основного металла*), то дефектный участок заваривают. Заваривать следует швом достаточного сечения. Подрезы, образовавшиеся в глубинных слоях многослойного шва, если они не были заварены при наложении последующих слоев, являются внутренним дефектом. Такие подрезы, как правило, заполнены шлаком, затекшим в образовавшуюся при подрезе полость.

Наплывы. Напływом называют натекание металла шва на поверхность основного металла без сплавления с ним. Наплывы наблюдаются преимущественно при сварке однослойных стыковых швов без разделки кромок и при сварке угловых швов наклонным электродом или с оплавлением кромки и при наплавке (рисунок 10.28). Напływ, изображенный на рисунке 8.28, а, иногда называют грибовидностью. Возникают наплывы при неправильном выборе режима сварки или наличии на свариваемых кромках толстого слоя окалины.

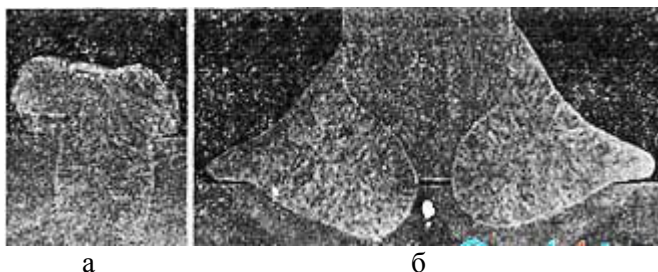


Рисунок 10.28 – Напływ при сварке шва:

а – стыкового; б – углового $\times 100$

Для предупреждения образования напльва следует увеличить ширину шва, повысив напряжение дуги, или уменьшить количество металла, образующего усиление. Это достигается путем размещения металла в зазоре между свариваемыми кромками или в разделке. Наплывы – это внешний дефект, но из-за

натекания металла на кромку выявление их при осмотре шва затруднено. Устраняют наплывы механическим удалением избыточного металла.

Прожоги. Прожогами называют полости в шве, образовавшиеся в результате вытекания сварочной ванны. Прожоги возникают при избыточной силе тока, увеличении зазора между свариваемыми кромками, изменении положения (*наклона*) электрода или изделия и неплотном прилегании флюсовой, флюсо-медной или стальной подкладки к свариваемым листам. Прожоги обнаруживаются при внешнем осмотре. Это недопустимый дефект сварного соединения. Места прожогов должны быть зачищены и заварены заново. На рисунке 10.29 показан прожог, образовавшийся при выполнении однослойного шва на флюсовой подушке. Начальной стадией прожога является провисание шва, наблюдаемое при односторонней сварке (рисунок 10.30).

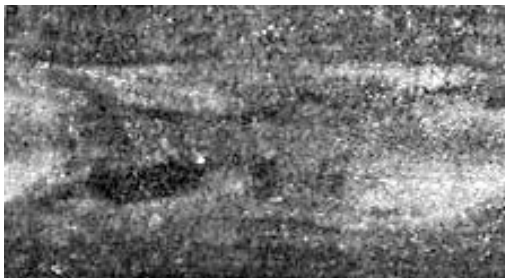


Рисунок 10.29 – Прожог (*обратная сторона шва*) x10



Рисунок 10.30 – Провисание шва x10

Кратер. Кратером называют углубление, образующееся после обрыва дуги в конце шва. На участке кратера шов имеет уменьшенное сечение. В кратере, как правило, обнаруживаются усадочные рыхлости, часто переходящие в трещину (рисунок 10.31). Длина кратера в зависимости от режима сварки составляет 20...200 мм. При механизированных видах сварки кратер образуется только в конце данного шва, который, как правило, выводят на выводную планку. При сварке вручную кратер возникает в конце участка шва, сваренного каждым отдельным электродом.

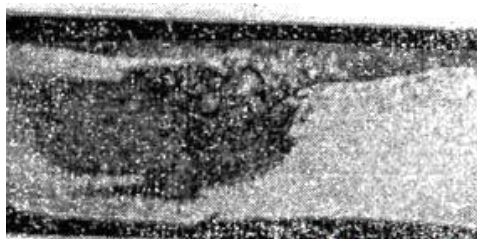


Рисунок 10.31 – Трещина в кратере шва $\times 10$

В особо ответственных конструкциях металл шва на участке кратера следует удалять механическим путем или выплавлять. Если сварку вручную ведут без выводных планок, то кратер в конце шва необходимо тщательно заваривать и обрывать дугу на заваренном участке шва. Не следует выводить кратер на основной металл, т. к. это приводит к образованию подрезов и ожогов.

Шлаковые включения. Шлаковыми включениями называют видимые невооруженным глазом округлые или вытянутые включения шлака, расположенные в металле шва, как у границы сплавления, так и между отдельными слоями или в вершине провара. Они обычно образуются в результате заполнения сварочным шлаком несплошностей, возникающих при непроварах или подрезах.

Шлаковые включения относятся к внутренним дефектам шва. Участки шва, где их величина превышает допускаемую

техническими условиями на данный вид продукции, вырубают и заваривают заново.

Ожоги. Ожогами называют небольшие участки подвергавшегося расплавлению металла на основном металле вне сварного шва. Эти участки обладают пониженной пластичностью. Возникают ожоги в результате возбуждения дуги с целью освобождения конца электрода от обмазки, при контакте поверхности находящегося под напряжением держателя с изделием и при выводе кратера за пределы шва на основной металл. Ожоги относятся к внешним дефектам.

Неравномерность ширины шва. Ширина шва обычно изменяется в результате резких колебаний напряжения дуги или скорости сварки. Значительные изменения ширины шва сопровождаются изменением глубины проплавления, что может привести к непровару.

Вопросы для самопроверки

1. Что понимают под физической и технологической свариваемостью? Какими критериями и показателями оцениваются свариваемость в зависимости от назначения сварной конструкции?

2. Какие виды дефектов кристаллической решетки, их свойства и роль в развитии физических и механических процессов образуются при технологической обработке металлов, в том числе при сварке?

3. Что понимают под фазовыми и структурными превращениями в металлах при технологических воздействиях? Какие виды превращений имеют место в сталях при сварке?

4. Какими закономерностями оценивают процесс кристаллизации чистых металлов и сплавов? Укажите особенности кристаллизации металла сварных швов.

5. Что понимают под схемой кристаллизации сварных швов? Перечислите параметры процесса кристаллизации и поясните их влияние на склонность к образованию дефектов и влияние на механические свойства сварных швов.

6. Каково строение границ зерен, в чем заключается процесс их образования? Как изменяется вид зерен и их границ в процессе тепловой технологической обработки металлов?

7. Какова кинетика видоизменения зерен в зоне термического влияния сварных соединений сталей при многослойной сварке?

8. Какие экспериментальные и расчетные методы применяют для определения фазового состава структуры металла сварных соединений углеродистых и легированных сталей?

9. Каковы физические основы и причины образования сварочных деформаций и напряжений, кинетика формирования собственных сварочных напряжений в сталях в процессе охлаждения при сварке?

10. Что такое горячие трещины в сварных соединениях? Какие факторы обуславливают образование трещин? Укажите зависимости значений этих факторов от химического состава и конструктивно-технологических параметров процесса изготовления сварной конструкции.

11. Какие экспериментальные и расчетные методы применяют для оценки сопротивляемости металла сварных соединений образованию горячих трещин?

12. Какие способы применяют для повышения сопротивляемости сварных соединений образованию горячих трещин и предотвращения их возникновения в сварных конструкциях?

13. Что такое холодные трещины в сварных соединениях? Какие факторы обуславливают образование холодных трещин? Укажите зависимости значений этих факторов от химического состава и конструктивно-технологических параметров процесса изготовления сварной конструкции.

14. Какие экспериментальные и расчетные методы применяют для оценки сопротивляемости металла сварных соединений образованию холодных трещин?

15. Какие способы применяют для повышения сопротивляемости сварных соединений образованию холодных трещин и предотвращения их возникновения в сварных конструкциях?

16. Каковы причины и условия хрупкого разрушения металла сварных соединений сталей?

17. Какие методы применяют для оценки склонности к хрупкому разрушению металла сварных соединений?

18. Каковы критерии трещиностойкости металла сварных соединений? Какие экспериментальные и расчетные методы применяют для оценки сопротивляемости металла нестабильному распространению трещин и трещиноподобных дефектов?

11 ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ [2, 8, 10, 11]

11.1 Виды термической обработки сварных соединений

В исходном состоянии после сварки соединение характеризуется неоднородностью структуры, химического состава и механических свойств металла, а также наличием сварочных остаточных напряжений. Степень этой неоднородности и уровень напряжений зависят от многих факторов металлургического и технологического порядков, в том числе и от марки свариваемой стали и присадочного материала, вида и технологии сварки, формы и размеров сварного изделия.

Остаточные сварочные напряжения обусловлены усадкой металла сварного шва в процессе кристаллизации, неравномерностью распределения температуры в зоне сварки, структурными изменениями и жесткостью свариваемого изделия. Уровень этих напряжений может быть высок и достигать значений предела текучести металла, а в некоторых случаях и превышать его, вызывая в сварном соединении нежелательные пластические деформации.

Неоднородность структуры и свойств сварных соединений также может быть значительной.

Не все сварные соединения проходят термическую обработку после сварки. Напротив, как правило, при сварке стремятся к исключению термообработки, что позволяет сократить технологический процесс изготовления изделия. Термическая обработка становится обязательным этапом технологического процесса сварки в тех случаях, когда снижение рабочих характеристик сварных соединений, а также уровень остаточных напряжений, привнесенных в процессе сварки, превышают допустимые пределы.

Применение различных видов термической обработки позволяет:

- 1) устранить или существенно понизить уровень остаточных сварочных напряжений;

2) улучшить микроструктуру зоны термического влияния и металла сварного шва;

3) обеспечить комплекс механических характеристик сварного соединения, а также коррозионностойких и специальных свойств (*например, магнитных*) на уровне нормативных требований.

При термической обработке снимается наклеп металла в пластически деформированной зоне и восстанавливаются свойства материала, подвергшегося действию термомодеформационного старения. Обеспечивается также достаточно равномерное распределение свойств металла в различных зонах сварного соединения.

Сварные соединения, выполненные из углеродистых низколегированных и высоколегированных сталей, подвергаются следующим видам термической обработки: ***отпуску, нормализации, стабилизирующему отжигу, закалке (аустенизации), обработке в межкритическом интервале температур (ОСТ 26-91-04).***

Сварные соединения подвергают термообработке либо непосредственно после сварки, когда температура сварного изделия еще не понизилась до комнатной, либо только по истечении определенного времени. В первом случае исходят из температуры последующего нагрева, т. е. такой температуры, до которой нагревают сварное изделие после сварки.

Процесс любого из перечисленных видов термической обработки состоит из нагрева сварного соединения до определенной температуры, выдержки при этой температуре в течение от нескольких минут до нескольких часов и последующего охлаждения. Самым распространенным видом термической обработки является отпуск.

Отпуск сварных конструкций заключается в нагреве до температур не выше A_{c1} , выдержке и охлаждении на воздухе. Этот вид термической обработки используется для:

1) воздействия на закаленные участки сварного соединения с целью получения более равновесного структурного состояния;

2) снятия наклепа после пластической деформации (*как отжиг первого рода*);

3) снижения уровня сварочных напряжений.

В зависимости от температуры нагрева *различают низкий, средний и высокий отпуск*.

Низкий отпуск характеризуется температурами нагрева, не превышающими 250...300 °С, и способствует перераспределению собственных напряжений, некоторому повышению пластических свойств без значительных потерь уровня прочностных характеристик. При низком отпуске идет частичный распад мартенсита и остаточного аустенита.

В некоторых марках легированных сталей применение температур нагрева, близких к 300 °С, вызывает явление необратимой отпускной хрупкости, заключающейся в резком падении ударной вязкости. В углеродистых сталях отпускная хрупкость отчетливо не проявляется.

Средний отпуск протекает при температурах нагрева в пределах 300...400 °С и способствует формированию мелкодисперсной трооститной или сорбитной структуры. Распад мартенсита на более равновесные структурные составляющие приводит к снижению твердости и прочности и повышению пластических свойств металла сварного соединения.

Высокий отпуск заключается в нагреве сварного соединения до температуры, несколько ниже критической точки A_{C1} например от 400 до 600...700 °С для углеродистой или низколегированной стали, продолжительной выдержке (2...3 мин на 1 мм толщины) и последующем медленном охлаждении. Цель отпуска – снижение уровня остаточных сварочных напряжений и повышение пластичности металла сварного соединения. Высокому отпуску подвергаются сварные соединения из различных сталей (*кроме аустенитных*).

Высокий отпуск более эффективен, чем низкий, т. к. обеспечивает полное снятие сварочных напряжений и устраняет закалилку металла шва и околошовной зоны. При этом прочность металла несколько понижается, а пластичность и ударная вязкость существенно повышаются. Отпуск не обеспечивает перекристаллизации металла и, следовательно, не может устранить ни столбчатой структуры, ни явлений перегрева в околошовной зоне.

При низком отпуске (около 200 °С) идет частичный распад пересыщенного твердого раствора в α – фазе. Происходит распад остаточного аустенита.

При отпуске в интервале температур 200...400 °С происходят полный распад мартенсита и образование структуры, состоящей из ферритно–цементитной смеси с цементитом глобулярной формы. При высоком отпуске (интервал температур 400...650 °С) осуществляется коагуляция (слияние) частиц цементита, создаются условия для рекристаллизации феррита и формирования структуры сорбит отпуска. Степень восстановления свойств при отпуске зависит от состава стали, вида и режима сварки.

Для низкоуглеродистых низколегированных и ряда теплоустойчивых сталей температура и длительность отпуска назначаются для обеспечения полного снятия сварочных напряжений при минимальном снижении свойств основного металла. С повышением температуры отпуска и длительности выдержки твердость шва и ряда участков ЗТВ снижается. Это способствует повышению пластичности и вязкости металла сварного соединения.

Термическая обработка высоколегированных сталей не должна вызывать ухудшения свойств основного металла, обеспечивая при этом по возможности более высокое восстановление свойств околошовной зоны. При этом для предотвращения закалочных трещин отпуск должен проводиться непосредственно после сварки, а его температура должна быть несколько ниже температуры отпуска основного металла.

При наличии в стали сильных карбидообразующих элементов повышение температуры отпуска способствует протеканию процесса дисперсионного твердения, связанного с выпадением карбидов из легированного твердого раствора. Это приводит, наряду с некоторым ростом прочностных свойств, к значительному снижению пластичности сварного соединения.

Помимо положительного влияния на свойства сварных соединений отпуск может иметь и **отрицательные последствия**, такие как коробление, деформация и образование трещин. Для их предупреждения необходимо избегать неравномерного

нагрева изделия в целом, а скорость охлаждения в интервале 600...300 °С ограничивать. Чрезмерно быстрое охлаждение способствует возникновению собственных напряжений и приводит к фиксации пресыщенного твердого раствора, создавая тем самым предпосылки для последующего старения и охрупчивания в процессе эксплуатации.

Термообработка в межкритическом интервале температур проводится при длительной (до 20 ч) выдержке сварного соединения при температуре $A_{C1} - A_{C3}$. Нагрев в интервале межкритических температур вызывает протекание процесса неполной перекристаллизации. Часть зерен с более высокой концентрацией углерода претерпевает ($\alpha \rightarrow \gamma$) – превращение. Оставшаяся менее легированная часть сохраняет ферритную структуру. Разность в концентрациях углерода вызывает его диффузию прежде всего по границам зерен. В результате происходит выравнивание концентрации углерода в различных зонах сварного соединения, частичное измельчение исходной крупнозернистой структуры.

Температура нагрева и время выдержки определяются химическим составом стали. Чем в большей степени сталь легирована элементами, стабилизирующими аустенит (*Mn, Cr, Mo*), тем требуются более высокие температуры нагрева и более длительная выдержка в межкритическом интервале температур. Однако при существенном увеличении времени выдержки ударная вязкость начинает снижаться. Оптимальной для этих сталей является термообработка по режиму 780 °С с выдержкой в течение 5 ч и охлаждение с печью. Пластинчатый перлит при этом превращается в зернистый и располагается в областях старых перлитных колоний или по границам зерен (*отжиг на зернистый перлит*).

Таким образом, термообработка в межкритическом интервале температур может быть радикальным средством улучшения свойств сварных соединений из низколегированных сталей и в ряде случаев заменять нормализацию.

Нормализация предусматривает нагрев сварного соединения выше критической точки A_{C3} , непродолжительную выдержку и последующее охлаждение на спокойном воздухе. Назначе-

ние нормализации – это получение однородной структуры с измельченным зерном и улучшение механических свойств металла сварного соединения (*некоторое повышение прочности, существенное повышение пластичности и ударной вязкости*), а также снижение уровня остаточных сварочных напряжений.

Аустенизация (*закалка на аустенит*) заключается в нагреве сварного соединения до 1050...1200 °С, выдержке около 1...2 ч и последующем охлаждении на воздухе. С повышением степени легированности сталей при их сварке увеличивается вероятность сегрегации примесей и легирующих элементов по границам зерен в ЗТВ и особенно в околошовной зоне. Это приводит к необходимости проведения высокотемпературной обработки для выравнивания концентрации легирующих элементов по объему зерна и восстановлению эксплуатационных характеристик металла сварного соединения.

Стабилизирующий отжиг заключается в нагреве сварного соединения при температуре на 20...30 °С выше критической точки $A_{с3}$, выдержке в течение 2...3 ч и охлаждении на воздухе. Этот вид термической обработки приводит к снижению остаточных напряжений на 70...80 %, обеспечивает стабильную структуру в аустенитных сталях, хорошо противостоящую возникновению межкристаллитной коррозии

Выбор термической обработки существенным образом зависит от химического состава стали и ее реакции на термический цикл сварки.

11.2 Термическая обработка сталей

Углеродистые нелегированные и низколегированные стали. Задача термообработки конструкций из низкоуглеродистых и низколегированных сталей обычно сводится к снятию сварочных напряжений в процессе высокого отпуска или к выравниванию свойств и улучшению структуры отдельных участков сварного соединения за счет нормализации с последующим высоким отпуском.

Для сварных соединений конструкций ответственного назначения, в частности, сосудов, работающих под давлением, и

трубопроводов из углеродистых и низколегированных сталей, рекомендуется проведение высокотемпературного отпуска (600...650 °C).

На свойства сварных соединений низкоуглеродистых и низколегированных сталей, применяемых в отожженном состоянии, отпуск после сварки практически не влияет. В соединениях низколегированных сталей, используемых в термоупрочненном состоянии, отпуск после сварки проводится при температуре на 20...30 °C ниже температуры отпуска основного металла до сварки.

Необходимость проведения нормализации сварных соединений из низкоуглеродистых сталей определяется значительным снижением ударной вязкости металла шва и участка перегрева околосшовной зоны. Это связано с образованием крупнозернистой видманштеттовой структуры на участке перегрева (рисунок 6.24).

Металл с видманштеттовой структурой обладает пониженной ударной вязкостью и малой стойкостью против перехода в хрупкое состояние. Повышение ударной вязкости металла сварного соединения в этом случае обеспечивается только после нормализации сварной конструкции, приводящей к устранению видманштеттовой структуры и измельчению зерна. После термообработки шов и металл ЗТВ имеет структуру феррита и сорбитообразного перлита. Размер зерен соответствует номеру 7...8 по ГОСТ 5639–82.

При электрошлаковой сварке низкоуглеродистых сталей из-за длительного пребывания металла при температуре аустенизации, образуются крупные аустенитные зерна. Это способствует возникновению видманштеттовой структуры при скоростях охлаждения металла, имеющих место при этом виде сварки. Термообработка сварных соединений приводит (*при нормализации*) к резкому возрастанию ударной вязкости. Поэтому в тех случаях, когда по условиям эксплуатации конструкции необходимо обеспечить высокую ударную вязкость металла шва и околосшовной зоны при температурах ниже комнатной, ее следует подвергать общей или местной нормализации с последующим общим отпуском для снятия напряжений.

Повышение содержания в конструкционных сталях марганца, хрома, никеля и других легирующих элементов при содержании углерода от 0,1 % и выше приводит к появлению в ЗТВ сварных соединений бейнита, мартенсита и остаточного аустенита (*15XCHД, 17ГС, 14ХГС и др.*). Для снятия сварочных напряжений и получения мелкодисперсной ферритно-перлитной структуры для сварных соединений, изготовленных из этой группы сталей, чаще всего применяется высокий отпуск при температуре 600 °С, а при длительных выдержках – при 550 °С.

Для конструкционных низкоуглеродистых сталей повышенной прочности, легированных ниобием, титаном и ванадием (*15Г2АФ, 16Г2АФ, 18Г2АФ и др.*), опасность хрупкого разрушения чаще всего возникает в околошовной зоне из-за выпадения карбидонитридов этих элементов. Отпуск таких сварных соединений по температурам, рекомендованным для шовного металла, приводит к ухудшению свойств околошовной зоны из-за коагуляции упрочняющей фазы. Лишь повышение температуры отпуска до 700...720 °С или применение общей нормализации всего изделия позволяет улучшить свойства сварных соединений, изготовленных из этих сталей.

Основная причина послесварочной термообработки среднеуглеродистых нелегированных и низколегированных конструкционных сталей – это высокая склонность к образованию закалочных структур и появлению холодных трещин. Термообработка сварных соединений среднеуглеродистых низколегированных сталей необходима сразу же после завершения сварки, чтобы свести к минимуму время, за которое может развиваться замедленное разрушение. Основной вид обработки – это высокий отпуск при 620...650 °С, проводимый непосредственно после сварки. При использовании этих сталей в термоупрочненном состоянии отпуск сварных соединений должен быть заменен на общую термообработку всего изделия в виде закалки и отпуска, режимы которых соответствуют исходной термической обработке основного металла.

Теплоустойчивые стали. С введением в сталь таких легирующих элементов, как молибден, хром, ванадий и др., яв-

ляющихся основными элементами теплоустойчивых и жаропрочных сталей, температура отпуска заметно повышается. Для хромомолибденовых сталей она составляет 660...680 °С, для хромомолибденованадиевых – 700 °С, для высокохромистых – около 720 °С, для аустенитных – 800...850 °С.

Низколегированные теплоустойчивые стали из-за наличия в их составе хрома и молибдена характеризуются повышенной чувствительностью к закалке. Поэтому в околошовной зоне и ЗТВ может образовываться мартенсит и возникать опасность появления холодных трещин. После сварки все изделия из жаропрочных низколегированных сталей подвергают термической обработке. С повышением содержания углерода в стали время между окончанием сварки и началом термообработки сокращается. Чаще всего стали этой группы после сварки подвергаются высокому отпуску для выравнивания структуры и снятия сварочных напряжений при температуре 650...750 °С в течение 2...3 ч. Реже применяется нормализация сварного соединения с отпуском или без него.

Среднелегированные теплоустойчивые стали так же характеризуются пониженной стойкостью против образования холодных трещин из-за повышенного содержания легирующих элементов, усиливающих склонность к образованию закалочных структур. Термообработку следует производить с момента окончания сварки до того момента, пока еще холодные трещины не возникли. В одних случаях это время составляет несколько десятков часов, в других – несколько минут. Своевременная термообработка соединений может полностью устранить опасность образования холодных трещин. ЗТВ сварного соединения подвергают высокому отпуску, температура которого тем выше, чем выше степень легированности стали (720...760 °С).

Полная термообработка сварных соединений из среднелегированных сталей заключается в закалке и последующем отпуске. Режимы термообработки зоны сварного шва подбираются исходя из рекомендаций, установленных для свариваемой стали. Дело в том, что закаленные стали после отпуска, особенно высокого, практически не снижают прочности при длитель-

ном статическом нагружении, т. е. они становятся несклонными к замедленному разрушению.

Высоколегированные стали с особыми свойствами. Основная опасность для эксплуатационной надежности конструкций, изготовленных из высоколегированных сталей, заключается в возможности образования горячих и холодных трещин. Горячим трещинам подвержены в основном аустенитные стали и сплавы, холодным — закаливающиеся стали мартенситного и мартенситно-ферритного классов.

Сварочный нагрев аустенитных высоколегированных сталей вызывает протекание целого ряда процессов, ухудшающих их свариваемость. При этом методами послесварочной термической обработки удастся снизить воздействие только части из этих процессов. Наиболее широко термическая обработка сварных соединений из аустенитных сталей применяется для повышения их коррозионной стойкости, в частности, предотвращения явления межкристаллитной коррозии.

К числу наиболее существенных мер борьбы с межкристаллитной коррозией в зоне термического влияния относятся следующие:

1) ***Аустенизация сварного соединения*** — закалка на гомогенный твердый раствор. При нагреве под закалку выпавшие в результате сварочного нагрева карбиды хрома растворяются в аустените. Последующее быстрое охлаждение позволяет получить однородный аустенит. Однако повторный нагрев в области критических температур может снова привести к выпадению карбидов хрома. Этот вид термической обработки также способствует снижению остаточных сварочных напряжений (на 70...80 %) и повышению пластичности металла сварного соединения с одновременным выравниванием структуры металла шва и прилегающих к нему зон основного металла. Перерыв между сваркой и термической обработкой не регламентирован. Следовательно, аустенизацию можно проводить спустя даже несколько суток после окончания процесса сварки.

2) ***Стабилизирующий, или диффузионный отжиг***, заключающийся в нагреве металла при 850...900 °С в течение 2...3 ч с

последующим остыванием на воздухе. В этом случае карбиды хрома выпадают наиболее полно, но за счет диффузионных процессов содержание хрома в объеме зерен аустенита выравнивается, и поэтому металл становится нечувствительным к межкристаллитной коррозии.

Кроме того, под действием рабочих температур (500...900 °С) и напряжений в сварном соединении могут протекать процессы сигматизации (появления хрупкой твердой фазовой составляющей σ -фазы) – интерметаллида переменного состава, вызывающего резкое снижение ударной вязкости. Наиболее эффективное средство борьбы с сигматизацией металла шва и ЗТВ – это нагрев до температуры 1000...1150 °С с выдержкой в течение 1 ч и последующим охлаждением на воздухе. Тогда обеспечиваются полное растворение σ -фазы в аустените и дальнейшая невосприимчивость швов к воздействию опасных температур.

Важное значение имеет строгое соблюдение режима термической обработки. Скорость нагрева в диапазоне температур 20...550 °С следует выдерживать невысокой для того, чтобы уменьшить величину термических напряжений, обусловленных градиентом температур по толщине изделия. В интервале от 550 до 1100 °С подъем температуры следует проводить с максимальной скоростью 20...30 °С/мин, особенно в интервале 650...850 °С.

Замедленный нагрев может вызвать выделение растворившихся в процессе сварки высокодисперсных карбидов ниобия или титана, упрочняющих тело зерна металла околошовной зоны. Такой упрочняющий эффект, подобно дисперсионному твердению металла хромомолибденованадиевых сталей, может способствовать возникновению и развитию хрупкого межзеренного разрушения в околошовной зоне сварных соединений аустенитных сталей.

Температура выдержки определяет структурное состояние металла. Недогрев не обеспечивает растворения вторичных фаз и получения однородной аустенитной (*ферритно-аустенитной*) структуры, а перегрев вызывает недопустимый рост зерна в ме-

талле шва и околошовной зоны. В обоих случаях отклонение от температур выдержки приводит к ухудшению свойств сварного соединения.

Охлаждение сварного соединения должно проводиться на спокойном воздухе. Можно использовать для охлаждения также сжатый воздух или воду, обеспечивающие более интенсивное снижение температуры. Дополнительное искусственное охлаждение должно быть равномерным по всему периметру сварного шва для того, чтобы исключить боковую деформацию. Замедленное охлаждение считается вредным, поскольку оно способствует преждевременному распаду аустенита (*выпадению карбидов и избыточной ферритной фазы*) и, следовательно, приводит к снижению пластичности и жаропрочности металла.

Основная задача термической обработки **высокохромистых сталей мартенситного класса** – это обеспечение стойкости металла шва и околошовной зоны к образованию трещин. Мартенситное превращение в этих сталях имеет две особенности, отрицательно влияющие на образование холодных трещин. При охлаждении сталей, нагретых до температуры, соответствующей аустенитному состоянию, происходит мартенситный распад в широком интервале скоростей охлаждения. Кроме того, для сталей этой группы характерно формирование смешанного типа структуры, содержащей некоторое количество остаточного аустенита или феррита. В результате воздействия сварочного термического цикла в ЗТВ сталей происходит значительное укрупнение зерна. Все это вызывает резкое падение вязкости металла в околошовной зоне. Высокотемпературный отпуск при 760...780 °С позволяет значительно повысить пластичность металла в этой зоне.

Однако если такую обработку не осуществить тотчас после сварки, то оставшаяся в металле шва и околошовной зоны часть нераспавшегося аустенита не претерпит необходимых превращений и сохранит крупнозернистую структуру. В этом случае изделие подвергают термической обработке – отжигу при 900 °С, затем медленному охлаждению до 600 °С и последующему охлаждению на спокойном воздухе.

Нагрев металла шва и околошовной зоны **высокохромистых сталей ферритного класса** в процессе сварки приводит к потере пластичности и охрупчиванию металла, связанному с выделением вторичных карбидов хрома по границам зерен, и к возможности межкристаллитной коррозии. Для исправления полученной структуры и повышения стойкости сварного соединения к холодным трещинам необходима термическая обработка. Режим термической обработки: нагрев конструкции температуры до 870...900 °С с выдержкой не менее 10 ч и последующее быстрое охлаждение в холодной воде. В процессе нагрева и длительной выдержки полностью растворяются в твердом растворе (*феррите*) выпавшие при сварке карбиды. Последующее быстрое охлаждение не позволяет им снова выпасть из раствора.

В ряде случаев для улучшения свойств сварного соединения из ферритной стали достаточен высокий отпуск конструкции при температуре 700...750 °С.

Для высокохромистых ферритных сталей также характерно протекание процесса сигматизации в результате длительной выдержки в интервале температур 550...875 °С. Эффективным средством предотвращения образования Σ -фазы для этой группы сталей, так же как и для аустенитных сплавов, является нагрев сварных соединений до температуры 1050...1100 °С с последующим быстрым охлаждением.

Падение пластичности швов и основного металла в результате старения происходит при длительной эксплуатации сварных соединений в условиях повышенных температур (500...750 °С). Оно сопровождается выделением по границам зерен вторичных карбидов и интерметаллидов. Находят применение следующие средства борьбы с этим видом охрупчивания: снижение в металле шва и ЗТВ содержания углерода и нагрев сварного соединения до температур выше 900 °С, при котором происходит распад вторичных карбидов и интерметаллидов.

Сварные соединения из **аустенитно-ферритных сталей** склонны к охрупчиванию при работе в интервале температур 325...525 °С, особенно при 475 °С. Наблюдается значительное снижение пластичности и особенно ударной вязкости. Для

устранения этого явления применяют нагрев до 1000...1150 °С с последующим быстрым охлаждением. В аустенитно-ферритных швах, кроме того, целесообразно ограничивать содержание ферритной составляющей (от 5 до 20 %), что позволяет предупредить сигматизацию.

Сварные соединения **высокохромистых сталей мартенситно-ферритного класса** для улучшения свойств зоны шва и ряда участков ЗТВ подвергаются высокому отпуску. Термическая обработка должна быть проведена сразу после окончания сварки. Если же перед термической обработкой сварное соединение будет охлаждено до комнатной температуры, может резко снизиться пластичность металла околосшовной зоны вследствие формирования закалочных структур. Распад остаточного аустенита вызовет образование высокоуглеродистого мартенсита, что приведет к повышению внутренних напряжений и появлению хрупких участков металла, т. е. при этом резко возрастет склонность металла к хрупкому разрушению. Для предотвращения этого сварные соединения подвергают высокому отпуску путем нагрева до 740...770 °С, выдержке при этой температуре в течение 5 ч и охлаждению до 200 °С со скоростью не более 150 °С/ч.

Замедленная кинетика структурных превращений в высокохромистых сталях является одной из причин образования в их околосшовных зонах мартенситных прослоек. Поэтому непременное условие – это точное выполнение заданных режимов термической обработки сварного соединения.

Если проведение термической обработки непосредственно после сварки невозможно, то сварное соединение медленно охлаждают до 150...200 °С и выдерживают при этих температурах в течение 2...3 ч. Эта операция проводится с целью полного завершения распада остаточного аустенита без повышения уровня внутренних напряжений. После этого сварное соединение охлаждают до комнатной температуры. В этом случае термическую обработку можно проводить не сразу по окончании сварки, а не позднее чем через 24 ч после окончания сварки.

Вопросы для самопроверки

1. В чем заключается цель термической обработки сварных соединений?
2. Какие нежелательные изменения структуры металла после сварки устраняются термической обработкой?
3. Для чего используется отпуск?
4. На какие виды подразделяется отпуск?
5. Что такое стабилизирующий отжиг?
6. В чем заключается аустенизация сварного соединения?

ЛИТЕРАТУРА

1. Теория сварочных процессов : учебник для вузов / А. В. Коновалов, А. С. Куркин, Э. Л. Макаров, В. М. Неровный, Б. Ф. Якушин; под ред. В. М. Неровного. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007. – 752 с.
2. Лившиц, Л. С. Металловедение сварки и термическая обработка сварных соединений / Л. С. Лившиц, А. В. Хахимов. – М. : Машиностроение, 1989. – 243 с.
3. Металлургия дуговой сварки / И. К. Походня, И. Р. Явдошин, А. П. Пальцевич и др.; под ред. И. К. Походни. – Киев : Наук. думка, 2004. – 445 с.
4. Прохоров, Н. Н. Физические процессы при сварке: в 2 т. Т. 1. Элементы физики металлов и процесс кристаллизации. – М. : Metallurgy, 1968. – 695 с. Т. 2. Внутренние напряжения, деформации и фазовые превращения. – М. : Metallurgy, 1979. – 600 с.
5. Сварка и свариваемые материалы : справочник: в 3 т. Т. 1. Свариваемость материалов / под ред. Э. Л. Макарова. – М. : Metallurgy, 1991. – 527 с.
6. Сварка и свариваемые материалы : справочник : в 3 т. Т. 2. Технология и оборудование / под ред. В. М. Ямпольского. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1996. – 574 с.
7. Сварка. Резка. Контроль : справочник : в 2 т. / под общ. ред. Н. П. Алешина, Г. Г. Чернышова. Т. 1 / Н. П. Алешин, Г. Г. Чернышов, Э. А. Гладков и др. – М. : Машиностроение, 2004. – 625 с.
8. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / под ред. акад. Б. Е. Патона. – М. : Машиностроение, 1974. – 768 с.
9. Грабин В. Ф. Металловедение сварки плавлением / В. Ф. Грабин. – Киев : Наук. думка, 1982. – 416 с.

10. Ефименко, Л. А. Металловедение и термическая обработка сварных соединений : учеб. пособие / Л. А. Ефименко, А. К. Прыгаев, О. Ю. Елагина. – М. : Логос, 2007. – 456 с.
11. Моисеенко, В. П. Материалы и их поведение при сварке : учеб. пособие / В. П. Моисеенко. – Ростов н/Д: Феникс, 2009. – 300 с.
12. Солнцев, Ю. П. Материаловедение / Ю. П. Солнцев, Е. И. Пряхин. – СПб. : Химиздат, 2004. – 735 с.
13. Левченко, А. М. Книга лекций по сварке в Политехническом университете Петра Великого / А. М. Левченко. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2015. – 396 с.

**Владимир Петрович Тимошенко,
Михаил Васильевич Радченко**

**ТЕПЛОВЫЕ И МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ
В СВАРОЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ**

Учебное пособие

Часть 1

Редакторы: И. И. Баранов,
Н. И. Горбачёва

Подписано в печать 28.11.2016. Формат 60×84 1/16.

Печать – ризография. Уч.-изд.л. 15,22.

Тираж 50 экз. Заказ 2016 –

Издательство Алтайского государственного
технического университета им. И. И. Ползунова
656038, г. Барнаул, пр-т Ленина, 46

Отпечатано в типографии АлтГТУ
656038, г. Барнаул, пр-т Ленина, 46
тел.: (8-3852) 29-09-48