

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БРЕСТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Кафедра строительных конструкций

А.В. Мухин, Н.В. Черноиван

МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ И СВАРКА

Конспект лекций

*Рекомендован Советом университета для студентов
специальности 1 – 70 01 01 «Производство строительных
изделий и конструкций»*

Брест 2011

УДК 669.017 (075.8):621.79
ББК 34
М 92

Рецензенты:

директор УО «Брестский политехнический колледж» **В.С. Басов**, канд. техн. наук, доцент;
главный инженер филиала УП «Белорусский научно-исследовательский институт
строительства» – «Научно-технический центр» **В.Н. Деркач**, канд. техн. наук.

Мухин А.В., Черноиван Н.В.
М 92 **Металловедение и сварка:** конспект лекций для студентов специальности 1-70 01 01 –
«Производство строительных изделий и конструкций» очной формы обучения. –
Брест: Издательство БрГТУ, 2011. – 112 с.

ISBN 978-985-493-187-6

В настоящем издании подробно изложены основные вопросы металловедения и сварки, проработка которых позволяет осуществить углубленное изучение при подготовке к зачету.

Материалы предназначены для студентов дневной формы обучения специальности 1-70 01 01 – «Производство строительных изделий и конструкций», но могут быть полезны для студентов других специальностей, которые изучают курс «Металловедение и сварка».

УДК 669.017 (075.8)
ББК 34

ISBN 978-985-493-187-6

© Мухин А.В., Черноиван Н.В., 2011
© Брест, Издательство БрГТУ, 2011

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	6
МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ	7
1. КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТАЛЛОВ	7
2. РЕАЛЬНОЕ СТРОЕНИЕ МЕТАЛЛОВ	8
2.1. Типы межатомных связей	8
2.2. Кристаллическое строение металлов. Типы кристаллической решетки	9
2.3. Дефекты строения кристаллической решетки	12
2.4. Влияние несовершенств строения металлов на их свойства	15
3. КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ МЕТАЛЛОВ	17
3.1. Термодинамические основы процесса кристаллизации	17
3.2. Механизм процесса кристаллизации	18
3.2.1. Общие закономерности и разновидности процессов кристаллизации	18
3.2.2. Самопроизвольная кристаллизация. Образование центров кристаллизации	18
3.2.3. Рост центров кристаллизации (зародышей)	19
3.2.4. Соотношение скоростей образования и роста зародышей. Величина зерна	20
3.2.5. Несамопроизвольная кристаллизация. Модифицирование	21
3.3. Форма кристаллов. Строение металлического слитка	21
3.4. Вторичная кристаллизация	23
4. ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫЕ СПЛАВЫ	25
4.1. Общие сведения о диаграммах состояния	25
4.2. Понятие о правилах фаз и отрезков	25
4.3. Диаграмма состояния железо-углерод (цементит)	26
4.3.1. Верхняя часть диаграммы железо-цементит	26
4.3.2. Нижняя часть диаграммы системы железо-цементит	28
4.4. Влияние углерода и постоянных примесей на структуру и свойства сталей	29
4.4.1. Влияние углерода	29
4.4.2. Влияние кремния и марганца	29
4.4.3. Влияние серы и фосфора	30
4.4.4. Влияние азота, кислорода и водорода	30
5. ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ	31
5.1. Основы теории термической обработки	31
5.1.1. Общие сведения	31
5.1.2. Термическая обработка железоуглеродистых сплавов	31
5.1.3. Превращения при нагреве сталей. Образование аустенита	31
5.1.4. Рост зерна аустенита при нагреве	32
5.1.5. Превращения переохлажденного аустенита	33
5.1.6. Превращения аустенита при непрерывном охлаждении	37
5.1.7. Влияние углерода и легирующих элементов на распад переохлажденного аустенита	37
5.1.8. Основы теории отпуска сталей	38
5.2. Практика термической обработки сталей	39

5.2.1. Отжиг I рода	39
5.2.2. Отжиг II рода	41
5.2.3. Закалка стали	43
5.2.3.1. Выбор температуры закалки.....	43
5.2.3.2. Закаливаемость и прокаливаемость стали	44
5.2.3.3. Способы закалки.....	45
5.2.4. Отпуск стали.....	46
5.2.5. Дефекты термической обработки	47
6. СПОСОБЫ ПРОИЗВОДСТВА И ОЧИСТКИ СТАЛЕЙ.....	48
6.1. Способы производства сталей	48
6.1.1. Материалы для производства металлов и сплавов	48
6.1.2. Способы получения металлов из руд	48
6.1.3. Сущность процесса производства стали	49
6.1.4. Производство стали в кислородных конвертерах	50
6.1.5. Бездоменное производство стали	52
6.1.6. Разливка стали	52
6.2. Внепечное повышение качества стали.....	54
7. СТАЛИ И ЧУГУНЫ	57
7.1. Стали	57
7.1.1. Классификация сталей	57
7.1.2. Конструкционные стали	58
7.1.2.1. Углеродистые конструкционные стали	59
7.1.2.2. Конструкционные низколегированные строительные стали	60
7.1.2.3. Классификация строительных сталей по прочности и области их применения	61
7.1.3. Инструментальные стали и сплавы	62
7.1.4. Специальные стали	62
7.1.4.1. Коррозионно стойкие стали	62
7.1.4.2. Жаропрочные стали	62
7.2. Чугуны.....	63
СВАРКА.....	67
8. ФИЗИЧЕСКАЯ СУЩНОСТЬ ПРОЦЕССА СВАРКИ.....	67
8.1. Образование соединений при сварке	67
8.2. Классификация основных способов сварки.....	68
9. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ДУГОВОЙ СВАРКИ	71
9.1. Свойства сварочной дуги	71
9.1.1. Электрические свойства.....	71
9.1.2. Тепловые свойства.....	73
9.1.3. Процессы плавления и переноса металла при дуговой сварке	74
9.2. Металлургические и физико-химические процессы при дуговой сварке	76
9.2.1. Термический цикл.....	76
9.2.2. Особенности металлургических процессов.....	76
9.2.3. Физико-химические процессы	78
9.2.3.1. Взаимодействие жидкого металла сварочной ванны с кислородом, водородом и другими газами.....	78

9.2.3.2. Защита расплавляемого при сварке металла	79
9.2.3.3. Взаимодействие металла сварочной ванны с электродными покрытиями, флюсом и газами	80
9.2.4. Структура сварных соединений	82
9.2.5. Понятие о свариваемости металлов	84
9.2.6. Горячие и холодные трещины в сварных соединениях	85
9.2.6.1. Горячие трещины	85
9.2.6.2. Холодные трещины	85
10. СВАРКА ПЛАВЛЕНИЕМ	87
10.1. Ручная дуговая сварка	87
10.1.1. Особенности способа сварки. Области применения	87
10.1.2. Подготовка металла под сварку	87
10.2. Электродуговая механизированная и автоматическая сварка под флюсом	88
10.2.1. Сущность способа	88
10.2.2. Преимущества и недостатки	89
10.3. Сварка в защитных газах	90
10.3.1. Сущность способа	91
10.3.2. Преимущества и недостатки	91
10.3.3. Подготовка кромок и их сборка под сварку	92
10.4. Электрошлаковая сварка	92
10.4.1. Сущность способа	92
10.4.2. Преимущества и недостатки	93
10.4.3. Подготовка деталей к сборке и сварке	94
10.4.4. Возбуждение электрошлакового процесса	95
10.5. Ванная сварка	96
10.5.1. Сущность способа	96
10.5.2. Технология ванной сварки при монтаже арматурных и сборных конструкций	96
10.6. Термитная сварка	99
10.6.1. Сущность способа	99
10.6.2. Термохимическая сварка	100
11. СВАРКА ДАВЛЕНИЕМ	101
11.1. Контактная сварка	101
11.1.1. Особенности способа сварки	101
11.1.2. Области применения контактной сварки в промышленном строительстве	102
11.1.3. Подготовка элементов к контактной сварке	103
11.1.4. Стыковая контактная сварка	103
11.1.5. Точечная контактная сварка	105
11.1.6. Шовная контактная сварка	106
11.2. Холодная сварка давлением	107
11.3. Диффузионная сварка в вакууме	108
ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА	110

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящий конспект лекций составлен по программе курса «Металловедение и сварка» для студентов специальности 1-70 01 01 – «Производство строительных изделий и конструкций» дневной формы обучения.

Дисциплина «Металловедение и сварка» предназначена дать студентам знания, умения и основные навыки для правильного и экономически целесообразного выбора и применения металлов. Необходимо видеть преимущества и недостатки металлов, так как именно в этом заключается связь данной дисциплины с другими курсами учебного плана, составляющая ее входной блок, требующий знаний химии, физики, математики и электротехники.

Изучение настоящей дисциплины служит теоретической базой технологической подготовки и обеспечивает успешное усвоение смежных дисциплин: «Детали машин и подъемно-транспортные механизмы», «Строительные конструкции» и ряда других дисциплин, что составляет содержание выходного блока дисциплины.

Учебный материал дисциплины «Металловедение и сварка» охватывает два раздела.

В первом разделе «Металловедение» излагаются основы теории сплавов, влияние пластической деформации на свойства металлов, классификация, маркировка и применение в строительстве углеродистых и легированных сталей современные способы получения сплавов.

Во втором разделе «Сварка металлов» рассматриваются вопросы сварки плавлением и давлением, процессы термической резки, обеспечение качества и экономической эффективности сварки.

МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ

Металловедение – наука, изучающая строение и свойства металлов и их сплавов, устанавливающая связь между их составом, строением и свойствами и разрабатывающая пути воздействия на их свойства.

1. КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТАЛЛОВ

Каждый металл отличается строением и свойствами от другого, тем не менее по некоторым признакам их можно объединить в группы. Прежде всего металлы можно разделить на две большие группы – черные и цветные металлы.

Черные металлы имеют темно-серый цвет, большую плотность (кроме щелочноземельных), высокую температуру плавления, относительно высокую твердость и во многих случаях обладают полиморфизмом. Наиболее типичным металлом этой группы является железо.

Цветные металлы чаще всего имеют характерную окраску: красную, желтую, белую. Обладают большой пластичностью, малой твердостью, относительно низкой температурой плавления, для них характерно отсутствие полиморфизма. Наиболее типичным металлом этой группы является медь.

Черные металлы в свою очередь можно подразделить следующим образом:

1. Группа железа – железо, кобальт, никель (так называемые ферромагнетики) и близкий к ним по свойствам марганец. Кобальт, никель и марганец часто применяются как добавки к сплавам железа, а также в качестве основы для соответствующих сплавов, похожих по своим свойствам на высоколегированные стали.

2. Тугоплавкие металлы, температура плавления которых выше, чем железа (т. е. выше 1539° С). Применяют как добавки к легированным сталям, а также в качестве основы для соответствующих сплавов (титан).

3. Урановые металлы – актиниды, имеющие преимущественное применение в сплавах для атомной энергетики.

4. Редкоземельные металлы – лантан, церий, неодим, празеодим и др., объединяемые под названием лантаноиды, и сходные с ними по свойствам иттрий и скандий. Эти металлы обладают весьма близкими химическими свойствами, но довольно различными физическими (температура плавления и др.). Их применяют как присадки к сплавам других элементов.

5. Щелочноземельные металлы в свободном металлическом состоянии не применяются, за исключением особых случаев (литий, натрий).

Цветные металлы подразделяются на:

1. Легкие металлы – бериллий, магний, алюминий, обладающие малой плотностью.

2. Благородные металлы – серебро, золото, металлы платиновой группы (платина, палладий, иридий, родий, осмий, рутений). К ним может быть отнесена и «полублагородная» медь. Обладают высокой устойчивостью против коррозии.

3. Легкоплавкие металлы – цинк, кадмий, ртуть, олово, свинец, висмут, таллий, сурьма и элементы с ослабленными металлическими свойствами – галлий, германий.

2. РЕАЛЬНОЕ СТРОЕНИЕ МЕТАЛЛОВ

2.1. Типы межатомных связей

Целостность твердых материалов и их прочность обусловлены наличием сил межатомного притяжения, которые приводят к образованию атомных связей. Обычно выделяют четыре типа атомных связей. Первые три типа связей: ионная, ковалентная и металлическая – относительно прочны. Они возникают вследствие обмена или объединения валентных электронов, находящихся на S-орбитах и P-орбитах. Четвертый тип связей – межмолекулярный (ван-дер-ваальсовый) – характеризуется гораздо меньшей прочностью (более слабой энергией взаимодействия).

Ионная связь образуется путём передачи атомом одного элемента своих валентных электронов атому другого элемента. Это приводит к образованию положительного и отрицательного ионов, которые притягиваются друг к другу электростатически. Расстояние между центрами ионов определяется уравниванием сил притяжения между ионами и сил отталкивания их электронных оболочек. Типичный пример образования ионной связи – кристаллы поваренной соли (NaCl). В качестве конструктивных такие материалы практически не применяются.

Ковалентная связь осуществляется в результате обобществления ("спаривания") валентных электронов двух соседних атомов. Например, в алмазе связь двух атомов углерода осуществляется парами валентных электронов, находящихся на общей орбите. В межатомном пространстве создается локализация электронов в направлениях, кратчайших для двух соседних атомов. Образуются "электронные мостики", вне которых электронная плотность очень мала. Ковалентная связь проявляется при образовании молекул из атомов одного элемента (например, H₂, O₂, Cl₂ и т.д.) или разных элементов (в карбидах – Fe₃C, SiC, нитридах – AlN). Чем больше степень перекрытия электронных орбит валентных электронов, тем прочнее ковалентные связи. Материалы с ковалентной связью характеризуются малой плотностью, высокой твердостью и хрупкостью. Они обычно являются диэлектриками или полупроводниками.

Межмолекулярная (полярная) связь основана на действии сил Ван-дер-Ваальса, связанных с присутствием в молекулах внутренних диполей. Эти диполи образуются либо в результате статической неоднородности распределения электронов в атомах и молекулах, либо при несовпадении центров положительных и отрицательных зарядов в асимметричных молекулах (например, HF). Вследствие этого положительный конец одного диполя будет притягиваться к отрицательному концу диполя другой молекулы, что проявляется как молекулярное взаимодействие. Такая связь реализуется при кристаллизации молекул водорода, азота, углекислого газа, воды, метана, в макромолекулах полимерных материалов.

Металлическая связь обусловлена особенностями электронного строения атомов металлов, в которых внешние валентные электроны относительно слабо связаны с ядрами. Поэтому при сближении атомов электронные орбиты их внешних электронов перекрываются, валентные электроны могут свободно переходить от одного атома к другому, т.е. теряют принадлежность к отдельным атомам и становятся общими, образуя так называемый «электронный газ». Связь в этом случае определяется электростатическим притяжением между положительно заряженным ионным скелетом и отрицательно заряженным электронным газом. Этот особый вид связи носит ненаправленный характер и обуславливает большинство характерных для металлов свойств (высокую теплопроводность и электропроводность, хорошую деформируемость и т.д.).

Таким образом, металл можно представить в виде положительного ионного остова, состоящего из атомных ядер с внутренними электронами, и коллективизированных валентных электронов, образующих электронный газ или, точнее,

учитывая возможность взаимодействия электронов, электронную жидкость «омывающую» ионный остов. Электронный газ компенсирует силы взаимного электростатического отталкивания положительных ионов, обеспечивая их связь в твердом теле, т. е. металлическую связь. В металлах электроны проводимости есть всегда в отличие от полупроводников, где они появляются только при определенных воздействиях (например, температуры, освещения).

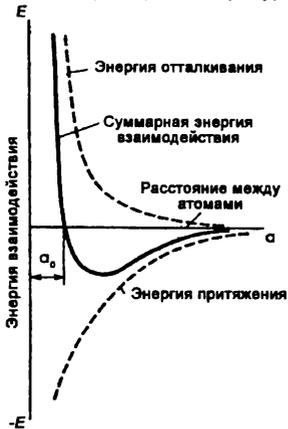


Рисунок 1 – Схема энергии взаимодействия двух атомов в зависимости от межатомного расстояния

При всех типах межатомной связи атомы стремятся расположиться на таких расстояниях друг от друга (a_0), чтобы энергия взаимодействия, представляющая собой сумму энергий отталкивания и притяжения атомов, была минимальной (рис. 1). Изменение этого расстояния между атомами в твердых телах при деформировании, диффузии, разделении, испарении связано с преодолением энергии взаимодействия.

Величина энергии взаимодействия для различных типов межатомной связи различна (табл. 1).

Таблица 1 – Энергия взаимодействия для различных типов межатомной связи

Тип связи	Межмолекулярная		Ионная	Ковалентная	Металлическая		
Материал	He	Ar	NaCl	SiC	Fe	Mo	W
Энергия, кДж/моль	0,092	6,3	750	1180	396	670	880
$t_{пл}, ^\circ\text{C}$	-272,4	-189,4	801	—	1539	2625	3410

Как видно из таблицы 1, наблюдается определенная связь между энергией взаимодействия и свойствами элементов, в данном случае с температурой плавления ($t_{пл}$). Она выше в материалах с ковалентной и металлической связью. С ростом энергии взаимодействия увеличиваются такие характеристики, как модуль упругости, коэффициент самодиффузии и др.

2.2. Кристаллическое строение металлов.

Типы кристаллической решетки

Твердые тела в зависимости от скорости охлаждения при затвердевании могут находиться в аморфном и кристаллическом состояниях. Эти состояния отличаются степенью упорядоченности в расположении атомов. При аморфном состоянии тел (как и в жидкостях) соблюдается только "ближний порядок", т.е. существует правильная координация только для ближайших атомов. Положение в пространстве соседей – второго, третьего и более дальних порядков – хаотично. Тела в аморфном состоянии можно рассматривать как жидкости с очень высоким коэффициентом вязкости. Типичным примером такого твердого тела является стекло.

При кристаллическом состоянии, характерном для большинства металлов, наблюдается и "дальний порядок", когда определенная ориентация в пространстве и заданное расстояние соблюдаются как для ближайших атомов, так и для соседей второго, третьего и более дальних порядков. Причем расстояние между атомами соответствует минимальной энергии взаимодействия между ними. Такие закономерно расположенные атомы образуют правильную кристаллическую решетку. Ее можно представить в виде семейства воображаемых линий и плоскостей, проходящих через точки расположения ионов в пространстве (рис. 2).

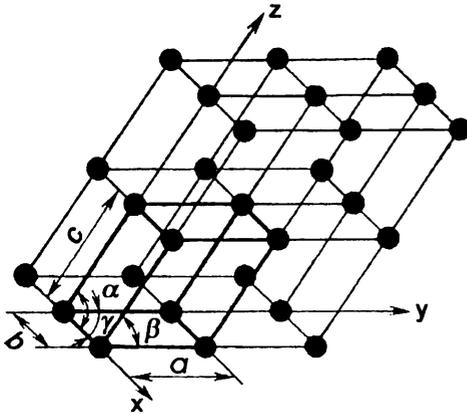


Рисунок 2 – Схема кристаллической решетки металлов

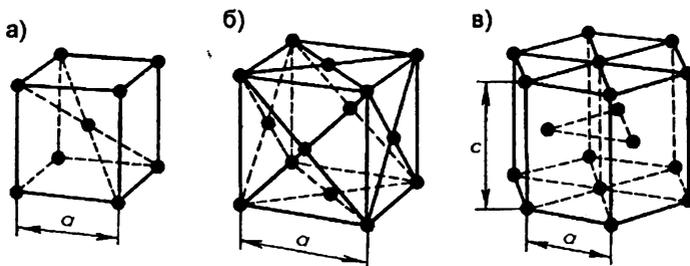
Жирными линиями выделен наименьший параллелепипед, последовательным перемещением которого вдоль трех осей может быть построен весь кристалл. Этот наименьший объем кристалла, дающий представление об атомной структуре металла в любом объеме, получил название элементарной кристаллической ячейки. Для однозначной характеристики ее необходимо знать три ребра (a , b и c) и три угла между осями (α , β и γ).

Величины a , b и c называются параметрами (периодами) кристаллической решетки. Они показывают расстояние между центрами соседних атомов (ионов) в направлении данной оси. Измеряются периоды решетки в нанометрах ($1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$) или ангстремах ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ м}$).

Выделяют 14 типов кристаллических решеток в зависимости от возможных вариаций соотношения величин a , b , c ; α , β , и γ , а также того, что атомы могут располагаться не только в узлах кристаллических решеток, но и в центрах элементарных ячеек и в центрах граней. Чаще всего у металлов встречаются три типа решеток (рис. 3):

- 1) **объемноцентрированная кубическая** – ОЦК, в которой атомы расположены по вершинам элементарной ячейки и в центре ее (Fe_α , W , Mo , K , Na , Li , Ti_β и др.);
- 2) **гранецентрированная кубическая** – ГЦК, в которой атомы расположены по вершинам элементарной ячейки и в центрах ее граней (Ni , Au , Ag , Pt , Fe_γ , Cu , Al и др.);
- 3) **гексагональная плотноупакованная** – ГПУ, представляющая собой призму с шестигранником в основании, в которой атомы расположены в три слоя (Mg , Ti_α , Zn и др.).

Параметр a кубических решеток колеблется в пределах $0,286 \dots 0,607 \text{ нм}$. Параметры гексагональной решетки находятся в пределах: $a = 0,228 \dots 0,398 \text{ нм}$ и $c = 0,357 \dots 0,652 \text{ нм}$.



- а – объемноцентрированная кубическая (ОЦК);
 б – гранецентрированная кубическая (ГЦК);
 в – гексагональная плотноупакованная (ГПУ)

Рисунок 3 – Основные виды элементарных ячеек кристаллических решеток металлов

Если считать атомы в кристаллах упругими соприкасающимися шарами, то кроме периода можно назвать следующие характеристики решетки, определяющие свойства металлов:

Координационное число (К) – это количество атомов, находящихся на наиболее близком и одинаковом расстоянии от любого произвольно выбранного атома в решетке. Координационное число для объемно-центрированной кубической решетки равно 8, для гранецентрированной кубической и гексагональной плотноупакованной решеток – 12.

Базис – количество атомов, приходящихся на одну элементарную ячейку. Для ОЦК решетки он равен 2 (каждый атом в вершине принадлежит данной ячейке на $1/8$, атом в центре – целиком, значит, $8 \times 1/8 + 1 = 2$). Для ГЦК решетки базис равен 4 ($8 \times 1/8 + 6 \times 1/2 = 4$), для ГПУ решетки – 6 ($12 \times 1/6 + 2 \times 1/2 + 3 = 6$).

Коэффициент компактности решетки (η) определяется отношением объема, занимаемого атомами с условно сферической формой, ко всему объему ячейки. Для ОЦК решетки коэффициент компактности равен 0,68; для ГЦК решетки – 0,74 и для ГПУ решетки – 0,74 (при $c/a = 1,633$). Важной характеристикой решетки, определяющей растворимость других элементов в ней, является максимальный размер пустот (пор). Он выше у металлов с ГЦК и ГПУ решетками.

Если рассматривать плотность распределения атомов по разным направлениям и плоскостям кристалла, то видно, что она может быть существенно различной. Например, на боковой грани ГЦК решетки расположены 4 атома, а на диагональной плоскости – 6 атомов. Плоскости кристаллов с более плотной упаковкой имеют меньший уровень поверхностной энергии, по ним легче осуществляется деформация в кристалле. Такая неодинаковость свойств кристалла в разных кристаллографических направлениях называется **анизотропией**. Анизотропными могут быть физические, механические, технологические и другие свойства. Чем меньше симметрия кристалла, тем сильнее проявляется эффект анизотропии.

При изготовлении и строительстве конструкций из металлов обычно применяются поликристаллические материалы, состоящие из большого количества различно ориентированных друг к другу мелких ($10 \dots 10^4$ см) кристаллов, образующих кристаллиты или зерна. Поэтому анизотропия в поликристаллическом теле не имеет ярко выраженного характера и свойства как бы усредняются во всех направлениях благодаря различной ориентации мелких кристаллов. Поликристаллические металлические материалы в равновесном состоянии могут считаться **изотропными**.

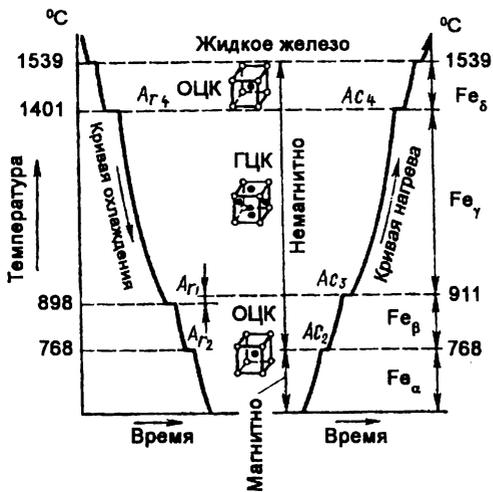


Рисунок 4 – Кривые охлаждения и нагрева железа

Рассматривая вопрос о кристаллическом строении материалов, следует отметить способность одного и того же материала (в том числе и металлов) образовывать в зависимости от температуры и давления несколько разных кристаллических структур. Это явление называется **полиморфизмом (или аллотропией)**. Различные структурные модификации одного и того же металла называют **полиморфным и (или аллотропическими) модификациями**. Перестройка атомов кристаллического тела, имеющего решетку одного типа, в решетку другого типа при изменении температуры и давления называется полиморфным (или аллотропическим) превращением.

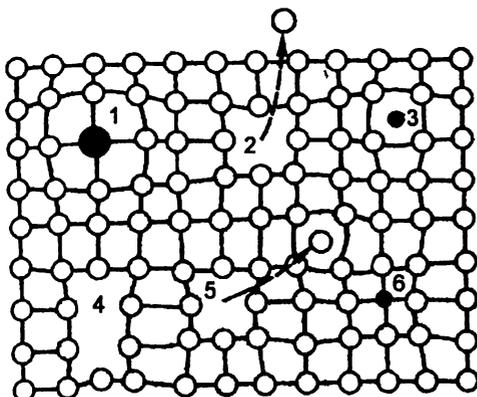
Полиморфные модификации, устойчивые при более низких температурах, для большинства металлов принято обозначать буквой α , а при более высоких – β , затем γ и т.п.

Полиморфизм распространен среди многих металлов и имеет важное значение в технике, поскольку оказывает влияние на поведение металлов и сплавов при их нагреве и охлаждении в процессе термической обработки, сварки, литья и т.д. Полиморфизмом обладают железо ($Fe_{\alpha} \rightleftharpoons Fe_{\delta}$), титан ($Ti_{\alpha} \rightleftharpoons Ti_{\beta}$), олово ($Sn_{\alpha} \rightleftharpoons Sn_{\beta}$) и другие металлы.

Полиморфные превращения сопровождаются выделением теплоты при охлаждении металла и поглощением теплоты при нагреве (рис. 4), при этом температура остается постоянной до полного завершения превращения во всем объеме металла. Полиморфные превращения сопряжены с изменением параметров решетки (периода, координационного числа, базиса, коэффициента компактности и др.), что обуславливает скачкообразное изменение свойств металлов и сплавов (удельного объема, электрической проводимости, магнитных механических и химических свойств и др.).

2.3. Дефекты строения кристаллической решетки

В реальных кристаллах всегда присутствуют дефекты строения, обусловленные нарушением правильного расположения атомов кристаллической решетки. Дефекты кристаллического строения подразделяют по геометрическим признакам на **точечные, линейные, поверхностные и объемные**.



- 1 – примесной атом замещения;
- 2 – дефект Шоттки;
- 3 – примесной атом внедрения;
- 4 – дивакансия;
- 5 – дефект Френкеля (вакансия и межузельный атом);
- 6 – примесной атом замещения

Рисунок 5 – Схема точечных дефектов в кристалле

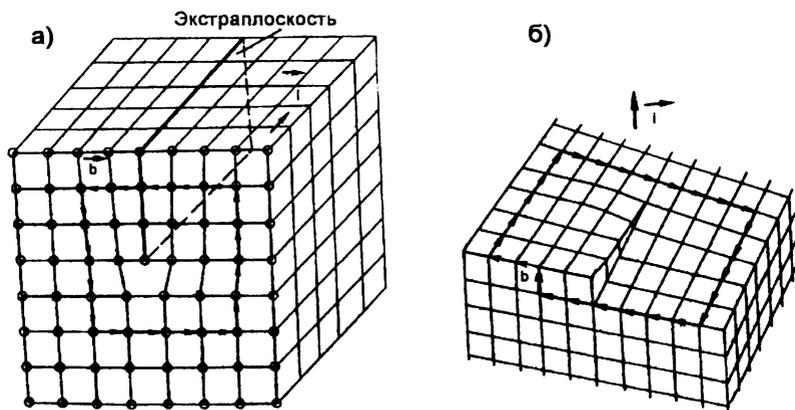
Точечные дефекты (рис. 5) малы во всех трех измерениях. Размер их не превышает нескольких атомных диаметров. К точечным дефектам относятся вакансии, т.е. узлы решетки, в которых атомы отсутствуют. Вакансии образуются в результате перехода атома из узла решетки на поверхность или полного испарения его с поверхности кристалла. В кристалле все атомы совершают колебательные движения возле узлов решетки. Отдельные атомы, кинетическая энергия которых выше средней, свойственной данной температуре нагрева (особенно если они расположены у поверхности), могут выйти на поверхность кристалла. Их место займут атомы, находящиеся дальше от поверхности. Принадлежавшие указанным атомам узлы окажутся свободными, т.е. возникнут тепловые вакансии. При переходе атома из узла решетки в междоузлие образуется дефект решетки, получивший название межузельного атома. Энергия, которую необходимо затратить для образования межузельных атомов, в 4...5 раз больше энергии, необходимой для образования тепловых вакансий. Поэтому количество вакансий в кристалле обычно больше, чем межузельных атомов. При наличии в кристаллической решетке "инородного" атома других элементов они располагаются либо в узлах кристаллической решетки, либо в междоузлиях. В первом случае образующийся точечный дефект решетки называется примесным атомом замещения, во втором – примесным атомом внедрения.

Точечные дефекты вызывают местные искажения кристаллической решетки и влияют на ряд физических свойств (электропроводность и другие термически активируемые процессы, диффузию, распад пересыщенных твердых растворов, ползучесть и т.д.).

Линейные дефекты малы в двух направлениях, а в третьем направлении соизмеримы с длиной кристалла. К ним относятся дислокации, цепочки вакансий и примесных и межузельных атомов.

Краевая дислокация (рис. 6 а) представляет собой локализованное искажение кристаллической решетки, вызванное наличием в ней "лишней" атомной полуплоскости или экстраплоскости (перпендикулярна плоскости чертежа).

Наиболее простой и наглядный пример образования дислокаций в кристалле – сдвиг. Если верхнюю часть кристалла сдвинуть относительно нижней на одно межатомное расстояние так, чтобы сдвиг охватил не всю плоскость скольжения, а только ее часть, то граница между участком, где скольжение уже произошло, и ненарушенным участком в плоскости скольжения и будет дислокацией. Как видно из рисунка, линия краевой дислокации перпендикулярна вектору сдвига. Дислокация может быть прямой или выгнутой в ту или другую сторону.



а – краевая; б – винтовая

Рисунок 6 – Дислокации в кристаллической решётке

Если экстраплоскость находится в верхней части кристалла, то дислокацию называют положительной и обозначают \perp , а если в нижней – то отрицательной и обозначают \neg .

Дислокации при приложении небольшого касательного напряжения легко перемещаются. При этом экстраплоскость посредством незначительного смещения перейдет в полную плоскость кристалла, а функции экстраплоскости будут переданы соседней плоскости. Дислокации одинакового знака отталкиваются, а разного знака взаимно притягиваются. Слияние дислокаций разного знака приводит к их взаимному уничтожению (аннигиляции).

Винтовая дислокация (рис. 6 б), так же как и краевая, образуется при неполном сдвиге кристалла на плоскости. В отличие от краевой, она располагается параллельно направлению сдвига. При наличии винтовой дислокации кристалл можно рассматривать как состоящий из одной атомной плоскости, закрученной в виде винтовой поверхности.

Дислокации образуются в процессе пластической деформации металлов при кристаллизации (в процессе срастания зерен и блоков) и при фазовых превращениях в твердом состоянии. Важной характеристикой структуры металлов является плотность дислокаций, под которой понимают суммарную длину дислокаций l (см), приходящуюся на единицу объема кристалла V (см³). Таким образом, размерность плотности дислокаций – см⁻².

Поверхностные дефекты – это двумерные несовершенства, имеющие значительные размеры в двух измерениях, а в третьем их размер соизмерим с межатомным (5...10 межатомных расстояний). Типичным примером таких дефектов являются зоны поверхностей раздела между отдельными зернами или их блоками (субзернами) в поликристаллических материалах (рис. 7). Соседние зерна в металлах обычно разориентированы на величину от нескольких долей градуса (малоугловые границы) до нескольких градусов или десятков градусов (высокоугловые границы).

Блоки (субзерна) повернуты один по отношению к другому на угол от нескольких секунд до нескольких минут (малоугловые границы), их размеры на 3...4 порядка меньше размеров кристаллитов (зёрен). Если не учитывать точечные дефекты, то в пределах каждого блока (или субзерна) решетка почти идеальная.

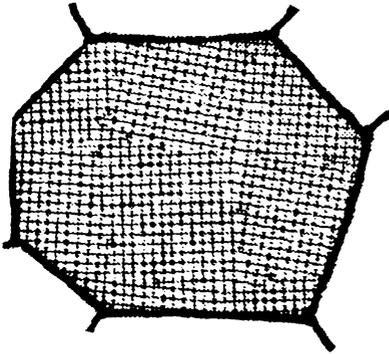


Рисунок 7 – Схема строения зерна металла

Границы между отдельными кристаллитами (зернами) представляют собой переходную область шириной 5...10 межатомных расстояний, в которой атомы расположены менее правильно, чем в объеме зерна. По границам зерен в технических металлах концентрируются примеси, что еще больше нарушает правильный порядок расположения атомов.

Границы блоков (субзерен), а также малоугловые границы зерен образованы дислокациями.

Состояние границ зерен оказывает большое влияние на свойства металлов.

Объемные дефекты (трехмерные несовершенства) – это поры, газовые пузырьки, неметаллические включения, микротрещины и т.п. Они имеют значительную по сравнению с атомами протяженность во всех трех направлениях кристалла. Объемные дефекты образуются при кристаллизации, фазовых превращениях в твердом состоянии, пластической деформации и других процессах. Эти дефекты снижают прочность металлов.

2.4. Влияние несовершенств строения металлов на их свойства

Теоретическую прочность идеального кристалла можно определить, вычислив напряжение при котором произойдет отрыв одной части кристалла от другой. Разделение их на две части произойдет, когда расстояние между смежными слоями атомов достигнет расстояния D , и напряжение составит величину σ_u . При малой скорости деформации можно пренебречь нагревом и считать, что энергия деформации полностью переходит в энергию образования поверхности P .

Относительная деформация может быть определена по формуле:

$$\epsilon = \sigma/E.$$

Энергия деформации может быть определена по формуле :

$$W=0.5 \cdot \sigma_u \cdot \epsilon \cdot D=0.5 \cdot \sigma_u \cdot D \cdot \sigma_u/E=0.5 \cdot \sigma_u^2 \cdot D \cdot /E; \quad (1)$$

Учитывая, что образуется две поверхности получим $W=2P$.

Прочность кристаллического материала может быть определена по формуле (2):

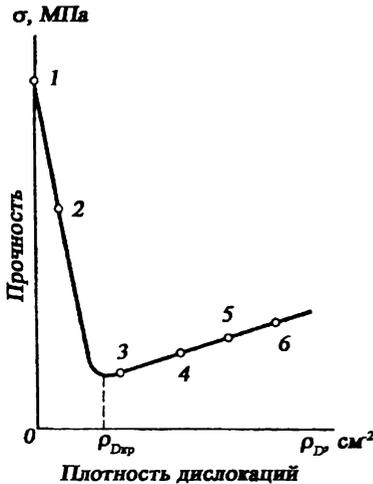
$$\sigma_u = 2 \cdot (P \cdot E / D)^{1/2}; \quad (2)$$

Определим прочность без дефектов кристалла железа имеющего $P=1 \text{ дж/м}^2$, $E=206000 \cdot 10^5 \text{ Па}$, $D = 2 \cdot 10^{-10} \text{ м}$. Подставив указанные значения в формулу 2, получим $\sigma_u = 64000 \text{ МПа}$.

Использование теории дислокаций позволило объяснить причину большого расхождения между теоретической и фактической (реальной) прочностью кристаллических тел.

Теоретическая прочность должна быть пропорциональна произведению сил межатомного взаимодействия на число атомов в сечении кристалла.

Дефекты решетки оказывают большое влияние на различные свойства металлов и прежде всего на механические свойства. Использование теории дислокаций позволило объяснить причину большого расхождения между теоретической и фактической (реальной) прочностью кристаллических тел.



- 1 – теоретическая прочность; 2 – прочность монокристаллических нитей;
- 3 – практическая прочность отожженного металла; 4 – прочность закалённой стали;
- 5 – прочность стали после термомеханической обработки;
- 6 – прочность мартенситостареющей стали

Рисунок 8 – Зависимость прочности от плотности дислокаций

Расчетное усилие для смещения одной части кристалла относительно другой оказалось на 2...3 порядка выше фактически затрачиваемого при пластической деформации металла. Так, теоретическая прочность железа составляет около 64000 МПа, а фактическая – всего 250 МПа. Такое расхождение теоретической и фактической прочности объясняется тем, что деформация происходит не путем одновременного смещения целых атомных плоскостей, а за счет постепенного перемещения дислокаций. Для перемещения дислокации требуется значительно меньшее усилие, чем для жесткого смещения одной части кристалла относительно другой в плоскости сдвига. Это объясняется тем, что в первом случае требуется разрыв межатомных связей во всех атомных плоскостях по плоскости сдвига, а во втором - разрыв атомных связей только в одной соседней с экстраплоскостью краевой дислокации.

Влияние искажений кристаллической решетки на прочность металлов приведено на рисунке 8. Левая ветвь кривой соответствует практически бездислокационным кристаллам (так называемым "усам"), прочность которых близка к теоретической. При ограниченной плотности дислокаций ($10^5 \dots 10^8 \text{ см}^{-2}$) и других искажениях кристаллической решетки процесс сдвига происходит тем легче, чем больше дислокаций находится в объеме металла. Прочность металлов при этом минимальная. С повышением плотности дислокаций до значений $10^{10} \dots 10^{12}$ их движение затрудняется из-за взаимодействия полей упругих искажений дислокаций друг с другом. До деформирования (продвижения дислокаций) требуется увеличение усилий, т.е. металл упрочняется, что соответствует правой ветви кривой на рисунке 8.

3. КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ МЕТАЛЛОВ

3.1. Термодинамические основы процесса кристаллизации

В твердых кристаллических телах между атомами сохраняются постоянные промежутки и ориентировка на значительных расстояниях, т.е. соблюдается так называемый дальний порядок. В газах отсутствует закономерность в расположении атомов, они расположены хаотически. В жидкостях определенная ориентировка и постоянство расстояний между атомами распространяются только на ближайших соседей, т.е. соблюдается так называемый ближний порядок.

С понижением температуры и при охлаждении жидкости подвижность атомов падает, и вблизи температуры плавления образуются группировки атомов, в которых атомы упакованы так, как в кристаллах. Эти группировки могут стать центрами кристаллизации или зародышами, из которых при охлаждении ниже температуры плавления-затвердевания формируется кристаллическая решетка, и металл переходит в твердое состояние.

Переход металла из жидкого состояния в твердое с образованием кристаллической структуры называется первичной кристаллизацией.

Рассмотрим термодинамические условия этого процесса.

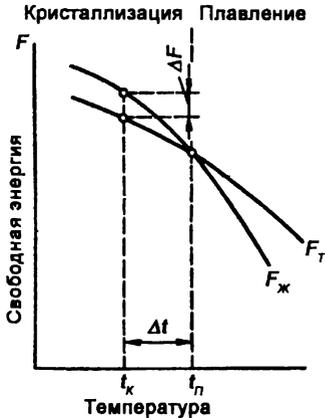


Рисунок 9 – Изменение свободной энергии в жидком ($F_{ж}$) и твердом ($F_{т}$) состояниях в зависимости от температуры

Процесс кристаллизации обусловлен стремлением любой системы к термодинамически более устойчивому состоянию с меньшей энергией Гиббса (свободной энергией F). При снижении температуры (рис. 9) энергия Гиббса повышается и для твердого, и для жидкого состояния, но темпы ее повышения различны. При температуре плавления-затвердевания кривые изменения свободной энергии Гиббса для твердого и жидкого состояний пересекаются, т.е. равновероятно существование как твердой, так и жидкой фазы. Выше температуры плавления устойчиво жидкое состояние металла, имеющего меньшее значение свободной энергии Гиббса, а ниже этой температуры устойчив твердый металл.

Чтобы началась устойчивая кристаллизация жидкого металла, его нужно охладить до температуры t_k , меньшей температуры t_p на величину Δt . Величина Δt получила название "степень переохлаждения". Только при наличии переохлаждения и возникновении разности в уровне свободной энергии Гиббса у жидкой и твердой фаз возникает движущая сила процесса кристаллизации. Чем больше степень переохлаждения, тем больше разность свободной энергии Гиббса жидкого и твердого состояния, тем энергичнее идет кристаллизация.

Степень переохлаждения, достаточная для начала кристаллизации, зависит от природы, чистоты и скорости охлаждения металла, обычно она составляет 10...30°C. Чем чище жидкий металл, тем больше он склонен к переохлаждению.

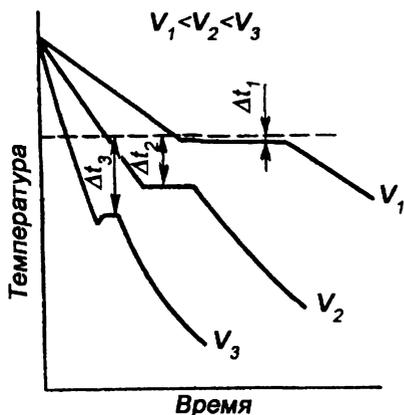


Рисунок 10 – Термические кривые (кривые охлаждения) металла

На рисунке 10 приведены термические кривые (кривые охлаждения) металла, кристаллизующегося с различными скоростями охлаждения. Горизонтальные площадки на кривых охлаждения объясняются выделением скрытой теплоты плавления при кристаллизации. С ростом скорости охлаждения (v) растет степень переохлаждения металла, достаточная для развития кристаллизации, и падает реальная температура кристаллизации.

3.2. Механизм процесса кристаллизации

3.2.1. Общие закономерности и разновидности процессов кристаллизации

Кристаллизация металлов – одна из разновидностей фазовых превращений. Она подчиняется общим закономерностям кинетики фазовых превращений и предполагает наличие двух элементарных процессов: зарождение центров (зародышей) новой фазы внутри старой и рост этих центров (зародышей).

На наличие такой закономерности при кристаллизации металлов впервые указал известный русский металлург Д.К. Чернов.

Кристаллы могут зарождаться самопроизвольно из гомогенной (однородной) жидкости. Такой тип кристаллизации получил название самопроизвольной. В гетерогенных (неоднородных) жидкостях зародышами твердой фазы часто служат тугоплавкие частицы, оксиды, интерметаллические соединения, находящиеся к моменту кристаллизации в жидком металле в виде твердых включений. В этом случае кристаллизацию называют не самопроизвольной.

3.2.2. Самопроизвольная кристаллизация. Образование центров кристаллизации

При охлаждении кристаллизующегося металла, при температурах близких, но несколько выше температуры плавления, образуются небольшие участки с расположением атомов, как в твердом кристалле. Вследствие интенсивного теплового движения такие образования динамически неустойчивы. Просуществовав некоторое время, они рассасываются, затем возникают вновь в другом элементарном объеме жидкости и т.д. Число их по мере охлаждения увеличивается. При температуре, рав-

ной температуре плавления, число возникающих участков с правильным расположением атомов равно числу рассасывающихся, т.е. наблюдается динамическое равновесие между твердой и жидкой фазой. При температурах ниже температуры плавления, т.е. при переохлаждении жидкого металла, часть микрообъемов с правильным расположением атомов, достигшая некоторых критических размеров, может получить способность к устойчивому росту, т.е. стать центрами кристаллизации (зародышами).

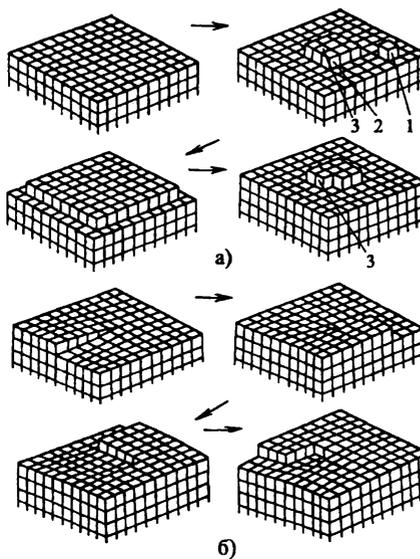
Рассмотрим условия, при которых возможен устойчивый рост зародыша. Термодинамически таким условием является снижение свободной энергии Гиббса при росте зародыша. При образовании элементарного зародыша объемом V свободная энергия Гиббса, с одной стороны, уменьшается, с другой – увеличивается вследствие появления поверхности раздела между жидкостью и зародышем.

Минимальный размер зародыша, способного к росту при данных температурных условиях, называется критическим размером зародыша, а сам зародыш – критическим или равновесным.

С увеличением степени переохлаждения размер критического зародыша уменьшается.

3.2.3. Рост центров кристаллизации (зародышей)

Рост трехмерного зародыша происходит в результате перехода атомов из переохлажденного расплава к кристаллам. При этом возможны два механизма роста (рис. 11):



а – при образовании двухмерного зародыша;

б – вокруг винтовой дислокации

Рисунок 11 – Схема роста кристалла

1) присоединение атомов переохлажденной жидкости на гладкую поверхность трёхмерного изолированного зародыша – положение 1;

2) присоединение атомов из переохлажденной жидкости путем оседания их на плоские грани двухмерных зародышей – положение 2.

Атом, поступивший в положение 2, имеет связи и закрепляется на растущем зародыше более надежно, чем атом, поступивший в положение 1 и имеющий только одну связь.

Рост кристалла обеспечивается, если растущая грань зародыша не является идеально гладкой, а имеет ступеньки в виде двухмерного образования (см. рис. 11 а).

В реальных кристаллах, имеющих дефекты, роль двухмерного образования, к которому присоединяются атомы из переохлажденной жидкости, выполняют выходы на поверхность растущей грани - ступеньки винтовой дислокации (см. рис. 11 б). В этом случае наблюдается характерный спиралевидный рост кристаллов.

3.2.4. Соотношение скоростей образования и роста зародышей. Величина зерна

Процессы возникновения и роста зародышей в кристаллизующемся металле протекают параллельно. Поэтому увеличение общей массы затвердевшего металла происходит как за счет возникновения новых центров, так и за счет роста существующих. Пока образовавшиеся зародыши растут свободно, они могут иметь относительно правильную геометрическую форму. При сращивании правильность очертаний кристаллов нарушается. Полностью затвердевший металл представляет собой совокупность образований неправильной формы, получивших название кристаллов или зерен.

Общая скорость кристаллизации зависит от хода указанных выше двух элементарных процессов. Она определяется скоростью зарождения центров кристаллизации (Ч.Ц. - числа центров кристаллизации, возникших в единичном объеме за единицу времени) и скоростью роста кристаллов (С.Р.) из этих центров (приращения длины кристаллов в единицу времени). Величины Ч.Ц. и С.Р. зависят от степени переохлаждения (рис. 12) и имеют вид кривых с максимумом.

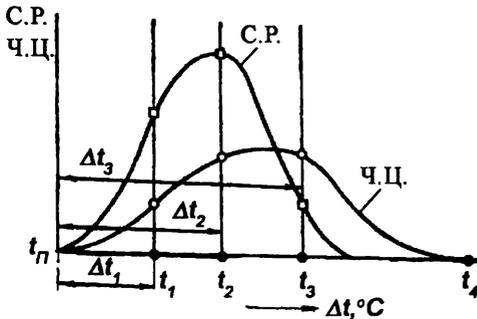


Рисунок 12 – Зависимость числа центров кристаллизации и скорости роста кристаллов от степени переохлаждения

При температуре плавления, когда переохлаждение $\Delta t=0$, и число зародышей, и скорость их роста равны нулю. С увеличением переохлаждения растет разность свободных энергий Гиббса, и при хорошей подвижности атомов растут и достигают максимума Ч.Ц. и С.Р. Последующее уменьшение Ч.Ц. и С.Р. объясняется снижением подвижности атомов при падении температуры. Уменьшение коэффициента диффузии при больших Δt затрудняет перестройку атомов жидкости в кристаллическую решетку твердого тела. При очень больших переохлаждениях Ч.Ц. и С.Р. равны нулю и жидкость не кристаллизуется, а затвердевает как аморфное тело. Технически аморфную структуру для некоторых металлов можно получить, выливая струю металла на вращающийся металлический барабан, охлаждаемый внутри жидким газом азотом, инертными газами.

При кристаллизации металлов в условиях сварки и литья, как правило, реализуются только восходящие ветви кривых зависимости Ч.Ц. и С.Р. от степени переохлаждения. От соотношения скоростей зарождения и развития центров зависит размер зерен. При малых переохлаждениях скорость роста велика, а скорость зарожде-

ния мала. В этом случае образуется сравнительно небольшое количество крупных кристаллов. При увеличении Δt скорость зарождения возрастает быстрее, чем скорость их роста, и размер зерна в затвердевшем металле уменьшается. На размер зерна влияют также температура нагрева и разливки жидкого металла, его химический состав, присутствие в нем посторонних примесей.

3.2.5. Несамостоятельная кристаллизация. Модифицирование

В реальных условиях самостоятельное зарождение центров кристаллизации в жидком металле затруднено. Чаще источником образования зародышей являются твердые частицы: интерметаллиды, неметаллические включения, оксиды, продукты раскисления. Если примеси имеют кристаллическую решетку, близкую по строению к затвердевающему металлу (так называемые изоморфные примеси), то они играют роль готовых центров кристаллизации. Чем больше примесей, тем больше центров кристаллизации, тем мельче зерно. Часто в металл специально вводят вещества, которые при кристаллизации способствуют измельчению зерна. Такая операция называется модифицированием, а вводимые примеси – модификаторами. Описанный выше механизм присущ модификаторам первой группы (1^{го} рода). Существует и другой механизм модифицирования, когда в расплав вводятся поверхностно-активные вещества. Располагаясь на гранях растущего кристалла, эти вещества уменьшают поверхностное натяжение и уменьшают величину критического зародыша, что увеличивает их число. Это модификаторы второй группы (2^{го} рода).

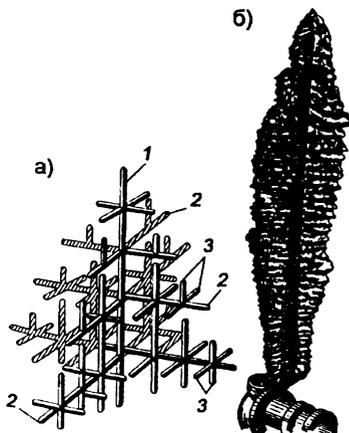
Модификаторы, вводимые в количестве десятых, сотых и тысячных долей процента, практически не меняют химического состава сплава, но влияют на схему кристаллизации, измельчают зерна и уменьшают механические свойства.

Модификаторами в сталях являются Al, Ti, V, PЗЭ (редкоземельные элементы), в чугунах – Mg, в алюминиевых сплавах – Ti, Zr, V.

3.3. Форма кристаллов. Строение металлического слитка

Сталь разливают в изложницы, получая слитки весом до нескольких десятков тонн. И непрерывным способом, используя кристаллизаторы, получают непрерывный слиток. Ниже рассматривается кристаллизация стали в слитках.

Форма кристаллов, образующихся при затвердевании металлов, зависит от условий охлаждения (скорости охлаждения), характера и количества примесей. Кристаллы могут быть равноосными, пластинчатыми, игольчатыми, сферическими и т.д., но наиболее распространены разветвленные древовидные кристаллы – дендриты.

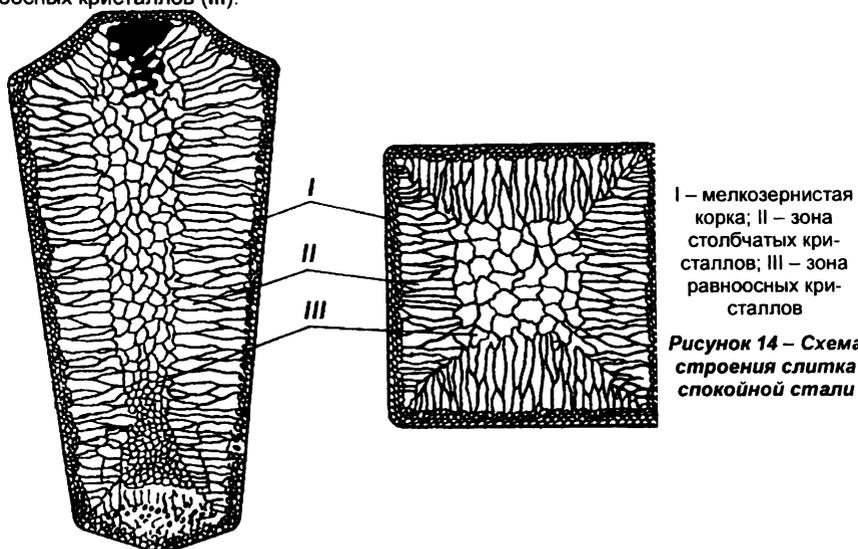


- 1 – главная ось; 2 – ось второго порядка;
3 – ось третьего порядка

Рисунок 13 – Схема образования дендрита (а) и дендрит Чернова (б)

Первоначально образуются длинные ветви – оси первого порядка (главные оси дендритов – 1) (рис. 13 а). Они растут перпендикулярно плоскостям кристалла с максимальной плотностью упаковки. Одновременно с удлинением осей первого порядка на их ребрах происходит зарождение и рост перпендикулярных к ним таких же ветвей второго порядка (2). В свою очередь на осях второго порядка зарождаются и растут оси третьего порядка (3). В конечном счете образуются кристаллы в форме дендритов (рис. 13 б). Правильная форма дендритов искажается в результате столкновения и срастания их на поздних стадиях кристаллизации. Кристаллизация сплавов носит избирательный характер. В первую очередь на осях 2^{ого} и 3^{его} порядка затвердевает более чистый металл, а границы зерен и промежутки между главными ветвями оказываются более обогащенными примесями. Неоднородность химического состава в пределах дендрита называется дендритной ликвацией. В сталях в большей степени ликвации подвержены углерод, сера и фосфор.

При кристаллизации крупных промышленных слитков на форму кристаллов наиболее сильно влияют скорость и направление теплоотвода. Схема строения слитка спокойной стали приведена на рисунке 14. Структура слитка состоит из трех зон: наружной мелкозернистой зоны (I), зоны столбчатых кристаллов (II) и зоны равноосных кристаллов (III).



I – мелкозернистая корка; II – зона столбчатых кристаллов; III – зона равноосных кристаллов

Рисунок 14 – Схема строения слитка спокойной стали

Наружная мелкозернистая корковая зона состоит из неориентированных в пространстве мелких кристаллов. Ее образование обусловлено резким перепадом температур: жидкий металл – холодные стенки изложницы. Металл в этой зоне сильно переохлаждается, в нем образуется большое число центров кристаллизации, и он приобретает мелкозернистое строение.

После образования корковой зоны условия теплоотвода меняются. В зоне II температурный градиент в жидком металле падает и снижается степень его переохлаждения. Число центров кристаллизации уменьшается, и от них в направлении, обратном отводу тепла, т.е. перпендикулярно стенке изложницы, растут столбчатые кристаллы (зона II). В зоне III (центральной области слитка) направление преимущественного теплоотвода становится менее выраженным. Там скапливается больше

примесей, поэтому в центре слитка растут преимущественно равноосные кристаллы. Вследствие различия удельных объемов твердого и жидкого металла и избирательного характера кристаллизации сплава в верхней части слитка образуется усадочная раковина (рыхлость) и концентрируются примеси. Такое неравномерное распределение примесей по разным зонам слитка называется зональной ликвацией, которую удаляют в отходы. Отходы могут составлять 5-10% массы слитка.

Кристаллизация слитка, при которой подавляется образование равновесных кристаллов зоны III и стыкуются зоны столбчатых кристаллов, называется **транс-кристаллизацией**. Транскристаллизация стали нежелательна, так как на стыке столбчатых кристаллов образуется плоскость слабости. Для цветных металлов, пластичность которых выше, транскристаллизация полезна.

Необходимо отметить, что кроме зональной ликвации существует неравномерное распределение углерода, кислорода, серы и других элементов по слитку. Неравномерное распределение углерода по слитку может составлять 60-100%, серы 100-300% от нормируемого значения. Устраняют данные ликвации различными методами, связанными чаще всего с несколькими переплавами.

3.4. Вторичная кристаллизация

Выше отмечалась способность некоторых веществ перестраивать свою кристаллическую решетку при изменении температуры, т.е. претерпевать полиморфные превращения. Процесс образования новых кристаллов в твердом кристаллическом веществе получил название вторичной кристаллизации в отличие от первичной, когда новые кристаллы образуются из жидкого вещества.

Для вторичной кристаллизации характерны те же закономерности, что и для первичной: кристаллизация идет путем зарождения и роста центров новой фазы, а течение этих процессов и размеры образовавшихся кристаллов зависят от степени переохлаждения. Однако вторичная кристаллизация имеет свои особенности, связанные с тем, что новая фаза появляется в среде с высокой упругостью и имеет другой удельный объем:

1. Превращение сопровождается изменением объема и возникновением внутренних напряжений, иногда таких значительных, что происходит разрушение (образование трещин).

2. Механизм роста новой фазы может быть не только нормальным (диффузионным), но и мартенситным (бездиффузионным).

3. В случае больших переохлаждений для роста новой фазы должен соблюдаться принцип структурного и размерного соответствия между кристаллами старой и новой фазы.

Нормальный (диффузионный) механизм роста имеет место в случае образования новой фазы при достаточно высокой температуре и в условиях малых скоростей охлаждения. При этом степень переохлаждения незначительна, новая фаза образуется в пластичном матричном сплаве с малой упругостью и высокой подвижностью атомов. Места появления новой фазы - границы зерен и блоков исходной модификации. Новая фаза растет путем диффузионного перехода атомов от матричной к новой фазе.

Мартенситный (бездиффузионный) механизм роста наблюдается в условиях низких температур или больших переохлаждений. Из-за низкой диффузионной подвижности атомов и большой упругости матрицы рост новой фазы происходит путём кооперативного направленного смещения атомов на расстояния, меньше межатомных.

Перестройка решетки происходит по тем кристаллографическим плоскостям и направлениям исходной фазы, которые имеют одинаковое строение и близкие параметры с определенными плоскостями новой фазы, т.е. соблюдается принцип структурного и размерного соответствия.

Мартенситный механизм превращения возможен, если границы раздела между старой и новой фазой полностью или частично когерентны. На когерентной границе плоскости (границы) соприкасающихся решеток разных фаз имеют одинаковое строение при незначительном отличии межатомных размеров. Поэтому достаточно небольших направленных перемещений атомов (на расстояния меньше межатомных), чтобы произошла последовательная перестройка одной решетки в другую и получил развитие рост новой фазы.

При некогерентной границе для роста кристалла новой фазы требуются смещения атомов на расстояния больше межатомных. Для них мартенситный рост невозможен.

При мартенситном превращении новая фаза растет с очень большой скоростью ($\approx 10^3$ м/с). В зависимости от анизотропии упругих свойств обеих фаз, новая фаза может иметь пластинчатую или игольчатую форму.

В процессе роста новой фазы из-за объемного эффекта превращения возникают упругие напряжения, которые по мере роста новой фазы увеличиваются и достигают предела упругости. После этого происходит пластическая деформация, нарушающая сопряженность решеток и приводящая к образованию некогерентной границы. Превращение мартенситного типа в этом участке прекращается.

Большие внутренние напряжения вызывают накопление дефектов в новой мартенситной фазе (дислокаций, вакансий, блочности). Такое изменение в структуре вызывает повышение прочности новой фазы, называемое фазовым наклёпом. Результатом фазового наклёпа являются повышенная твёрдость, прочность и меньшая пластичность мартенситных структур по сравнению с равновесными, образовавшимися по нормальному (диффузионному) механизму.

4. ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫЕ СПЛАВЫ

4.1. Общие сведения о диаграммах состояния

Диаграмма состояния - это графическое изображение фазового состояния всех сплавов данной системы в зависимости от температуры и концентрации компонентов. Обычно они строятся для равновесных условий и могут характеризовать процессы, происходящие в сплавах при малых скоростях нагрева и охлаждения.

Диаграммы состояния позволяют научно обоснованно выбирать сплавы с заданными свойствами, а также режимы термической обработки, литья, сварки, обработки давлением.

Диаграмму состояния строят обычно экспериментально. Для ее построения используют термический метод, с помощью которого получают кривые затвердевания и охлаждения сплавов. По остановкам и перегибам на этих кривых, обусловленных тепловыми эффектами превращений, определяют температуру превращений.

Точки перегиба или остановки кривых охлаждения называют **критическими точками**. Геометрическое место точек, образующих линию начала затвердевания, называют **линией ликвидус** (лат. – жидкий), линию конца затвердевания – **линией солидус** (лат. – твердый).

По горизонтали диаграмм состояния откладывается концентрация, по вертикали – температура. Каждая точка диаграммы соответствует сплаву определенного состава, находящемуся при определенной температуре в условиях равновесия. Обычно строятся диаграммы состояния двойных сплавов, реже – тройных.

С помощью диаграмм состояния определяют температуру плавления и полиморфных превращений в сплавах, а также количество и природу фаз в сплаве данного состава при данной температуре, количественное соотношение этих фаз в сплаве.

4.2. Понятие о правилах фаз и отрезков

При анализе диаграмм состояния возникает вопрос о числе степеней свободы, т.е. числе внешних и внутренних факторов (температуре, давлении, концентрации), которые могут изменяться без изменения числа фаз в системе.

Количественная зависимость между числом степеней свободы системы, находящейся в равновесном состоянии, и числом компонентов и фаз принято называть **правилом фаз**. **Правило фаз** для металлических систем выражается уравнением

$$C = K - \Phi + m,$$

где C – число степеней свободы системы;

K – число компонентов;

Φ – число фаз;

m – число внешних факторов (температура, давление).

Если принять, что все превращения происходят при постоянном давлении, это уравнение примет следующий вид:

$$C = K - \Phi + 1,$$

где 1 – внешний переменный фактор (температура).

Пользуясь правилом фаз, рассмотрим, как происходит изменение числа степеней свободы однокомпонентной системы для случая расплавленного чистого металла ($K=1$, $\Phi=1$): $C=1-1+1=1$, т.е. температуру можно менять, не изменяя числа фаз. Такое состояние системы называют **моновариантным** (одновариантным). В процессе кристаллизации число фаз равно 2 (жидкая и твердая фазы), а $K=1$, тогда $C=1-2+1=0$. Это значит, что две фазы находятся в равновесии, при строго определенной температуре (температуре плавления), и она не может быть изменена, пока одна из фаз не исчезнет (закристаллизуется или расплавится). Такое состояние системы называется **нонвариантным** (безвариантным). На кривой охлаждения наблюдается горизонтальная площадка.

Для двухкомпонентной системы, находящейся в жидком состоянии ($K=2$, $\Phi=1$), правило фаз имеет вид $C=2-1+1=2$. Такая система называется бивариантной (двухвариантной). В данном случае возможно изменение двух факторов равновесия (температуры и концентрации), при этом число фаз не меняется. Для этой же системы, если начинается процесс кристаллизации, существуют две фазы (жидкая и твердая) $K=2$, $\Phi=2$. Согласно правилу фаз $C=2-2+1=1$, т.е. с изменением температуры концентрация должна быть строго определенной. На кривой охлаждения начало кристаллизации отмечается характерным переломом.

При анализе строения и свойств сплавов важным является состав фаз и их количественное соотношение. Их можно определять с помощью **правила отрезков**.

Правило отрезков может использоваться не только для изучения процесса кристаллизации сплавов, но и для исследования процессов, происходящих в твердом состоянии. Оно применимо ко всем двухфазным сплавам независимо от их агрегатного состояния. При охлаждении состав жидкой фазы, в соответствии с правилом отрезков, меняется по линии ликвидус, а твердой фазы – по линии солидус.

4.3. Диаграмма состояния железо-углерод (цементит)

Диаграмма состояния включает все сплавы (сталь, чугун), имеющие практическое применение. Практически максимальное содержание углерода в сплавах с железом равно 6,67%. Это значение соответствует содержанию углерода в карбиде железа Fe_3C .

На диаграмме нанесены сплошные и пунктирные линии. Это связано с тем, что углерод в сплавах может находиться в элементарном виде (графит) и в виде химического соединения (цементит).

Таким образом, диаграмма состояния системы железо-углерод может иметь два варианта:

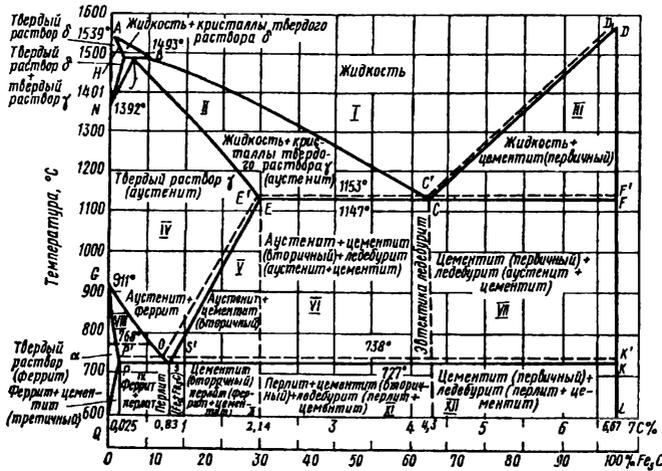
- 1) система железо-цементит (метастабильная);
- 2) система железо-графит (стабильная).

Рассмотрим диаграмму состояния системы железо-цементит (сплошные линии).

4.3.1. Верхняя часть диаграммы железо-цементит

Точка А на диаграмме показывает температуру плавления чистого железа, а точка D показывает температуру плавления цементита. Процесс кристаллизации расплава начинается по линии ABCD (линия ликвидуса). Выше линии ликвидуса (область I) сплав находится в жидком состоянии и представляет собой однородную систему.

Линия ANJECF является линией солидуса. Сплавы, лежащие ниже этой линии, находятся в твердом состоянии. При температурах между линиями ликвидуса и солидуса происходит кристаллизация сплавов. В период кристаллизации одновременно существуют две фазы – жидкий сплав и кристаллы твердых растворов. Рассматривая линию ABCD, можно отметить, что с увеличением содержания углерода в железе до 4,3% температура плавления сплава понижается, а с дальнейшим повышением содержания углерода (участок CD) температура плавления сплава увеличивается. На участке линии ликвидуса АВ выделяются кристаллы δ -раствора, состав которых определяется линией AN. Состав жидкой фазы изменяется по линии АВ. Предельную растворимость углерода (0,1%) в Fe_δ при температуре 1493°C показывает точка Н. На линии HJB при температуре 1493°C жидкость, содержащая 0,5% С (точка В), реагирует с ранее выпавшими кристаллами δ -раствора и образуют кристаллы нового вида. Реакцию подобного типа называют перитектической. В результате этой реакции образуются кристаллы аустенита, содержащего 0,18%С (точка J).



Точка на диаграмме	Температура, °С	Содержание углерода, %	Примечание
A	1539	0	Температура плавления железа
B	1493	0,50	Состав жидкой фазы при перитектической* реакции
J	1493	0,18	Состав аустениета при перитектической реакции
H	1493	0,10	Состав феррита при перитектической реакции
N	1392	0	Полиморфное превращение $Fe_\delta \rightarrow Fe_\alpha$
C	1147	4,30	Состав эвтектики (ледебурит)
D	1600	6,67	Температура плавления цементита
E	1147	2,14	Предельная растворимость углерода в Fe,
G	911	0	Полиморфное превращение $Fe_\gamma \rightarrow Fe_\alpha$
S	727	0,83	Состав эвтектоида (перлит)
P	727	0,025	Предельная растворимость углерода в Fe _α
K	727	6,67	Состав цементита
Q	20	0,01	Минимальная растворимость углерода в железе

Рисунок 15 – Диаграмма состояния железоуглеродистых сплавов

По линии BC при понижении температуры из расплава выпадают кристаллы аустенита переменного состава, в которых содержание углерода от 0,5 до 4,3% меньше, чем в жидкой фазе, из которой они выделяются. Изменение состава жидкой фазы с понижением температуры происходит по линии BC, а выпавших кристаллов – по линии JE (линия солидуса). Если сплавы содержат до 2,14% C, то их кристаллизация заканчивается при температуре выше 1147°C. Кристаллизация сплавов, содержащих 2,14...4,3%, заканчивается полностью по линии EC при температуре 1147°C, где жидкая фаза обогащается углеродом до 4,3%. Одновременно из расплава выпадают кристаллы аустенита, содержащие 2,14% C (точка E), и цементита, содержащего 6,67% C (точка F). Механическая смесь кристаллов цементита и аустенита образует ледебурит (точка C).

Сплавы, лежащие правее точки C, т.е. содержащие от 4,3 до 6,67% C, кристаллизуются по линии CD. В начале кристаллизации из расплава выделяется первичный цементит. По мере выпадения из жидкого расплава первичного цементита содержание углерода в жидкой фазе уменьшается. При температуре 1147°C (линия CF) оставшийся расплав содержит 4,3% C и затвердевает с образованием ледебурита (эвтектики). В результате окончательно затвердевший сплав (ниже линии CF) состоит из первичного цементита и ледебурита.

Сплавы, находящиеся влево от точки С (содержащие до 4,3% С), называют доэвтектическими, а сплавы, находящиеся вправо от точки С (содержащие более 4,3% С) – заэвтектическими. Между линиями ликвидуса ABCD и солидуса ANJECF (области II и III) железоуглеродистые сплавы состоят из жидкой и твердой фаз, причем с понижением температуры количество твердой фазы увеличивается.

Таким образом, непосредственно после окончания затвердевания структура доэвтектических сплавов состоит из аустенита и ледебурита, структура эвтектического сплава – из ледебурита и структура заэвтектических сплавов – из первичного цементита и ледебурита.

4.3.2. Нижняя часть диаграммы системы железо-цементит

Ниже линии солидуса ANJECF в затвердевших сплавах при понижении температуры наблюдаются дальнейшие изменения их структуры, связанные с перекристаллизацией в твердом состоянии. Такие изменения называют вторичной кристаллизацией. С понижением температуры железо переходит из одной модификации в другую ($Fe_{\gamma} \rightarrow Fe_{\alpha}$) и растворимость углерода в железе заметно уменьшается.

Дозэвтектические сплавы (до 2,14% С) в области IV состоят из одного аустенита. При охлаждении сплавов, содержащих менее 0,8% С (левее точки S), ниже линии GOS происходит распад аустенита с выделением из него избыточного феррита. Так как феррит, выделяющийся при охлаждении аустенита по линии GOS, содержит не более 0,025% С, (предельная растворимость углерода в Fe_{α} , точка P), аустенит несколько обогащается углеродом, изменяя состав по линии SE. Кристаллы феррита изменяют свой состав по линии GOS. Такой процесс протекает до температуры 727°C. В этой точке при 0,8 %С аустенит распадается на твердую однородную смесь кристаллов феррита и цементита – перлит. Пользуясь правилом отрезков по диаграмме состояния (см. рис. 15), можно определить соотношение феррита и цементита в перлите при 727°C

$$Q_{\phi}/Q_{\psi} = SK/PS = (6,67 - 0,8)/0,8 \approx 7,$$

где Q – количество вещества.

Сплавы с содержанием 0,83% С называются эвтектоидными, менее 0,83% – доэвтектоидными и более 0,83% С – заэвтектоидными. При охлаждении сплавов, лежащих правее точки S и содержащих более 0,83% С, ниже линии SE происходит распад аустенита с выделением из него вторичного цементита. Так как выделяющийся вторичный цементит содержит 6,67% С, концентрация углерода в остающемся аустените изменяется по линии SE до состава точки S (0,8% С) при 727°C.

Таким образом, доэвтектоидные сплавы в области VIII состоят из аустенита и феррита, а в области IX – из феррита и перлита. Заэвтектоидные сплавы (0,83...2,14% С) в области V состоят из аустенита и вторичного цементита, а в области X – из вторичного цементита и перлита.

Сплавы, содержащие от 2,14 до 4,3% С, выше линии PSK, но ниже линии ECF (область VI) состоят из аустенита, вторичного цементита и ледебурита.

По линии PSK и ниже в этих же сплавах (область XI) происходит превращение аустенита в перлит; структура сплава состоит из перлита, вторичного цементита и ледебурита. Сплавы, соответствующие эвтектической точке С, ниже линии PSK имеют структуру одного ледебурита.

Сплавы, содержащие 4,3...6,67% С, ниже линии CF, по выше линии PSK (область VII) состоят из первичного цементита и ледебурита; ниже линии PSK (область XII) сплавы сохраняют эту структуру.

В нижней левой части диаграммы линия PQ показывает уменьшение растворимости углерода в α -железе (феррите) с понижением температуры. По линии PQ выделяется третичный цементит. Следовательно, сплавы между точками P и Q состоят из феррита и третичного цементита.

Сплавы, находящиеся внутри области QPG, состоят только из феррита.

4.4. Влияние углерода и постоянных примесей на структуру и свойства сталей

Сталь – это многокомпонентный сплав, содержащий, кроме углерода, ряд постоянных примесей Mn, Si, S, P, O, H, N и др., которые влияют на его свойства.

4.4.1. Влияние углерода

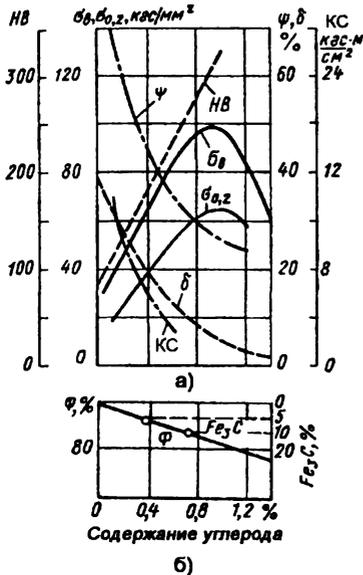


Рисунок 16 – Влияние углерода на механические свойства (а) и количество феррита и цементита в стали (б)

Структура стали после медленного охлаждения состоит из феррита и цементита. Количество цементита в стали возрастает с ростом содержания углерода (рис. 16 б). Феррит имеет низкую прочность, но сравнительно пластичен. Цементит характеризуется высокой твердостью, но хрупок. Поэтому с ростом содержания углерода в стали возрастает ее твердость, прочность (сопротивление разрыву, предел текучести), а уменьшается пластичность и вязкость (относительное удлинение, относительное поперечное сужение, ударная вязкость) (рис. 16 а).

Рост прочности стали происходит при содержании углерода до 0,8...1,0%. При увеличении содержания углерода более 0,8% уменьшается не только пластичность, но и прочность. Это связано с образованием сетки хрупкого вторичного цементита вокруг перлитных зерен, легко разрушающейся при нагружении.

Углерод оказывает существенное влияние на технологические свойства стали: свариваемость, обрабатываемость давлением и резанием. С увеличением содержания углерода ухудшается свариваемость, а также способность стали деформироваться в горячем и холодном состоянии.

4.4.2. Влияние кремния и марганца

Содержание марганца и кремния в углеродистой стали в качестве примеси обычно не превышает 0,5...0,8% и 0,35...0,4% соответственно. Они переходят в сталь в процессе раскисления при выплавке. Кремний, растворяясь в феррите, резко упрочняет его, но одновременно снижает пластичность. Марганец повышает прочность феррита, практически не понижая его пластичности, но резко уменьшает краснотемперную хрупкость стали, т. е. хрупкость при высоких температурах, связанную с отрицательным влиянием серы.

4.4.3. Влияние серы и фосфора

Сера и фосфор являются вредными примесями в стали. Основные источники их – руды, из которых выплавляется исходное сырье для стали — чугун. Сера с железом образует сульфид FeS, который образует легкоплавкую эвтектику (Fe+FeS) с температурой плавления 988°C. При кристаллизации эта эвтектика располагается в виде сетки по границам зерен. При нагревании стали до температуры прокатки иликовки (1000...1200°C) эвтектика расплавляется, что приводит к нарушению связи между зернами и возникновению надрывов и трещин при деформации. Это явление называется красноломкостью стали. Присутствие в стали марганца, обладающего большим сродством к сере, чем железо, и образующего с серой тугоплавкое ($t_{пл}=1620^{\circ}\text{C}$) соединение MnS, практически исключает явление красноломкости.

Сера уменьшает работу развития трещины (КСТ), снижает предел выносливости, пластичность, свариваемость и коррозионную стойкость. Поэтому содержание серы в стали строго регламентируется и ограничивается до 0,035...0,06%.

Фосфор при малых количествах растворяется в железе и образует твердый раствор. При повышенном его содержании (более 1,0...1,2%) образуется фосфид Fe₃P. Растворяясь в феррите, фосфор сильно искажает кристаллическую решетку, что увеличивает временное сопротивление разрыву и предел текучести (прочность), но сильно уменьшает пластичность и вязкость. Снижение вязкости, обусловленное присутствием фосфора, тем значительнее, чем больше в стали углерода. Фосфор повышает порог хладноломкости и уменьшает работу развития трещины. В зависимости от качества стали в ней допускается от 0,025 до 0,08% P.

4.4.4. Влияние азота, кислорода и водорода

Азот, кислород и водород могут присутствовать в стали в газообразном состоянии (в раковинах, микротрещинах, порах и других дефектных участках металла), в виде твердых растворов внедрения, в виде хрупких неметаллических включений FeO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂N и др.

Неметаллические включения, располагаясь в основном по границам зерен, повышают порог хладноломкости, понижают сопротивление хрупкому разрушению и предел выносливости стали.

Очень опасен растворенный в стали водород, который поглощается при выплавке или сварке. Имея очень маленький атомный радиус, он способен диффундировать в стали даже при комнатных температурах и накапливаться в микрообъемах внутри металла. Это создает большие давления и приводит к образованию в стали внутренних трещин – флокенов, резко ухудшающих ее механические свойства.

Растворимость N, H, O и C в α -железе очень мала и понижается с понижением температуры. В условиях неравновесного (ускоренного) охлаждения, характерного для процессовковки, прокатки, сварки, образуются пересыщенные твердые растворы указанных выше элементов в α -железе. Постепенное выделение элементов из пересыщенных растворов при нормальной или повышенной температуре называется старением. Старение приводит к снижению ударной вязкости и повышению порога хладноломкости. Охрупчивание стали возможно и после холодной пластической деформации (если она приводится ниже температуры рекристаллизации). Сущность процесса охрупчивания, называемого **деформационным старением**, следующая.

Растворенные в α -железе азот и углерод концентрируются в зоне растягивающих напряжений, образованных дислокациями в виде своеобразных "облаков" (называемых облаками Котрелла). При пластической деформации число дислокаций и их подвижность резко увеличиваются. Двигающиеся дислокации и транспортируемые с ними "облака" с повышенной концентрацией C и N накапливаются у барьеров (например, границ зерен). Это создает значительное пересыщение азотом и углеродом в местах скопления дислокаций. Постепенное выделение углерода и азота из пересыщенных твердых растворов в виде нитридов и карбидов вызывает охрупчивание стали.

5. ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

5.1. Основы теории термической обработки

5.1.1. Общие сведения

Термической обработкой (ТО) называют процессы теплового воздействия на металлы, находящиеся в твёрдом состоянии, с целью изменения их структуры и свойств в заданном направлении без изменения химического состава. ТО – самый распространенный в современной технике и самый действенный способ изменения свойств металлов и сплавов, в то же время это самый древний способ. ТО применяют и как промежуточную операцию для улучшения технологических свойств (обрабатываемости давлением, резанием, свариваемости), и как окончательную для придания требуемых эксплуатационных свойств (твёрдости, износостойкости, коррозионной стойкости и т.д.). Обычно чем ответственнее конструкция, тем больше в ней термически обрабатываемых деталей.

Теория термической обработки – это учение об изменениях структуры и свойств, не исчезающих после прекращения теплового воздействия на материал.

Любой процесс термической обработки можно охарактеризовать графиком в координатах "температура-время" и описать с помощью параметров, главные из которых – максимальная температура нагрева сплава, время выдержки и скорость охлаждения. Дополнительно могут указываться скорость нагрева, охлаждающая и нагревательная среда и некоторые другие параметры.

5.1.2. Термическая обработка железоуглеродистых сплавов

Нагрев и охлаждение при обработке сталей и чугунов вызывают в них фазовые превращения четырех типов:

1) диффузионное превращение перлита в аустенит при нагреве выше температуры 727°C : $\text{P} \Rightarrow \text{A}$;

2) диффузионное превращение аустенита в перлит при охлаждении ниже температуры 727°C : $\text{A} \Rightarrow \text{P}$;

3) бездиффузионное превращение аустенита в мартенсит при быстром охлаждении ниже температуры начала мартенситного превращения M_s : $\text{A} \Rightarrow \text{M}$;

4) превращение мартенсита при его нагреве в ферритокарбидную смесь: $\text{M} \Rightarrow \text{P}(\text{Ф}+\text{К})$.

Движущей силой этих превращений является изменение свободной энергии аустенита, мартенсита и перлита при изменении температуры.

5.1.3. Превращения при нагреве сталей. Образование аустенита

В соответствии с диаграммой состояния системы железо-углерод равновесные температуры фазовых превращений (критические точки) определяются линиями диаграммы. Чтобы превращение происходило в действительности, температура должна отличаться от равновесной, когда свободные энергии фаз равны. Для протекания превращения перлита в аустенит необходим перегрев выше 727°C . Превращение $\text{P} \Rightarrow \text{A}$ в полном соответствии с диаграммой происходит только при очень медленном нагреве. В обычных условиях превращение "запаздывает" и проходит при более высокой температуре, причем реализуется в диапазоне температур, лежащем тем выше, чем быстрее нагревается сталь. Превращение стали с исходной структурой перлита, перлита+феррита и перлита+цементита вторичного происходит путем образования и последующего роста зародышей аустенитной фазы. Оно подчиняется всем закономерностям, свойственным кристаллизационному процессу: осуществляется за счет диффузии, зародыши аустенита возникают на межфазной поверхности раздела Ф-Ц. Сначала происходит полиморфное превращение железа, а затем в образовавшемся железе растворяется углерод цементита. Последний элементарный процесс

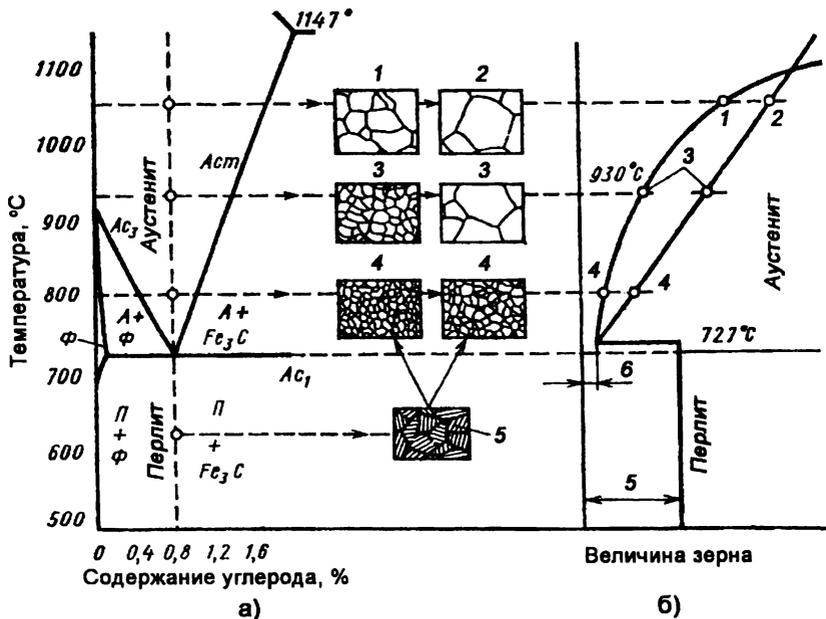
запаздывает по сравнению с полиморфным превращением, поэтому требуется дополнительное время для устранения неоднородности аустенита по химическому составу (гомогенизация аустенита).

В эвтектоидной стали фазовые превращения заканчиваются, когда весь цементит перлита растворится в аустените. В до- и заэвтектоидных сталях после превращения $P \rightarrow A$ еще остаются избыточные фазы – феррит и цементит вторичный соответственно. Для их превращения в аустенит необходим нагрев до температур выше A_{c3} (тогда $F \rightarrow A$) или A_{cm} ($C \rightarrow A$) (см. рис. 17).

Так как в каждом перлитном зерне при нагреве появляется сразу несколько зародышей аустенита, в результате превращения образуются более мелкие зерна. Измельчение зерна в процессе фазовой перекристаллизации при нагреве сталей используется в практике термической обработки. Чем тоньше строение перлита, тем больше межфазовых границ, больше возникает зародышей и короче пути диффузии, следовательно, быстрее протекает аустенизация. В легированных сталях превращение идет медленнее, чем в углеродистых, так как диффузионные процессы замедляются, а карбиды легирующих элементов труднее растворяются в аустените, чем цементит.

Чем выше скорость нагрева, тем мельче полученное аустенитное зерно, поскольку в этом случае скорость образования зародышей превышает скорость их роста.

5.1.4. Рост зерна аустенита при нагреве



- 1 – наследственно мелкозернистая сталь; 2 – наследственно крупнозернистая сталь;
 3 – наследственное зерно; 4 – зерно при нагреве под термическую обработку;
 5 – исходное зерно; 6 – начальное зерно аустенита

Рисунок 17 – Диаграмма состояния железо-углерод (а) и схема роста зерна аустенита в стали, содержащей 0,83% С (б)

Аустенитное зерно, образовавшееся к моменту окончания превращения П→А, называется **начальным**. В этот момент диаметр зерна аустенита δ мал – меньше, чем исходного перлитного зерна (рис. 17). С повышением температуры нагрева и увеличением выдержки диффузия ускоряется, и зерно аустенита быстро растёт. В однофазной аустенитной области рост происходит быстрее, чем в двухфазных областях со структурой "аустенит+цементит вторичный" или "аустенит+феррит", где участки второй фазы тормозят движение границ аустенитных зерен.

Скорость роста аустенитного зерна различна не только у сталей разного химического состава, но даже у сталей одной марки, отличающихся условиями выплавки. По склонности к росту начального аустенитного зерна различают наследственно крупнозернистые и наследственно мелкозернистые стали.

В наследственно крупнозернистой стали зерно сильно растёт даже при незначительном перегреве выше A_{C1} .

В наследственно мелкозернистой стали при нагреве до $1000...1050^{\circ}C$ зерно растёт незначительно, а при дальнейшем увеличении температуры начинается бурный рост зерна.

К наследственно крупнозернистым относятся стали, раскисленные только ферромарганцем (кипящие) или ферромарганцем и ферросилицием. Стали, дополнительно раскисленные алюминием, а также легированные титаном, цирконием, ванадием, хромом, вольфрамом, молибденом, являются наследственно мелкозернистыми. В них рост зерна сдерживается дисперсными частицами, расположенными по границам аустенитных зерен и как бы "зашпиливающими" их. При высоких температурах эти "барьерные" частицы растворяются в аустените, что в условиях интенсивной диффузии вызывает бурный рост зерна.

Фактическая величина аустенитного зерна в стали зависит от ее состава и металлургической предыстории (условий выплавки, предварительной деформации и термической обработки). Поэтому вводится понятие **действительного зерна**, т.е. того размера, которое приобрело аустенитное зерно в результате всех предшествующих операций.

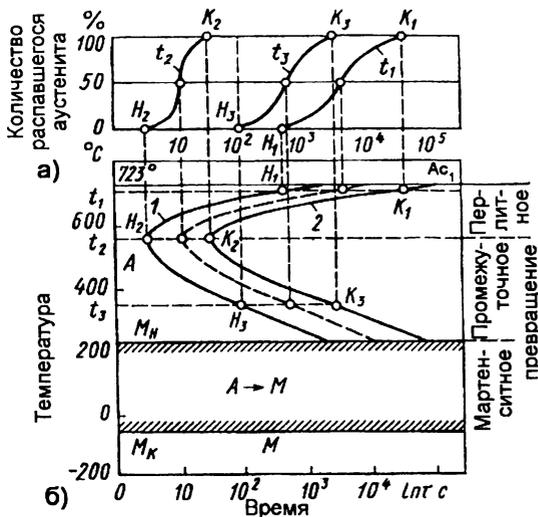
Размер зерна оценивается баллами (номерами): число зерен n , помещающихся на площади 1 мм^2 шлифа, связано с номером (баллом) зерна N . Стали с баллом зерна $1...5$ относят к крупнозернистым, с баллом $6...15$ – к мелкозернистым.

Длительное пребывание стали при высоких температурах приводит к образованию крупнозернистой структуры **перегрева**. В такой стали избыточный феррит или цементит выделяется по границам зерна в виде грубой сетки или длинных пластин (игл), перерезающих перлитные зерна. Структура перегрева является дефектной, так как сталь в таком состоянии резко охрупчивается, особенно при ударном нагружении. Восстановление пластичности стали и исправление структуры перегрева возможно путем повторного отжига II рода (нормализации) при температурах немного выше A_{C3} и A_{Cm} и укороченных выдержках.

Если нагрев проводится до очень высоких температур (подсолидусных) и в окислительной атмосфере, может происходить частичное оплавление границ зерен и их окисление. Такое явление называется **пережогом**. Пережог сопровождается катастрофическим снижением прочности стали. Это – неисправимый дефект; такой сплав является окончательным браком.

5.1.5. Превращения переохлажденного аустенита

В соответствии с диаграммой состояния аустенит железоуглеродистых сплавов не сохраняется до комнатной температуры. При охлаждении ниже температуры $727^{\circ}C$ он претерпевает превращения, которые осуществляются либо в условиях постоянной температуры, т.е. **изотермически**, либо при непрерывном понижении температуры, т.е. **термокинетически** (или **анизотермически**). Описывать эти превращения удобно с помощью диаграмм "время-температура-степень распада аустенита" (рис. 18 а).



а – кинетическая кривая превращения аустенита;
 б – С-образная диаграмма изотермического превращения аустенита

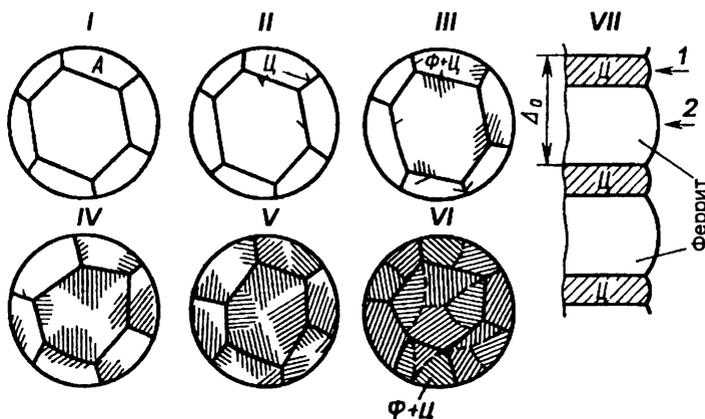
Рисунок 18 – Схема построения диаграммы изотермического превращения переохлажденного аустенита для стали, содержащей 0,83% С

Изотермическое превращение аустенита можно изучить с помощью небольших стальных образцов из эвтектоидной стали (0,83% С), которые нагревают до температуры стабильного существования аустенита. Затем их быстро переносят в соляные ванны, температура которых ниже A_{c1} , и выдерживают до полного распада аустенита. Образец практически мгновенно принимает температуру ванны, при которой и протекает распад. Его можно зафиксировать и оценить в процентах по изменению магнитных свойств, удельного объема, микроструктуры образцов (так как аустенит – это немагнитная фаза, а мартенсит и феррит – ферромагнетики; удельный объем аустенита меньше, чем мартенсита и ферритоцементитных смесей). Построив для каждой температуры кинетические кривые превращения аустенита (рис. 18 а), отмечают на них время начала превращения (до этого момента распад не фиксируется) и время окончания превращения, когда количество продуктов распада аустенита не увеличивается. **Время до начала распада называется инкубационным периодом: оно тем больше, чем устойчивее переохлажденный аустенит.**

Распад аустенита сначала идет интенсивно, а потом замедляется. Время распада меняется в очень широких пределах – от нескольких секунд до часов. Поэтому время на диаграммах изотермического превращения аустенита удобно брать в логарифмическом масштабе, откладывая его по оси абсцисс, а по оси ординат – температуру (в градусах). Проведя горизонтали, параллельные оси абсцисс и соответствующие температурам, отмечают на них характерные точки начала и конца распада. Соединив однотипные по физическому смыслу точки плавными кривыми, получим С-образную диаграмму изотермического распада аустенита (рис. 18 б). На ней выделяются несколько областей. Выше температуры A_{c1} существует устойчивый аустенит, между ординатой, С-образной кривой начала распада и горизонталью **Mn** – переохлажденный аустенит, правее С-образной кривой конца распада – ферритоцементитные смеси. При резком охлаждении аустенита ниже температуры **Mn** аустенит начинает бездиффузионным путем превращаться в мартенсит, и при температурах ниже **Mк** этот процесс заканчивается. Поле между двумя С-образными кривыми – это переходная область, где существуют еще нераспавшийся переохлажденный аустенит и продукты его превращения, а между линиями **Mn** и **Mк** – мартенсит и непревратившийся остаточный аустенит.

Если провести пунктирную линию параллельно A_{c1} через точку минимальной устойчивости аустенита, то в зависимости от степени его переохлаждения можно выделить в зоне продуктов превращения три области: перлитного превращения П (между A_{c1} и пунктирной линией), мартенситного превращения М (ниже Мн) и бейнитного Б (промежуточного) между пунктирной линией и Мн. Рассмотрим подробнее эти превращения.

Перлитное превращение. Это процесс вторичной кристаллизации, протекающей по обычному диффузионному механизму, когда из аустенита с определенной однородной концентрацией углерода образуются фазы с резко отличающейся структурой и концентрацией: феррит (почти чистое железо) и цементит (6,67% С). Образованию этих фаз должны предшествовать диффузия углерода и самодиффузия железа. Ведущей фазой, возникающей в первую очередь, является цементит, зародыши которого появляются на границах аустенитных зерен (рис. 19). Растущий карбид забирает углерод из близлежащих объемов аустенита. Последний при обеднении углеродом теряет свою устойчивость и испытывает полиморфное превращение. Зарождение ферритных центров легче реализуется на цементитных границах. Рост ферритных пластин приводит к повышению концентрации углерода в рядом расположенных микрообъемах аустенита, что стимулирует зарождение новых и рост уже имеющихся пластин цементита. Таким образом, пластинки цементита и феррита растут параллельно, инициируя рост друг друга и образуя колонии.



I – аустенит; II – образование зародыша цементита (Ц); III – образование пластин феррита (Ф); IV...VI – рост и образование новых пластин Ц и Ф; VII – строение перлитного зерна;

1 – пластина цементита; 2 – пластина феррита

Рисунок 19 – Схема возникновения и рост зерна перлита

Продукты перлитного превращения имеют пластинчатое строение. Величина ферритных и цементитных пластин зависит от степени переохлаждения аустенита и характеризуется межпластинчатым расстоянием Δb (усредненной суммой толщин пластинки феррита и цементита). Чем больше переохлаждение, тем меньше Δb , т.е. дисперснее структура и выше твердость. Самая грубая смесь называется перлитом (П, 0,6...1,0 мкм, 180...250 НВ), более тонкая – сорбитом (С, 0,25...0,30, 250...350), самая тонкая – трооститом (Т, 0,20...0,15, 350...450).

Аналогично твердости меняются другие прочностные. Показатели пластичности максимальные у сорбита.

Мартенситное превращение. В общем случае мартенситными называют бездиффузионные превращения в твердом состоянии, происходящие путем одновременного коллективного смещения атомов в определенных кристаллографических плоскостях и направлениях на расстояния меньше, чем межатомные. Превращения подобного типа возможны в условиях низких температур, когда диффузия практически подавлена. В сталях мартенситное превращение заключается в бездиффузионной перестройке (ГЦК \rightarrow ОЦК). При этом необходимо, чтобы граница раздела "аустенит-мартенсит" была когерентной, т.е. расположение атомов обеих фаз совпадало. Между решетками аустенита и мартенсита в этом случае существует хорошее сопряжение. Только в таких условиях возможно направленное смещение атомов, когда соседи любого атома в аустените остаются его же соседями в мартенсите. Углерод, находившийся в железе, не успевает выделиться и остается на том же месте, но уже в решетках α -железа, деформируя их так, что они вытягиваются в направлении одной из осей, превращаясь из кубической со стороны a в тетрагональную с параметрами a и c . Чем больше в решетке железа углерода, тем больше ее искажения, оцениваемые степенью тетрагональности c/a : $c/a = 1 + 0,046 \times (\%C)$.

Неравновесный пересыщенный твердый раствор внедрения углерода в α -железо называется мартенситом. Он отличается от феррита (равновесного твердого раствора внедрения углерода в α -железо) содержанием углерода: в феррите при комнатной температуре не более 0,006% C, а в мартенсите столько же, сколько в исходном аустените.

Мартенситное превращение имеет ряд особенностей. Оно протекает при непрерывном понижении температуры, а в случае изотермической выдержки останавливается. Оставшийся аустенит стабилизируется, так что при дальнейшем понижении температуры превращение возобновляется не сразу, идет при более низкой температуре.

Превращение протекает в интервале температур **Мн-Мк** и не доходит до конца; некоторое количество остаточного аустенита (несколько процентов) сохраняется и при температурах ниже **Мк**. Температуры **Мн** и **Мк** понижаются с увеличением содержания углерода и легирующих элементов и не зависят от скорости охлаждения.

Мартенситные кристаллы образуются и растут практически мгновенно (скорость их роста 1000 м/с) в пределах аустенитического зерна, не пересекая границ зерна и друг друга. В высоко- и среднеуглеродистых сталях кристаллы мартенсита имеют форму линзовидных пластин (игл в плоскости шлифа), образующих фермоподобные ансамбли. В малоуглеродистых сталях мартенситные кристаллы представляют собой рейки, ориентированные в одном направлении и собранные в пакеты. Каждый кристалл мартенсита состоит из блоков, размеры которых меньше, чем в исходном аустените. Границы мартенситных кристаллов и блоков, а также статические искажения решетки от присутствия углерода являются препятствиями для движения дислокаций.

Мартенсит по сравнению с другими структурными составляющими стали имеет наибольший удельный объем. *В порядке убывания удельного объема можно выстроить ряд: мартенсит – троостит – сорбит – перлит – аустенит.*

Превращение $A \rightarrow M$ сопровождается увеличением объема, что приводит к большим микроискажениям и дроблению блоков (фазовому наклепу), а в макромасштабе – к появлению значительных внутренних закалочных напряжений, вызывающих коробление изделий и даже возникновение трещин. Максимальное увеличение объема отмечается у эвтектоидной стали, чувствительной к закалочным деформациям и трещинам.

Мартенсит вследствие своего специфического строения характеризуется высокой твердостью (до 65 HRC, 960 HV) и прочностью (2600...2700 МПа для стали с 0,6...0,8% C), но малой пластичностью и хрупкостью. С ростом содержа-

ния углерода в стали увеличивается степень искаженности и дефектности решетки, усложняется дислокационная структура, что приводит к увеличению твердости и хрупкости мартенсита.

Бейнитное превращение. Протекает в интервале температур от перлитного до мартенситного (для углеродистых сталей около 550...200°C) и сочетает механизмы как диффузионного перлитного, так и бездиффузионного мартенситного превращений. Поэтому его называют также промежуточным превращением. При температурах бейнитного превращения диффузия железа и легирующих элементов весьма замедлена, а диффузия углерода протекает достаточно интенсивно. В аустенитных зернах происходит диффузионное перераспределение атомов углерода. Появляются обедненные и обогащенные углеродом участки. Из обогащенных углеродом объемов выделяются карбиды, а оставшийся обедненный аустенит превращается по мартенситному механизму или такой аустенит может стабилизироваться и остаться непревращенным.

Различают **верхний (530...350°C)** и **нижний (350...250°C)** бейнит.

Верхний бейнит (ВБ) имеет перистое строение и похож на резаную солому. Карбиды в нем – отдельные узкие частички, распределенные в α -фазе (а не пластинки, как в перлите). Механические свойства характеризуются сочетанием несколько пониженной по сравнению с трооститом хрупкостью, повышенной хрупкостью и малой пластичностью. Это неблагоприятная структура, получения которой следует избегать.

Нижний бейнит имеет игольчатое строение, похож на мартенсит. По сравнению с трооститом и сорбитом характеризуется более высокими твердостью и прочностью, повышенным сопротивлением хрупкому разрушению. Стали со структурой нижнего бейнита хорошо работают в упругих элементах, пружинах, рессорах.

5.1.6. Превращения аустенита при непрерывном охлаждении

На практике распад аустенита происходит, как правило, не изотермически, а в условиях непрерывного охлаждения в интервале температур (термокинетически). Поэтому в дополнение к диаграммам изотермического распада существуют термокинетические диаграммы. Они строятся тоже в координатах "температура-время" на основании серии кривых охлаждения образцов, на которых фиксируются начало и конец превращения. Изотермическое превращение требует меньше времени, чем термокинетическое, для одинакового развития однотипных процессов.

При термокинетическом распаде углеродистых сталей промежуточное превращение не происходит; распад идет либо по перлитному, либо по мартенситному механизму. Бейнит может образовываться при непрерывном охлаждении только в легированных сталях. Положение мартенситной точки **M_n** не зависит от скорости охлаждения, а температура **A_{c1}** понижается с увеличением скорости охлаждения.

Минимальная скорость охлаждения, при которой весь аустенит переохлаждается до температуры **M_n** и превращается в мартенсит, называется **критической скоростью закалки**. Графически она изображается касательной к кривой начала распада аустенита в точке его минимальной устойчивости.

Термокинетические диаграммы используются на практике для выбора условий закалки сталей.

5.1.7. Влияние углерода и легирующих элементов на распад переохлажденного аустенита

В предыдущих разделах рассматривались превращения аустенита при охлаждении эвтектоидной стали (0,83% С). В до- и заэвтектоидных сталях вид диаграмм изотермического распада меняется: появляются дополнительные линии **A_{c3}** и **A_{cm}** соответственно; температуры **M_n** и **M_k** понижаются с увеличением содержания углерода.

В случае медленного охлаждения в верхнем интервале температур из аустенита сначала выделяются избыточные фазы – феррит в дозвтектоидных и цементит вторичный в заэвтектоидных сталях. При более резком охлаждении эти фазы выделяться не успевают и образуются феррито-цементитные структуры, внешне похожие на эвтектоид (сорбит, троостит), но с содержанием углерода не 0,83%, а соответствующим его концентрации в исходном аустените. Такие структуры, образовавшиеся из переохлажденного аустенита, называются **квазиэвтектоидами**.

Легирующие элементы (кроме кобальта) замедляют распад аустенита. Устойчивость переохлажденного аустенита особенно повышается при одновременном легировании несколькими элементами и тем сильнее, чем выше их концентрация. Закалку таких сталей можно вести с меньшими скоростями охлаждения (следовательно, создавая меньшие закалочные напряжения и уменьшая опасность образования короблений и трещин). Таким образом, легирование повышает технологичность сталей при термической обработке.

5.1.8. Основы теории отпуска сталей

Отпуском (старением) называются процессы распада неравновесных структур, образовавшихся при закалке. Стали при отпуске нагревают до температур ниже A_{c1} . Переход неравновесных мартенсита и остаточного аустенита в более устойчивое состояние носит диффузионный характер и идет тем интенсивнее, чем выше температура отпуска и больше его продолжительность. Различают низко- (до 250°C), средне- (250...550°C) и высокотемпературный (550...680°C) отпуск. При этом происходят следующие процессы:

- распад мартенсита;
- распад остаточного аустенита;
- изменение структуры феррита и карбидные превращения;
- уменьшение остаточных напряжений.

Распад мартенсита идет в несколько этапов. До температур 150°C на границе мартенситных кристаллов и на дефектах возникают частицы когерентно-связанного с мартенситом ϵ -карбида (Fe_2C) толщиной несколько атомных слоев, длиной несколько нанометров. Мартенсит прилегающих участков обедняется углеродом, тогда как в удаленных участках высокая концентрация углерода сохраняется, так как диффузия углерода при такой низкой температуре практически не идет. Образуется неоднородный (гетерогенный) мартенсит. Легирующие элементы на эту стадию практически не влияют, остаточный аустенит сохраняется неизменным. При 150...350°C продолжается выделение из мартенсита ϵ -карбида и его укрупнение. Идет диффузия углерода: его концентрация во всем объеме мартенсита выравнивается и понижается. Искажения решетки уменьшаются и степень тетрагональности c/a стремится к единице. Такая структура называется **мартенситом отпуска**. При температурах 250...350°C ϵ -карбид присоединяет недостающий углерод и превращается в цементит.

Легирующие элементы (кремний и карбидообразующие) затрудняют диффузию углерода и тормозят распад мартенсита. Поэтому в легированных сталях мартенсит сохраняется до более высоких температур, чем в углеродистых.

При 250...350°C происходит распад другой неравновесной структурной составляющей – остаточного аустенита. Он превращается в нижний бейнит. Легирующие элементы задерживают распад аустенита, так же как и распад мартенсита.

С повышением температуры отпуска до 350...450°C выделение из мартенсита избыточного углерода завершается. Уменьшаются плотность дефектов и упругие искажения решетки в феррите. Карбиды перестраиваются в цементиты, укрупняются (коагулируют) и сфероидизируются. Получающаяся структура, состоящая из феррита и распределенного в нем мелкодисперсного цементита, называется **трооститом отпуска**.

Нагрев выше 450°C не связан с фазовыми превращениями углеродистых сталей. Меняется только морфология (форма и размеры) фаз. Уменьшается плотность дислокаций, укрупняются карбиды и ферритные пластинки. Такая структура называется **сорбитом отпуска**. Сорбит отпуска имеет оптимальное сочетание прочностных и пластических составов, поэтому термическую обработку на сорбит – закалку с высоким отпуском называют **улучшением**.

При очень высоком отпуске (более 650°C и до A_{c1}) сорбит отпуска превращается в еще более крупную структуру – **перлит отпуска**. Присутствие легирующих элементов затрудняет все эти процессы, смещая их в область более высоких температур.

Сорбит и троостит отпуска отличаются от одноименных закалочных структур тем, что цементит отпуска имеет зернистую, а не пластинчатую форму. Поэтому при одинаковой твердости и прочности сталь после отпуска имеет более высокие показатели пластичности, чем после закалки.

Сложные структурные изменения при отпуске, зачастую протекающие одновременно, могут вызывать различные изменения свойств стали. Так, выделение когерентных ϵ -карбидов, превращение остаточного аустенита в мартенсит или бейнит приводят к упрочнению. Разрыв когерентных связей, коагуляция карбидов, уменьшение дефектности феррита и укрупнение его пластин уменьшают прочность и повышают пластичность стали.

Специфический характер имеет изменение ударной вязкости: в целом она возрастает с ростом температуры, но имеются два температурных интервала отпускной хрупкости, когда ударная вязкость падает.

Отпускная хрупкость I рода (необратимая) не устраняется повторным отпуском при тех же температурах. Наблюдается она во всех сталях при температурах 250...350 °C независимо от их легированности и объясняется по-разному. Для предотвращения отпускной хрупкости I рода следует избегать проведения отпуска при температурах ее проявления.

Хрупкость II рода (обратимая) наблюдается обычно в легированных сталях. Причиной ее считают выделение хрупких дисперсионных фаз по границам зерен α -фазы и диффузию некоторых элементов (фосфора) к границам, что вызывает их охрупчивание. Предотвратить отпускную хрупкость II рода можно путем резкого охлаждения после отпуска (в масле, воде). Массивные детали, в центральных частях которых невозможно добиться высоких скоростей охлаждения, для предотвращения "провалов" ударной вязкости изготавливают из стали, легированной молибденом (0,2...0,3%) или вольфрамом (0,5...1,0%). Они связывают легирующие элементы, не давая им выделиться в виде хрупких частиц по границам зерен.

5.2. Практика термической обработки сталей

5.2.1. Отжиг I рода

Отжиг I рода в зависимости от исходного состояния стали и температуры его выполнения может приводить к развитию процессов гомогенизации, рекристаллизации и снятия остаточных напряжений. Указанные процессы происходят независимо от того, протекают ли в сталях при этой обработке фазовые превращения (перекристаллизация) или нет. Поэтому отжиг I рода в зависимости от целей может проводиться при температурах выше или ниже температур фазовых превращений.

Отжиг I рода снижает химическую и физическую неоднородность на предшествующих стадиях передела стали (литье, обработка давлением, сварка).

Гомогенизационному (диффузионному) отжигу подвергают крупные отливки и слитки сталей для устранения в них дендритной и внутрикристаллитной ликвации, которая, охрупчивая сталь, ухудшает ее способность к обработке давлением.

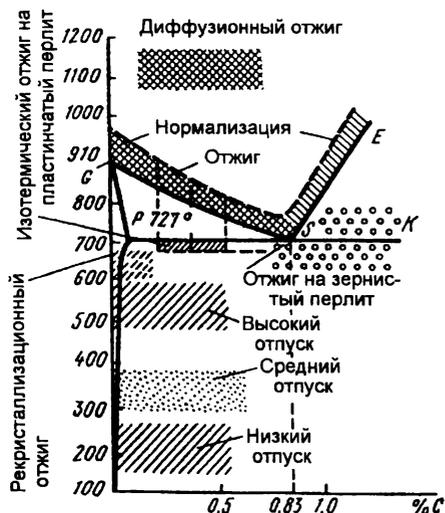


Рисунок 20 – Диаграмма температурного режима для различных видов отжига и отпуска стали

Нагрев при гомогенизационном отжиге должен быть до высоких температур (1100...1200°C) (см. рис. 20), так как только в этом случае более полно протекают диффузионные процессы, обеспечивающие выравнивание химического состава в отдельных объемах стали. Длительность выдержки при высоких температурах составляет 15...20 ч. Охлаждение до 800...820°C ведут с печью, а далее на воздухе. Недостаток гомогенизационного отжига – образование крупнозернистой структуры. Этот недостаток устраняется при последующей обработке слитка давлением или в процессе последующей термической обработки.

Рекристаллизационный отжиг чаще применяют как промежуточную операцию для снятия наклепа между операциями холодного деформирования. Для реализации рекристаллизационного отжига холоднодеформированную сталь нагревают выше температуры начала рекристаллизации, делают выдержку при этой температуре с последующим охлаждением. Температура отжига для углеродистых сталей с 0,08...0,2% С, чаще подвергаемых холодной деформации (прокатке, штамповке, волочению), находится в интервале 680...700°C (см. рис. 20).

Кроме рекристаллизации феррита, при отжиге стали могут протекать также коагуляция и сфероидизация цементита. Это повышает пластичность и облегчает выполнение холодной пластической деформации.

Отжигу для снятия остаточных напряжений подвергают сварные изделия, отливки, детали после обработки резанием, правки и т.д., в которых возникают внутренние (остаточные) напряжения. Остаточные напряжения могут вызывать коробление, а в некоторых случаях, при суммировании с эксплуатационными нагрузками, снижать работоспособность конструкций. Особенно опасны остаточные растягивающие напряжения. Процесс снижения или снятия остаточных напряжений при отжиге I рода основан на понижении предела текучести стали при нагреве, вследствие чего происходит релаксация напряжений. Температура нагрева должна быть 550...650°C. Время выдержки составляет несколько часов и устанавливается опытным путем. Скорость нагрева и особенно охлаждения должна быть невелика, чтобы исключить образование новых остаточных напряжений. (Релаксация напряжений – самопроизвольное уменьшение напряжений с течением времени при практически неизменных линейных размерах тела путем перехода части упругой деформации в микропластическую.)

5.2.2. Отжиг II рода

Отжиг II рода заключается в нагреве стали до температур выше температур A_{c3} или A_{c1} , выдержке и, как правило, последующем медленном охлаждении. В процессе нагрева и охлаждения в этом случае протекают фазовые превращения, определяющие структуру и свойства стали.

После отжига углеродистой стали получают структуры, указанные на диаграмме состояния железо-цементит. После отжига стали имеют низкие прочность и твердость при высокой пластичности. При фазовой перекристаллизации измельчается зерно, устраняются строчечность, вызванная ликвацией, и другие неблагоприятные структуры стали. Понижая прочность и твердость, отжиг облегчает обработку резанием средне- и высокоуглеродистых сталей. Измельчая зерна, снимая внутренние напряжения и уменьшая структурную неоднородность, отжиг II рода способствует повышению пластичности и вязкости по сравнению со свойствами, полученными после литья, сварки,ковки и прокатки. Отжигу подвергают отливки, поковки, сортовой и фасонный прокат, трубы, горячекатаные листы и т.д.

Различают полный, изотермический и неполный отжиг II рода.

Полный отжиг заключается в нагреве на $30...50^{\circ}\text{C}$ выше температуры A_{c3} для доэвтектоидной стали и A_{cm} – для заэвтектоидной стали, выдержке при этой температуре для полного прогрева и завершения фазовых превращений в объеме металла и последующем медленном охлаждении (см. рис. 21).

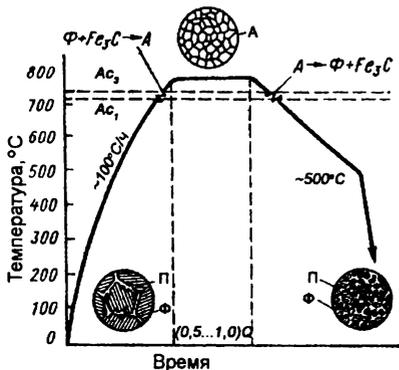


Рисунок 21 – Схема полного отжига доэвтектоидной стали

При нагреве до температуры выше A_{c3} на $30...50^{\circ}\text{C}$ образуется аустенит. Он характеризуется мелким зерном, поэтому при охлаждении возникает мелкозернистая структура, обеспечивающая высокую вязкость и пластичность.

Скорость нагрева не регламентируется, продолжительность выдержки колеблется в пределах $0,5...1$ ч на 1 т нагреваемого металла ($1...1,5$ мин на 1 мм толщины заготовки).

Охлаждение должно быть медленным (обычно с печью). Оно должно обеспечивать распад аустенита при малых степенях переохлаждения, чтобы избежать образования излишне дисперсной ферритокарбидной структуры и свойственной ей более высокой твердости.

Скорость охлаждения при отжиге зависит от устойчивости переохлажденного аустенита и, следовательно, от состава стали. Чем больше устойчивость аустенита в области температур перлитного превращения, тем медленнее должно быть охлаждение. Поэтому легированные стали, обладающие высокой устойчивостью переохлажденного аустенита, охлаждаются при отжиге медленнее ($40...60^{\circ}\text{C/ч}$), чем углеродистые ($100...150^{\circ}\text{C/ч}$).

После завершения распада аустенита в перлитной области дальнейшее охлаждение можно ускорять и выполнять не с печью, а на воздухе, за исключением случаев, когда отжиг применяют и для снятия напряжений (сварные конструкции, отливки сложной формы).

Полный отжиг обычно применяют для сортового проката из сталей с 0,3...0,4 %С, поковок и фасонных отливок.

Нормализация – это разновидность полного отжига, при которой нагрев производится как при полном отжиге в область аустенита, т.е. до температур $A_{с3}+(30...50\text{ }^{\circ}\text{C})$ для дозвтектоидных и $A_{сm}+(30...50\text{ }^{\circ}\text{C})$ для зазвтектоидных сталей. Выдержка должна обеспечивать полный прогрев заготовки, завершение в металле фазовых превращений и выравнивание химического состава по объему аустенитного зерна. Охлаждение ведется на спокойном воздухе.

Нормализация обеспечивает полную фазовую перекристаллизацию стали и устраняет крупнозернистую структуру, полученную при сварке, литье, обработке давлением. Нормализацию обычно применяют для мягких низкоуглеродистых и низколегированных сталей.

Ускоренное охлаждение на воздухе приводит к распаду аустенита при более низких температурах, что повышает дисперсность ферритоцементитной структуры и увеличивает количество перлита в малоуглеродистых сталях, сорбита и троостита в средне- и высокоуглеродистых сталях. Это повышает твердость нормализованной стали по сравнению с отожженной.

Нормализация горячекатаной стали повышает ее сопротивление хрупкому разрушению, что характеризуется снижением порога хладноломкости и повышением работы развития трещины.

Нормализация более экономичная операция, чем отжиг. Для низкоуглеродистых сталей ее применяют вместо отжига. При этом вследствие некоторого повышения твердости уменьшается налипание металла на резце, улучшается чистота поверхности при обработке резанием. Для среднеуглеродистых сталей нормализацию с высоким отпуском применяют вместо закалки и высокого отпуска. В этом случае механические свойства несколько ниже по сравнению с получаемыми при закалке, но практически исключается вероятность образования закалочных трещин.

Для высокоуглеродистых инструментальных сталей нормализация применяется для устранения цементитной сетки, являющейся дефектом структуры.

При **изотермическом отжиге** сталь нагревают, как и для полного отжига, выше $A_{с3}$ и после выдержки сравнительно быстро охлаждают до температуры, лежащей ниже точки $A_{с1}$ (обычно 600...680 °С). При этой температуре осуществляют изотермическую выдержку 3...6 ч, необходимую для полного распада аустенита, после чего следует более ускоренное охлаждение, вплоть до охлаждения на воздухе.

Изотермический отжиг сокращает длительность процесса отжига и обеспечивает получение однородной ферритоперлитной структуры. Он используется для поковок и сортового проката легированных сталей относительно небольших размеров, так как для заготовок большого размера и большой массы затруднительно быстрое и равномерное охлаждение до температуры изотермической выдержки.

Неполный отжиг отличается от полного тем, что сталь нагревают ниже точки $A_{с3}$ или $A_{сm}$, но несколько выше $A_{с1}$. Для дозвтектоидных сталей неполный отжиг применяют для улучшения обрабатываемости их резанием. При неполном отжиге происходит частичная перекристаллизация стали вследствие превращения $P \rightarrow A$ без превращения избыточного феррита.

Неполный отжиг конструктивных углеродистых и легированных сталей проводят при 750...770°С с последующим охлаждением со скоростью 30...60 С/ч (чем выше легирование стали, тем медленнее охлаждение) до 600°, далее на воздухе.

С помощью неполного отжига в сталях можно сформировать структуру перлита не пластинчатой формы, а сфероидальной, зернистой (см. рис. 20). Такой отжиг называется **сфероидизацией**. Сталь с зернистым перлитом имеет более низкую прочность и соответственно более высокие значения относительного удлинения и поперечного сужения. Так, твердость эвтектоидной стали с пластинчатым перлитом 228 НВ, а с зернистым 163 НВ. Соответственно временное сопротивление 820 и 630 МПа, а относительное удлинение 15 и 20%. После отжига на зернистый перлит стали обладают лучшей обрабатываемостью резанием и свариваемостью. Нагрев сталей при сфероидизации проводят немного выше точки A_{c1} , что вызывает практически полную перекристаллизацию. Частицы цементита, не растворяющиеся при нагреве в заэвтектоидной стали и области аустенита с повышенной концентрацией углерода (образующиеся за счет неполной его гомогенизации после растворения цементита в доэвтектоидной и заэвтектоидной стали) являются центрами кристаллизации для цементита, выделяющегося при последующем охлаждении ниже точки A_{c1} и принимающего зернистую форму.

Стали, близкие по составу к эвтектоидной, имеют узкий интервал температур нагрева для отжига на зернистый цементит (750...760°C). Для заэвтектоидных углеродистых сталей интервал расширяется (770...790°C). Легированные заэвтектоидные стали для получения зернистых карбидов можно нагревать до более высоких температур (770...820°C).

Охлаждение до 680...620°C при сфероидизации осуществляется медленнее 20°C/ч и должно обеспечить распад аустенита на ферритокарбидную структуру, сфероидизацию и коагуляцию (укрупнение) образовавшихся карбидов. Для сфероидизации часто используется изотермический отжиг. В этом случае сталь охлаждают до 620...680°C. Выдерживают при этой температуре 4...6 ч, что обеспечивает распад переохлажденного аустенита и коагуляцию карбидов. Затем охлаждение проводят на воздухе.

Для повышения пластичности сфероидизирующий отжиг применяют и для горячекатаных конструкционных сталей с 0,2 до 0,4% С. Их подвергают аустенизации при 760...800°C (в зависимости от марки стали) с последующей изотермической выдержкой при 680...700°C в течение 5...10 ч или замедленному охлаждению (20°C/ч) до 670°C.

5.2.3. Закалка стали

Закалка заключается в нагреве стали на 30...50°C выше A_{c3} для доэвтектоидных сталей или A_{c1} для заэвтектоидных сталей, в выдержке для завершения фазовых превращений и последующем охлаждении со скоростью выше критической.

Ускоренное охлаждение со скоростями выше критических обеспечивается применением специальных охлаждающих жидкостей. Обычно для закалки используют воду, водные растворы солей, щелочей, масла.

В результате закалки наряду с повышением прочности и твердости одновременно резко снижается пластичность и возникают внутренние напряжения, поэтому после закалки проводят отпуск. Конструкционные стали подвергают закалке и отпуску для повышения прочности, твердости, получения достаточно высокой пластичности и вязкости, а для ряда деталей также высокой износостойкости. Инструментальные стали подвергают закалке и отпуску в основном для повышения твердости, износостойкости и прочности.

5.2.3.1. Выбор температуры закалки

Доэвтектоидные стали нагревают до температуры на 20...30°C выше точки A_{c3} (см. рис. 22). В этом случае сталь с исходной структурой перлит (П) + феррит (Ф) при нагреве приобретает структуру аустенита, которая при последующем охлаждении со скоростью выше критической превращается в мартенсит.

За глубину закаленного слоя условно принимают расстояние от поверхности до полумартенситной зоны (50% мартенсита + 50% троостита).

Прокаливаемость стали тем выше, чем меньше критическая скорость закалки. Поэтому все факторы, уменьшающие критическую скорость закалки (повышающие устойчивость переохлажденного аустенита), увеличивают прокаливаемость. Сильно повышает прокаливаемость легирование марганцем, молибденом, никелем, малыми добавками бора (0,003...0,005%). Прокаливаемость особенно возрастает при одновременном введении в сталь нескольких легирующих элементов, например хрома и никеля.

Все указанное выше о влиянии легирования на прокаливаемость справедливо, если только легирующие элементы полностью растворены в аустените. Если же они находятся в виде частиц нерастворимых карбидов, то легирующие элементы не повышают устойчивости аустенита, а могут ее уменьшать, так как, являясь готовыми зародышами, карбиды облегчают распад аустенита и снижают прокаливаемость.

Сильно влияет на прокаливаемость величина зерна аустенита. Факторы, способствующие росту аустенитного зерна (рост температуры закалки и время выдержки), повышают прокаливаемость.

5.2.3.3. Способы закалки

Самое широкое применение получила закалка в одном охладителе. Такую закалку называют **непрерывной**.

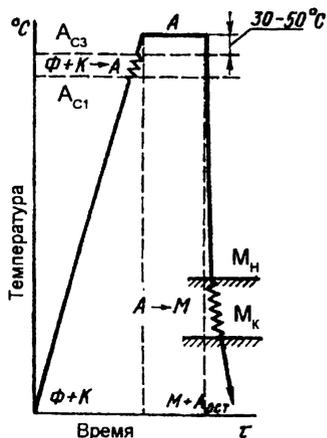


Рисунок 23 – Схема закалки дозетектоидной стали

В ряде случаев, особенно для изделий сложной формы и при необходимости уменьшения деформаций, более эффективно применение ступенчатой и изотермической закалки.

Ступенчатая закалка. При этой закалке сталь после нагрева и выдержки при температуре закалки охлаждают в среде, имеющей температуру несколько выше точки начала мартенситного превращения M_n (обычно 180...250°C) и выдерживают сравнительно короткое время, такое, чтобы не успел начаться процесс превращения аустенита в бейнит. Дальнейшее охлаждение осуществляют на воздухе. Выдержка в закалочной среде обеспечивает выравнивание температуры по всему сечению изделия. Мартенситное превращение протекает при охлаждении на воздухе почти одновременно по всему сечению и менее полно, чем при непрерывной закалке. Закаленная сталь сохраняет большее количество остаточного аустенита; снижается уровень внутренних напряжений, уменьшается коробление и вероятность образования закалочных трещин. Ступенчатая закалка применима для сравнительно небольших изделий.

Изотермическая закалка. Закалка по этому способу выполняется в основном так же, как и ступенчатая. Но в данном случае предусматривается более длительная выдержка выше точки M_n . При такой выдержке происходит распад аустенита с образованием нижнего бейнита.

У большинства легированных сталей, для которых применяется изотермическая закалка, распад аустенита в промежуточной области не идет до конца. Если вести процесс так, чтобы аустенит, не распавшийся при изотермической выдержке, не претерпевал мартенситного превращения при дальнейшем охлаждении, то сталь получает структуру бейнита и 10...20% остаточного аустенита, обогащенного углеродом. При такой структуре достигается высокая прочность при достаточной вязкости.

В качестве охлаждающей среды при ступенчатой и изотермической закалках используют расплавленные соли и щелочи. Охлаждение в расплавах едких щелочей, если предварительно детали нагревались в расплавленных солях, не вызывает окисления, позволяет получить чистую поверхность светло-серого цвета. Закалку по этому способу называют светлой.

Обработка стали холодом. Для уменьшения количества остаточного аустенита, снижающего твердость закаленной стали, применяют обработку холодом. Ее применяют для сталей, у которых температура конца мартенситного превращения (M_k) лежит ниже 0°C .

Охлаждение сталей до температур, соответствующих точке M_k , которая для большинства средне- и высокоуглеродистых, а также легированных сталей находится в пределах $-30...-70^\circ\text{C}$, вызывает превращение остаточного аустенита в мартенсит, что повышает твердость стали. Но одновременно возможен рост внутренних напряжений. Поэтому изделия охлаждать ниже точки начала мартенситного превращения M_n нужно медленно и сразу после обработки холодом следует выполнять отпуск.

5.2.4. Отпуск стали

Отпуск заключается в нагреве закаленной стали до температур ниже A_{c1} , в выдержке при заданной температуре и последующем охлаждении с определенной скоростью. Отпуск является завершающей операцией термической обработки, в результате которой сталь получает требуемые механические свойства. Отпуск полностью или частично снимает внутренние напряжения, возникающие при закалке.

Большое влияние на величину остаточных напряжений оказывает скорость охлаждения при отпуске. Чем медленнее охлаждение, тем меньше остаточные напряжения.

Основное влияние на свойства стали оказывает температура отпуска. Различают три вида отпуска.

Низкотемпературный (низкий) отпуск проводят с нагревом до 250°C . При этом снимаются внутренние напряжения, мартенсит закалки превращается в отпускенный мартенсит, несколько повышается прочность и немного улучшается вязкость без заметного снижения твердости. Закаленная сталь (0,5...1,3% C) после низкого отпуска сохраняет твердость в пределах 58...63 НКС, а следовательно, высокую износостойкость.

Низкотемпературному отпуску подвергают режущий и измерительный инструмент из углеродистых и низколегированных сталей, а также детали, прошедшие поверхностную закалку, цементацию, цианирование или нитроцементацию. Продолжительность отпуска обычно 1...2,5 ч. Для изделий больших сечений, измерительных инструментов время отпуска увеличивается.

Среднетемпературный (средний) отпуск выполняют при $350...500^\circ\text{C}$ и применяют преимущественно для пружин, рессор и штампов. Такой отпуск обеспечивает высокие предел упругости и предел выносливости, релаксационную стойкость. Структура стали после среднего отпуска – троостит отпуска или троосто-мартенсит, твердость 40...50 НКС.

Высокотемпературный (высокий) отпуск проводят при 500...700°C. Структура стали после высокого отпуска – сорбит отпуска. Высокий отпуск создает наилучшее соотношение прочности и вязкости стали.

Закалка с высоким отпускком по сравнению с нормализованным или отожженным состоянием одновременно повышает прочность, пластичность, а также ударную вязкость. Термическую обработку, состоящую из закалки и высокого отпуска, называют улучшением. Улучшению подвергают среднеуглеродистые (0,3...0,5% С) конструкционные стали, к которым предъявляют высокие требования по пределу текучести, пределу выносливости и ударной вязкости. Улучшение значительно повышает конструкционную прочность стали, уменьшает чувствительность к концентраторам напряжений, повышает работу развития трещины, снижает температурный порог хладноломкости.

Отпуск при 550...600°C в течение 1...2 ч почти полностью снимает остаточные напряжения, возникающие при закалке.

Закалке с высоким отпускком (600...700°C) на металлургических заводах подвергают низкоуглеродистые и низколегированные толстолистовые стали, применяемые в строительных конструкциях, судостроении, мостостроении, что повышает их сопротивление хрупкому разрушению и уменьшает склонность к старению.

5.2.5. Дефекты термической обработки

Дефекты термической обработки представляют собой трещины длиной от долей мм и достигающие длины 500 мм, глубиной до всей толщины изделия. Трещины направлены от поверхности и образуются вследствие объёмных изменений, связанных со структурными превращениями при нагреве и охлаждении металла. Трещины образуются в слитках или деформированном металле в изделиях при их переделах. Трещины напряжений образуются при охлаждении, мартенситовых превращениях, при вылеживании сталей с мартенситом, при медленном нагреве наклепанных сталей, при нагреве и охлаждении сталей, легированных хромом, при быстром нагреве сталей с высокой твёрдостью и малой пластичностью. Наиболее часто в изделиях для строительных конструкций – болтах и арматуре высокой прочности – встречаются закалочные трещины. Закалочные трещины начинаются от поверхностных концентраторов и всегда выходят на поверхность. Их излом всегда окрашен цветами побежалости от жёлтого до коричневого.

6. СПОСОБЫ ПРОИЗВОДСТВА И ОЧИСТКИ СТАЛЕЙ

6.1. Способы производства сталей

6.1.1. Материалы для производства металлов и сплавов

Для производства металлов и сплавов используют руды, флюсы, топливо и огнеупорные материалы.

Рудой называют горные породы, содержащие металлы в количествах, обеспечивающих их экономную переработку. Так, из железных руд экономически целесообразно извлекать железо при содержании его в руде не менее 30...60%, из медных руд - при содержании меди 3...5%. Руда состоит из минералов, содержащих металл в виде оксидов, сульфидов, карбонатов и пустой породы (в основном кремнезема, глинозема). В состав руды могут входить примеси - сера, фосфор, мышьяк.

Флюсом называют материалы, образующие при плавке шлак – легкоплавкие соединения с пустой породой, золой топлива и примесями. Обычно шлак обладает меньшей, чем выплавляемый металл, плотностью, поэтому он располагается в печи над металлом и может быть удален в процессе плавки. Шлак защищает металл от печных газов и воздуха. В качестве флюсов может использоваться кварцевый песок, состоящий в основном из SiO_2 (он образует кислый шлак), а также известняк CaCO_3 и другие соединения кальция и магния (они образуют основной шлак).

Топливом в металлургических процессах служат кокс, природный, доменный, коксовый газы и мазут.

Кокс получают сухой перегонкой коксующихся каменных углей без доступа воздуха при температуре 1000...1100°C. При такой обработке из угля извлекают ценные побочные продукты – бензолы, фенолы, а также улавливается коксовый газ. Куски кокса должны иметь размеры 20...60 мм. Кокс должен иметь достаточную прочность, чтобы не разрушаться под действием веса шихтовых материалов, и пористое строение для обеспечения газопроницаемости.

Природный газ состоит в основном из метана CH_4 .

Доменный газ – побочный продукт при выплавке чугуна в доменной печи, содержащий значительное количество горючих составляющих (до 32% CO , 4% H_2).

Мазут – тяжелый остаток перегона нефти, содержащий до 88% C , 10...12% H_2 и небольшое количество кислорода и серы.

Огнеупорные материалы применяют для внутренней облицовки (футеровки) плавильных печей и другого оборудования, находящегося под действием высоких температур, расплавленных металлов и шлаков. По химическому составу огнеупорные материалы классифицируют на кислые, основные и нейтральные. К кислым относят диносовый кирпич, кварцевый порошок и другие материалы с высоким содержанием кремнезема SiO_2 , к основным – доломитовые, магнезитовые с большим содержанием основных оксидов CaO , MgO , к нейтральным – материалы, состоящие из оксидов алюминия, хрома и т.д. (шамот, хромомагнезит), а также углеродистый кирпич, содержащий до 92% углерода в виде графита.

6.1.2. Способы получения металлов из руд

Основные способы получения металлов из руд следующие:

1. Пирометаллургический – расплавление руд путем их нагрева за счет тепла, выделяемого при сжигании топлива. Этот способ является пока основным для получения железа и его сплавов, меди и других металлов.

2. Электрометаллургический – способ получения металлов, осуществляющийся в дуговых, индукционных и других электропечах или электролизом из расплавов и водных растворов (например, получение алюминия из глинозема).

3. Гидрометаллургический – выщелачивание металлов из руд различными растворителями и последующее выделение их из раствора. Выщелачивание может осуществляться как на поверхности земли, так и под землей с помощью системы скважин. Этот способ широко применяется для получения меди, а также урана.

4. Химико-металлургический – объединяет химические и пирометаллургические процессы, например, титан получают восстановлением тетрахлорида $TiCl_4$ магнием и последующей плавкой в электродуговых печах.

6.1.3. Сущность процесса производства стали

Основными материалами для производства стали являются чугун и металлический лом (скрап). В стали углерода и примесей гораздо меньше, чем в чугуне. Поэтому сущность любого варианта передела чугуна в сталь – снижение содержания углерода и примесей путем их избирательного окисления и перевода в шлак и газы в процессе плавки.

Можно отметить три этапа, характерных для процесса выплавки стали.

Первый этап – расплавление шихты и нагрев ванны жидкого металла. На этом этапе температура металла невелика, поэтому активно идут процессы окисления железа, кремния, марганца и фосфора, сопровождающиеся выделением тепла, и "вяло" протекает реакция окисления углерода, идущая в прямом направлении с поглощением тепла (принцип Ле-Шателье).

Второй этап – кипение металлической ванны – начинается по мере ее прогрева до более высоких температур, чем на первом этапе. При повышении температуры интенсифицируется реакция окисления углерода, проходящая с поглощением тепла. Стимулировать протекание этой реакции можно введением в ванну значительных количеств руды, окалины или вдуванием кислорода. Образующийся в результате данной реакции оксид углерода CO нерастворим в жидком металле и выделяется из него, вызывая "кипение" ванны. При этом содержание углерода в металле уменьшается до требуемого, температура выравнивается по объему ванны, частично удаляются неметаллические включения, захватываемые всплывающими пузырьками CO , а также другие газы, проникающие в пузырьки CO . Все это способствует повышению качества металла.

В этот же период создаются условия для удаления серы, находящейся в стали в виде растворенного в ней сульфида. Для этого на ванне наводится основной шлак, содержащий CaO , который связывает серу в нерастворимый в металле и растворимый в шлаке сульфид.

Третий этап – раскисление стали – заключается в восстановлении оксида железа, растворенного в жидком металле. При плавке повышение содержания кислорода в металле необходимо для окисления примесей и углерода, но в готовой стали кислород – вредная примесь, так как понижает механические свойства стали.

Раскисление стали осуществляется путем введения в жидкую ванну или в шлак элементов раскислителей в виде ферросплавов ($FeMn$, $FeSi$) или чистых металлов (алюминий).

Вводящиеся в жидкую ванну раскислители (**осаждающее раскисление**), обладающие большим сродством к кислороду, чем железо, восстанавливают оксид железа FeO , растворенный в жидком металле. Продукты раскисления – окислы MnO , SiO_2 , Al_2O_3 , имеющие меньшую, чем у стали, плотность, всплывают в шлак. Но часть из них может остаться в стали, что понижает ее свойства.

Вводящиеся в шлак раскислители (**диффузионное раскисление**) восстанавливают оксид железа FeO , растворенный в шлаке, что в соответствии с законом распределения приводит к диффузионному перемещению оксида железа, растворенного в металле, в шлак. Образующиеся при таком способе раскисления оксиды элементов раскислителей остаются в шлаке, а восстановленное железо переходит в сталь, что уменьшает количество неметаллических включений в стали и повышает ее качество.

В зависимости от степени раскисленности выплавляют **спокойные, кипящие и полуспокойные стали**.

Спокойная сталь получается при полном раскислении в печи и ковше.

Кипящая сталь раскислена в печи не полностью. Ее раскисление продолжается в изложнице при затвердевании слитка благодаря взаимодействию FeO и углерода, содержащихся в металле, и выделению в виде пузырьков оксида углерода CO. Кипящая сталь практически не содержит неметаллических включений – продуктов раскисления. Поэтому она обладает хорошей пластичностью и пригодна для получения деталей методами холодной штамповки.

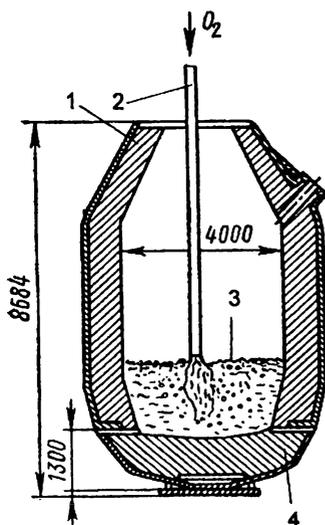
Полуспокойная сталь имеет промежуточную раскисленность между спокойной и кипящей. Частично она раскисляется в печи и ковше, а частично – в изложнице, благодаря взаимодействию оксида железа и углерода, содержащихся в стали.

Легиrowание стали осуществляется введением в необходимом количестве ферросплавов или чистых металлов в расплав. Легирующие элементы, сродство к кислороду которых меньше, чем у железа, при плавке и разливке практически не окисляются, поэтому их вводят в печь в любое время плавки. Легирующие элементы, у которых сродство к кислороду выше, чем у железа, вводят в металл после или одновременно с раскислением, в конце плавки, а иногда непосредственно в ковш.

Сталь производится в различных по принципу действия металлургических агрегатах: кислородных конвертерах, мартеновских печах и электропечах. В РБ на РУП «БМЗ» в г. Жлобине используются дуговые электросталеплавильные 100-тонные печи и установки печь-ковш.

6.1.4. Производство стали в кислородных конвертерах

Кислородно-конвертерный процесс заключается в продувке жидкого чугуна кислородом. Кислородный конвертер – это сосуд грушевидной формы из стального листа, выложенный изнутри основным огнеупорным кирпичом (см. рис. 24). Вместимость конвертера – 100...350 т жидкого чугуна. Конвертер может поворачиваться на цапфах вокруг горизонтальной оси для завалки скрала (лома), заливки чугуна и слива стали и шлака.



1 – футеровка; 2 – фурма водоохлаждаемая;
3 – зеркало ванны; 4 – днище

Рисунок 24 – Кислородный конвертер емкостью 130 т

Шихтовыми материалами в кислородно-конвертерном процессе являются стальной лом, жидкий и твердый передельный чугун, известь и железная руда, служащие для наведения шлака, а также боксит Al_2O_3 и плавиковый шпат CaF_2 , обеспечивающие разжижение шлака. (Передельный чугун – основной вид чугуна, предназначенный для передела в сталь. Выплавляется в доменных печах в результате восстановления оксидов железа, входящих в состав руды, твердым углеродом, оксидом углерода и водородом, выделяющимися при сгорании топлива в печи.) (Шихта – смесь материалов в определенных пропорциях для переработки в металлургических печах.)

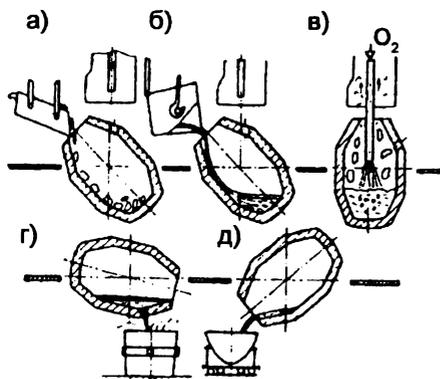


Рисунок 25 – Последовательность технологических операций при выплавке стали в кислородных конвертерах

Перед плавкой конвертер наклоняют и с помощью завалочных машин загружают стальной ломом (рис. 25 а). Затем заливают жидкий чугун при температуре $1250...1400^{\circ}C$ (рис. 25 б), возвращают конвертер в вертикальное положение (рис. 25 в), внутрь его вводят водоохлаждаемую фурму и вдувают через нее кислород. Одновременно с продувкой кислородом в плавку вводят шлакообразующие материалы. При продувке происходит окисление углерода и других примесей как непосредственно кислородом дутья, так и оксидом железа FeO , распределяющегося между жидким металлом и шлаком. Реакции окисления сопровождаются выделением тепла, что обеспечивает расплавление лома и шихтовых материалов. Наличие в шлаке значительного количества CaO и активное перемешивание металла и шлака при плавке обеспечивают удаление серы и фосфора путем связывания их в соединения, растворимые в шлаке и не растворимые в металле ($P_2O_5 \cdot 3CaO$, CaS).

Подачу кислорода заканчивают, когда содержание углерода соответствует заданному. После этого конвертер поворачивают, и выпускают сталь в ковш (рис. 25 г), а шлак – в шлаковозную чашу (рис. 25 д).

Уменьшение содержания кислорода в стали без увеличения времени пребывания ее в конвертере может быть достигнуто раскислением стали осаждающим методом после разливки ее из конвертера в ковш путем введения в ковш ферросилиция, ферромарганца и алюминия.

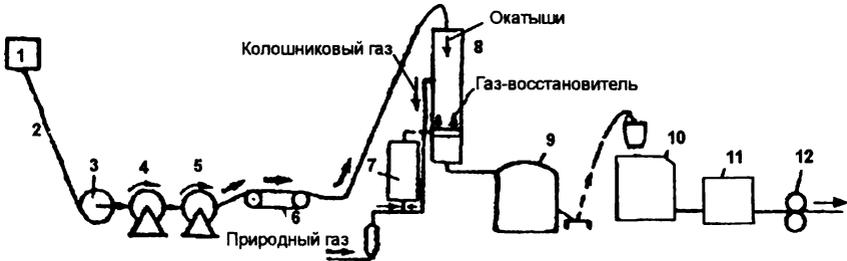
Для улучшения качества стали, более глубокого обезуглероживания, увеличения доли скрапа в конвертер, кроме кислорода, вдувают сверху и через донные отверстия природный газ аргон и азот, парокислородную и аргонокислородную смесь, порошкообразный CaO . Плавка в конвертерах вместимостью $150...350$ т протекает за $25...50$ мин.

Кислородно-конвертерный процесс производства стали является самым производительным. Им производится основная масса углеродистых и низколегированных сталей.

6.1.5. Бездоменное производство стали

Двухстадийный процесс переработки железной руды в сталь путем получения чугуна в доменных и выплавки из него стали в конвертерах, мартеновских и электросталеплавильных печах требует повышенных энергозатрат и экологически несовершенен, особенно стадия доменного производства чугуна. Поэтому шире начали использовать более экономичные процессы прямого восстановления железа из руд с последующей его плавкой в электропечах для получения стали.

Технологическая схема процесса бездоменного получения стали приведена на рисунке 26.



- 1 – горно-обогатительный комбинат; 2 – трубопровод с пульпой; 3 – дисковые вакуум-фильтры; 4 – барабанные смесители; 5 – барабанный окомкователь; 6 – печь для обжига окатышей; 7 – реформер для получения газа-восстановителя; 8 – шахтная печь (установка прямого восстановления железа); 9 – электропечь; 10 – установка непрерывной разливки стали; 11 – подогревающая печь; 12 – валки прокатного стана

Рисунок 26 – Схема процесса бездоменного получения стали

Сырьем для получения железа по этой схеме служит концентрат с 70% Fe, поступающий с горно-обогатительного комбината 1 в виде пульпы (смеси с водой) по трубопроводу 2. После отстоя пульпы образующийся осадок концентрата обезвоживается на вакуум-фильтрах 3, смешивается в барабанных смесителях 4 с бентонитовой связкой и окомковывается в барабанном окомкователе 5. Полученные окатыши обжигают в печи 6 и по конвейеру в установку прямого восстановления железа, представляющую собой шахтную печь 8, работающую по принципу противотока. Сверху в печь загружают окатыши. В средней части в нее вдувают газ-восстановитель при температуре 760°C под давлением 0,15 МПа, образующийся в реформере 7 при взаимодействии природного и колошниковых газов и состоящий из водорода и оксида углерода. В восстановительной зоне происходит разогрев окатышей до 1000...1100°C и восстановление в них железной руды водородом и оксидом углерода до твердого губчатого железа. Содержание железа в окатышах достигает 90...95%. Для охлаждения металлургических окатышей в нижнюю часть печи вдувают воздух. Далее окатыши подают в электропечь 9, где они расплавляются; металл очищают от примесей, добавляя к нему необходимые компоненты, и получают легированную сталь, которая разливается на установке непрерывной разливки стали 10. Полученные слитки подогреваются в печи 11, затем их прокатывают на валках 12.

6.1.6. Разливка стали

Выплавленную в плавильных печах сталь выпускают в сталеразливочный ковш. Вместимость ковша обычно соответствует вместимости плавильной печи и составляет 5...250 т. Для крупных плавильных печей применяют ковш вместимостью до 450 т.

Сталь разливают в **изложницы** или **кристаллизаторы** установок непрерывной разливки.

Изложницы представляют собой чугунные формы для получения слитков различного сечения. Масса слитков, перерабатываемых прокаткой, обычно составляет 10...12 т. Слитки, используемые для переработки ковкой (поковки), могут иметь массу до 250...300 т.

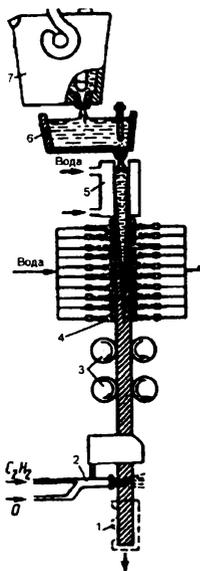
Применяют две разновидности разливки стали в изложницы – **сверху** и **сифоном**.

При разливке сверху каждую изложницу заполняют отдельно. Сталь подается из ковша. Для лучшего центрирования струи и уменьшения разбрызгивания стали на изложницу устанавливают футерованную изнутри промежуточную воронку.

При сифонной разливке сталь из ковша поступает в центральный литник и через каналы сифонных проводок одновременно снизу во все изложницы, установленные на поддоне и имеющие футерованные надставки.

Разливку стали сверху обычно применяют для крупных слитков из углеродистых сталей, а сифонную разливку – для мелких и средних слитков из легированных сталей.

Непрерывная разливка стали производится на специальных установках УНРС. Установки УНРС бывают вертикальными (рис. 27), горизонтальными и радиальными.



- 1 – кантователь; 2 – газовый резак;
- 3 – валки; 4 – зона вторичного охлаждения;
- 5 – водоохлаждаемый кристаллизатор;
- 6 – промежуточный ковш;
- 7 – сталеразливочный ковш

Рисунок 27 – Схема установки для непрерывной разливки стали вертикального типа

Жидкая сталь из ковша 7 (см. рис. 27) через промежуточное разливочное устройство 6 непрерывно заливается в водоохлаждаемую изложницу без дна, называемую кристаллизатором 5, откуда с помощью валков вытягивается слиток. На выходе из кристаллизатора слиток охлаждается водой из форсунок 4, окончательно застывает и попадает в зону резки, где его разрезают газовым резаком 2 на слитки определенной длины и подают при помощи кантователя 1 на прокатный стан.

На УНРС обычно получают слитки прямоугольного сечения размерами от 150×500 до 300×200 мм, квадратного сечения со стороной от 150 до 400 мм, а также круглые в виде толстостенных труб. Специальные установки непрерывной разливки стали позволяют исключить операцию резки слитка на заготовки и совмещать

процесс кристаллизации с процессом прокатки полосы на неререверсируемых станах. При этом появляется возможность получения полосы толщиной 2...10 мм и шириной до 2800 мм.

Благодаря непрерывному питанию, направленному затвердеванию и возможности обжатия в процессе кристаллизации в заготовках, полученных на УНРС, отсутствуют усадочные раковины. Выход годной продукции может достигать 96...98% массы разливаемой стали; поверхность заготовок отличается высоким качеством, а металл слитков – плотным и однородным строением.

В РБ на РУП «БМЗ» в г. Жлобине используются радиальные шестиручьевые машины непрерывного литья заготовок 125×125 мм длиной до 12 м и криволинейная четырёхручьевая блюмовая МНЛЗ для заготовок 250×300 мм, 300×400 мм для конструкционных сталей и сталей для корда.

6.2. Внепечное повышение качества стали

Полученные в кислородных конвертерах, мартеновских и электрических печах стали не всегда удовлетворяют по своим свойствам требованиям современной техники. Для повышения их качества используют специальные технологические процессы **внепечного рафинирования** (очистки) и **рафинирующих переплавов**.

Внепечное рафинирование может осуществляться:

- путем вакуумирования струй или перемешиванием струи металла с синтетическим шлаком при выпуске металла из печи в сталеразливочный ковш;
- путем модифицирования металла в ковше вводом алюминия или кальцийсодержащих материалов в виде капсул или порошковой проволоки;
- путем продувки жидкого металла в ковше порошками кальцийсодержащих материалов, инертным газом, иногда с одновременным индукционным перемешиванием;
- путем вакуумирования жидкого металла вместе с ковшом или путем сочетания вакуумирования, введения порошковых материалов и продувочкой газами.

Из методов внепечного рафинирования наиболее широкое применение получила **обработка в вакууме и жидкими синтетическими шлаками**.

Вакуумную обработку применяют для уменьшения содержания в стали **растворенных газов и неметаллических включений**. Внепечное вакуумирование разделяется на 4 основных вида: **вакуумирование в ковше, вне ковша, в струе металла и в изложнице**.

Вакуумирование в ковше обычно проводят перед разливкой стали по изложницам. С этой целью выпущенную из мартеновских и электрических печей в разливочный ковш сталь выдерживают в течение 10...15 мин в специальных камерах с остаточным давлением 265...665 Па, из которых непрерывно удаляют воздух и газ. При понижении давления растворимость газов в стали (азота, водорода) уменьшается, и они в виде пузырьков всплывают на поверхность, захватывая с собой неметаллические включения. Вакуумная обработка позволяет уменьшить в 3...5 раз содержание газов и в 2...3 раза количество неметаллических включений в стали, что способствует повышению ее прочности и пластичности.

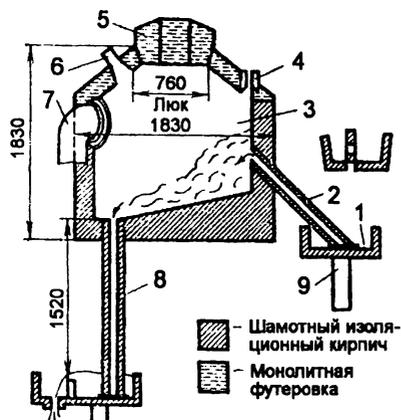
При **вакуумировании вне ковша** сталь из ковша поступает в резервуар с внутренней огнеупорной футеровкой, в котором происходит не только вакуумирование, но и подогрев металла, что позволяет увеличить время выдержки под вакуумом, не опасаясь охлаждения стали. После дегазации стали выливают обратно в ковш. Остаточное давление в камере от 265...665 Па.

Вакуумирование в струе получило более широкое распространение, чем в ковше. Внутри герметичной камеры установлен разливочный ковш, в который сталь поступает из раздаточного ковша. Разливку по изложницам ведут на воздухе. В ре-

зультате такой обработки содержание кислорода снижается на 70%, водорода на 65%. Существует много разновидностей этого способа вакуумирования.

Вакуумирование в изложнице проводят при застывании в ней стали. Для этого на изложницу устанавливают вакуумную камеру, на нее промежуточный ковш (дозатор), дно которого сделано из легкоплавкого материала. Жидкая сталь расплавляет диск дна, которое закрывает отверстие в верхней части камеры и сталь, проходя через вакуумную камеру, попадает в изложницу. Содержание водорода уменьшается в 4...5 раз (до 0,0001%), кислорода на 60%.

В настоящее время разработаны новые методы вакуумной обработки металла, сочетающие непрерывную разливку с вакуумированием (рис. 28).



- 1 – промежуточное устройство; 2 – патрубок;
- 3 – футерованная вакуумная камера;
- 4 – отвод для газовой горелки; 5 – футеровка;
- 6 – глазок для наблюдения за процессом;
- 7 – труба для отвода воздуха и газов;
- 8 – патрубок к УНРС; 9 – плунжер

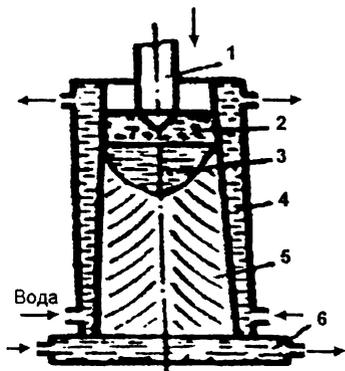
Рисунок 28 – Установка для непрерывного вакуумирования стали

Жидкая сталь из промежуточного устройства 1 всасывается по патрубку 2 в футерованную вакуумную камеру 3 и сливается по патрубку 2 в другое промежуточное устройство 8, из которого ее можно разливать непосредственно в изложницу, в ковш или в кристаллизатор установки непрерывной разливки. Перед вакуумированием камеру и футеровку 5 нагревают до максимально допустимой температуры при помощи горелки. После разогрева горелку отводят и камеру герметизируют: патрубок 2 закрывают легкоплавким диском, а патрубок 8 – жидким стеклом. Воздух и газы отсасывают через трубу 7. Промежуточные устройства устанавливают в рабочее положение при помощи плунжеров 9. Для наблюдения за процессом имеется глазок 6. По окончании вакуумирования в камеру подают азот, вытесняя из нее остатки металла и предотвращая образование взрывоопасной газовой смеси.

Обработка стали синтетическими шлаками заключается в следующем. В ковш, перед выпуском стали из печи, наливают небольшое количество (3...5% по отношению к массе стали) жидкого шлака, содержащего 55% CaO, 42% Al₂O₃, до 3% SiO₂ и 1% FeO. Затем в ковш с большой высоты мощной струёй выпускают выплавленную сталь. В результате интенсивного перемешивания стали и шлака поверхность их взаимодействия увеличивается в сотни раз по сравнению с той, которая имеется в печи. Поэтому процессы рафинирования резко ускоряются и для их протекания требуется уже не 1,5...2 ч, как обычно в печи, а примерно столько, сколько уходит на выпуск плавки. Сталь, обработанная синтетическим шлаком, имеет пониженное содержание кислорода, серы и неметаллических включений, что обеспечивает высокую пластичность и ударную вязкость.

Рафинирующий перегрев стали чаще всего осуществляется электрошлаковым, вакуумно-дуговым, плазменно-дуговым и электронно-лучевым методами.

Электрошлаковый переплав (ЭШП) разработан в Институте электросварки им. Е.А.Патона (рис. 29). Переплаваемая сталь в виде круглых прутков **1** подается в шлаковую ванну **2**. Через шлаковую ванну, обладающую высоким электрическим сопротивлением, пропускается электрический ток, что генерирует в ней тепло, достаточное для расплавления электрода. Капли расплавленного металла, проходя через слой основного шлака (60...65% CaF_2 , 25...30% Al_2O_3 , CaO и другие добавки), очищаются от кислорода, серы и металлических включений, собираются в ванне **3** и затвердевают в водоохлаждаемой изложнице – кристаллизаторе **4**, образуя слиток **5**. Кристаллизация переплавленного металла происходит последовательно и направлена снизу вверх, что также способствует удалению неметаллических включений, пузырьков газов и повышению однородности структуры и плотности слитка. После завершения переплава поддон **6** опускают и затвердевший слиток извлекают из изложницы.



- 1 – круглый пруток переплаваемой стали;
- 2 – шлаковая ванна; 3 – ванна переплавленной стали; 4 – водоохлаждаемая изложница;
- 5 – слиток переплавленной стали;
- 6 – водоохлаждаемый поддон

Рисунок 29 – Схема электрошлакового переплава

Современные установки ЭШП позволяют получать слитки различного сечения (в том числе трубчатого) массой до 100 т.

Вакуумно-дуговой переплав (ВДП) осуществляется в вакуумных дуговых печах с расходуемым электродом. Слиток образуется как и при ЭШП, в водоохлаждаемом кристаллизаторе – изложнице. Наличие вакуума в корпусе печи способствует дегазации капель переплаваемого металла и жидкого металла ванны, а направленная кристаллизация обеспечивает удаление неметаллических включений и получение плотной структуры в слитке с минимальной усадочной раковинкой. Вместимость печей для ВДП достигает 50 т.

Плазменно-дуговой переплав (ПДП) применяется для получения сталей и сплавов особо высокой чистоты. Источником тепла в установке служит плазменная струя, совмещенная со столбом электрической дуги с температурой 10000...20000°С. Исходным металлом для получения слитков служат стружка и другие отходы металлообрабатывающей промышленности. Металл плавится и затвердевает в водоохлаждаемом кристаллизаторе, а образующийся слиток вытягивается вниз. Переплав ведут в нейтральной атмосфере (аргон, гелий). Это обстоятельство, а также высокая температура обеспечивают дегазацию металла и удаление из него неметаллических включений, серы и фосфора.

Электронно-лучевой переплав (ЭЛП) осуществляется в вакуумных установках за счет тепла, образующегося в результате торможения в переплаваемом металле потока электронов, сформированного в электронных пушках. Затвердевание слитка происходит в водоохлаждаемом кристаллизаторе. Глубокий вакуум (до 0,001 Па) и благоприятные условия затвердевания обеспечивают получение особо чистого высококачественного металла. ЭЛП применяют для очистки сталей и сплавов и получения особо чистых тугоплавких металлов.

7. СТАЛИ И ЧУГУНЫ

7.1. Стали

7.1.1. Классификация сталей

Стали – это железуглеродистые сплавы, в которых содержится от 0,02% С до 2,14% С.

Стали классифицируются по качеству, химическому составу, назначению, степени раскисленности, структуре и т.д.

По качеству, которое формируется в основном на стадии выплавки и определяется содержанием таких вредных примесей, как сера и фосфор, стали бывают:

обыкновенного качества (массовая доля серы не более 0,05% и фосфора – до 0,040%);

качественные (массовая доля серы до 0,035% и фосфора – до 0,035%);

высококачественные (массовая доля серы до 0,025% и фосфора – до 0,025%);

особовысококачественные (массовая доля серы до 0,015% и фосфора – до 0,025%).

В зависимости от условий и степени раскисления различают **спокойные** (сп), **кипящие** (кп) и **полуспокойные** (пс) стали.

По химическому составу стали делятся на углеродистые и легированные.

В углеродистых сталях решающее влияние на их свойства оказывает содержание углерода. Присеи Mn и Si в пределах 0,8...1% практически не оказывают влияния на механические свойства стали. В зависимости от содержания углерода стали делят на **малоуглеродистые** (массовая доля углерода до 0,25%), **среднеуглеродистые** (массовая доля углерода 0,25...0,55%), **высокоуглеродистые** (массовая доля углерода 0,60...1,3%).

Легированными называются стали, в которых кроме обычных примесей и углерода содержатся специально вводимые в определенных сочетаниях легирующие элементы (хром, никель, молибден, ванадий, вольфрам, алюминий, бор, титан и др.), а также марганец и кремний в количествах, превышающих обычное их содержание (1% и выше). Легированные стали в зависимости от содержания легирующих элементов делятся на **низколегированные** (с содержанием легирующих элементов в сумме не более 2,5...3%), **легированные** (с содержанием легирующих элементов 2,5...10%) и **высоколегированные** (с содержанием легирующих элементов свыше 10%).

Легирующие элементы оказывают разнообразное влияние на свойства стали. Хром повышает твердость, коррозионную стойкость; никель – прочность, пластичность, коррозионную стойкость; вольфрам – твердость и красностойкость; ванадий – плотность, прочность, сопротивление удару, истиранию; кобальт – жаропрочность, магнитопроницаемость; молибден – красностойкость, прочность, сопротивление окислению при высоких температурах; марганец при содержании выше 1% – твердость, износостойкость, сопротивление разрушению при ударных нагрузках; титан – прочность, сопротивление коррозии; алюминий – окалиностойкость; ниобий – кислотостойкость; медь уменьшает коррозию. В сталь вводят также бор, селен, цирконий.

Легирующие элементы, растворяясь в железе, искажают и нарушают симметрию его кристаллической решетки и строение внешних электронных оболочек, что упрочняет феррит. Значительно большее упрочнение стали достигается при введении карбидообразующих легирующих элементов, которые образуют сложные карбиды, что меняет содержание и количество карбидной фазы.

Многие легирующие элементы способствуют измельчению зерен феррита, что значительно увеличивает вязкость стали. Некоторые легирующие элементы расширяют область аустенита, а другие, наоборот, сужают эту область. Большое значение

на практике имеет способность ряда легирующих элементов повышать прокаливаемость стали на значительную толщину, задерживая переход аустенита в другие структуры, что создает возможность закалки стали при умеренных скоростях охлаждения. При этом уменьшаются внутренние напряжения и снижается опасность образования закалочных трещин. В таблице 2 показано влияние главных легирующих элементов на свойства сталей.

Таблица 2 – Влияние легирующих элементов на свойства сталей

Характеристика сталей	Легирующие элементы							
	C	Cr	Ni	Mn	Si	W	V	Cu
Временное сопротивление	+	+	+	+	+	+	+	+
Предел текучести	+	+	+	+	+	+	+	+
Относительное удлинение	-	0	0	-	-	-	-	0
Твердость	+	+	+	+	+	+	+	0
Ударная вязкость	-	+	+	-	-	-	0	0
Усталостная прочность	+	0	0	0	0	0	++	0
Свариваемость	-	0	0	0	-	0	+	-
Стойкость против коррозии	0	+	0	+	-	0	+	++
Хладноломкость	0	-	-	0	0	-	0	-
Красноломкость	+	0	0	+	+	-	0	0
Упрочнение твердого раствора на базе Fe	+	+	+	+	+	-	0	+
Расширяет область аустенита	+	-	+	+	-	-	-	-
Сужает область аустенита	-	+	-	-	+	-	-	-
Увеличивает прокаливаемость	+	-	+	+	-	-	+	-
Образует устойчивые карбиды	+	+	-	+	-	+	+	-

Условные обозначения: "+" – повышает; "++" – значительно повышает, "-" – снижает; "0" – не влияет.

Легированные стали маркируют цифрами и буквами, например, 15X, 10Г2СД, 16Г2АФ, 20Х2Н4А и т.д. Двухзначные цифры, приводимые в начале марки, указывают среднее содержание углерода в сотых долях процента, буквы русского алфавита обозначают легирующий элемент: А – азот (*N*) только в середине обозначения, Б – ниобий (*Nb*), В – вольфрам (*W*), Г – марганец (*Mn*), Д – медь (*Cu*), Е – селен (*Se*), К – кобальт (*Co*), Н – никель (*Ni*), М – молибден (*Mo*), П – фосфор (*P*), Р – бор (*B*), С – кремний (*Si*), Т – титан (*Ti*), Ф – ванадий (*V*), Х – хром (*Cr*), Ц – цирконий (*Zr*), Ч – редкоземельный, Ю – алюминий (*Al*).

Цифры после буквы указывают примерное содержание соответствующего легирующего элемента в целых процентах; отсутствие цифры указывает, что оно составляет до 1% и менее.

Основная масса легированных сталей выплавляется **качественной**.

Высококачественные стали содержат меньше вредных примесей и обозначаются буквой А, помещенной в конце обозначения марки.

Особовысококачественные стали в конце марки имеют буквенное обозначение, характеризующее способ очистки от вредных примесей. Например, 30ХГС-ЭШ: буквы "ЭШ" обозначают, что сталь подверглась электрошлаковому переплаву.

По назначению стали подразделяют на **конструкционные, инструментальные** и **стали специального назначения**.

7.1.2. Конструкционные стали

Конструкционными называются стали, применяемые для изготовления конструкций и сооружений, деталей машин и механизмов. Эти стали могут быть как углеродистыми, так и легированными. Содержание углерода в конструкционных сталях не превышает 0,5...0,6%. Конструкционные стали должны иметь высокие механические свойства, определяемые при стандартных испытаниях и конструктивную прочность,

т.е. прочность, которая находится в наибольшем соответствии со служебными свойствами данного изделия. К свойствам, определяющим надежность материала в отношении внезапных разрушений, относится работа распространения вязкой трещины, (критическое значение коэффициента интенсивности напряжений в вершине трещины), температура порога хладноломкости. Долговечность изделий определяется сопротивлением усталости, коррозии и износу.

Конструкционная сталь должна обладать и хорошими технологическими свойствами – легко обрабатываться давлением, резанием, свариваться, максимально прокаливаться и т.д.

Конструкционная сталь поставляется горячекатаной и холоднокатаной в виде листов, полос, сортовых и фасонных профилей, гнутых профилей и др.

7.1.2.1. Углеродистые конструкционные стали

Углеродистые конструкционные стали выпускают обыкновенного качества и качественными. Углеродистые стали обыкновенного качества – наиболее дешевые. В процессе выплавки их меньше очищают от вредных примесей и поэтому они содержат больше количества неметаллических включений.

Углеродистую сталь обыкновенного качества по ГОСТ 380 изготавливают следующих марок: Ст0, Ст1кп, Ст1пс, Ст1сп, Ст2кп, Ст2пс, Ст2сп, Ст3кп, Ст3пс, Ст3сп, Ст3Гпс, Ст3Гсп, Ст4кп, Ст4пс, Ст4сп, Ст5пс, Ст5сп, Ст5Гпс, Ст6пс, Ст6сп. Буквы "Ст" обозначают "сталь", **цифры** – условный номер марки в зависимости от химического состава стали, буквы "кп", "пс", "сп" – способ и степень раскисления; буква "Г" свидетельствует о повышенном содержании марганца (до 0,8...1,2%).

Структура сталей обыкновенного качества – феррит + перлит. Чем выше условный номер марки, тем больше в стали углерода и перлита, тем выше ее прочность и ниже пластичность.

В зависимости от вида конструкций и условий их эксплуатации к стали могут предъявляться разные требования. Поэтому прокат углеродистых сталей обыкновенного качества поставляется по **шести категориям**. Для обозначения категорий к обозначению марки стали добавляют номер категории, например, Ст3пс1, Ст3сп5 и т.д.

При поставке по любой из шести категорий гарантируется химический состав сталей в соответствии с ГОСТ 380, предел прочности, предел текучести, относительное удлинение, сопротивление изгибу в холодном состоянии. Ударная вязкость нормируется для 3^{ей} категории при температуре +20°C, для 4^{ей} – при -20°C, для 5^{ей} – при -20°C и после механического старения и для 6^{ей} категории – после механического старения.

Механические свойства проката зависят от толщины и регулируются термической обработкой. По желанию потребителя может обеспечиваться свариваемость сталей путем соблюдения требований по химическому составу и механическим свойствам. Листовые стали (категории 1...5) поставляются в горячекатаном состоянии, а категории "6" – в упрочненном. В сталях, предназначенных для сварных конструкций, массовая доля углерода не должна превышать 0,22%.

Качественные углеродистые стали по ГОСТ 1050 выпускаются марок 08, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 58 и 60, диаметром или толщиной не более 250 мм и могут быть спокойными (сп), полуспокойными (пс) и кипящими (кп). Эти стали содержат не более 0,035% S и 0,035% P. Их структура – феррит и перлит. Чем больше в стали углерода, тем больше в структуре перлита, тем выше ее прочностные свойства и ниже пластичность.

В обозначении качественных углеродистых конструкционных сталей слово "сталь" или "Ст" не пишется, а ставятся **двузначные цифры**, показывающие содержание углерода в сотых долях процента.

Прокат сталей обыкновенного качества может поставляться нетермообработанным, калиброванным и со специальной отделкой поверхности; нагартованным ("Н") или термообработанным ("Т") – нормализованным, отожженным или высокоотпущенным, нормализованным с отпуском, закаленным с отпуском. По качеству поверхности прокат относится к одной из двух групп: преимущественно для горячей обработки давлением или преимущественно для холодной механической обработки. По согласованию с потребителями прокат может поставляться с гарантированным химическим составом, нагартованным или термообработанным, с контролем тех или иных механических свойств, с нормированной величиной аустенитного зерна и т.д.

Стали марок 05кп, 08кп, 08, 10 используются для изготовления деталей сложной конфигурации методом холодной штамповки.

Стали марок 15, 20, 25 применяют для изготовления труб малых диаметров, используемых для строительства газонефтепроводов и решетчатых строительных конструкций, а также для изготовления болтов, гаек, пальцев, валов, осей, крюков и других деталей неотчетливого назначения. Если последние работают в условиях поверхностного износа, их подвергают поверхностному упрочнению цементацией или цианированием. Для строительных конструкций применяют также качественные стали марок 18кп, 18пс, 18сп, 18Гпс, 18Гсп, выпускаемые по ГОСТ 23570 "Прокат из стали углеродистой свариваемой для строительных металлических конструкций".

Среднеуглеродистые стали 30, 35, 40, 45 применяют для деталей с высокой прочностью на поверхности и вязкой сердцевиной (втулки, тяги, шатуны, коленвалы, оси, шайбы и др.). Стали с большим содержанием углерода марок 55 и 60 используют для деталей, работающих в тяжелых условиях трения и вибраций (прокатных валков), пружин и рессор. В этих случаях для получения нужного комплекса свойств стали подвергают термической и химико-термической обработке.

7.1.2.2. Конструкционные низколегированные строительные стали

По сравнению с углеродистыми сталями низколегированные строительные стали имеют более высокие механические свойства. Это достигается упрочнением феррита за счет легирования сравнительно небольшими количествами кремния (до 0,60%), марганца (до 1,7%), хрома (до 0,5%), никеля (до 1,75%), меди (до 0,3%) и некоторыми другими элементами.

В строительных конструкциях, магистральных нефте- и газопроводах, резервуарах и др. низколегированные стали применяют в горячекатаном или термоупрочненном состоянии.

Термоупрочнение осуществляется нормализацией либо закалкой и высоким отпуском. Горячекатаные и нормализованные стали имеют структуру феррита и перлита, улучшенные – структуру сорбита отпуска.

Соединения элементов строительных конструкций обычно выполняют сваркой. Поэтому одним из основных требований, предъявляемых к строительным сталям, является хорошая свариваемость. Это предполагает, что при сварке сталей не должны образовываться горячие и холодные трещины, а механические свойства шва и околошовной зоны (зоны термического влияния) не должны существенно отличаться от свойств свариваемой стали.

Склонность к образованию горячих и холодных трещин, степень снижения механических свойств в зоне термического влияния увеличивается с ростом содержания углерода в стали. Поэтому массовая доля углерода в низколегированных строительных сталях не должна превышать 0,22%.

К низколегированным строительным сталям относятся стали марок 09Г2, 09Г2С, 09Г2Д, 14Г2, 17ГС, 10Г2С1, 10ХСНД, 10ХСНДП, 15ХСНД, 14Г2АФ, 16Г2АФ, 12Г2СМФ, 12ГН2МФАЮ и др. Введение в сталь никеля и меди (например, 15ХСНД) понижает температурный порог перехода в охрупченное состояние до -60°С, увеличивает коррозионную стойкость стали в атмосферных условиях.

Легирование стали небольшими количествами ванадия и ниобия (до 0,15%) в сочетании с азотом (до 0,025%) (14Г2АФ, 16Г2АФ, 17Г2АФБ и др.) приводит к образованию равномерно распределенных мелкодисперсных карбонитридов ванадия и ниобия. Это обеспечивает рост механических свойств за счет измельчения зерна и дисперсионного упрочнения, так как карбонитриды тормозят рост аустенитного зерна при нагреве и являются барьерами для движения дислокаций при пластической деформации.

Дополнительное повышение механических свойств и снижение порога хладноломкости может быть достигнуто с помощью контролируемой прокатки. Контролируемая прокатка состоит в проведении деформации, особенно в конце процесса, при более низкой, чем при горячей прокатке, температуре (800...850°С), с увеличением степени деформации в последних проходах. Такой режим прокатки для низколегированных сталей является по сути высокотемпературной термомеханической обработкой (ВТМО). Контролируемую прокатку проводят для сталей с карбонитридным упрочнением и бейнитных сталей. Высокие механические свойства после контролируемой прокатки объясняются дисперсионным упрочнением, получением мелкого зерна за счет торможения карбонитридами процессов возврата и рекристаллизации и получением развитой субзеренной структуры. В бейнитных сталях (08Г2МФБ), кроме того, имеет место упрочнение, обусловленное фазовым наклепом.

Применение низколегированных сталей взамен углеродистых позволяет экономить 15...50% металла.

7.1.2.3. Классификация строительных сталей по прочности и области их применения

Горячекатаный фасонный прокат (уголки, двутавры, швеллеры), листовой, широкополосный универсальный прокат и гнутые профили из углеродистых и низколегированных сталей, предназначенных для сварных строительных конструкций, в соответствии с ГОСТ 27772 подразделяют на условные классы вне зависимости от химического состава и марки стали, принимая во внимание только их механические свойства при растяжении.

Строительные стали в зависимости от уровня прочностных свойств условно классифицируют на стали обычной прочности (предел текучести до 290 МПа), стали повышенной прочности (от 290 до 440 МПа) и стали высокой прочности (от 440 и выше).

К группе сталей обычной прочности относятся малоуглеродистые стали обыкновенного качества марок Ст3 и СтЗГ и качественные стали марок 18 и 18Г. Строительную сталь повышенной прочности получают путем термического упрочнения малоуглеродистых сталей (СтЗТ) или использования низколегированных сталей, причем стали С345 и С375 обычно изготавливают в горячекатаном состоянии, а С390 – в нормализованном или улучшенном состоянии. Группа строительных сталей высокой прочности включает стали С440 и С590. Первая может поставляться в нормализованном или улучшенном состоянии, вторая – только после термоупрочнения улучшением (закалки и высокого отпуска).

В маркировке буква «С» означает сталь строительную, цифры обозначают предел текучести, буквы «К», «Д» – вариант химического состава.

В зависимости от нормируемых свойств (химического состава, предела прочности, предела текучести, относительного удлинения, угла загиба, ударной вязкости при различных температурах и после механического старения) низколегированные строительные стали подразделяют на 15 категорий.

Выбор марок сталей для строительных конструкций осуществляют на основе вариантного проектирования и технико-экономического анализа в соответствии с рекомендациями строительных норм и правил (СНиП II-23-81*). Рекомендации СНиП учитывают различия в условиях работы конструкций, которые подразделяются на четыре группы.

После сварки низколегированные стали для снятия напряжений могут подвергаться высокому отпуску при 630...700°С.

7.1.3. Инструментальные стали и сплавы

По назначению **инструментальные материалы** классифицируют на стали и сплавы для **режущего, штампового и измерительного инструментов**.

Инструментальные стали содержат повышенное количество углерода (0,7...1,5%). В зависимости от степени легирования их делят на углеродистые, легированные и высоколегированные. В качестве инструментальных материалов используются также металлокерамические твердые сплавы и сверхтвердые материалы – алмаз, кубический нитрид бора и др.

Рабочие кромки при эксплуатации инструмента (особенно режущего и штампового) испытывают высокие контактные давления, что вызывает их разогрев и изнашивание. В связи с этим важнейшее условие работоспособности инструментов – **высокая износостойкость**. Для исключения пластического течения (затупления) рабочих кромок инструментальный материал должен обладать высокой твердостью и теплоустойчивостью. Под **теплоустойчивостью** понимают способность материала сохранять стабильную структуру и высокую твердость при повышенных температурах. Она оценивается по наибольшей температуре нагрева, до которой сохраняются без существенного изменения структура, высокая твердость и износостойкость.

Работа многих инструментов сопряжена с возникновением высоких статических напряжений, чаще всего от изгиба и кручения. Поэтому инструментальный материал должен иметь высокую прочность. Для штампов, фрез и других инструментов характерно ударное нагружение. В этом случае важное значение имеет **вязкость материала**.

Кроме служебных, для инструментальных материалов важными являются **технологические свойства**: прокаливаемость, величина объемных изменений при залке, обрабатываемость давлением, резанием, шлифуемость и т.д.

7.1.4. Специальные стали

В группу **специальных сталей** обычно включают высоколегированные стали, обладающие особыми свойствами – **коррозионной стойкостью, жаростойкостью, жаропрочностью, износостойкостью, высокими упругими свойствами** и др.

7.1.4.1. Коррозионно стойкие стали

Коррозионно стойкой (или нержавеющей) называют сталь, **обладающую высокой химической стойкостью в агрессивных средах**. Коррозионно стойкие стали получают легированием низко- и среднеуглеродистых сталей хромом, никелем, титаном, алюминием и марганцем. Антикоррозионные свойства сталям придает введение в них большого количества хрома и никеля. Наибольшее распространение получили хромистые и хромоникелевые стали.

7.1.4.2. Жаропрочные стали

Повышение температуры не только сильно понижает прочностные свойства металлов, но и вызывает такие специфические явления, как **ползучесть** (часто для обозначения этого эффекта используется термин "крип"). Ползучесть проявляется в том, что при условии, когда в материале, нагруженном при повышенных температурах, создаются напряжения, даже не превышающие предела текучести, и материал остается под нагрузкой длительное время, то в течение всего действия температуры и напряжения он деформируется (ползет) с определенной скоростью. Развитие ползучести может вызвать разрушение металла.

Сопротивление металла ползучести и разрушению в области высоких температур при длительном действии нагрузки называют жаропрочностью. Жаропрочность характеризуется условным **пределом ползучести** и **пределом длительной прочности**.

Условный предел ползучести – это напряжение, при котором при заданной температуре и времени испытания произойдет удлинение образца на заданную величину или установится заданная скорость деформации (ползучести).

Предел длительной прочности – это напряжение, вызывающее разрушение металла при определенной температуре за заданный отрезок времени.

Жаропрочность сплавов достигают:

- легированием твердых растворов, при котором обеспечивается увеличение энергии связи между атомами, снижение скорости диффузии и как следствие - повышение температуры рекристаллизации;
- созданием у сплавов специальной структуры, состоящей из вкрапленных в основной твердый раствор и по границам зерен дисперсных карбидных и инерметаллидных фаз. Такая структура получается в результате закалки с высоких температур и последующего старения в области, близкой к рабочим температурам. Наличие равномерно распределенных дисперсных избыточных фаз затрудняет пластическую деформацию при высоких температурах;
- увеличением размеров зерна.

7.2. Чугуны

Чугуны – это железоуглеродистые сплавы, в которых содержится более 2,14% С.

В лабораторной работе №1 мы рассматривали так называемые белые чугуны, в которых весь углерод находится в связанном состоянии в составе цементита.

Свое название белые чугуны получили из-за характерного светло-матового цвета в изломе. Белые чугуны обладают высокой твердостью и хрупкостью. Они практически не поддаются обработке резанием и используются для последующего передела в сталь или ковкий чугун.

Специальным легированием и (или) замедленным охлаждением можно создать условия, при которых кристаллизация чугунов будет сопровождаться выделением из железоуглеродистого расплава углерода в свободном состоянии в виде графита, или (и) получают развитие процессы распада цементита с выделением структурно свободного графита по реакциям $\text{Ц} \rightarrow \text{А} + \text{Г}$; $\text{Ц} \rightarrow \text{Ф} + \text{Г}$.

Такие чугуны, в которых весь углерод либо его значительная часть находятся в свободном состоянии – в виде графита (Г), называются **графитизированными** или **серыми**. Последнее название (серые чугуны) обусловлено также более темным цветом излома по сравнению с светло-матовым цветом излома белых чугунов.

Таким образом, структура серых чугунов состоит из металлической основы и графитовых включений (рис. 30). В зависимости от степени развития графитизации меняется характер металлической основы, и по этому признаку серые чугуны разделяют на перлитные, ферритоперлитные и ферритные.

Перлитные чугуны. Структура их состоит из перлита и включений графита. Перлит содержит 0,83% С; следовательно, это количество углерода находится в связанном состоянии, остальной углерод находится в свободном виде, т.е. в форме графита.

Ферритоперлитные чугуны. Структура их состоит из феррита, перлита и включений графита. В этих чугунах количество связанного углерода меньше 0,83%.

Ферритные чугуны. В этих чугунах металлической основой является феррит, а практически весь углерод, имеющийся в сплаве, присутствует в форме графита (количество связанного углерода < 0,1%).

Из рассмотрения структур указанных трех видов чугунов можно сделать вывод, что их металлическая основа похожа на структуры технического железа, дозвтектоидной и эвтектоидной стали. Следовательно, по структуре серые чугуны отличаются от стали только тем, что в них имеются графитовые включения, предопределяющие специфические свойства чугунов.

Металлическая основа	Форма графитовых включений			
	Пластинчатая	Вермикулярная	Хлопьевидная	Шаровидная
Феррит				
Феррит+перлит				
Перлит				

Рисунок 30 – Классификация чугуна по структуре металлической основы и форме графитовых включений

Графит в чугунах может быть в четырех основных формах:

- в виде лепестков, пластинок – **пластинчатый графит**;
- в виде червеобразных прожилок – **вермикулярный графит**;
- в виде округлых включений – **шаровидный графит**;
- в виде равноосных компактных, но не округлых форм – **хлопьевидный графит**.

Свойства чугунов зависят от свойств металлической основы, количества и характера графитовых включений.

Графит по сравнению со сталью обладает худшими механическими свойствами, и поэтому графитовые включения можно рассматривать как своеобразные пустоты, надрезы или микротрещины, т.е. чугун можно рассматривать как сталь, испещренную большим количеством пустот и трещин. Чем больший объем занимают графитовые включения (пустоты), тем ниже механические свойства чугунов. При равном объеме пустот лучшие свойства будут у чугунов с более мелкими округлыми дисперсными графитовыми включениями. Самые плохие механические свойства отмечаются в случаях, когда графитовые включения образуют замкнутый скелет.

Чугун имеет низкую прочность в условиях действия растягивающих напряжений, так как графитовые включения, особенно пластинчатые, облегчают развитие трещин. В условиях сжатия прочность чугуна соизмерима с прочностью металлической основы, поскольку чувствительность к концентраторам напряжений, создаваемых графитовыми включениями, в условиях действия сжимающих напряжений значительно ниже.

Пластичность чугунов в основном зависит от формы графитовых включений и растет по порядку по мере перехода от пластинчатых к шаровидным включениям. Так, относительное удлинение для чугунов с пластинчатыми включениями составляет 0,2...0,5%, чугунов с вермикулярным графитом – 1...1,5%, чугунов с хлопьевидным графитом – 5...10%, чугунов с шаровидным графитом – 10...15%.

Твердость чугунов не зависит от формы графита и определяется структурой металлической основы. У ферритных чугунов она составляет – 150 НВ, у феррито-перлитных – 200НВ и перлитных – 250НВ.

Наличие графитовых включений не только приводит к ослаблению металлической матрицы, но и определяет некоторые достоинства чугунов:

- облегчается обрабатываемость резанием по сравнению с белыми чугунами и сталью за счет повышения ломкости стружки на графитовых включениях;
- смазывающее действие графита обуславливает хорошие антифрикционные свойства чугуна;
- наличие графитовых включений обеспечивает высокую демпфирующую способность (т.е. способность гасить вибрации и резонансные колебания);
- наличие графитовых включений делает чугун нечувствительным к поверхностным дефектам.

По форме графита различают чугун с пластинчатым графитом – обычный серый чугун (СЧ), с червеобразным графитом – серый вермикулярный (ЧВГ), чугун с шаровидным графитом – высокопрочный (ВЧ) и чугун с хлопьевидным графитом – ковкий чугун (КЧ).

Серый чугун (ГОСТ 1412) маркируется буквами С – серый и Ч – чугун. После букв следуют цифры, указывающие минимальное значение временного сопротивления разрыву в 0,1 МПа (кгс/мм²). Предел прочности чугуна при изгибе приблизительно в два раза выше предела прочности при растяжении; в свою очередь, предел прочности при сжатии в 3...5 раз выше предела прочности при растяжении.

Стандарт предусматривает марки серых чугунов: СЧ10, СЧ15, СЧ18, СЧ20, СЧ21, СЧ24, СЧ25, СЧ30, СЧ35, СЧ40, СЧ45.

Чугун марки СЧ10 используют для строительных колонн и фундаментных плит и т.д., остальные – для литых деталей сельхозмашин, станков, автомобилей, тракторов и т.д.

В некоторых случаях ускоренным охлаждением на поверхности деталей из серых чугунов создаются отбеленные слои, т.е. слои, имеющие структуру белого чугуна. Они хорошо работают в условиях повышенного абразивного износа.

Высокопрочный чугун с шаровидным графитом (ГОСТ 7293) маркируют буквами ВЧ и цифрами, которые показывают минимальные значения временного сопротивления. В более ранней редакции стандарта указывались также значения относительного удлинения в процентах: например, ВЧ35, ВЧ40, ВЧ45, ВЧ50, ВЧ60, ВЧ70, ВЧ80, ВЧ100 (ранее ВЧ38-17, ВЧ42-12).

Высокопрочные чугуны изготавливают из низкосернистых и низкофосфористых серых чугунов путем модифицирования их магнием, церием или иттрием для получения графита шаровидной формы. Сочетание высокой прочности и пластичности позволяет изготавливать из этих чугунов ответственные детали автомобилей (коленчатые и распределительные валы), сельхозмашин (шестерни, звездочки, ступицы колес, шкивы, зубья борон, стойки корпусов плугов, опорные катки) и др.

Ковкий чугун с хлопьевидным графитом (ГОСТ 1215) маркируют буквами КЧ и цифрами. Первые две цифры указывают временное сопротивление, вторые – относительное удлинение в %. (Название "ковкий чугун" условное. Оно не обозначает, что такой чугун можно подвергать операциямковки, а свидетельствует о некотором повышении пластичности по сравнению с серыми и белыми чугунами.)

Ковкий чугун получают длительным нагревом при невысоких температурах (отжигом) отливок из белого чугуна. Отжиг проводят в две стадии. На первой стадии отливки нагревают и выдерживают при 950...970°С. В этот период происходит 1^я стадия графитизации, т.е. распад цементита, входящего в состав ледебурита Л(А+Ц). В результате распада цементита образуется хлопьевидный графит: Л(А+Ц) → Л(А+Гх).

Затем отливки охлаждают до температур, соответствующих интервалу эвтектоидного превращения. При охлаждении происходит выделение вторичного цемента из аустенита, его распад и в итоге – рост графитных включений: $A \rightarrow \text{Ц}_{\text{II}} \rightarrow (A+Гх)$.

При достижении эвтектоидного интервала температур (760...740°C) охлаждение резко замедляют и дают длительную выдержку при температуре несколько ниже указанного интервала (720°C). В этот период протекает 2^я стадия графитизации: распад аустенита с образованием ферритографитной структуры или распад цемента, входящего в состав перлита, с образованием феррита и графита (в процессе выдержки ниже эвтектоидной температуры). После окончания 2^{ой} стадии структура чугуна состоит из феррита и хлопьевидного графита.

Если не проводить выдержку ниже эвтектоидной температуры, то образуется ковкий ферритоперлитный чугун (П+Г), имеющий более светлый излом и меньшую пластичность, чем у ферритного ковкого чугуна.

Из отливок ковкого чугуна изготавливают детали с относительно тонкими стенками, работающие при ударных и вибрационных нагрузках. Так, ферритные ковкие чугуны марок КЧ37-12 и КЧ35-10 широко применяют в сельскохозяйственном машиностроении, а ферритоперлитные КЧ45-7, КЧ60-3 – для деталей, работающих в условиях износа.

Специальные чугуны. Целенаправленным легированием можно существенно изменять структуры металлической основы чугунов от ферритной до аустенитной и мартенситной и формировать у них особые эксплуатационные свойства, такие, как повышенная антифрикционность, износостойкость, жаростойкость и жаропрочность, коррозионная стойкость и т.д.

Соответственно в маркировке специальных чугунов появляются буквы, характеризующие их назначение: А – антифрикционные (АСЧ-1, АКЧ-1, АВЧ-2), а также буквы и цифры, характеризующие содержание специально вводимых легирующих элементов: например, ИЧХ4Г7Д – износостойкий чугун, легированный 4% Cr, 7% Mn и до 1% Cu; ЖЧХ2,5 – жаростойкий чугун, легированный 2,5% Cr; ЧН19Х3Ш – чугун никелевый жаропрочный с 19% Ni, 3% Cr с шаровидным графитом и т.д.

СВАРКА

8. ФИЗИЧЕСКАЯ СУЩНОСТЬ ПРОЦЕССА СВАРКИ

8.1. Образование соединений при сварке

Большинство металлов и металлических сплавов при комнатной температуре представляют собой кристаллические тела. Как известно, в кристаллах атомы располагаются в строго определенном порядке и на определенном расстоянии друг от друга. В металлических кристаллах это расстояние очень мало и колеблется в пределах 2...4 Å. Расстояние это настолько мало, что внешние валентные электроны движутся не только вокруг своего ядра, а начинают перескакивать на орбиты электронов соседних атомов, т.е. сближение атомов на это расстояние приводит к коллективизации электронов, характерной для металлов.

Известно, что одноименно заряженные частицы отталкиваются, а разноименно заряженные – притягиваются. Так как в металлах атомы отдают свои внешние электроны в общий "коллектив", то они теряют свою нейтральность и превращаются в положительно заряженные ионы, вокруг которых непрерывно движутся электроны. На эти положительные ионы действуют силы отталкивания и притяжения. Два соседних иона отталкиваются друг от друга, как одноименно заряженные частицы. А когда между ними проскакивает электрон, они притягиваются к электрону, т.е. электрон как бы стягивает соседние ионы.

Расстояние, вокруг которого колеблются положительные ионы в кристаллических телах, называется равновесным, с повышением температуры оно возрастает.

Атомы, расположенные в глубине тела, окружены большим количеством соседей, чем поверхностные атомы. Поэтому первые тратят больше энергии на взаимодействие с соседями, а поверхностные атомы имеют некоторый "излишек" энергии, которая называется *свободной*. Часть пути электроны поверхностных атомов проходят в пространстве, где силы электрического взаимодействия направлены только в одну сторону – в глубь тела. Если бы удалось изготовить металлическое тело с идеально гладкой поверхностью, на которой поверхностные атомы располагались бы на одной плоскости, то при сближении таких тел, вследствие проскакивания при поверхностных электронах через пространство над плоскостью, возникли бы силы притяжения. Когда расстояние между поверхностными атомами достигнет 2...4 Å, произойдет перекрытие электронных уровней, и валентные электроны одного куска металла будут свободно переходить в другой и наоборот, т.е. произойдет коллективизация электронов этих двух тел. При этом граница раздела между телами исчезнет и образуется неразъемное соединение, произойдет **сваривание металлов**.

В реальных условиях, как известно, получить такие неразъемные соединения путем простого сближения соединяемых поверхностей не удается. Это обусловлено **двумя причинами**.

Во-первых, поверхности реальных тел представляют собой чередующиеся микровыступы и впадины, высота и глубина которых зависит от способов обработки. Даже на хорошо отполированной поверхности высота неровностей превышает 1000 Å, т.е. на три порядка больше того расстояния, на котором в металлах начинает проявляться межатомное взаимодействие. Поэтому при контакте соприкосновение реальных тел происходит лишь в отдельных точках, площадь которых составляет 0,01...0,001 долю геометрической площади соприкосновения. И если даже возникнет электронное взаимодействие между атомами соединяемых тел в этих точках соприкосновения, суммарная величина этих сил будет очень мала и прочность соединения также окажется незначительной.

Во-вторых, поверхностные атомы, обладая свободной энергией, активно взаимодействуют с окружающей средой, образуя химические соединения (окислы, нитриды) и адсорбционные пленки влаги, масел и т.п. Толщина слоя продуктов взаимодействия поверхностных атомов с окружающей средой достигает десятков и сотен тысяч ангстрем. Эти слои препятствуют взаимодействию друг с другом поверхностных атомов соединяемых тел. Для соединения реальных металлических тел необходимо активировать свариваемые поверхности путем их очистки от окислов, нитридов, адсорбционных пленок, причем эта очистка должна производиться не только перед сваркой, но и в процессе сварки. Кроме того, надо обеспечить взаимодействие атомов не в отдельных точках, а по всей соединяемой поверхности.

В реальных условиях эти задачи решаются путем применения различных активных и защитных сред в зоне сварки (флюсы, газы, вакуум), смятием выступов путем сдавливания деталей, нагревом металла в зоне сварки и т.д.

Сварное соединение в принципе можно получить путем сжатия соединяемых деталей. При этом происходит смятие выступов и течение металла в зоне соединения деталей. В процессе течения металла окисные и адсорбционные пленки разрушаются и выжимаются на периферию сварного соединения. С повышением температуры металла в зоне соединения усилия, необходимые для сжатия, уменьшаются. При температуре выше $t_{пл}$ металл в зоне сварки переходит в жидкое состояние, и расплавленные участки соединяемых деталей под действием сил Ван-дер-Ваальса сливаются в общую ванночку, подобно тому как две капли любой жидкости при сближении объединяются в одну общую каплю.

Таким образом, с физической точки зрения, сваркой называется процесс образования неразъемного соединения двух или более тел за счет химического взаимодействия атомов соединяемых тел по поверхности соединения. Для осуществления этого процесса необходим источник тепловой и механической энергии, которая обеспечивает активацию и сближение поверхностных атомов. (ГОСТ 2601-84)

8.2. Классификация основных способов сварки

Сварка является одним из древнейших способов обработки металлов. Возникновение сварки относится к тем временам, когда человечество научилось добывать и применять металлы. Во время археологических раскопок найдены украшения из золота, серебра и платины, детали которых сварены еще в IV в. до н.э.; в развалинах Помпеи обнаружены свинцовые водопроводные трубы со сварными швами; средневековые кольчуги и оружие изготовлено из деталей, многие из которых соединены сваркой.

В настоящее время сварка стала одним из наиболее широко распространенных технологических процессов. Сейчас известно более 70 способов сварки. С помощью этого технологического процесса соединяют между собой не только различные металлы, их сплавы, но и некоторые керамические материалы, пластмассы, стекло, разнородные материалы. Сваривать можно металлы практически любой толщины. Прочность сварного соединения в большинстве случаев не уступает прочности целого металла. Сварку выполняют на земле, под водой и в космосе.

Все способы сварки в зависимости от состояния металла в зоне сварки делятся на две большие группы (см. рис. 31):

сварка в твердой фазе (сварка давлением), когда температура металла в зоне сварки не превышает температуру плавления;

сварка в жидкой фазе (сварка плавлением), когда металл в зоне сварки нагревается выше его температуры плавления.

В зависимости от вида энергии, применяемой при сварке, различают три типа процессов сварки: **термический, термомеханический, механический.**

К **термическому типу сварки** относятся способы сварки, осуществляемые плавлением металла соединяемых деталей в зоне сварки за счет тепловой энергии: дуговая, газовая, электрошлаковая, термитная, электронно-лучевая, плазменно-дуговая и др.



Рисунок 31 – Классификация основных способов сварки

Дуговая сварка – сварка плавлением, при которой нагрев осуществляется электрической дугой. Особым видом дуговой сварки является **плазменная сварка**, при которой нагрев осуществляется сжатой дугой.

Электрошлаковая сварка – сварка плавлением, при которой для нагрева металла используют теплоту, выделяющуюся при прохождении электрического тока через расплавленный электропроводный шлак.

Газовая сварка – сварка плавлением, при которой кромки соединяющихся частей нагревают пламенем газов, сжигаемых на выходе горелки для газовой сварки.

При **термитной сварке** используют теплоту, образующуюся в результате сжигания термита – порошка, состоящего из смеси алюминия и оксида железа.

К **термомеханическому типу сварки** относятся способы сварки, при которых используются тепловая энергия и механическое сдавливание свариваемых деталей: контактная электросварка, диффузионная, газопрессовая, индукционная и др.

Контактная сварка – сварка с применением давления, при которой нагрев осуществляют теплотой, выделяемой при прохождении электрического тока через находящиеся в контакте соединяемые части.

Диффузионная сварка – сварка давлением, осуществляемая взаимной диффузией атомов контактирующих частей при воздействии относительно повышенной температуры и при незначительной пластической деформации.

К механическому типу сварки относятся способы, осуществляемые с использованием механической энергии для нагрева и сдавливания свариваемых деталей: трением, взрывом, холодная и др.

Сварка трением – сварка давлением, при которой нагрев осуществляется трением, вызываемым вращением свариваемых частей относительно друг друга.

Ультразвуковая сварка – сварка давлением, осуществляемая при воздействии ультразвуковых колебаний.

Сварка взрывом – сварка, при которой соединение осуществляется в результате вызванного взрывом соударения быстро движущихся частей.

Холодная сварка – сварка давлением при незначительной пластической деформации, без внешнего нагрева соединяемых частей.

Современные способы сварки плавлением наряду с приведенной классификацией по виду источника тепла, применяемого для нагрева деталей, могут быть подразделены также:

в зависимости от времени действия источника тепла – сварка с непрерывным и импульсным нагревом;

по типу защиты сварочной ванны и свариваемого металла от окружающей среды – сварка со шлаковой, газошлаковой и газовой защитой;

по степени автоматизации процесса – ручная, полуавтоматическая, автоматическая сварка.

9. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ДУГОВОЙ СВАРКИ

9.1. Свойства сварочной дуги

9.1.1. Электрические свойства

Электрическая дуга представляет собой длительный и мощный разряд электричества, в процессе которого выделяется значительное количество тепловой и световой энергии. Обычно электрическая дуга горит в газовом пространстве между двумя электропроводными телами (электродами), находящимися на сравнительно небольшом расстоянии друг от друга.

По роду тока сварочные дуги называются **дугами постоянного и переменного тока**. При питании дуги постоянным током различают сварку на **прямой и обратной полярности**. В первом случае электрод подключается к отрицательному полюсу и служит катодом, а изделие – к положительному полюсу и служит анодом. На обратной полярности электрод подключается к положительному, а изделие – к отрицательному полюсу.

При питании переменным током полярность дуги меняется с частотой 50 Гц. В зависимости от числа электродов и способов включения электродов и свариваемой детали в электрическую цепь различают следующие виды сварочных дуг:

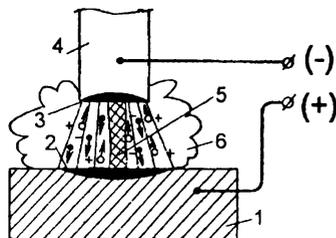
- **прямого действия**, когда дуга горит между электродом и изделием;
- **косвенного действия**, когда дуга горит между электродами, а свариваемое изделие не включено в электрическую цепь;
- **комбинированного действия**, когда трехфазная дуга возбуждается между двумя электродами, а также между каждым электродом и свариваемым изделием.

В нормальных условиях газы не пропускают электрический ток, но при наличии в них электрически заряженных частиц – электронов и ионов – становятся электропроводными.

Электрон – мельчайшая материальная частица с массой $9,1 \times 10^{-31}$ кг, несущая один отрицательный заряд электричества. Масса электрона во много раз меньше массы атома и, в частности, в 1840 раз меньше массы атома водорода.

Под действием разности потенциалов электроны движутся в газах с большой скоростью. Встречая на своем пути атомы или молекулы газа, электроны ударяются о них и, добавляя или отнимая отрицательный заряд, превращают их в ионы. При удалении с орбиты атома одного или нескольких электронов образуется положительный ион, при добавлении электронов – отрицательный.

В электрическом поле электроны и отрицательные ионы устремляются к положительному полюсу, а положительные ионы – к отрицательному. **Ионизация** обеспечивает необходимые условия для протекания через газ электрического тока и образования дугового разряда.



- 1 – свариваемое изделие; 2 – анодная область; 3 – катодная область;
- 4 – электрод; 5 – столб дуги;
- 6 – ореол пламени

Рисунок 32 – Схема строения электрической дуги

В электрической дуге постоянного тока, горящей между электродами 1 и 4 (рис. 32), различают три основных участка – катодную область 3, столб дуги 5 и анодную область 2. Дуга окружена ореолом пламени 6, представляющим собой раскаленную газозобразную смесь паров электродов и продуктов их реакции с окружающей газовой средой. Часть катодной области, излучающей электроны, называют катодным пятном. Плотность тока в нем очень высокая. Анодная область, расположенная у положительного электрода, бомбардируется электронами и отрицательными ионами; при этом происходит превращение энергии их движения в тепловую энергию.

Для начала процесса ионизации и возникновения дугового разряда необходимо поступление в газовую среду свободных электронов от внешнего источника. При сварке таким источником обычно является поверхность отрицательного электрода (катода).

Выход первичных электронов с поверхности катода обуславливается в основном термоэлектронной и автоэлектронной эмиссиями. Физическая сущность термоэлектронной эмиссии электронов заключается в том, что металл, нагретый до высокой температуры, приобретает способность излучать свободные электроны в окружающее пространство. Автоэлектронная эмиссия происходит за счет высокой напряженности электрического поля и не зависит от температуры нагрева катода.

Для зажигания дуги обычно пользуются термоэлектронной эмиссией, которая возникает при замыкании электродом сварочной цепи. Замыкание всегда происходит посредством микроскопических выступов, существующих на поверхности свариваемого металла и электрода. Большая плотность тока, приходящаяся на эти выступы, приводит к быстрому их нагреву до высокой температуры и возникновению мощной эмиссии электронов.

При последующем удалении конца электрода с поверхности изделия (на расстоянии 3...5 мм) этот поток электронов вызывает ионизацию газа в межэлектродном пространстве и возникновение дугового разряда. Во время горения дуги электропроводность газа увеличивается за счет паров металла электродов, нагрева газа, автоэлектронной эмиссии и других процессов.

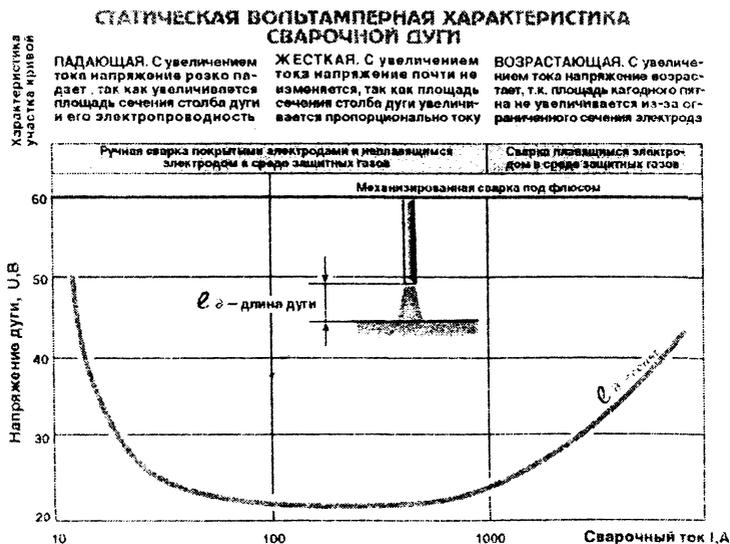


Рисунок 33 – Статическая вольтамперная характеристика сварочной дуги

Изменение электропроводности межэлектродного пространства оказывает решающее влияние на величину тока и напряжение электрической дуги.

Зависимость между напряжением дуги и величиной тока, выраженную графически, при постоянной длине дуги называют статической, или вольтамперной, характеристикой дуги.

Статические характеристики бывают падающие, жесткие и возрастающие (см. рис. 33).

Напряжение дуги при установившемся режиме не зависит от силы тока, а зависит только от длины дуги, которая при сварке плавящимся электродом может многократно меняться, что связано в значительной степени с процессами плавления и переноса металла.

По сравнению с рассмотренной выше дугой постоянного тока электрический режим дуги переменного тока обладает рядом существенных особенностей.

При перемене полярности в начале и конце полупериода, когда ток достигает нулевого значения, дуга угасает и температура катодного и анодного пятен снижается, что приводит к уменьшению электропроводности межэлектродного пространства.

Когда напряжение на дуге промежутке меняет полярность, происходит встречное движение ранее создавшихся и вновь образующихся ионов, что вызывает дополнительную деионизацию газов в столбе дуги. Повторное зажигание дуги в результате этого происходит при пиковом значении напряжения, которое выше напряжения стационарного горения дуги.

Наличие в дуге паров некоторых стабилизирующих элементов (например, мел, поташ, калиевая селитра) с низким потенциалом ионизации улучшает условия зажигания дуги переменного тока и обеспечивает устойчивое ее горение. Этим объясняется применение для сварки на переменном токе электродов со стабилизирующими покрытиями.

9.1.2. Тепловые свойства

Электрическая дуга, горящая в атмосфере (открытая дуга), является мощным и концентрированным источником тепла. Количество выделяемого тепла и температура на различных участках дуги не одинаковы и являются наибольшими в анодной (+) области (рис. 34).

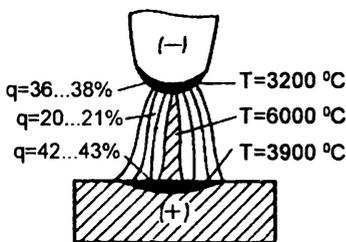


Рисунок 34 – Распределение температур T и количества тепла q , выделяемого электрической дугой

При использовании угольного электрода и постоянного тока в катодной области (-) выделяется 36...38% тепла и температура достигает 3200° С. В анодной области выделяется 42...43% тепла и температура ее близка 3900° С. Температура столба дуги в средней зоне составляет порядка 6000° С. При металлическом электроде температура в катодной области составляет около 2400, а в анодной — около 2600° С.

Неравномерным распределением тепла в дуге постоянного тока пользуются для регулирования скорости плавления основного или электродного металла, подводя их соответственно к катоду (-) или аноду (+) сварочной цепи.

При питании дуги переменным током распределение ее тепла и температуры в граничных участках электродов выравнивается в связи с периодической сменой местоположения катодной и анодной областей и примерно равно их среднему арифметическому значению.

Основными тепловыми характеристиками сварочной дуги является **тепловая мощность** и **погонная энергия**.

Полная тепловая мощность свободно горящей дуги, т.е. количество тепла, выделяемое дугой, приравнивается к тепловому эквиваленту ее электрической мощности.

Эффективная тепловая мощность сварочной дуги, т.е. количество теплоты, вводимое дугой в свариваемый металл в единицу времени, меньше полной тепловой мощности в связи с расходом тепла дуги на нагрев электрода, теплоотдачу в окружающую среду и потери на разбрызгивание электродного материала.

Погонной энергией дуги называют количество теплоты, вводимое в 1 см длины однопроходного шва или валика.

Погонная энергия является основным показателем для выбора режима сварки.

При дуговой сварке плавящимся электродом и при постоянном сечении однопроходного шва или валика многопроходного шва погонная энергия пропорциональна поперечному сечению однопроходного шва или валика.

9.1.3. Процессы плавления и переноса металла при дуговой сварке

Перенос электродного металла на изделие при дуговой сварке плавящимся электродом является сложным процессом (Рисунок 35). После зажигания дуги (положение I) на поверхности торца электрода образуется слой расплавленного металла, который под действием сил тяжести и поверхностного натяжения собирается в каплю (положение II). Капли могут достигать больших размеров и перекрывать столб дуги (положение III), создавая на непродолжительное время короткое замыкание сварочной цепи, после чего образовавшийся мостик из жидкого металла разрывается, дуга возникает вновь и процесс каплеобразования повторяется (положения I' и II').

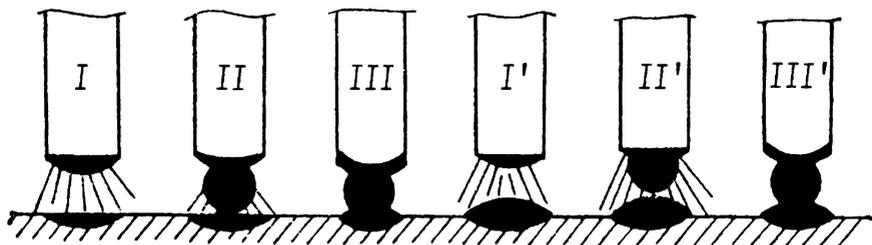


Рисунок 35 – Схема переноса металла с электрода на свариваемый металл

Размеры и количество капель, проходящих через дугу в единицу времени, зависят от полярности и силы тока, химического состава и физического состояния электродного металла (отожженный, наклепанный), состава покрытия и ряда других условий. Крупные капли, достигающие 3...4 мм, обычно образуются при сварке непокрытыми электродами, мелкие капли (до 0,1 мм) – при сварке покрытыми электродами и большой плотности тока.

Мелкокапельный процесс обеспечивает стабильность горения дуги и благоприятствует условиям переноса в дуге расплавленного металла электродов. При некоторых условиях (сварка в аргоне током выше критического) наблюдается струйный перенос.

Перенос капель жидкого электродного металла на свариваемый металл происходит под действием ряда факторов: сил тяжести и поверхностного натяжения, газового реактивного и внутреннего давления, электродинамических и электростатических сил.

Сила тяжести может способствовать или препятствовать переносу капель в дуге. При нижнем положении свариваемого металла (по отношению к электроду) сила тяжести способствует отрыву капли от торца плавящегося электрода и переносу ее на шов. При потолочной и частично при вертикальной сварке сила тяжести капли противодействует переносу ее на изделие.

Сила поверхностного натяжения стремится уменьшить величину поверхности жидкой капли и придать ей форму шара. В этой форме капля удерживается на конце электрода и перемещается в дуге до соприкосновения с поверхностью жидкой сварочной ванны, после чего вытягивается в общий контур ванны. Сила поверхностного натяжения удерживает жидкую ванну металла от вытекания при сварке в потолочном и вертикальном положениях.

Сила реактивного действия газов («газовое дутье») возникает за счет частичного превращения электродного металла в пары и расширения их под действием высокой температуры дуги, а также за счет давления газов при сгорании компонентов покрытия электрода. Эта сила направлена по оси электрода и способствует перемещению образовавшейся капли от электрода к ванне расплавленного металла. При наличии чехольчика на конце толстопокрытого электрода действие этой силы увеличивается.

Сила внутреннего газового давления возникает в каплях металла за счет газов, находящихся в растворенном или свободном состоянии, а также за счет поглощения жидким металлом газов в зоне дуги. С повышением температуры газы расширяются и разрывают каплю. Сила этих микроскопических взрывов независимо от положения шва в пространстве способствует перемещению капель через столб дуги и одновременно является причиной разбрызгивания металла.

Электродинамические и электростатические силы. Большое значение в процессе переноса капель с электрода на изделие имеют электродинамические силы. Напряженность электрического поля электрода всегда больше напряженности электрического поля зоны основного металла в связи с тем, что плотность тока на электроде превышает плотность тока на изделии. При таком неравномерном распределении напряжений электрических полей возникает продольная сила, действующая вдоль оси электрода от более высокой напряженности к более низкой (от электрода к изделию). Эта сила, сжимая жидкий металл у торца электрода, способствует отделению капель и переносу их в сварочную ванну.

Электростатическая сила действует перпендикулярно к поверхности катодного пятна и направлена в сторону столба дуги. Она зависит от силы тока, доли ионной составляющей тока на катод, катодного падения напряжения, а также природы паров и газов в катодной области. Величина электростатической силы соизмерима с другими силами, участвующими в переносе металла.

Современное состояние сварочной техники позволяет управлять процессами переноса металла через дугу. Это достигается применением **импульсно-дуговой сварки**, при которой ток периодически изменяют импульсами по заданной программе. При этом способе сварки часто используют непрерывно горящую дежурную сварочную дугу с определенными параметрами, в которую вводятся импульсы тока и напряжущая с регулируемой частотой, амплитудой и длительностью цикла. Рабочая сварочная дуга имеет свои параметры. Обычно сила тока импульса в 4...6 раз превышает ток дежурной дуги.

Соответствующим подбором длительности импульсов и пауз можно регулировать частоту отделения капель, обеспечивая расплавление электрода во время пауз и отрыв капель в момент окончания импульса тока.

При импульсном увеличении тока возрастает величина электромагнитной силы, сжимающей перешеек жидкой капли металла и переносящей ее по направлению оси электрода, чем обеспечивается устойчивый процесс при сварке во всех пространственных положениях. Импульсно-дуговой метод используется при сварке открытой дугой и в защитных газах.

9.2. Металлургические и физико-химические процессы при дуговой сварке

9.2.1. Термический цикл

При дуговой сварке источник тепла – электрическая дуга – перемещается вдоль свариваемых кромок, нагревая и расплавляя металл. Основной и электродный металлы перемешиваются в подвижной сварочной ванне и застывая образуют сварной шов.

В сварочной ванне металл нагревается до температуры выше температуры плавления. Температура жидкого металла в сварочной ванне не везде одинакова: на периферийных участках она близка к температуре плавления металла, а на участках, находящихся под воздействием электрической дуги, значительно выше. При сварке низкоуглеродистой стали наименьшая температура сварочной ванны 1530°C, наибольшая – около 2300°C и средняя – около 1800°C. Таким образом, металл сварного шва претерпевает значительные температурные воздействия: нагрев, плавление, затвердевание и остывание. Кроме сварного шва, температурным воздействиям (нагреву и остыванию) подвергается также околошовная зона основного металла.

Изменение температуры во время сварки в данной точке сварного шва или околошовной зоны называется **термическим циклом**.

Термический цикл зависит от способа и режима сварки. Регулируя время нагрева и остывания путем правильного выбора режима сварки, можно повлиять на формирование структуры шва и околошовной зоны и, следовательно, получить сварной шов требуемого качества.

Основными параметрами режима, регулирующими термический цикл сварки, являются величина погонной энергии дуги и начальная температура металла (перед сваркой). С увеличением погонной энергии или начальной температуры металла (в случае предварительного подогрева) скорость охлаждения уменьшается, что благоприятно влияет на структуру шва и околошовной зоны; таким путем можно, например, устранить образование закалочной структуры в околошовной зоне.

9.2.2. Особенности металлургических процессов

Сварной шов образуется в результате сложного металлургического процесса, протекающего в следующих характерных условиях:

- 1) при высокой температуре;
- 2) в небольшом объеме расплавленного металла;
- 3) в течение короткого времени;
- 4) при быстром отводе тепла в прилегающий твердый металл;
- 5) при участии двух разных металлов;
- 6) при интенсивном воздействии окружающих газов и шлака.

Рассмотрим влияние этих условий на процесс сварки. Благодаря высокой температуре в дуге происходят химические реакции, которые не имеют места при обычном металлургическом процессе, как, например, диссоциация некоторой части молекулярного кислорода, азота и водорода на атомарный (с поглощением тепла).

Атомарный кислород и азот интенсивно соединяются с железом и другими элементами стали, что способствует насыщению шва кислородом и азотом.

Атомарный водород легко растворяется в жидкой стали и при ее затвердевании не успевает выделиться полностью, частично оставаясь в шве.

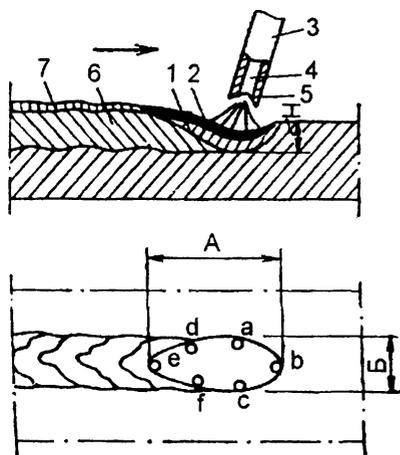
При высокой температуре капли расплавленного электродного металла активно взаимодействуют с жидким шлаком и окружающей газовой средой. Электродный и основной металлы сварочной ванны, перемешиваясь, взаимодействуют между собой, а также продолжают контактировать и взаимодействовать с расплавленным шлаком и газами, образующимися в зоне дуги.

При высокой температуре интенсивно испаряются и выгорают из стали отдельные элементы.

Ванна расплавленного металла (рис. 36) занимает небольшой объем.

Средняя длина сварочной ванны (А) при ручной сварке 15...25 мм, при автоматической 50...100 мм. Ширина ванны (В) и глубина (Н) также могут быть определены теоретически. Средние их размеры: при ручной сварке 8...12 мм; 2...3 мм; при автоматической – 20...30 мм; 5...20 мм.

Жидкий металл ванны соприкасается с твердым основным металлом, через который происходит быстрый отвод тепла. Металл шва кристаллизуется и застывает. В передней части ванны происходит процесс плавления, в тыльной части – процесс кристаллизации.



- 1 – ванна расплавленного металла;
- 2 – расплавленный шлак; 3 – электрод;
- 4 – электродный стержень; 5 – электродное покрытие; 6 – металл шва;
- 7 – затвердевший шлак

Рисунок 36 – Схема ванны расплавленного металла

Время пребывания жидкого металла в сварочной ванне при автоматической сварке стали толщиной 5...30 мм колеблется в пределах от 5 до 40 с. При ручной сварке это время меньше.

Скорость подачи и отвода тепла влияет на характер кристаллизации расплавленного металла и на структуру околошовной зоны.

В отличие от основного металла, металл сварного шва имеет типичную структуру литой стали, быстро затвердевшей в условиях интенсивного теплоотвода в прилегающий твердый металл.

В образовании шва принимают участие два металла: основной и электродный, которые по химическому составу часто отличаются друг от друга. Химический состав металла шва зависит от состава основного и электродного металла, а также от реакций, происходящих в процессе сварки. На ход и интенсивность этих реакций влияют главным образом окружающая среда, степень защиты расплавленного металла от атмосферного воздуха, состав окружающих газов и шлака, режим сварки.

9.2.3. Физико-химические процессы

9.2.3.1. Взаимодействие жидкого металла сварочной ванны с кислородом, водородом и другими газами

Кислород оказывает наиболее существенное влияние на физико-химические процессы при сварке. Он поступает в ванну из воздуха или из электродного покрытия и интенсивно окисляет расплавленный металл, соединяясь с железом и другими элементами. При высокой температуре происходит окисление железа атомарным или молекулярным кислородом с выделением тепла.

В результате образуется закись железа, которая при высокой температуре хорошо растворяется в стали. При температуре 2300°C растворимость FeO составляет 8,5%, а при температуре 1520°C снижается до 0,83%, что соответственно равно количеству кислорода в стали 1,8 и 0,18%.

В процессе затвердевания шва из-за понижения растворимости часть закиси железа выпадает из стали и переходит в шлак; значительная часть не успевает выделиться вследствие быстроты процесса затвердевания и остается в шве. Если в мартеновской кипящей стали содержание кислорода не превышает 0,01...0,02%, то в металле шва, выполненного металлическим электродом незащищенной дугой, его остается 0,25...0,7%.

Кислород также интенсивно окисляет находящиеся в стали углерод, кремний, марганец и другие элементы. В процессе сварки металлическим электродом незащищенной дугой окисляется и переходит в шлак и газы из металла электрода в среднем 10...12% железа, 50...60% углерода и 50...70% марганца.

Длина дуги влияет на увеличение или уменьшение окисления. При большей длине дуги окисление происходит интенсивней вследствие более длительного контакта с воздухом расплавленного электродного металла. При меньшей длине дуги окисление происходит менее интенсивно вследствие уменьшения времени взаимодействия жидкого электродного металла с кислородом.

Кислород, находясь в стали в виде закиси железа, является вредной примесью, так как резко снижает механические свойства стали.

Водород попадает в сварочную ванну из влаги, находящейся в воздухе, электродном покрытии, ржавчине, на крошках свариваемых деталей, или же из органических веществ, входящих в состав некоторых электродных покрытий.

При высокой температуре влага превращается в пары воды, которые диссоциируют, выделяя водород с поглощением тепла.

Молекулярный водород в свою очередь диссоциирует на атомарный, который легко растворяется в жидкой стали.

Растворившийся в сварочной ванне атомарный водород с понижением температуры переходит в молекулярное состояние. Молекулярный водород нерастворим в стали, поэтому в период кристаллизации ванны он выделяется из шва. Однако вследствие быстрого остывания это выделение происходит не полностью. Часть молекулярного водорода остается в шве в виде газовых включений и является вредной примесью, так как приводит к образованию ряда дефектов сварки — пористости и трещин в шве и околошовной зоне.

Азот поступает в сварочную ванну из окружающего воздуха. Взаимодействуя с металлом, он образует нитриды железа, марганца и других элементов. Металл шва насыщается нитридами, выделившимися из твердого раствора в α -железе, в виде тонких включений (нитридных игл). Кроме того, при высокой температуре азот способен растворяться в стали.

Если в мартеновской стали содержание азота не превышает 0,001...0,008%, то в шве, выполненном металлическим электродом незащищенной дугой, его содержание достигает 0,12...0,18%.

Азот ухудшает механические свойства стали, являясь вредной примесью.

При быстром остывании сварного шва не все нитриды успевают выделиться и частично остаются в виде твердого раствора в α -железе. С течением времени нитриды, а также окислы железа и водород выделяются из твердого раствора, что сопровождается повышением твердости, снижением пластичности и ударной вязкости шва. Этот процесс называют старением.

Растворимость водорода и азота при сварке стали с понижением температуры в процессе затвердевания ванны резко падает. Вследствие этого происходит выделение водорода и азота из жидкого металла. Не успевшие всплыть на поверхность пузырьки этих газов остаются в шве, образуя пористость. Для предупреждения этого дефекта стремятся максимально уменьшить содержание азота и водорода в атмосфере дуги.

Оксид углерода, образующаяся при сварке стали за счет окисления углерода, содержащегося в основном и электродном металлах, обычно успевает выделиться из жидкого металла до его застывания. Однако при повышенном содержании углерода в свариваемой стали, электродной проволоке или в электродах при недостатке раскислителей, большой скорости сварки или применении неправильной полярности часть окиси углерода не успевает выделиться и остается в шве также в виде пор.

Металл шва, выполненный незащищенной дугой, обладает низкими механическими свойствами. Предел прочности равен 340...380 МПа, относительное удлинение 3...8%, угол загиба 30...50° и ударная вязкость 50...150 кДж/м².

Вследствие этого сварку незащищенной дугой в настоящее время в строительстве и других отраслях народного хозяйства почти не применяют.

9.2.3.2. Защита расплавляемого при сварке металла

Для получения высококачественного металла шва и сварного соединения применяют защиту расплавляемого при сварке металла от окружающего воздуха защитным газом или шлаком. В качестве защитного газа широко используют двуокись углерода (углекислый газ), аргон, гелий и др. Защитный газ из баллонов подают по шлангам в зону дуги.

Наиболее распространенной является газошлаковая защита, которая образуется при расплавлении специального покрытия, нанесенного на электрод, специального порошка – флюса, насыпанного слоем определенной толщины на место сварки или запрессованного внутрь трубчатой порошковой проволоки. В процессе сварки покрытие или флюс плавятся, образуя газ, окружающий зону сварки, и шлак, обволакивающий капли расплавленного металла и сварочную ванну, что преграждает доступ к ним кислорода и азота воздуха.

Однако, несмотря на защиту, некоторое количество кислорода будет проникать в зону дуги из воздуха, защитных газов и шлака, а также из ржавчины и окислины, имеющихся на металле. Поэтому электродные покрытия и флюсы должны обеспечивать удаление кислорода из стали.

Что же касается азота, то защитные газы и шлаки должны максимально предохранять расплавленный металл от контакта с азотом воздуха, так как дальнейшие меры по удалению азота из сварочной ванны малоэффективны. Вследствие этого количество покрытия на электроде, расход защитного газа, количество или толщина слоя флюса подбираются из условия максимально возможной защиты сварочной ванны от окружающего воздуха. Например, коэффициент массы покрытия, т.е. отношение массы защитного покрытия электрода к массе покрытого стержня электрода исходя из условия максимальной защиты от азота воздуха принимается от 0,25 до 0,35.

9.2.3.3. Взаимодействие металла сварочной ванны с электродными покрытиями, флюсом и газами

Электродные покрытия или флюсы кроме защиты расплавляемого при сварке металла от окружающего воздуха должны обеспечивать **раскисление, легирование и рафинирование металла шва.**

Раскислением называют процесс освобождения стали от кислорода.

Он осуществляется двумя путями:

- процессом **осаждающего раскисления**, который происходит за счет элементов-раскислителей, имеющих большую способность к окислению, чем железо; при этом кислород связывается этими элементами-раскислителями, и восстановление железа происходит за счет их окисления;
- процессом **диффузионного раскисления**, который заключается в связывании закиси железа в стойкие силикаты, не растворяющиеся в железе и переходящие в шлак.

При **осаждающем раскислении** процессы окисления железа и его восстановления происходят при сварке непрерывно. Окисление железа происходит в передней части ванны, где температура более высокая. Восстановление железа из закиси, находящейся в металле, происходит преимущественно в задней части сварочной ванны, где температура более низкая.

Железо восстанавливается за счет окисления других элементов, в частности кремния и марганца, имеющих в основном и электродном металлах или попавших в ванну из шлака. При этом железо остается в металле.

Аналогичные реакции могут протекать за счет других элементов – алюминия, титана и т.д., имеющих большую способность к окислению, чем железо, и при наличии их в достаточном количестве в сварочной ванне.

В задней части сварочной ванны с понижением температуры из жидкого металла интенсивно выделяется ранее растворившийся в нем кислород, который взаимодействует с элементами-раскислителями.

SiO_2 и MnO , образовавшиеся в результате химических реакций, большей частью переходят в шлак.

Для лучшего раскисления стали необходимо в сварочную ванну вводить элементы-раскислители – кремний, марганец, алюминий, титан и др. Это осуществляется введением указанных элементов в электродную проволоку или в сварочные флюсы и покрытия электродов.

В зоне высоких температур (в передней части ванны) при наличии в шлаке SiO_2 и MnO необходимых концентраций развивается преимущественно процесс восстановления железом марганца и кремния. При этом Mn и Si переходят в металл, а FeO распределяется между металлом и шлаком.

Восстановленные Mn и Si с понижением температуры ванны частично участвуют в раскислении железа, а частично остаются в металле.

При **диффузионном раскислении** закись железа, находящаяся в расплавленном металле, связывается в стойкие силикаты, которые, не растворяясь в стали, остаются в шлаке.

Эти силикаты при наличии марганца, введенного в шлак в качестве раскислителя, реагируют с ним, восстанавливая железо. При этом силикат марганца остается в шлаке.

Существование процесса диффузионного раскисления возможно при наличии в шлаке достаточного количества кремнезема (SiO_2) и использовании шлака, максимально лишенного FeO , так как в противном случае кремнезем будет реагировать с FeO шлака, а не металла. Необходимо также, чтобы содержание SiO_2 в шлаке не было чрезмерно большим, так как это ухудшит сварочные свойства шлака.

Легирование металла шва различными полезными примесями происходит при сварке наряду с процессом раскисления. Легирующие элементы вводят в электродную проволоку или в покрытие для получения требуемого химического состава и механических свойств шва.

При сварке углеродистых и низколегированных сталей легирующие элементы Mn и Si являются одновременно раскислителями, которые вводят в состав электродных покрытий. Специальных раскислителей и легирующих элементов в составе плавяных флюсов для автоматической сварки нет, однако они содержат окислы марганца и кремния. Последние в процессе сварки восстанавливаются из шлака, обеспечивая раскисление и легирование металла шва. Так как при автоматической сварке расплавляется примерно в 3 раза больше шлака, чем при ручной, то количества восстановленных при этом кремния и марганца оказывается достаточно для выполнения указанных функций. Однако легирование шва этим путем ограничено. Более широкой возможностью легирования металла шва обеспечивают керамические флюсы, так как в их состав кроме раскислителей вводятся и легирующие элементы.

Леглирующими элементами при сварке служат марганец, кремний, титан, алюминий, углерод, хром, никель, молибден и др.

Параллельно с раскислением и легированием при сварке происходит **рафинирование металла шва**. Этот процесс заключается в освобождении шва от шлаковых включений и вредных примесей.

Сера и фосфор являются вредными примесями в стали. Сера способствует возникновению трещин, а фосфор снижает вязкость стали, поэтому важно их удалить из сварного шва.

Сера легко образует в сварочной ванне сульфид железа, который удаляют с помощью марганца.

Сульфид марганца мало растворим в жидкой стали и переходит в шлак. Фосфор соединяется с железом и образует фосфиды, которые удаляют путем окисления фосфора и последующего связывания с помощью кальция, вводимого в покрытие электродов или флюс. Полученное соединение не растворяется в стали и переходит в шлак.

Рафинирование металла обеспечивается также наличием слоя расплавленного шлака на поверхности ванны, вследствие чего охлаждение металла шва происходит более медленно и из него успевают выделиться шлаковые и газовые включения.

Защита расплавленного металла при помощи электродных покрытий или флюса обеспечивает получение высококачественного сварного шва с небольшим содержанием кислорода и азота. При сварке низкоуглеродистой стали покрытиями электродами (УОНИ-13/45) содержание в шве кислорода составляет 0,02...0,03%; азота 0,02...0,05%. При автоматической сварке под флюсом марки ОСЦ-45 кислорода содержится в шве 0,03...0,05% и азота 0,002...0,003% (в случае применения стекловидного флюса).

Защитные газы, применяемые при сварке, подразделяются на инертные и активные. Инертные газы – аргон и гелий – не вступают в соединение с другими веществами и только защищают расплавляемый при сварке металл от воздуха. Из активных газов для сварки широко применяют углекислый газ. Он является окислительным газом и, защищая расплавленный металл от доступа окружающего воздуха, вместе с тем активно взаимодействует со сталью.

На участке сварочной ванны с высокой температурой происходит окисление железа и других элементов. На участке ванны, где температура понижается, железо восстанавливается. При этом СО уходит в атмосферу, а SiO₂ и MnO – в шлак.

Таким образом, для компенсации убывающих из сварочной ванны раскислителей необходимо применять электродную проволоку с повышенным содержанием марганца и кремния.

При сварке стали в защитных газах полезным оказывается добавление в газ небольшого количества (от 3 до 15%) кислорода. Кислород, связывая попадающий в сварочную ванну водород в водяной пар или нерастворимый в стали гидроксил (ОН), предохраняет от насыщения сварного шва водородом и образования пористости.

9.2.4. Структура сварных соединений

Качество сварного соединения зависит не только от химического состава металла шва, но и от характера структуры. Для ее изучения необходимо вначале проследить процесс кристаллизации металла шва.

В отличие от кристаллизации слитка, кристаллизация сварочной ванны протекает в следующих **характерных условиях**:

- 1) при незначительном объеме расплавленного металла;
- 2) при быстром концентрированном нагреве металла сварочной дуги и быстром охлаждении вследствие интенсивного теплоотвода;
- 3) при наличии подвижного температурного поля, создаваемого перемещением дуги. Вследствие этого средняя скорость кристаллизации равна скорости сварки.

Процесс первичной кристаллизации начинается после расплавления и перемешивания основного и электродного металлов и прекращения действия дуги на сварочную ванну. Жидкий металл охлаждается и в направлении, обратном отводу тепла, т.е. от стенок ванны к центру, начинается рост кристаллов.

Вначале центрами кристаллизации являются стенки ванны, на которых в виде острых шипов выступают части нерасплавленного основного металла. Вокруг этих центров происходят затвердевание жидкого металла и рост кристаллов, что обеспечивает прочную связь между основным и наплавленным металлом.

Для сварного шва характерна склонность к образованию столбчатой структуры, т.е. типичной структуры литого металла. Рост столбчатых кристаллов способствует лучшему удалению из расплавленного металла шлаковых и газовых включений, которые по мере роста кристаллов выталкиваются на поверхность ванны.

В узких швах, у которых отношение ширины шва к его глубине менее единицы, **зона ликвации** (неравномерного расположения составляющих сплава и особенно вредных примесей) находится в центре, вследствие чего эти швы могут оказаться сильно ослабленными. В широких швах, у которых ширина больше его глубины в 1,5 раза и более, **зона ликвации** находится в верхней части шва, что не опасно для его прочности.

Исследование микроструктуры сварного шва низкоуглеродистой стали, выполненного покрытыми электродами или под флюсом, показывает, что металл шва, в отличие от металла слитка, имеет мелкозернистую структуру и равномерное распределение зерен феррита и перлита, что свидетельствует о замедленном охлаждении шва под слоем шлака. В шве отсутствуют кислородные включения и нитриды.

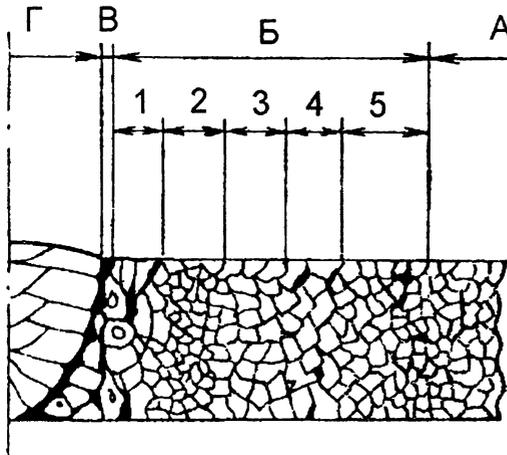
При исследовании микроструктуры сварных швов стали с повышенным содержанием углерода (среднеуглеродистой) можно наблюдать увеличение количества перлита и рост зерна, связанный с увеличением содержания в стали углерода. Эта сталь чувствительна к перегреву и закалке, в ней встречаются участки перегрева с крупными кристаллами, иногда расположенными под углом 60...90° друг к другу (видманштеттова структура). Поэтому при сварке стремятся не допускать перегрева стали или исправляют его последующей термической обработкой.

Сварное соединение разделяется на 4 зоны, имеющие различные микроструктуры (рис. 37):

- А** – зона основного металла;
- Б** – зона термического влияния;
- В** – зона сплавления;
- Г** – зона металла шва.

Зоны *Б* и *В* называют также околошовной зоной.

Зоной термического влияния *Б* называют участок основного металла, не подвергшийся расплавлению, структура и свойства которого изменились в результате нагрева при сварке плавлением. Ширина этой зоны меняется в зависимости от способа и режима сварки и приблизительно равна при ручной сварке 3...6 мм, при автоматической – 2,5...4 мм, при электрошлаковой – 11...14 мм, при газовой – до 27 мм и при сварке в углекислом газе – 1,8...3,5 мм. Зона термического влияния разделяется на несколько участков (см. рис. 37):



А – зона основного металла;
Б – зона термического влияния;
В – зона сплавления;
Г – зона металла шва;

1 – участок перегрева; 2 – участок перекристаллизации; 3 – участок неполной перекристаллизации; 4 – участок рекристаллизации; 5 – участок без заметных структурных изменений

Рисунок 37 – Микроструктура сварного соединения

1 – участок перегрева, подвергшийся действию температур примерно 1100...1200°C, близких к температуре плавления; здесь находится перегретый металл с крупным зерном. Крупнозернистая видмапшкеттова структура образуется при повышенной погонной энергии, а также при увеличенном содержании в стали углерода или легирующих элементов; такая структура образуется в низкоуглеродистой стали при электрошлаковой сварке, так как последняя характерна высокой погонной энергией; в сталях с повышенным содержанием углерода или легирующих элементов перегрев этого участка при дуговой сварке сопровождается, вследствие интенсивного теплоотвода, закалкой и образованием закаленного мартенсита, что приводит к ухудшению таких механических свойств, как вязкость и пластичность, а иногда, при несоблюдении заданной технологии сварки, к образованию трещин;

2 – участок перекристаллизации (нормализации), который подвергался воздействию температур от 880 до 1100°C. Он характеризуется мелким строением зерна, т.е. более полной перекристаллизацией и повышенными по сравнению с основным металлом механическими свойствами;

3 – участок неполной перекристаллизации характеризуется частичным образованием новых зерен стали, т.е. неполной перекристаллизацией; температура нагрева на этом участке примерно от 720 до 880°C;

4 – участок старения (рекристаллизации), подвергавшийся нагреву примерно от 500 до 720°C, характеризуется повышением прочности и снижением пластичности стали в процессе вылеживания, вследствие выделения избыточных карбидов и нитридов; в сталях, упрочненных термическим или механическим способом, на этом участке наблюдается снижение прочности;

5 – участок, подвергавшийся нагреву от 100 до 500°С и не имеющий заметных структурных изменений, однако при сварке низкоуглеродистых сталей, имеющих повышенное количество газов, на этом участке наблюдается падение ударной вязкости вследствие старения;

В – зона сплавления, где находятся частично сплавившиеся зерна металла на границе основного металла и шва; свойства этой зоны часто определяют качество сварного соединения.

9.2.5. Понятие о свариваемости металлов

Под свариваемостью понимают свойство металла или сочетания металлов образовывать при установленной технологии сварки соединения, отвечающее требованиям, обусловленным конструкцией и эксплуатацией изделия.

Рассмотрим подробнее вопросы свариваемости стали, применяемой в строительстве.

На свариваемость стали решающее влияние оказывает ее химический состав.

Наиболее важным элементом в стали является углерод. Хорошо свариваются низкоуглеродистые стали (содержащие до 0,25% углерода). Увеличение содержания углерода в стали ухудшает ее свариваемость, повышает склонность к закалке и образованию трещин в швах и околошовной зоне.

Такие элементы, как кремний, марганец, никель, хром в небольших количествах не ухудшают свариваемость стали. Сера, фосфор, молибден и ванадий ухудшают свариваемость и повышают склонность к закалке и образованию трещин.

Приблизительно свариваемость углеродистой и низколегированной сталей определяют по суммарному содержанию легирующих примесей в процентах, приведенному к эквиваленту углерода:

$$C_3 = C + Mn/6 + (Cr + V + Mo)/5 + (Ni + Cu)/15.$$

Сталь считают хорошо свариваемой, если $C_3 < 0,45\%$. При $C_3 > 0,45\%$ свариваемость стали ухудшается, и для получения качественного сварного соединения требуются специальные меры, например, предварительный подогрев, отжиг после сварки или другие виды термической обработки. Однако сталь с $C_3 > 0,45\%$ при автоматической сварке или при сварке деталей небольшой толщины в ряде случаев хорошо сваривается и без применения специальных мер.

Более точно свариваемость стали определяют по следующим основным показателям, характеризующим ее свойства:

- 1) структура шва и околошовной зоны;
- 2) стойкость металла шва против образования горячих трещин;
- 3) стойкость сварных соединений против образования холодных трещин;
- 4) прочность, пластичность и вязкость сварных соединений в исходном состоянии, в состоянии после термообработки и после старения;
- 5) свойства сварных соединений, обусловленные эксплуатационными требованиями (износостойкость, стойкость против коррозии, хладноломкость, выносливость и пр.).

Из этих показателей определяют не все, а только те, которые имеют решающее значение для данной стали.

В зависимости от условий эксплуатации могут определяться другие показатели свариваемости стали.

9.2.6. Горячие и холодные трещины в сварных соединениях

9.2.6.1. Горячие трещины

Горячими, или кристаллизационными, называют трещины, которые образуются в сварных швах при высокой температуре (более 800°С).

При остывании и затвердевании шва в процессе первичной кристаллизации между кристаллами остаются жидкие или полужидкие прослойки, которые имеют более низкую температуру плавления, чем температура плавления основной массы металла, так как они обогащены растворенными элементами. Если эти прослойки еще существуют в момент возникновения растягивающих напряжений, вызванных неравномерным нагревом и остыванием при сварке, и прочность их оказывается недостаточной для противостояния возникающим усилиям, то в шве образуются горячие трещины, проходящие по этим прослойкам между кристаллами. Образование горячих трещин при сварке возможно и в околошовной зоне, где при воздействии высокой температуры происходят рост зерен и выделение по их границам легкоплавких составляющих и вредных примесей, а также частичное оплавление.

Наличие в металле излишнего количества элементов, способных образовать непрочные прослойки между кристаллами, т.е. неблагоприятный химический состав стали, является главной причиной образования горячих трещин; кроме того, образованию горячих трещин способствует большая толщина свариваемых элементов и нерациональность конструкции, вызывающая излишнюю жесткость сварных соединений.

Способы определения стойкости стали против образования горячих трещин. Для определения стойкости сварных соединений против образования горячих трещин разработано много различных проб (испытаний). Рассмотрим одну из них, которая применяется для качественной оценки: склонны или несклонны примененные материалы к горячим трещинам при сварке. Для пробы изготавливается тавровый образец (рис. 38) из испытываемой стали толщиной не менее 7...8 мм. Сварку контрольного шва выполняют на разработанном для данного типа соединения режиме. Выявление трещин производится внешним осмотром контрольного шва и его излома или по макрошлифам, вырезанным из шва.

Для определения склонности к образованию трещин стыкового шва применяют образцы видоизмененной конструкции.

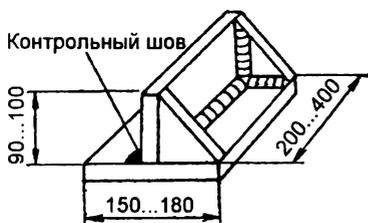
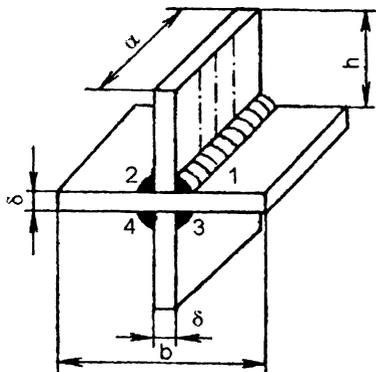


Рисунок 38 – Образец для определения склонности к образованию горячих трещин

9.2.6.2. Холодные трещины

Холодными называют трещины, которые возникают в швах и околошовной зоне при температуре ниже 100...200°С. Эти трещины, как правило, внутрикристаллические. Причинами их образования являются: концентрация в стали углерода и легирующих элементов, вызывающая закалку и местные структурные напряжения; растягивающие напряжения, вызванные неравномерным нагревом и остыванием при сварке; концентрация водорода; загрязнение металла фосфором; дефекты швов; объемно-напряженное состояние.

Способы определения стойкости стали против образования холодных трещин. Для определения стойкости стали против образования холодных трещин применяют ряд проб. Одной из них является крестовая проба (рис. 39), обеспечивающая качественную оценку склонности металла к образованию холодных трещин. Мерой стойкости служит начальная температура образца, при которой производится сварка и трещины не образуются. Охлаждение образца производят в смеси бензина и твердой углекислоты, а нагрев – в печи. После сварки каждого валика охлаждают образец до комнатной температуры, а затем до начальной температуры, после чего продолжают сварку. Образец выдерживают 4 сут., а затем вырезают из него темплеты и по шлифам проверяют наличие трещин в шве и околошовной зоне.



1, 2, 3, 4 – последовательность сварки;

$h=60 \dots 70$ мм; $b=200 \dots 300$ мм; $\alpha=150$ мм;

$\delta=10 \dots 30$ мм

Рисунок 39 – Образец для определения стойкости стали против образования холодных трещин (крестовая проба)

10. СВАРКА ПЛАВЛЕНИЕМ

10.1. Ручная дуговая сварка

10.1.1. Особенности способа сварки. Области применения

Ручная дуговая сварка металлическим покрытым (плавящимся) электродом, отличающаяся высокой универсальностью и значительной мобильностью, обусловившими преимущественное использование ее в строительстве, имеет ряд технологических особенностей.

Способ позволяет без замены сварочного инструмента и оборудования (при надлежащем сварочном режиме) выполнять швы различных типов, сечения и назначения, а также вести сварку в любом пространственном положении и в труднодоступных местах.

Широкое применение имеет сварка электрической дугой прямого действия. При этом сварщик поддерживает устойчивый процесс сварки непрерывной подачей конца электрода в зону горения дуги, не допуская значительных отклонений длины дуги. Наилучшие результаты достигаются при сварке короткой дугой. В этом случае электрод плавится спокойно с небольшим разбрызгиванием, и обеспечивается хорошее проплавление основного металла. Нормальная длина дуги обычно не превышает 0,5...1,1 диаметра электрода. При длинной дуге повышается окисление электродного металла, увеличивается разбрызгивание, снижается глубина провара, шов получается со значительными включениями окислов.

При сварке соединений деталей и узлов металлических строительных конструкций и изделий преимущественно используют металлические покрытые электроды диаметром 3...6 мм. Основной объем работ выполняют при токе 90...350 А и напряжении дуги 18...30 В.

Производительность ручной дуговой сварки существенно уступает производительности механизированных и автоматических способов дуговой сварки, особенно при наложении длинных (более 1 м) швов большого сечения в нижнем положении.

Качество швов и сварных соединений, выполненных ручной дуговой сваркой, в значительной степени зависит от условий работ и производственных навыков сварщиков.

В промышленном строительстве ручная дуговая сварка применяется:

при изготовлении и монтаже строительных и технологических металлических конструкций; при изготовлении закладных частей и деталей и выполнении монтажных соединений элементов арматуры железобетонных конструкций; при сварке стыковых соединений труб и присоединений деталей и узлов технологических, теплотехнических и магистральных трубопроводов; а также при производстве электромонтажных и санитарно-технических работ.

10.1.2. Подготовка металла под сварку

К основным операциям подготовки металла под сварку относятся: правка и очистка проката; механическая или термическая резка при заготовке деталей и полуфабрикатов; обработка кромок, подлежащих сварке.

Обработка кромок стыковых соединений заключается в отбортовке их при толщине металла до 4 мм или разделке кромок для создания скоса и притупления при большей толщине металла.

При дуговой сварке повышенные требования предъявляются к чистоте кромок и поверхности прилегающих к ним зон свариваемых деталей.

В целях избежания образования в швах пор, шлаковых и других включений торцевые поверхности кромок и прилегающие к ним зоны металла шириной 25...30 мм подлежат очистке от ржавчины, краски, масляных и других загрязнений. Очистку выполняют металлическими щетками, абразивными материалами или инструментом, а также газопламенной обработкой.

При сборке конструкций, помимо применения инвентарных и других сборочных приспособлений, кондукторов и кантователей, для фиксации взаимного расположения элементов конструкций и деталей часто используют прихватки (короткие швы), осуществляемые ручной дуговой сваркой.

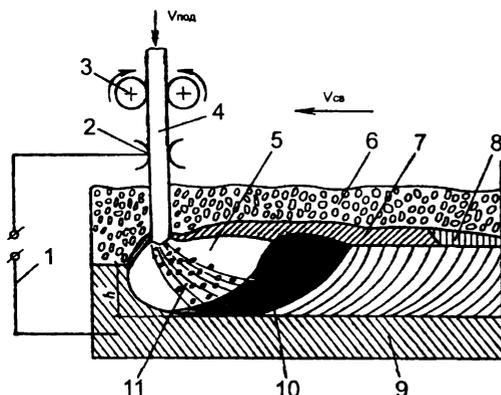
Длина швов-прихваток обычно 50...100 мм.

Размеры сечений прихваток не должны превышать $\frac{1}{2}$ основных швов (при толщине свариваемого металла более 5 мм). Поверхность прихваток следует защищать от шлака и загрязнений. При выявлении дефектов их удаляют абразивным инструментом и швы выполняют вновь.

Типы, конструктивные элементы и размеры сварных соединений для ручной сварки представлены в ГОСТ 5264-80*.

10.2. Электродуговая механизированная и автоматическая сварка под флюсом

10.2.1. Сущность способа



- 1 – источник сварочного тока;
- 2 – скользкий контакт (токопровод);
- 3 – подающие ролики;
- 4 – электродная проволока;
- 5 – газовый пузырь;
- 6 – флюс;
- 7 – расплавленный флюс;
- 8 – затвердевший шлак;
- 9 – свариваемый (основной) металл;
- 10 – сварочная ванна;
- 11 – сварочная дуга

Рисунок 40 – Схема сварки под флюсом

При этом способе сварки (рис. 40) электрическая дуга горит между концом электродной (сварочной) проволоки и свариваемым металлом под слоем гранулированного флюса. Ролики специального механизма подают электродную проволоку в дугу. Сварочный ток, переменный или постоянный прямой или обратной полярности от источника подводится скользким контактом к электродной проволоке и постоянным контактом – к изделию. Сварочная дуга горит в газовом пузыре, образованном в результате плавления флюса и металла и заполненном парами металла, флюса и газами. По мере удаления дуги расплавленный флюс при остывании образует шлаковую корку, которая легко отделяется от поверхности шва. Флюс засыпается впереди дуги из бункера слоем толщиной 40...80 и шириной 40...100 мм (чем больше толщина свариваемого металла и ширина шва, тем больше толщина и ширина слоя флюса). Масса флюса, идущего на шлаковую корку, обычно равна массе расплавленной сварочной проволоки. Нерасплавленная часть флюса собирается специальным пневмоотсосом в бункер и повторно используется. Потери металла на угар и разбрызгивание при горении дуги под флюсом значительно меньше, чем при ручной дуговой и сварке в защитных газах.

Расплавленные электродный и основной металлы в сварочной ванне перемешиваются и при кристаллизации образуют сварной шов.

В промышленности преимущественное применение находит способ сварки проволочными электродами (сварочной проволокой). Однако в некоторых случаях сварку и особенно наплавку целесообразно выполнять ленточными или комбинированными электродами. Лента, применяемая для этих электродов, имеет толщину до 2 мм и ширину до 40 мм. Дуга, перемещаясь от одного края ленты к другому, равномерно оплавляет ее торец и расплавляет основной металл. Изменяя форму ленты, можно изменить и форму поперечного сечения шва, достигая повышенной глубины проплавления по его оси или получая более равномерную глубину проплавления по всему сечению шва. Ленточный электрод целесообразно использовать при сварке корневых швов стыковых соединений на весу при зазорах свыше 1 мм, при сварке последних слоев широкой части разделки, при сварке толстого металла. При сварке корневых швов по отношению к оси стыка лента может располагаться под углом от 30 до 90° в зависимости от зазора между кромками.

Для повышения производительности сварки стыковых с разделкой кромок и угловых швов, где требуется повышенное количество наплавленного металла, в разделку до начала сварки или в процессе сварки специальным дозирующим устройством засыпают рубленую сварочную проволоку (крупку). Длина кусков крупки не превышает диаметра проволоки, из которой ее изготовляли. Этой же цели служит и сварка с увеличенным до 100 мм вылетом электрода. Это позволяет на 50...70 % увеличить количество наплавленного металла. Однако при этих способах сварки снижается глубина проплавления основного металла.

Сварка под флюсом может выполняться автоматически или механизированно.

10.2.2. Преимущества и недостатки

Сущность процесса сварки под флюсом определяет его особенности по сравнению с ручной дуговой сваркой.

Производительность по сравнению с ручной сваркой увеличивается в 5...12 раз. При сварке под флюсом ток по электродной проволоке проходит только в ее вылете (место от токоподвода до дуги). Поэтому можно использовать повышенные (25...100 А/мм²) по сравнению с ручной дуговой сваркой (10...20 А/мм²) плотности сварочного тока без опасения значительного перегрева электрода в вылете и отслаивания обмазки, как в покрытом электроде. Использование больших сварочных токов резко повышает глубину проплавления основного металла и появляется возможность сварки металла повышенной толщины без разделки кромок. При сварке с разделкой кромок уменьшается угол разделки и увеличивается величина их приутупления, т.е. уменьшается количество электродного металла, необходимого для заполнения разделки. Металл шва обычно состоит приблизительно на 2/3 из переплавленного основного металла (при ручной дуговой сварке соотношение обратное). В результате растут скорость и производительность сварки. Под флюсом сваривают металл толщиной 2...60 мм при скорости однодуговой сварки до 0,07 км/ч. Применение многодуговой сварки позволяет повысить её скорость до 0,3 км/ч.

Высокое качество металлов шва и сварного соединения достигается за счет надежной защиты расплавленного металла от взаимодействия с воздухом, его металлургической обработки и легирования расплавленным шлаком. Наличие шлака на поверхности шва уменьшает скорость кристаллизации металла сварочной ванны и скорость охлаждения металла шва. В результате металл шва не имеет пор, содержит пониженное количество неметаллических включений. Улучшение формы шва и стабильности его размеров, особенно глубины проплавления, обеспечивает постоянные химический состав и другие свойства на всей длине шва.

Сварку под флюсом применяют для изготовления крупногабаритных резервуаров, строительных конструкций, труб и т. д. из сталей, никелевых сплавов, меди, алюминия, титана и их сплавов.

Экономичность процесса определяется снижением расхода сварочных материалов за счет сокращения потерь металла на угар и разбрызгивание (не более 3%, а при ручной сварке достигают 15%), отсутствием потерь на огарки. Лучшее использование тепла дуги при сварке под флюсом по сравнению с ручной сваркой уменьшает расход электроэнергии на 30...40%. Повышению экономичности способствует и снижение трудоемкости работ по разделке кромок под сварку, зачистке шва от брызг и шлака. Сварка выполняется с применением специальных автоматов или полуавтоматов. Условия работы позволяют сварщику обходиться без щитков для защиты глаз и лица. Повышаются общий уровень и культура производства.

Недостатками способа является повышенная жидкотекучесть расплавленного металла и флюса. Поэтому сварка возможна только в нижнем положении при отклонении плоскости шва от горизонтали не более чем на 10...15°. В противном случае нарушится формирование шва, могут образоваться подрезы и другие дефекты. Это одна из причин, почему сварку под флюсом не применяют для соединения поворотных кольцевых стыков труб диаметром менее 150 мм. Кроме того, этот способ сварки требует и более тщательной сборки кромок под сварку и использования специальных приемов сварки. При увеличенном зазоре между кромками возможно вытекание в него расплавленного металла и флюса и образование в шве дефектов.

Типы, конструктивные элементы и размеры сварных соединений представлены в ГОСТ 8713-79*.

10.3. Сварка в защитных газах

Сварка под флюсом, несмотря на целый ряд положительных качеств, имеет существенный недостаток: она практически выполнима только при нижнем расположении сварного соединения и вследствие этого недостаточно мобильна. В различных пространственных положениях значительно удобнее сварка открытой дугой, в первую очередь в защитных газах, а также порошковой проволокой, в том числе и без дополнительной защиты дуги (самозащитной проволокой).

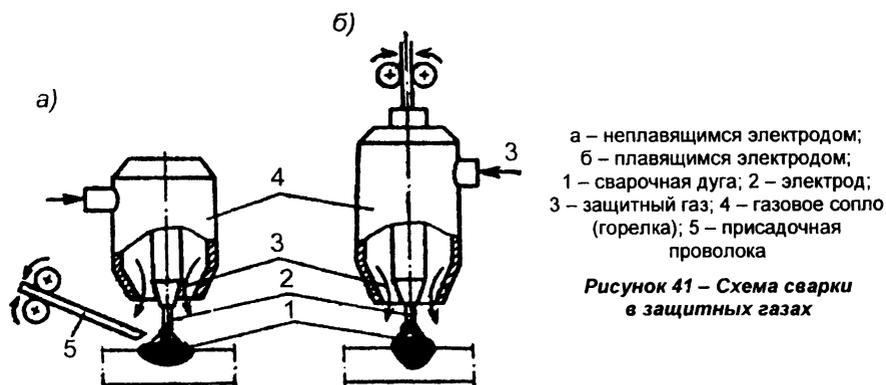


Рисунок 41 — Схема сварки в защитных газах

Этот способ сварки в последние годы находит широкое применение в промышленности и при строительно-монтажных работах. Существует несколько разновидностей дуговой сварки в защитных газах, классификация которых приведена на рисунке 41.

10.3.1. Сущность способа

Сварку можно выполнять неплавящимся, обычно вольфрамовым, или плавящимся электродом. В первом случае сварной шов получается за счет расплавления кромок изделия и, если необходимо, подаваемой в зону дуги присадочной проволоки. Плавящийся электрод в процессе сварки расплавляется и участвует в образовании металла шва. Для защиты применяют три группы газов: инертные (аргон, гелий); активные (углекислый газ, азот, водород и др.); смеси газов инертных, активных или первой и второй групп. Выбор защитного газа определяется химическим составом свариваемого металла, требованиями, предъявляемыми к свойствам сварного соединения; экономичностью процесса и другими факторами.

Смесь инертных газов с активными рекомендуется применять и для повышения устойчивости дуги, увеличения глубины проплавления и изменения формы шва, металлургической обработки расплавленного металла, повышения производительности сварки. При сварке в смеси газов повышается переход электродного металла в шов.

Смесь аргона с 1...5% кислорода используют для сварки плавящимся электродом низкоуглеродистой и легированной стали. Добавка кислорода к аргону понижает критический ток, предупреждает возникновение пор, улучшает форму шва.

Смесь аргона с 10...25 % углекислого газа применяют при сварке плавящимся электродом. Добавка углекислого газа при сварке углеродистых сталей позволяет избежать образования пор, несколько повышает стабильность дуги и надежность защиты зоны сварки при наличии сквозняков, улучшает формирование шва при сварке тонколистового металла.

Смесь аргона с углекислым газом (до 20%) и с не более 5% кислорода используют при сварке плавящимся электродом углеродистых и легированных сталей. Добавки активных газов улучшают стабильность дуги, формирование швов и предупреждают пористость.

Смесь углекислого газа с кислородом (до 20%) применяют при сварке плавящимся электродом углеродистой стали. Эта смесь имеет высокую окислительную способность, обеспечивает глубокое проплавление и хорошую форму, предохраняет шов от пористости.

В зону сварки защитный газ может подаваться центрально, а при повышенных скоростях сварки плавящимся электродом – сбоку. Для экономии расхода дефицитных и дорогих инертных газов используют защиту двумя отдельными потоками газов; наружный поток – обычно углекислый газ. При сварке активных материалов для предупреждения контакта воздуха не только с расплавленным, но и с нагретым твердым металлом применяют удлиненные насадки на сопла (подвижные камеры). Наиболее надежная защита достигается при размещении изделия и стационарных камер, заполненных защитным газом. Для сварки крупногабаритных изделий используют переносные камеры из мягких пластичных обычно прозрачных материалов, устанавливаемых локально над свариваемым стыком. Теплофизические свойства защитных газов оказывают большое влияние на технологические свойства дуги, а значит, на форму и размеры шва. При равных условиях дуга в гелии по сравнению с дугой в аргоне является более «мягкой», имеет более высокое напряжение, а образующийся шов имеет меньшую глубину проплавления и большую ширину. Углекислый газ по влиянию на форму шва занимает промежуточное положение.

10.3.2. Преимущества и недостатки

Широкий диапазон применяемых защитных газов обуславливает большое распространение этого способа как в отношении свариваемых металлов, так и их толщин (от 0,1 мм до десятков миллиметров). Основными преимуществами рассматриваемого способа сварки являются следующие:

- 1) высокое качество сварных соединений на разнообразных металлах и их сплавах разной толщины, особенно при сварке в инертных газах из-за малого угара легирующих элементов;

- 2) возможность сварки в различных пространственных положениях;
 - 3) отсутствие операций по засыпке и уборке флюса и удалению шлака;
 - 4) возможность наблюдения за образованием шва, что особенно важно при механизированной сварке;
 - 5) высокая производительность и легкость механизации и автоматизации процесса;
 - 6) низкая стоимость при использовании активных защитных газов.
- К недостаткам способа относятся:
- 1) необходимость применения защитных мер против световой и тепловой радиации дуги;
 - 2) возможность нарушения газовой защиты при сдувании струи газа движением воздуха или при забрызгивании сопла;
 - 3) потери металла на разбрызгивание, при котором брызги прочно соединяются с поверхностями шва и изделия;
 - 4) наличие газовой аппаратуры и в некоторых случаях необходимость водяного охлаждения горелок.

10.3.3. Подготовка кромок и их сборка под сварку

Способы подготовки кромок под сварку (механические, газовые и т. д.) такие же, как и при других способах сварки. Вид разделки кромок и ее геометрические размеры должны соответствовать ГОСТ 14771-76* или техническим условиям на изготовление изделия. При механизированной сварке плавящимся электродом можно получить полный провар без разделки кромок и без зазора между ними при толщине металла до 8 мм. При зазоре или разделке кромок полный провар достигается при толщине металла до 11 мм. При автоматической сварке стыковых соединений производительность процесса значительно возрастает при использовании разделки без скоса кромок. При толщине металла до 40 мм зазор между кромками в нижней части стыка до 10 мм. Для обеспечения постоянства зазора в зоне сварки из-за поперечной усадки при сварке каждого прохода выполняют шарнирное закрепление деталей с углом раскрытия кромок, зависящим от толщины свариваемого металла.

При сварке в углекислом газе многослойных швов на сталях перед наложением последующего слоя поверхность предыдущего слоя следует тщательно очищать от брызг и образующего шлака. Для уменьшения забрызгивания поверхности детали из углеродистой стали ее покрывают специальными аэрозольными препаратами типа «Дуга». Сварку можно вести при непросохшем препарате. Детали собирают с помощью струбцин, клиньев, скоб или на прихватках. Прихватки лучше выполнять в защитных газах тем же способом, которым будет проводиться и сварка. Прихватки перед сваркой осматривают, а при сварке переваривают.

10.4. Электрошлаковая сварка

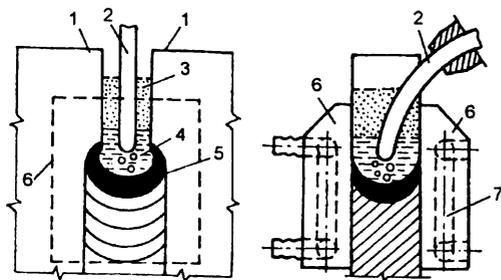
Недостатком дуговой электросварки является ограниченность проплавляющей способности дуги. За один проход при ручной дуговой сварке удаётся проплавить металл на глубину до 5 мм, а при автоматической сварке под флюсом – до 15 мм. Для сварки изделий большей толщины приходится производить разделку кромок, срезая кромки под углом 60° друг к другу. Такая разделка кромок приводит к нерациональному расходу металла: сначала кромки срезают, переводя металл в отходы, а затем при сварке разделанное пространство заполняют расплавленной проволокой. При этом увеличивается трудоемкость изготовления изделия, возрастает расход электроэнергии и т.д.

10.4.1. Сущность способа

Для соединения элементов большой толщины в Институте электросварки им. Е.О. Патона АН УССР в 1955 г. был разработан электрошлаковый метод сварки. При электрошлаковой сварке свариваемые детали устанавливаются так, чтобы свариваемый стык располагался вертикально, сварка производится снизу вверх.

Процесс электрошлаковой сварки происходит за счет тепла, выделяющегося при прохождении электрического тока через расплавленный флюс (шлак), имеющий большое электросопротивление.

При высокой температуре жидкого шлака, превышающей температуру плавления свариваемого металла, кромки основного металла и электродная проволока плавятся, образуя общую ванну жидкого металла. Схема электрошлаковой сварки представлена на рисунке 42.



- 1 – свариваемый металл;
- 2 – электрод;
- 3 – гранулированный флюс;
- 4 – шлаковая ванна;
- 5 – расплавленный металл;
- 6 – медные ползуны;
- 7 – каналы с проточной водой

Рисунок 42 – Электрошлаковая сварка

Свариваемые детали **1** расположены вертикально. Между свариваемыми кромками детали и медными формующими ползунами **2** устанавливают один или несколько электродов **5** (в зависимости от сечения шва) и помещают флюс. Ползуны **2** охлаждают водой через трубки **7**. Процесс сварки начинается с возбуждения электрической дуги между электродами и начальной (опорной) планкой и нижней частью детали. Расплавленный металл **3** (основной и электродный) находится на дне ванны, а над ним образуется слой расплавленного флюса (шлака) **4**. Когда над расплавленным металлом образуется слой высокотемпературного жидкого шлака, электродуговая плавка переходит в электрошлаковый процесс. Непрерывность процесса сварки обеспечивается равномерной подачей электродов и их перемещением вверх вдоль свариваемого шва, а также перемещением ползунов по мере затвердевания металла шва **6**.

Главной особенностью электрошлаковой сварки (ЭШС) является принципиальное различие процесса ЭШС в его начале и дальнейшем протекании, когда сварочная цепь электрического тока проходит по электроду, жидкому шлаку и основному металлу, обеспечивая расплавление основного и присадочного металлов, а также постоянно поступающего в ванну специального флюса. Ванна расплавленного шлака за счет меньшей, чем у расплавленного металла плотности, постоянно находясь в верхней части расплава, исключает воздействие окружающего воздуха на жидкий металл и очищает капли электродного металла, проходящие через шлак, от вредных примесей.

Разработано несколько способов электрошлаковой сварки. Наибольшее практическое применение имеет ЭШС проволочным электродом (одним или несколькими) с колебаниями или без колебаний, пластинчатым электродом большого сечения, плавящимся мундштуком.

10.4.2. Преимущества и недостатки

ЭШС имеет следующие технико-экономические достоинства:

1) высокую устойчивость процесса, мало зависящую от рода тока, и нечувствительность (благодаря тепловой энергии шлаковой ванны) к кратковременным изменениям тока и даже его прерыванию; электрошлаковый процесс устойчив при плотностях тока $0,2 \dots 300 \text{ А/мм}^2$ и возможен при использовании проволочных электродов диаметром $1,6 \text{ мм}$ и менее и пластинчатых электродов сечением 400 мм^2 и более высокое качество защиты сварочной ванны от воздуха;

2) высокую производительность. По скорости плавления присадочного металла электрошлаковая сварка вне конкуренции. Она позволяет допускать нагрузку на электрод до 10 000 А;

3) высокую экономичность процесса. На плавление равных количеств электродного металла при ЭШС затрачивается на 15...20 % меньше электроэнергии, чем при дуговой сварке. Расход флюса меньше, чем при дуговой сварке, в 10...20 раз и составляет около 5 % расхода электродной проволоки;

4) отсутствие необходимости в специальной подготовке кромок свариваемых деталей и малую чувствительность их к качеству обработки;

5) высокое качество защиты сварочной ванны от воздуха;

6) недефицитность и сравнительно низкую стоимость сварочных материалов;

7) возможность получения за один проход сварных соединений теоретически любой толщины.

Недостатками электрошлаковой сварки являются:

1) производство сварки только в вертикальном или в близком к вертикальному положению (отклонение от вертикали не более 30°) свариваемых плоскостей;

2) недопустимость остановки электрошлакового процесса до окончания сварки. В случае вынужденной остановки в сварном шве возникает дефект. В таком случае сварной шов подвергают ремонту или полностью удаляют и вновь заваривают;

3) крупнозернистая структура в металле шва и зоне термического влияния и связанная с этим низкая ударная вязкость металла сварного соединения при отрицательных температурах;

4) необходимость изготовления и установки перед сваркой технологических деталей (планки, «стартовые карманы», формирующие устройства и др.).

Электрошлаковая сварка применяется при сварке прямолинейных, криволинейных и кольцевых швов. Минимальная толщина деталей, образующих стыковое соединение при ЭШС без технологических затруднений, находится в пределах 25...30 мм. Экономически целесообразнее использовать ЭШС при изготовлении толстостенных конструкций, а также при изготовлении конструкций из низко- и среднеуглеродистых, низко-, средне- и высоколегированных сталей, чугуна и цветных металлов (алюминия, титана). Кроме того, ЭШС применяют для наплавки различных сплавов на низкоуглеродистые и низколегированные стали.

Электрошлаковой сваркой могут быть выполнены стыковые, угловые и тавровые соединения с конфигурацией шва: прямолинейной, кольцевой, переменного сечения, переменной кривизны.

Самым распространенным и простым с точки зрения техники сварки, является стыковое соединение. Угловые и тавровые соединения встречаются реже, поскольку по технологическим или конструктивным соображениям их заменяют стыковыми соединениями.

Типы, конструктивные элементы и размеры сварных соединений из сталей представлены в ГОСТ 15164-78.

10.4.3. Подготовка деталей к сборке и сварке

Пригодность деталей к ЭШС в основном определяется чистотой обработки торцевых поверхностей свариваемых кромок и состоянием боковых поверхностей кромок, по которым будут перемещаться устройства, формирующие шов.

Для сварки металла толщиной до 200 мм торцевые поверхности кромок готовят газорезательными машинами. Величина отдельных гребешков и выхватов не должно превышать 2...3 мм, а максимальное отклонение от прямоугольности реза должно быть не более 4 мм. При толщинах металла свыше 200 мм, а также для кольцевых швов и деталей из легированных сталей в большинстве случаев применяют механическую обработку.

Боковые поверхности деталей, выполненных из проката, обычно зачищают от ржавчины и окалины наждачными кругами. Боковые поверхности литых и кованных деталей подвергают механической обработке на ширину 60...80 мм от торца кромки. В тех случаях, когда применяют для сварки неподвижные формирующие устройства (медные водоохлаждаемые или стальные привариваемые), боковые поверхности литых деталей не обрабатывают.

При сборке стыковых соединений прямолинейных швов смещение кромок (депланация) не должно превышать 2...3 мм. При сварке деталей разной толщины перед сборкой более толстую кромку сострагивают или на тонкую кромку устанавливают по всей длине стыка выравнивающую планку, которую после сварки сострагивают. При сварке деталей разной толщины используют специальные ступенчатые ползуны. Случайные смещения кромок не должны превышать 1...2 мм.

Допуски на смещение кромок для кольцевых швов меньше. Максимальная разность диаметров стыкуемых деталей не должна превышать $\pm 0,5$ мм, а наибольшее смещение кромок при сборке должно быть не более 1 мм. При сварке кольцевых швов цилиндрических изделий большого диаметра с малой толщиной стенки, свальцованных из проката без механической обработки кромок, смещение кромок не должно превышать 3 мм.

При сборке под сварку для уменьшения депланации листов обычно используют шайбы-пластины с двумя круглыми отверстиями или другие приспособления. Эти пластины пропускают в зазор между листами, а в отверстия (диаметром примерно 40 мм) забивают цилиндрические клинья со скосом.

Перед сваркой сборочные приспособления следует удалять и заменять закрепляющими устройствами, которыми чаще всего служат скобы, привариваемые с тыльной стороны стыка. При большой толщине листов, когда скорость сварки невелика, вместо скоб можно применять пластины, привариваемые односторонними швами с лицевой стороны и удаляемые в процессе сварки, фиксирующие скобы или пластины устанавливают через 500...800 мм. Пластины приваривают так, чтобы шов заканчивался за 60...80 мм от торцевой поверхности кромок.

Для получения точных размеров готового сварного изделия необходимо собирать детали с зазором, учитывающим деформации соединяемых деталей при сварке. Следует различать расчетный, сварочный и сборочный зазоры. Сварочный зазор обычно принимают на 1...12 мм больше расчетного.

В действительности изделие собирают с большим так называемым сборочным зазором. Сборочный зазор в нижней части стыка равен сварочному зазору. В верхней части стыка сборочный зазор следует увеличивать на 2...4 мм на каждый метр длины стыка.

Электрошлаковые швы формируют с помощью водоохлаждаемых ползунов или медных подкладок, а также приваривающимися подкладками или замковыми соединениями.

Для начала электрошлакового процесса и выведения его за пределы сварного соединения используют входной карман и выходные планки.

10.4.4. Возбуждение электрошлакового процесса

Возбуждение электрошлакового процесса заключается в расплавлении флюса и нагреве образовавшейся шлаковой ванны до рабочей температуры.

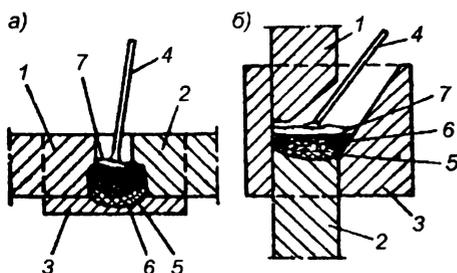
В производстве находят применение следующие способы наведения шлаковой ванны: «твердый старт», когда сварочный флюс вначале плавится теплом электрической дуги во входной планке, а затем шунтируется подсыпаемым и расплавляющимся флюсом, и «жидкий старт», когда в пространство, образуемое свариваемыми деталями и формирующими водоохлаждаемыми устройствами, заливают жидкий флюс, который предварительно расплавляют в отдельной печи.

При «твердом старте» желательно принимать более высокое сварочное напряжение (в процессе горения дуги), чем при стабильном электрошлаковом процессе. Для более легкого возбуждения дуги на дно входной планки засыпают металлический порошок, стружку, термитные смеси или устанавливают металлические вставки.

10.5. Ванная сварка

10.5.1. Сущность способа

Основным способом сварки арматуры при монтаже армокаркасов или сборных железобетонных конструкций является ванная сварка в инвентарных формах. При сварке этим способом ванна расплавленного металла создается за счет непрерывного поддержания дуги и удерживается посредством инвентарных остающихся или съемных подкладок и форм. Сварка может выполняться в нижнем (а) и вертикальном (б) положениях (см. рис. 43).



а – в нижнем положении;
 б – в вертикальном положении;
 1, 2 – арматурные стержни;
 3 – инвентарные формы;
 4 – электрод; 5 – застывающий металл; 6 – ванна расплавленного металла; 7 – слой флюса и шлака

Рисунок 43 – Ванная сварка арматурной стали

Наиболее эффективна полуавтоматическая ванная сварка под флюсом в съемных медных формах. В последнее время получила распространение полуавтоматическая сварка порошковой проволокой. Вместо медных форм допускается применение графитовых, которые, правда, быстро выходят из строя. Менее эффективна, но применяется при небольших объемах работ или в случае отсутствия необходимого оборудования, ручная многоэлектродная или одноэлектродная ванная сварка в медных формах. При затруднениях с обеспечением съемными формами допускается применение остающихся стальных подкладок, при этом сварку ведут ванным способом одним или несколькими электродами. На остающихся подкладках можно вести также полуавтоматическую сварку швами проволокой сплошного сечения или ванношовную ручную сварку покрытыми электродами. Типы, конструктивные элементы и размеры сварных соединений арматуры представлены в ГОСТ 14098-91.

10.5.2. Технология ванный сварки при монтаже арматурных и сборных конструкций

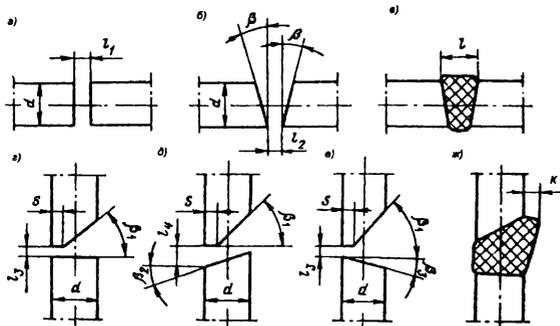
Сварка арматуры и других изделий с её применением выполняется в соответствии с требованиями ГОСТ 14098-91, СНБ 5.03.01-02, РТМ 393-94 для российских объектов и другими нормативными материалами.

По сравнению со сваркой внахлестку и с накладками ванная сварка обладает рядом преимуществ:

- 1) расход металла на стык уменьшается в 10 раз;
- 2) расход электродов и электроэнергии – в 2...3 раза;
- 3) трудоемкость и себестоимость – в 2...3 раза.

Для ванный сварки механическая разделка концов стержней на металлорежущих станках не требуется: торцы обрезают на прессах, пилой или газовой резкой.

Из всех видов ванной сварки наиболее эффективная *полуавтоматическая сварка в медных формах*. Она обеспечивает высокую производительность и хорошее качество сварки при диаметре стержней от 20 до 40 мм. На рисунке 44 а и б показана разделка стыков горизонтальных стержней. Зазор l_1 устанавливается от 12 до 20 мм и l_2 – от 5 до 12 мм. Угол скоса $\beta=10...15^\circ$. На рисунке 44 в показан внешний вид выполненного стыка; размер l должен быть не более 1,5d. На рисунке 44 г, д, е показана подготовка кромок вертикальных стержней. Размеры должны быть выдержаны в следующих пределах: $s \leq 0,15$; $l_3=5...15$ мм; $l_4=8...20$ мм; $\beta_1=40...50^\circ$; $\beta_2=20...25^\circ$; $\beta_3=10...15^\circ$; усиление у выполненного шва (рис. 44 ж) $K \leq 25$ мм.

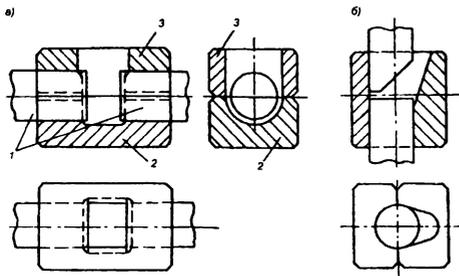


а, г – для стержней диаметром до 32 мм;
б, д, е – для стержней диаметром свыше 32 мм;
в, ж – разрезы швов

Рисунок 44 – Подготовка торцов стержней для ванной полуавтоматической сварки в медных формах

На рисунке 45 показаны конструктивные схемы инвентарных медных форм. При изготовлении на токарном станке или штамповкой они могут иметь другую конструкцию. Формы эти разъемные. Их укрепляют на стыках при помощи специальных хомутов или струбцин.

Для полуавтоматической сварки применяют проволоку диаметром 2 и 2,5 мм. При этом используют флюс. Перед сваркой флюс следует прокалить при температуре 250...300°C в течение 2 ч, а проволоку очистить и намотать на катушки на специальном намоточном станке. Сварку ведут полуавтоматами. В качестве источников питания применяют преобразователи, выпрямители и др. с жесткой внешней характеристикой. В начале сварки засыпают в разделку флюс примерно до половины диаметра стержня, погружают во флюс конец электродной проволоки и касанием к одному из стержней возбуждают дугу.

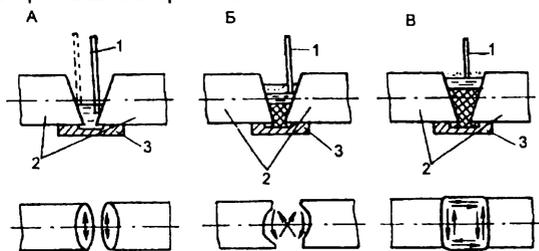


а – для горизонтальных стержней;
б – для вертикальных стержней;
1 – арматурные стержни;
2, 3 – инвентарная форма

Рисунок 45 – Конструктивные схемы медных форм

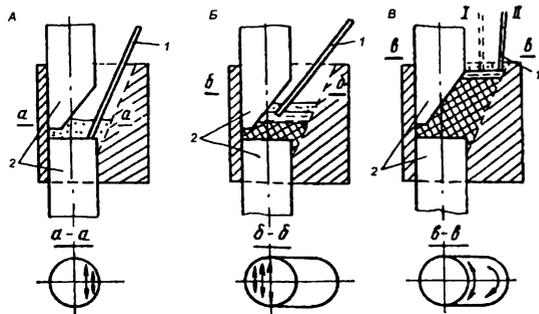
На рисунках 46, 47 показана манипуляция электродной проволокой в процессе сварки. Для горизонтальных стержней напряжение во время сварки не должно меняться. При сварке вертикальных стержней напряжение на последних этапах посте-

пенно понижают. Для регулировки напряжения реостат снимают с преобразователя и выносят в переносном футляре к месту сварки. В случае технической невозможности регулировки начальное напряжение дуги устанавливают на 4...5 В меньше нормального и в конце сварки сварочную проволоку отодвигают от вертикального стержня на предельно возможное расстояние (положение II, рис. 47 в). В процессе сварки подсыпают флюс дозировочными совками, как только начинается разбрызгивание жидкого шлака. По окончании сварки удаляют медную форму после потемнения поверхности шлака. Аналогично описанному сваривают стержни в графитовых формах, которые изготавливают с более толстыми стенками и из специальных углеграфитовых материалов.



А, Б, В – последовательные этапы сварки (стрелками показана манипуляция электродной проволокой); 1 – электродная проволока; 2 – стержни; 3 – медная форма

Рисунок 46 – Техника полуавтоматической ванный сварки горизонтальных арматурных стержней



А, Б, В – последовательные этапы сварки (стрелками показана манипуляция электродной проволокой); I, II – последовательность перемещения проволоки при окончании сварки; 1 – электродная проволока; 2 – стержни; 3 – медная форма

Рисунок 47 – Техника полуавтоматической ванный сварки вертикальных арматурных стержней

Ванную сварку порошковой проволокой диаметром 3 мм производят при помощи полуавтоматов от источника постоянного тока с жесткой внешней характеристикой. Применяют медные или графитовые формы. Полуавтоматическая сварка порошковой проволокой обеспечивает повышение производительности труда при высоком качестве по сравнению с ручной сваркой.

Многослойной ванный сваркой в медной форме соединяют горизонтальные стержни диаметром 20...80 мм. Сварку производят переменным током гребенкой электродов. Гребенку вставляют в держатель и опускают электроды в зазор между стержнями. После возбуждения дуги между электродами и дном подкладки образуется ванна расплавленного металла и шлака. Расплавляя электроды, постепенно заполняют зазор между соединяемыми стержнями. Заключают сварку, периодически погружая электроды в жидкий металл и прерывая дугу, чем достигается выпуклая поверхность шва с усилением.

Применяется также одноэлектродная ванная сварка в медной форме горизонтальных арматурных стержней.

В случаях, когда невозможно или нерационально использовать съемные медные или графитовые формы, применяют ванную сварку арматурных стержней на остающихся стальных подкладках или накладках. Накладка отличается от подкладки большими размерами, так как она воспринимает часть осевой эксплуатационной нагрузки. Ванную сварку на стальной подкладке применяют для стержней диаметром 20...32 мм. Ширина подкладки b примерно равна $1,5d_s$, толщина 6 мм; зазор между стержнями $1,5...2 d_s$ (где d_s — диаметр электрода), но не более 20 мм для ванной и 35 мм для ванно-шовной сварки.

Ванно-шовную сварку на стальной накладке применяют для стержней диаметром 36...80 мм. Ширина b накладки равна примерно $2d$, а толщина – от 6 до 15 мм. При ванно-шовной сварке помимо основного стыка, выполненного ванной сваркой, завариваются фланговые швы, что обеспечивает передачу эксплуатационных усилий на накладку. Сварку ведут на постоянном или переменном токе одиночными электродами. К сварке любым из описанных способов допускают сварщиков, сдавших испытания по сварке арматурных стержней.

10.6. Термитная сварка

10.6.1. Сущность способа

Термитная сварка осуществляется при помощи тепла, получаемого от сгорания порошкообразных термитных смесей (термитов). Смесью составляют из порошков металлов, обладающих большим сродством к кислороду, и порошка окиси железа. Термитная смесь воспламеняется при введении в нее специального запала. Внутри смеси возникают реакции, выделяющие большое количество тепла и развивающие очень высокую температуру, при которой расплавляется даже основной металл.

На практике получили распространение алюминиевый и магниевый термиты. Состав алюминиевого термита: 20...23% алюминия и 77...80% железной окалины. При нагревании этой смеси с помощью термоспичек или электрической дуги до 1200...1300°C происходит следующая реакция: $2Al + Fe_2O_3 = Al_2O_3 + 2Fe$.

Температура, развиваемая при горении алюминиевого термита, достигает 2600...3000°C. Для понижения температуры в образующийся расплав добавляют 10...15% Fe (в виде мелкой стружки). Для раскисления расплава используют ферромарганец и ферросилиций.

На практике применяют три способа термитной сварки: давлением, плавлением и комбинированный. При сварке давлением продукты термитной реакции используют как аккумулятор тепловой энергии. Нагретая термитная смесь придает свариваемым торцам изделия пластичность, что позволяет соединить их сжатием.

Сварку плавлением производят в особых огнеупорных формах, в которые устанавливают кромки свариваемых изделий. Образующийся при горении термита перегретый расплав оплавляет кромки изделий, создавая вблизи них ванну жидкого металла, покрытого слоем шлака. Шлак предохраняет металл от окисления и быстрого остывания, что обеспечивает хорошее качество сварного соединения.

Комбинированный способ применяют, как правило, при сварке рельсовых стыков. Количество термита выбирают так, чтобы нижняя часть формы была заполнена расплавленным металлом, а верхняя – расплавленным шлаком. После заливки формы рельсы сжимают. В результате нижняя часть сваривается плавлением, а верхняя – давлением.

Магниевый термит получил большое применение при сварке стальных проводов. Сварку осуществляют в специальных прессованных цилиндрических шашках, в которые устанавливают встык свариваемые провода, укрепленные в клещах. Шашки

имеют специальный запал для зажигания термита. После сгорания шашки разогретье концы проводов осаживают клещами.

При сварке магниевым термитом происходит реакция с выделением большого количества тепла: $3\text{Mg} + \text{Fe}_2\text{O}_3 = 3\text{MgO} + 2\text{Fe} + \text{Q}$.

10.6.2. Термохимическая сварка

Используется для сварки и резки малоуглеродистых и нержавеющей сталей, медных сплавов, сплавов с никелем в различных сочетаниях. Позволяет сваривать встык детали из листового материала толщиной от 1,5 мм до 8 мм, внахлест – от 1,5 мм до 4,5 мм. Обеспечивает длину сварного шва до 400 мм. Не требует применения дополнительных припоев и флюсов. Для сварки-резки применяют термохимические карандаши (см. рис. 48), пасты. В РФ применяемые карандаши типа ОКСАЛ также используются для резки арматуры диаметром до 22 мм.

Сварочный карандаши и пасты изготовлены на основе термита специального состава. В процессе горения этого термита происходит образование необходимых для сварки высокотемпературных припоев и флюсов, которые наносят на место соединения простым проведением горящего карандаша. Инициирование процесса горения термита осуществляется термитными спичками. Температура зажигания карандаша 800°C. Температура горения карандаша 1100...3000°C (в зависимости от состава термита). Горение карандаша протекает без участия кислорода воздуха. В процессе работы карандаш полностью сгорает, поэтому снабжен специальной державкой, снабженной защитным приспособлением. Сварочный карандаш дает возможность вести процесс сварки при скорости ветра до 10 м/сек, дожде и снеге.

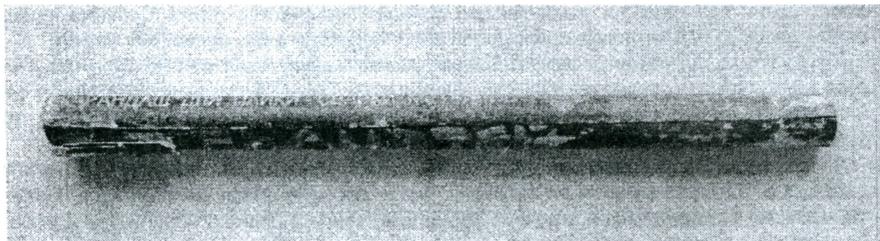


Рисунок 48 – Термохимический карандаш для сварки

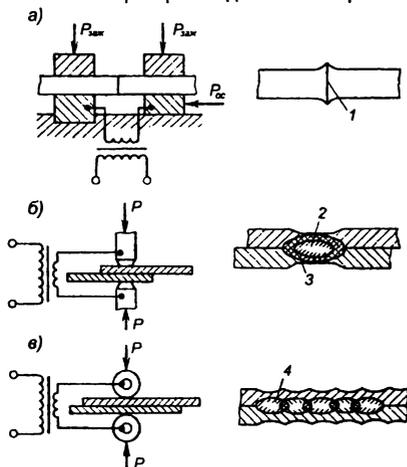
11. СВАРКА ДАВЛЕНИЕМ

11.1. Контактная сварка

11.1.1. Особенности способа сварки

Контактная сварка – процесс соединения деталей нагревом их в месте контакта до пластического или жидкого состояния с применением одновременного или последующего сильного сжатия (осадки), обеспечивающего взаимодействие атомов металла.

Контактную сварку (рис. 49, табл. 3) осуществляют с применением нагрева и давления, при этом для нагрева используют тепло, выделяющееся в контакте свариваемых частей при прохождении электрического тока.



а – стыковая;
б – точечная;
в – шовная;

1 – сварной стык; 2 – литое ядро точки; 3 – периферийная зона; 4 – литая зона шва

Рисунок 49 – Схемы основных процессов и сварных соединений контактной сварки

Таблица 3 – Отличительные особенности основных видов контактной сварки

Вид контактной сварки	Особенность сварки
Стыковая В том числе: оплавлением сопротивлением	Свариваемые части соединяют по поверхности стыкуемых торцов Нагрев металла осуществляется с оплавлением стыкуемых торцов То же, без оплавления стыкуемых торцов
Точечная	Сварное соединение образуется между торцами электродов, подводющих ток и передающих усилие сжатия
Рельефная	Соединение свариваемых деталей создается на отдельных участках их геометрической формы, в том числе по выступам
Шовная	Соединение свариваемых частей происходит между вращающимися роликовыми электродами, подводщими ток и передающими усилие сжатия

Надлежащее качество сварных соединений для большинства видов контактной сварки (кроме стыковой сопротивлением) достигается нагревом металла в зоне сварочных контактов до расплавления, а прилегающих к этой зоне участков металла – до пластического состояния, обеспечивающего необходимую деформацию их под действием усилия сжатия.

Количество тепла Q , выделяемого в зоне сварки, можно определить по формуле Ленца-Джоуля: $Q=I^2 \times R \times t$,

где I – сварочный ток, А; R – сумма сопротивлений отдельных участков цепи, Ом; t – время протекания тока, с.

Сопротивление R в зоне сварки обычно незначительно. Время действия тока t назначают минимальным (секунды, доли секунд), с тем чтобы избежать излишних тепловых потерь. Нагрев при контактной сварке достигается применением в сварочной цепи тока I больших значений (150 кА и более), при этом напряжение обычно не превышает 30 В.

Контактная сварка отличается высокой производительностью, возможностью широкой механизации и автоматизации рабочих процессов, а также существенным снижением расхода основных и вспомогательных материалов. Указанные преимущества этого способа сварки с наибольшей эффективностью проявляются при массовом и крупносерийном производстве однотипных изделий в стационарных условиях работы (в цехах, мастерских).

К особенностям контактной сварки, затрудняющим применение ее в условиях строительства, следует отнести большие установочные мощности контактных машин (до 1000 кВт·А и более), вызывающие необходимость подключения их к отдельному фидеру электрической сети; узкая специализация машин по видам сварных соединений (стыковые, точечные и др.); необходимость в большинстве случаев доставки к машинам заготовок изделий или конструкций; сложность контроля качества сварных соединений.

11.1.2. Области применения контактной сварки в промышленном строительстве

Перечень металлопродукции с соединениями, выполняемыми различными видами контактной сварки, приведен в табл. 4.

Таблица 4 – Перечень металлопроката с соединениями, осуществляемыми контактной сваркой

Вид сварки	Свариваемые металлы	Перечень металлопроката (низкоуглеродистая сталь), размеры свариваемых сечений или толщин металла
Стыковая сопротивлением	Сталь, алюминий, медь, сплавы меди и алюминия	Стержни с площадью сечения до 300 мм ² , трубы диаметром до 40 мм (с газовой защитой), проволока диаметром от 6 до 8 мм
Стыковая непрерывным оплавлением	Сталь низкоуглеродистая, углеродистая, низколегированная и легированная, алюминий, медь, сплавы меди и алюминия	Стержни, рельсы, толстостенные трубы с площадью сечения до 3000 мм ² . Профильный и листовой прокат, тонкостенные трубы с площадью сечения до 6000 мм ² и выше
Стыковая прерывистым оплавлением	То же	Профильный прокат, рельсы, трубы и т.д. Площадь сечения этих элементов в мелкосерийном производстве более 300, в массовом производстве более 1000 мм ²
Точечная (одно- и многоточечная)	Сталь низкоуглеродистая, углеродистая, низколегированная, легированная, цветные металлы и сплавы	Листовой прокат толщиной до 20 мм, крестообразные соединения арматуры железобетона
Шовная	То же	Листовой прокат толщиной до 3+3 мм

В настоящее время в промышленном строительстве контактную сварку применяют при изготовлении в стационарных условиях сеток, каркасов и других арматурных изделий железобетонных конструкций. Точечную сварку используют при изготовлении конструкций из открытых профилей стального проката с толщиной стенок до 6 мм. Стыковой сваркой соединяют короткогабаритные элементы из отходов проката для последующего его применения в конструкциях. Рельефная сварка осуществляется редко.

При изготовлении алюминиевых конструкций и изделий предусмотрена стыковая сварка угловых соединений рам окон и витражей из профильных элементов. Стыковой сваркой соединяют медные и алюминиевые провода (кабели) при электромонтажных работах.

11.1.3. Подготовка элементов к контактной сварке

Перед сваркой обрезают, правят и взаимно подгоняют соединяемые элементы, а также очищают поверхности металла от ржавчины, окалины, смазки и других загрязнений.

Для стыковой сварки сопротивлением необходима тщательная обработка и подгонка торцов перпендикулярно оси заготовок без местных зазоров. При сварке труб торцы их совместно фрезеруют одной дисковой фрезой с последующей зачисткой напильником.

Для стыковой сварки оплавлением допускается менее тщательная подготовка торцов. Элементы можно нарезать на пресс-ножницах, механической пилой или кислородной резкой, после чего поверхности реза очищают от окалины и шлака.

Обработка элементов для точечной и шовной сварки обычно заключается в обрезке кромок (при наличии неровностей), правке и очистке листового металла в зоне соединения.

Очистку металла под контактную сварку осуществляют металлическими щетками (ручными или приводными), песко- или дробеструйными аппаратами, а также травлением в растворах кислот с последующей нейтрализацией в щелочной среде и промывкой в проточной воде.

При подготовке элементов, подлежащих стыковой сварке, очищают торцевые поверхности и участки металла в местах закрепления в зажимах сварочной машины. Листовые элементы перед точечной и роликовой сваркой очищают с двух сторон на ширине не менее 30...50 мм в местах расположения сварных точек или швов.

При недостаточной очищенной поверхности металла заметно снижается качество сварных соединений и одновременно резко повышается износ электродов машин.

Во избежание возникновения дефектов, при сборке листовых элементов под точечную или шовную сварку, следует обеспечивать плотное взаимное прилегание их, не допуская зазоров более 0,5 мм на длине 100 мм.

Типы, конструктивные элементы и размеры сварных соединений представлены в ГОСТ 15878-79 и ГОСТ 14098-91.

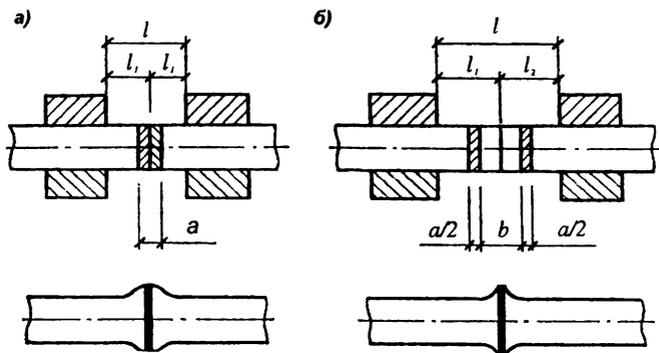
11.1.4. Стыковая контактная сварка

Техника и технология стыковой сварки в зависимости от применяемого способа сварки – сопротивлением или оплавлением, в том числе непрерывным и прерывистым оплавлением (с подогревом) – существенно отличается.

При сварке *сопротивлением* вначале приводят в соприкосновение торцы свариваемых деталей с приложением небольшого давления и после этого включают электрический ток. Давление в процессе нагрева остается без изменения, к концу нагрева его повышают для создания необходимой пластической деформации и сварки. Достижимая широкая зона нагрева позволяет вести сварку при сравнительно низком давлении.

Сварку **непрерывным оплавлением** осуществляют, приводя в соприкосновение детали, находящиеся под напряжением сварочной цепи, при этом возбуждают и поддерживают процесс непрерывного оплавления торцов, сближая детали с постоянной или возрастающей скоростью. После необходимого нагрева прилежащих к торцам слоев металла сдавливают (осаживают) контактные зоны деталей. При этом расплав с окислами выдавливается из плоскости соединения, а перегретый металл околостыковой зоны деформируется, образуя усиление и грат (окислы и капли расплавленного металла).

При сварке с **прерывистым оплавлением** детали предварительно подогревают периодическими короткими замыканиями после достижения высокой температуры концы деталей оплавляют и сжимают (осаживают). Предварительный подогрев, расширяя зону нагрева металла, позволяет уменьшить потребляемую электрическую мощность, сократить припуски на оплавление, а также снизить скорость осадки и давление.



а – сопротивлением;
б – оплавлением;

l – суммарная установочная длина; l_1, l_2 – установочная длина для каждой детали;
а, б – припуски на осадку и оплавление

Рисунок 50 – Схемы установки стержней при стыковой сварке

Конструктивное оформление концов деталей, подготовленных к контактной стыковой сварке, должно обеспечивать равномерный нагрев их по сечению в плоскости соединяемых торцов и в прилежащих зонах; оптимальные оплавления и пластическую деформацию нагретых зон деталей, а также наиболее благоприятные условия для удаления окислов из сварного соединения.

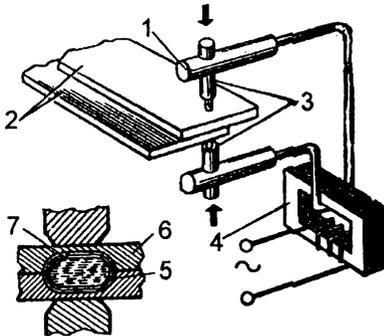
Плоскости контактных торцов деталей должны быть перпендикулярны их оси. Различие по внешним диаметрам деталей крупного сечения не должно превышать 15 %, а по толщине полос или стенок труб – 10%.

Установочная длина l , т. е. общая длина выступающих из зажимов машины концов деталей перед сваркой (рис. 50), влияет на процесс нагрева и охлаждения зоны сварки, а также на продольную устойчивость деталей при сдавливании. При сварке сопротивлением установочную длину назначают с учетом припуска на осадку (деформацию) торцов; при сварке оплавлением, кроме осадки, учитывают припуск на оплавление концов деталей.

Мощность стыковых машин выбирают из расчета $0,12 \dots 0,15$ кВА/мм² сечения свариваемых деталей; при сварке изделий с замкнутым контуром мощность увеличивают в два раза. Напряжение сварочного тока составляет 5...15 В; давление, создаваемое при осадке, равно 15...50 МПа.

11.1.5. Точечная контактная сварка

При точечной контактной сварке соединение создается между торцами электродов, подводящих ток и передающих усилие сжатия (рис. 51). Для получения точечной сварки детали помещают между электродами. При нажатии на педаль верхний хобот 1 машины опускается и зажимает детали 2. Через определенное время, необходимое для создания плотного контакта между деталями, включается сварочный ток, который доводит металл между электродами до плавления, а прилегающую к ядру 7 зону 6 – до пластического состояния. После кристаллизации расплавленного ядра давление снимается.



- 1 – хобот; 2 – свариваемые детали;
- 3 – электрододержатель;
- 4 – трансформатор; 5 – зона термического влияния шва;
- 6 – пластичный слой;
- 7 – расплавленное ядро

Рисунок 51 – Точечная контактная сварка

Электроды должны обладать высокой электро- и теплопроводностью, сохранять необходимую прочность до 400°C . Электроды изготовляют полими из холоднокатаной электролитической меди и сплавов на ее основе. Во время сварки электроды охлаждаются водой.

Для предупреждения образования в сварной точке дефектов в виде трещин, раковин и пор, возникающих из-за усадки металла в момент кристаллизации, давление снимается с некоторым запозданием после выключения тока.

Весь цикл сварки делится на три стадии: **сжатие, сварку и проковку**. Длительность каждого этапа на современных сварочных машинах можно регулировать в пределах от 0,02 до нескольких секунд.

Точечной сваркой выполняют нахлесточные соединения листовых элементов одинаковой или разной толщины, соединения накладных деталей из стержневого или профильного проката с листовыми элементами, соединения пересекающихся стержней и др.

Конструктивное оформление узлов, конструкций и изделий, предназначенных для точечной сварки, должно давать легкий и свободный доступ электродов машин к зоне сварки при наиболее простой конфигурации составляющих элементов. Не допускается введение больших ферромагнитных масс в сварочный контур машин, что имеет особо важное значение при использовании машин переменного тока. Сварку точек необходимо производить в последовательности, обеспечивающей наименьшую деформацию изделия.

Размер и структура сварной точки, определяющие прочность сварного соединения, в значительной степени зависят от формы контактной (рабочей) поверхности электродов. При сварке низкоуглеродистой стали преимущественно используют электроды с плоской рабочей поверхностью. Высокоуглеродистые и легированные стали, а также медь, алюминий и их сплавы сваривают электродами со сферической поверхностью.

В зависимости от числа свариваемых точек, схемы подвода тока к электродам и свариваемым деталям применяют следующие основные способы точечной сварки:

- 1) *одноточечная двусторонняя* (два электрода, питаемые от одного источника тока, расположены соосно с двух сторон свариваемых деталей);
- 2) *двухточечная односторонняя* (два электрода, питаемые от одного источника тока, расположены с одной стороны свариваемых деталей);
- 3) *двухточечная двусторонняя* (с каждой стороны свариваемых деталей соосно расположены по два электрода, питаемые от отдельных источников тока);
- 4) *многоточечная односторонняя* (несколько пар электродов, питаемые от отдельных источников тока, расположены с одной стороны свариваемых деталей).

Наиболее универсальным является способ одноточечной двусторонней точечной сварки, обеспечивающей возможность сваривать элементы строительных конструкций при толщине металла до 30+30 мм.

В зависимости от толщины свариваемых деталей и вида металла применяют различные технологические циклы сварки одной точки, отличающиеся характером изменений во времени действия тока I и давления P .

Мощность точечных машин достигает 600 кВА, плотность тока не менее 120 А/мм², вторичное напряжение 1...12 В, давление между электродами 20...120 МПа.

Рельефная сварка по существу представляет собой многоточечную сварку, при которой расположение точек определяется рельефом деталей. Равномерным распределением усилия сжатия и величиной тока достигается одинаковый провар во всех точках. Свариваемые детали после сварки по всей поверхности плотно прилегают друг к другу.

11.1.6. Шовная контактная сварка

Шовная сварка во многом подобна точечной и отличается тем, что в качестве электрода используют вращающиеся ролики, обеспечивающие возможность последовательной сварки точек без снятия давления с электродов. При вращении роликов и перемещении между ними деталей сваривается последовательно сплошной ряд точек, перекрывающих одна другую и образующих сплошной шов.

Шовной сваркой наиболее часто выполняют нахлесточные соединения и по отбортовке аналогично применяемым при точечной сварке.

Для шовной сварки используют дисковые (роликовые) электроды диаметром от 40 до 400 мм с плоскоцилиндрической рабочей поверхностью при сварке сталей и со сферической поверхностью при сварке цветных и легких металлов и их сплавов.

Шовной сваркой выполняют протяженные швы следующими основными способами:

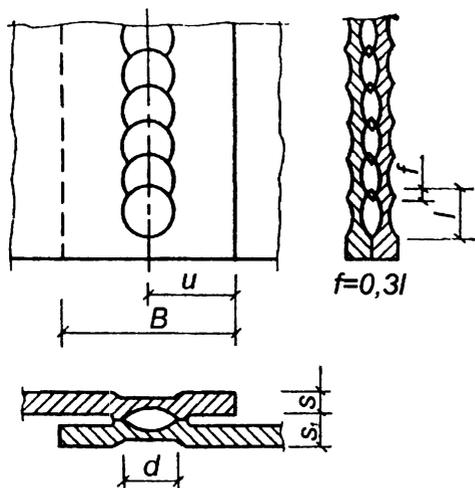
- 1) *непрерывной сваркой* – при непрерывном вращении роликов (электродов) и непрерывном действии сварочного тока;
- 2) *прерывистой сваркой* – при непрерывном вращении роликов и прерывистым (импульсным) действием сварочного тока;
- 3) *шаговой* – с периодической остановкой роликов после поворота их на заданный угол и подачей тока в моменты остановки.

Первые два способа обеспечивают возможность получения герметических швов.

Процесс непрерывной шовной сварки весьма неустойчив, так как по мере действия тока происходит возрастающий разогрев металла, сопровождающийся глубоким внедрением в него роликов. Способ используется для сварки металла толщиной до 1 мм.

При прерывистой шовной сварке получают отдельные сварные точки (в моменты действия тока), которые, перекрывая одна другую, образуют непрерывный шов. При этом обеспечивается устойчивый процесс сварки без перегрева металла.

Большинство конструктивных элементов (рис. 52) сварных соединений шовной сварки имеют обозначения, аналогичные принятым для соединений точечной сварки.



d – ширина литой зоны шва;
 l – длина литой зоны шва;
 f – величина перекрытий литых зон шва; u – расстояние от оси шва до края нахлестки;
 B – величина нахлестки

Рисунок 52 – Основные конструктивные элементы шовных соединений

Для получения плотного шва величина перекрытий f должна быть не менее $0,3 \times l$. Короткие швы сваривают от одного конца к другому, а длинные – от середины к концам. Роликовую сварку осуществляют на переменном токе силой 2000...5000 А.

11.2. Холодная сварка давлением

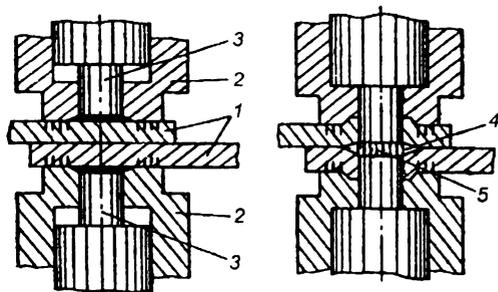
Холодную сварку осуществляют без нагрева свариваемых деталей и применяют главным образом для пластичных металлов (меди, алюминия и их сплавов). Сварное соединение получается внедрением одного металла в другой при их соприкосновении под давлением за счет пластической деформации металла в месте сварки при комнатной и даже отрицательной температурах.

При сжатии происходит диффузионный обмен электронов внешних орбит атомов соединяемых металлов и образование общей кристаллической решетки в сварном шве. Под действием сжимающих усилий атомы свариваемых металлов, расположенные на контактирующих поверхностях, сближаются на расстояние действия межатомных сил и возникают прочные металлические связи.

Качество холодной сварки зависит от подготовки свариваемых кромок. Последние должны быть тщательно очищены от окисных и жировых пленок. Окисные пленки некоторых легко окисляемых на воздухе металлов при достаточно больших удельных давлениях разрушаются и вытесняются из зоны сварки.

Холодной сваркой можно выполнять точечные или шовные соединения внахлестку, а также соединения встык. В строительном производстве широко применяют точечную сварку внахлестку.

Сварку производят без предварительного или с предварительным зажатием деталей, которое обеспечивает наиболее качественное соединение (рис. 53).



- 1 – свариваемые детали;
- 2 – прижимы; 3 – рабочие пуансоны;
- 4 – периферийная зона сварки;
- 5 – внутренняя зона сварки

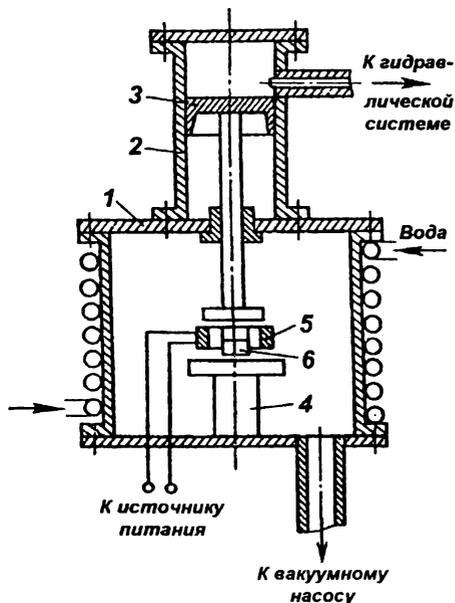
Рисунок 53 – Схема холодной сварки с предварительным зажатием деталей

Холодную сварку алюминиевых и медных деталей толщиной до 10 мм производят под давлением, значительно превышающем в зоне сварки предел текучести свариваемых металлов. В зависимости от состава и толщины свариваемых деталей выбирают удельное давление.

Холодная сварка проводов осуществляется на пневмогидравлических стационарных рычажных и эксцентриковых прессах и переносных установках. Для сварки алюминиевых и медных проводов применяют ручные и настольные клещи.

11.3. Диффузионная сварка в вакууме

Диффузионная сварка – способ сварки без расплавления основного металла за счёт нагрева и сдавливания соединяемых деталей. В месте сварки деталей происходит диффузия одного металла в другой.



- 1 – вакуумная камера;
- 2 – гидравлический цилиндр;
- 3 – поршень со штоком;
- 4 – опора; 5 – нагреватель;
- 6 – свариваемые заготовки

Рисунок 54 – Схема диффузионной сварки в вакууме

При этом способе сварки соединяемые детали с тщательно зачищенными и пригнанными поверхностями помещают в вакуумную камеру при остаточном давлении среды $133 \times 10^{-3} \dots 133 \times 10^{-5}$ Па ($10^{-3} \dots 10^{-5}$ мм рт. ст.) и нагревают токами высокой частоты до необходимой температуры, а затем соединяют друг с другом с усилием (рис. 54). Удельное давление достигает 25 МПа. Через несколько минут после окончания сварки детали охлаждаются, и их выгружают из камеры.

Выбор режима при диффузионной сварке зависит от рода свариваемых металлов. При сварке однородных металлов даже под микроскопом трудно установить месторасположение шва.

Диффузионную сварку в вакууме применяют для соединения трудносвариваемых металлов и сплавов, цветных металлов, металлокерамических изделий, пластин из твердых сплавов с державкой режущего инструмента. Кроме того, этим способом можно получить различные биметаллы, например, для деталей, работающих на износ.

Промышленные установки СДВУ (более 30 типов) для диффузионной сварки применяют для индивидуального, серийного и массового производств. Этим методом можно сваривать сталь с алюминием, чугуном, вольфрамом; серебро с нержавеющей сталью, платину с титаном и т. д. Этот эффективный способ соединения деталей небольших сечений легко можно автоматизировать.

Применение диффузионной сварки ограничивается необходимостью иметь сложную и дорогую аппаратуру. Её производительность не очень высока из-за наличия таких операций, как вакуумирование камеры, нагрев деталей, выдержка для проведения диффузии.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Гуляев, А.П. Металловедение: учебник.– 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1986.– 544 с.
2. Болдырев, А.М. Сварочные работы в строительстве и основы технологии металлов: учебник / А.М. Болдырев, А.С. Орлов. – М.: Изд-во АСВ, 1994.– 432 с.
3. Технология металлов и сварка / Под ред. П.И.Полухина. – М.: Высшая школа, 1977.– 464 с.
4. Алексеев, В.К. В.И. Сварка в промышленном строительстве: учебное пособие / В.К. Алексеев, В.И. Мельник. – 4-е изд. – М.: Стройиздат, 1977.– 360 с.
5. Сварка и резка в промышленном строительстве. Справочник строителя/Под ред. В.Д. Малышева. – 3-е изд. – М: Стройиздат, 1989.– 780 с.
6. Куликов, В.П. Технология и оборудование сварки плавлением и термической резки: учебник.– Мн.: Экоперспектива, 2003.– 415 с.

Учебное издание

Мухин Анатолий Викторович
Черноиван Николай Вячеславович

МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ И СВАРКА

Конспект лекций

*Рекомендован Советом университета для студентов
специальности 1 – 70 01 01 «Производство строительных
изделий и конструкций»*

Ответственный за выпуск: Н.В. Черноиван
Редактор: Т.В. Строкач
Компьютерная верстка: Е.А. Боровикова
Корректор: Е.В. Никитчик

Подписано к печати 15.03.2011 г. Бумага «Снегурочка».
Формат 60x84 ¹/₁₆. Гарнитура «Arial».
Усл. п. л. 6,5. Уч.-изд. л. 7,0. Тираж 120 экз.
Заказ № 309. Отпечатано на ризографе
учреждения образования «Брестский
государственный технический университет».
224017, г. Брест, ул. Московская, 267.
Лицензия № 02330/0549435 от 8.04.2009 г.

ISBN 978-985-493-187-6



9 789854 931876