

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ ИМПЕРАТОРА АЛЕКСАНДРА I»
(ФГБОУ ВО ПГУПС)

Н.А. Битюцкий, А.А. Соболев, И.Ю. Новосельский
А.А. Воробьев, Д.П. Кононов, Д.А. Жуков, А.А.
Соболев, А.П. Мойсееня, Н.А. Битюцкий

Материаловедение.
Технология конструкционных материалов
(Сварочное производство)

Учебное пособие

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2024

УДК 389.6: 621.753

ББК 30.10.65.2/4.ц

Воробьев А.А. Материаловедение и технология конструкционных материалов: учебное пособие по выполнению лабораторных работ / А.А. Воробьев, Д.П. Кононов, Д.А. Жуков, А.А. Соболев, А.П. Мойсееня, Н.А. Битюцкий. – СПб: ПГУПС, 2024. - 132 с.

В пособии рассмотрены основы теории сплавов, изложены основные положения о конструкции оборудования и параметрах режима электродуговой и газовой сварки, связанных с технологическими возможностями процессов. Показаны пути определения характеристик плавления электродов для различных способов дуговой сварки или наплавки. Представлены методы исследования дефектов сварных соединений.

Предназначено для студентов факультета «Транспортные и энергетические системы», изучающих дисциплину «Материаловедение и технология конструкционных материалов». Может быть использовано студентами технических специальностей, обучающихся по укрупнённым группам специальностей «Машиностроение», «Техника и технологии наземного транспорта», «Управление в технических системах» и др.

Рецензенты:

кандидат технических наук, доцент, генеральный директор

ОАО «Тверской вагоностроительный завод»

А.А. Овелян;

Профессор кафедры «Наземные транспортно-технологические комплексы»,
доктор технических наук

И.А. Иванов

Воробьев, А. А.

В75

Материаловедение. Технология конструкционных материалов (Обработка металлов резанием и металлорежущие станки): / А. А. Воробьев, А. М. Будюкин, Н.А. Битюцкий и др. – Санкт-Петербург: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2023. – 132 с.

В издании приводятся указания для выполнения лабораторных работ по дисциплине «Материаловедение. Технология конструкционных материалов», «Материаловедение и технология конструкционных материалов» и «Технология конструкционных материалов» (раздел «Сварка»).

Пособие предназначено для подготовки к лабораторным работам, практическим занятиям и как лекционный материал для обучающихся всех форм обучения по укрупненной группе 23.00.00 «Техника и технологии наземного транспорта», а именно для специальности 23.05.03 «Подвижной состав железных дорог» (специализаций: «Пассажирские вагоны», «Грузовые вагоны», «Высокоскоростной наземный транспорт», «Электрический транспорт железных дорог», «Технология производства и ремонта подвижного состава», «Локомотивы», «Вагоны»), специальности 23.05.01 «Наземные транспортно-технологические средства», (специализация «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные средства и оборудование»), направления 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов» профиль «Автомобильный сервис», 23.04.02 «Наземные транспортно-технологические комплексы» магистерская программа: «Производство и ремонт транспортно-технологических комплексов» и др. специализаций, направлений, профилей и программ.

УДК 621.01

ББК 34.41

© ФГБОУ ВО ПГУПС, 2023

СОДЕРЖАНИЕ

I. Материаловедение.....	7
1. Макроскопический анализ металлов и сплавов.....	8
1.1. Порядок выполнения работы.....	8
1.2. Теоретическая часть работы.....	8
1.3. Контрольные вопросы.....	11
2. Исследование твёрдости углеродистых сталей.....	12
2.2.1. Измерение твердости методом Бринелля (НВ).....	13
2.2.2. Измерение твердости методом Роквелла.....	14
2.2.3. Измерение твердости методом Виккерса.....	15
2.2.4. Теоретическое определение твердости.....	17
2.3. Контрольные вопросы.....	18
3. Теория сплавов.....	18
3.1. Основные вопросы по теории сплавов.....	18
3.2. Типовые формы заданий и ответов.....	19
3.2.1. Вид кривой охлаждения.....	20
3.2.2. Определение кристаллизующейся твёрдой фазы.....	21
3.2.3. Определение химического состава жидкой или твёрдой фаз.....	22
3.2.4. Реакция первичной кристаллизации и эвтектическая реакция для исследуемого сплава.....	22
3.2.5. Относительное весовое количество жидкой или твёрдой фаз в заданной точке интервала кристаллизации.....	23
3.2.6. Определение избыточной фазы в заданной точке на диаграмме состояния.....	23
3.2.7. Количество фаз и структурных составляющих для любого исследуемого сплава.....	24
3.2.8. Состав эвтектики (эвтектоида) у любого изучаемого сплава.....	25
3.2.9. Изменение физико-механических свойств сплавов при комнатной температуре в зависимости от их химических составов.....	25
4. Исследование микроструктуры металлов и сплавов.....	27
4.1. Порядок выполнения работы.....	27
4.2. Теоретическая часть работы.....	27
4.3. Изучение сплавов двойных систем.....	30
4.3.1. Диаграмма состояния I рода.....	31
4.3.2. Диаграмма состояния II рода.....	35
4.4. Контрольные вопросы.....	37
5. Диаграмма состояния Fe-Fe ₃ C.....	37
5.2. Теоретическая часть работы.....	38
5.2. Превращения при охлаждении сплавов.....	40
5.3. Превращения при нагреве сплавов.....	42
5.4. Контрольные вопросы.....	44

6. Стабильные и некоторые особые структуры стали	45
6.1. Порядок выполнения работы	45
6.2. Теоретическая часть работы	46
6.3. Контрольные вопросы	50
7. Исследование структуры и свойств чугунов.....	51
7.1. Порядок выполнения работы	51
7.2. Теоретическая часть работы	51
7.3. Белый чугун (ГОСТ 805-95).....	53
7.4. Серый чугун (ГОСТ 1412-85)	53
7.5. Ковкий чугун (ГОСТ 1215-79).....	56
7.6. Высокопрочный чугун (ГОСТ 7293-85)	56
8. Исследование метастабильных структур сталей	58
8.1. Порядок выполнения работы	58
8.2. Теоретическая часть работы	58
8.3. Закалка стали	59
8.4. Отпуск стали.....	61
8.5. Контрольные вопросы	63
II. Технология конструкционных материалов.....	64
1. Физические и электрические свойства сварочной дуги.....	64
1.1. Возникновение дуги.....	64
1.2. Строение сварочной дуги при ручной дуговой сварке штучным покрытым электродом	66
1.3. Устойчивое горение дуги	68
1.4. Электрические свойства дуги	69
1.5. Тепловые свойства сварочной дуги	70
1.6. Классификация сварочных дуг	71
1.7. Порядок выполнения работы	72
2.8. Контрольные вопросы	74
2. Определение параметров режима и качества электрической контактной сварки	74
2.1. Общие теоретические сведения.....	74
2.1.1. Стыковая контактная сварка.....	75
2.1.2. Точечная контактная сварка	78
2.1.3. Шовная контактная сварка.....	80
2.2. Порядок выполнения работы	82
2.3. Контрольные вопросы	82
3. Источники питания дуговой сварки. снятие и построение внешних характеристик	83
3.1. Краткие общие и теоретические сведения	83
3.2. Порядок выполнения работы	87
3.3. Содержание отчёта.....	87

3.4. Контрольные вопросы	87
4. Ручная электродуговая сварка стальных изделий штучным покрытым электродом. расчёт параметров режима сварки.....	88
4.1. Сущность ручной дуговой сварки. Исследование влияния покрытия электродов на качество сварного шва.....	88
4.2. Определение сварочно-технологических характеристик электродов и производительности сварки	89
4.3. Порядок выполнения работы	90
4.4. Техника и технология выполнения ручной дуговой сварки	91
5. Полуавтоматическая электродуговая сварка стальной проволокой в среде углекислого газа	93
5.1. Сущность и особенности способов дуговой сварки в защитных газах.	93
5.2. Порядок выполнения работы	96
5.3. Содержание отчёта.....	96
5.4. Контрольные вопросы	97
6. Автоматическая сварка под флюсом.....	97
6.1. Особенности процесса дуговой сварки под флюсом	97
6.2. Устройство, принцип действия и технологические возможности автоматов для дуговой сварки под флюсом.....	98
6.3. Порядок выполнения работы	103
6.4. Содержание отчёта.....	103
6.5. Контрольные вопросы	103
7. Исследование деформаций при наплавке пластин	104
7.1. Общие сведения	104
7.2. Содержание работы	106
7.3. Порядок выполнения работы	109
7.4. Контрольные вопросы	110
8. Определение параметров режима и качества газовой сварки	110
8.1. Содержание работы	110
8.2. Порядок выполнения работы	116
8.3. Контрольные вопросы	117
9. Исследование дефектов сварных соединений.....	117
9.1. Содержание работы	117
9.2. Контрольные вопросы	127
Библиографический список	128
Приложение А	129
Приложение Б	130
Приложение В.....	131
Приложение Г	132

ВВЕДЕНИЕ

Основной задачей дисциплины «Материаловедение и технология конструкционных материалов» является подготовка студентов в области материаловедения, технологии производства и обработки конструкционных материалов, формообразования заготовок и деталей машин.

Раздел I посвящен материаловедению. Рассмотрены строение и свойства материалов (в основном, металлов и их сплавов); структура, свойства, термическая и химико-термическая обработка железоуглеродистых сплавов.

Раздел II посвящён сварочному производству. В течение последнего столетия сварка стала одним из наиболее распространённых технологических процессов. Решение множества важнейших технических проблем современности неразрывно связано с необходимостью получения сварных соединений, способных работать в различных условиях, в том числе экстремальных.

Сварка предоставляет широкие возможности для оптимизации конструктивных решений, снижения трудоемкости изготовления конструкций, использования рациональных типов конструктивных элементов, позволяющих существенно уменьшить металлоемкость. Сварку как один из видов получения неразъемных соединений широко применяют в различных отраслях техники.

В данном учебном пособии освещены основные вопросы, возникающие при выполнении соединений различными видами электродуговой, электрической контактной и газовой сварки. Рассмотрены особенности сварки сталей различных классов, чугунов и цветных металлов; приведены характеристики оборудования для сварки металлов. Также разобраны возможные деформации и дефекты, которые могут возникнуть при проведении сварочных работ.

I. МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

1. МАКРОСКОПИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Цель работы: изучить один из методов исследования металлических материалов, получить практические навыки по выполнению некоторых операций, связанных с подготовкой металла к исследованию, а также по определению качества металлов посредством травления их реактивом Гейна, выполнения пробы на серу и по определению технологии изготовления различных образцов.

1.1. Порядок выполнения работы

Методом макроанализа студенты исследуют изломы деталей, макрошлифы, выполняют пробу металла на серу; дают заключение о качестве металла по наличию и характеру распределения серы в исследуемом макрошлифе и определяют способы (технологии) изготовления деталей, представленных в учебной коллекции.

Бригада студентов из трех-четырех человек получает один макрошлиф для практического визуального исследования макроструктуры и альбом характерных макроснимков. Сначала выполняют травление макрошлифа реактивом Гейна, затем характерные образцы зарисовывают в отчеты и дают им истолкование. После этого выполняют исследование распределения сернистых включений по методике Баумана. Полученные отпечатки приклеивают в отчеты и по ним дают заключение о качестве металла исследуемого макрошлифа.

Коллекцию макрошлифов и альбом характерных макроснимков используют для визуального исследования различных макроструктур и освоения их схематической зарисовки.

1.2. Теоретическая часть работы

Макроанализ – это способ исследования металлов и сплавов, осуществляемый невооруженным глазом или при небольшом увеличении (до 30 раз) с помощью лупы. Видимую при этом структуру металла называют макроструктурой.

Макроскопический анализ позволяет выявить различные виды нарушения сплошности (трещины, усадочные раковины, газовую пористость и др.), характер излома, химическую неоднородность (ликвацию), направление волокон в деформированном металле, расположение кристаллических зерен в литом металле и т.п.

Несмотря на кажущуюся простоту этого метода анализа металлических материалов он позволяет получить значительный объем полезной информации (в основном качественной) и наметить пути дальнейших исследований. Поэтому он находит широкое применение на практике.

Макростроение металла исследуют по изломам и макрошлифам. Изломы бывают вязкими, усталостными и хрупкими. Вязкий излом – это результат разрушения металла после пластической деформации (рис. 1.1, *а*), хрупкий – без заметной деформации (рис. 1.1, *б*).

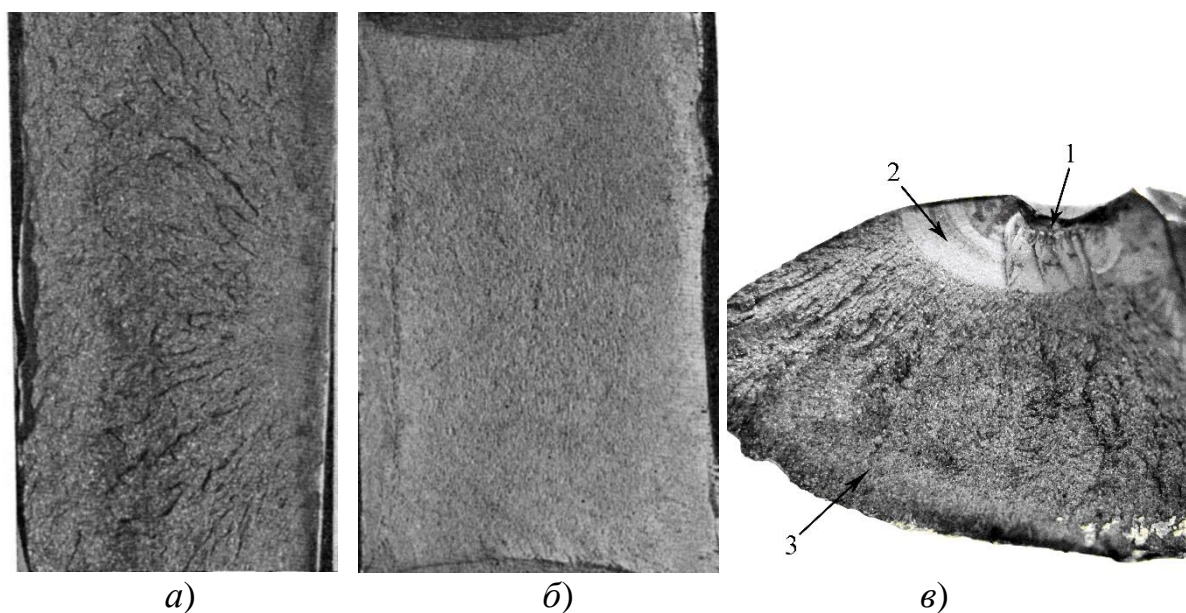


Рис. 1.1. Виды изломов:

а – вязкий; *б* – хрупкий; *в* – усталостный;
1 – зона зарождения усталостной трещины; 2 – зона усталостного развития трещины; 3 – зона окончательного долома

Изломы могут иметь волокнистое и кристаллическое (зернистое) строение. По излому можно судить о размере зерна, особенностях выплавки и литья (температуре литья, скорости и равномерности охлаждения сплава и т.д.), термической обработке, а следовательно, и о некоторых свойствах металла. Вид излома является критерием при определении склонности стали к хрупкому разрушению. Среди хрупких изломов различают крупнозернистый, мелкозернистый, межкристаллический, транскристаллический, нафталинистый и другие.

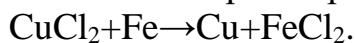
Крупнозернистый излом, например, образуется по граням крупных зерен. Такой излом в большинстве случаев является признаком недоброкачественной структуры. Чем более крупнозернистое строение в изломе, тем ниже механические свойства металла. Крупное зерно в структуре металла приводит к снижению ударной вязкости и, как следствие, снижает работоспособность детали при динамических и циклических нагрузках. Крупнозернистая структура, которую имеет литая сталь, может возникнуть также при нарушении технологии обработки: рекристаллизационном отжиге, перегреве стали при термообработке.

Мелкозернистый излом является признаком доброкачественной структуры и может наблюдаться у сталей, подвергнутых закалке. Механические

свойства сталей с мелкозернистой структурой более высоки, чем с крупнозернистой.

Причиной возникновения усталостного излома является воздействие знакопеременных или пульсирующих нагрузок. При подобном изломе (рис. 1.1, в), как правило, имеются концентратор - очаг возникновения трещины 1, зона предварительного разрушения со светлой сглаженной поверхностью 2, зона окончательного долома 3, образующаяся в момент окончательного разрушения и имеющая зернистое строение. Концентраторами напряжений чаще всего являются трещины, забоины, риски, неметаллические включения и т.д.

Макрошлиф представляет собой часть исследуемого металла, подвергнутого специальной подготовке. Она состоит в выравнивании напильником подлежащей обследованию поверхности и шлифовании ее наждачной бумагой. При необходимости шлиф травят реактивами (кислотами, щелочами или растворами солей), которые по-разному растворяют или окрашивают различные по составу или ориентации части металла. Например, обычные стали травят реактивом Гейна (8% CuCl_2 , 5% NH_4Cl , 87% H_2O). Режим травления: время 30-90 с, температура 18-24 °С. Во время травления протекает реакция:



Налет меди удаляют тампоном под струей воды.

Исследование макрошлифов позволяет определить форму и расположение зерен в литом металле; волокна (деформированные кристаллы) в прокатанном металле, поковках и штамповках; химическую неоднородность сплава (ликвацию), вызванную процессом кристаллизации или созданную термической или химикотермической обработкой (цементация, азотирование и т. д.). На них также четко выявляются металл сварного шва и наплавленных участков, зоны сплавления и термического влияния.

Макрошлифы используются также и для выявления серы в стали. Она является вредной примесью, понижающей пластичность и прочность стали, сопротивление истиранию и коррозионную стойкость. Сера не растворяется в железе, а образует с ним химическое соединение FeS . Сернистое железо с железом образует эвтектику FeS-Fe с температурой плавления 988 °С. При затверждении стали эта эвтектика располагается в виде легкоплавких оболочек вокруг зерен. Наличие таких оболочек является причиной красноломкости (хрупкости при красном калении) стали с повышенным содержанием серы при горячей обработке (ковке, прокатке и сварке). Оболочки расплавляются, в результате чего между зернами теряется связь и образуются трещины.

Согласно нормативным документам, в зависимости от количества и характера распределения серы в металле последний характеризуется как:

- *высококачественный* – серные включения распределены равномерно, общее содержание серы не превышает допустимых величин;

- *качественный* – прямая ликвация серных включений или очаговая (междендритная) ликвация с ориентацией к центру сечения;

- *обыкновенного качества* – очаговая ликвация без ориентации или с ориентацией к периферии, если количество пятен не больше нормы;

- *брак* – ликвация к периферии сечения и очаговая без ориентации или с ориентацией к периферии, если количество точек больше нормы по техническим условиям на данную деталь.

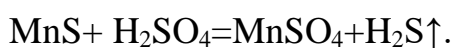
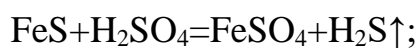
С целью выявления наличия ликвации серы и определения характера ее распределения выполняется проба металла на серу. Она осуществляется по следующей методике.

1. Бромосеребряную фотобумагу засвечивают и помещают на 5...10 мин в 5%-ный раствор серной кислоты. Эмульсионный слой фотобумаги при этом насыщается серной кислотой.

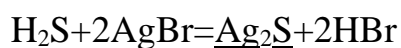
2. Макрошлиф обезжиривается и укладывается на стол подготовленной поверхностью вверх.

3. На подготовленную поверхность макрошлифа укладывается фотобумага эмульсионной стороной; валиком осуществляется ее прикатка к шлифу в течение 25-30 мин, но не менее 7-8 мин.

В результате взаимодействия сернистых соединений FeS и MnS макрошлифа с серной кислотой протекают следующие реакции:



Образующийся сероводород взаимодействует с бромистым серебром эмульсионного слоя фотобумаги, что приводит к образованию сернистого серебра Ag₂S:



↓

Ag₂S проявляется на фотобумаге в виде темно-коричневых точек и пятен, которые отражают места расположения серы в металле.

4. Сняв фотобумагу с макрошлифа, промывают ее водой и фиксируют, т.е. на 10...15 мин кладут в закрепитель.

5. Отпечаток на серу промывают и сушат.

Полученный фотоотпечаток, являющийся документальным отражением характера распределения сернистых соединений в конкретном макрошлифе, позволяет сделать заключение о качестве металла, из которого изготовлен данный шлиф.

1.3. Контрольные вопросы

1. Что представляет собой метод макроскопического анализа металлов?
2. Каких видов бывают изломы деталей?
3. Какое влияние оказывают размеры зерен кристаллического строения на склонность металла к разрушению?
4. Каков характер излома детали при воздействии знакопеременных или пульсирующей нагрузкой?

5. Что называется макрошлифом?
6. Какова технология изготовления макрошлифа?
7. Что называется ликвацией?
8. Как определяется ликвация серы?
9. Как зависит качество металла от характера распределения в нем серы?
10. Каковы особенности макроструктур образцов, изготовленных по различным технологиям (литьем, штамповкой, наплавкой и т. д.)?
11. Каков должен быть характер взаиморасположения волокон в прокатанном металле и максимально действующих на него усилий?
12. Почему при травлении реактивом Гейна наиболее быстро протравливают границы зерен?
13. Всегда ли металл будет некачественным, если сера в нем распределена неравномерно?
14. Почему в конце шлифования все риски на макрошлифе должны располагаться в одном направлении?

2. ИССЛЕДОВАНИЕ ТВЁРДОСТИ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

Цель работы – исследовать влияние содержания углерода на твердость стали, изучить методы измерения твердости материалов, освоить методику и получить практические навыки измерения твердости металлов.

2.1. Порядок выполнения работы

Группа студентов из трех-четырех человек получают методические пособия, три образца исследуемых углеродистых сталей, лупу Бринелля и переводные таблицы для определения теоретических значений твердости. Студенты записывают применение углеродистых сталей в зависимости от химического состава и марки стали. Твердость измеряют двумя методами: по методу Бринелля и Роквелла. После измерения рассчитывают теоретическое значение твердости, строят графики и сравнивают теоретические и экспериментальные значения. По результатам работы студенты делают выводы.

2.2. Теоретическая часть работы

Под твёрдостью понимают свойство материала сопротивляться проникновению в него более твёрдого наконечника (индентора), не получающего остаточных деформаций.

Испытания на твёрдость получили большое распространение в промышленности, т.к. они позволяют без разрушения изделия и изготовления специальных образцов, судить о качестве изделия. К тому же имеется возможность по результатам испытаний на твёрдость определить величину предела прочности материала без проведения испытаний на растяжение. Приборы для испытания на твердость обладают высокой производительностью (до 100 испы-

таний в час), значительно превышающей производительность других испытательных машин.

Наибольшее распространение получили статические методы:

- а) метод Бринелля – вдавливание стального закалённого шарика;
- б) метод Роквелла – вдавливание стального шарика при контроле мягких материалов или алмазного конуса при испытании твёрдых;
- в) метод Виккерса – вдавливание алмазной пирамиды.

2.2.1. Измерение твердости методом Бринелля (НВ)

Метод основан на том, что в плоскую поверхность металла на прессе Бринелля (рис. 2.1) вдавливается под постоянной нагрузкой P твердый стальной шарик.

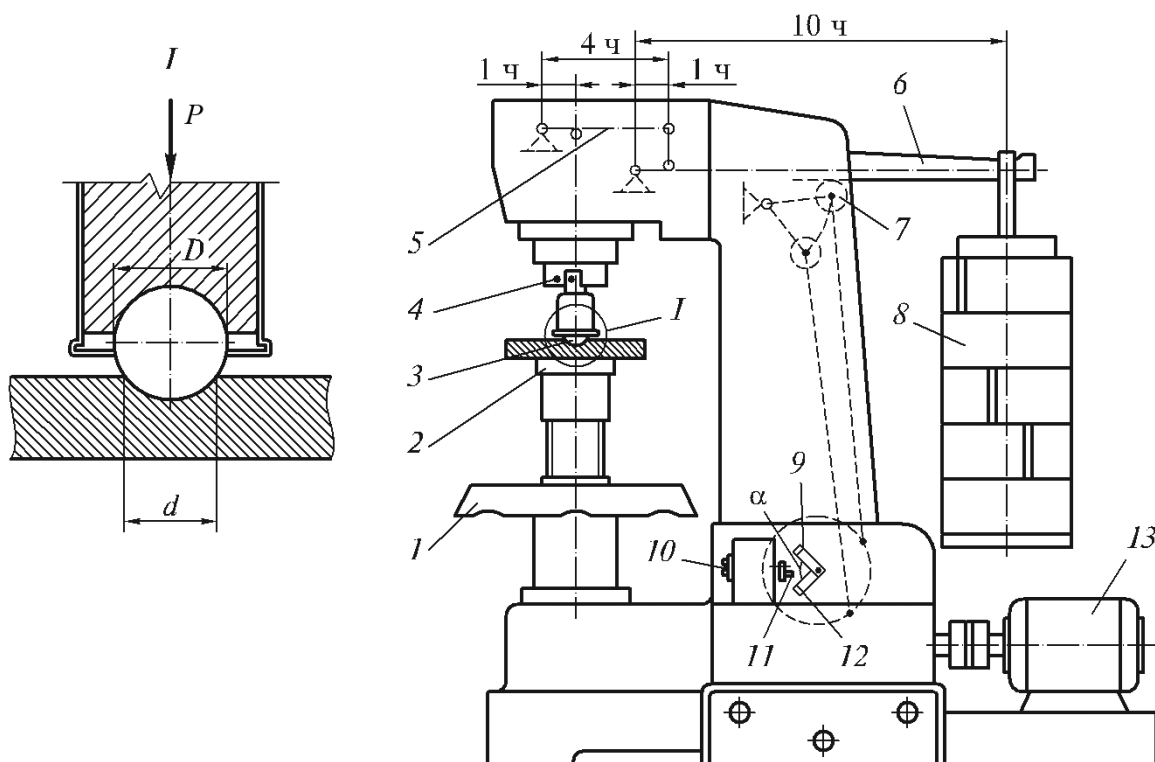


Рис. 2.1. Схема пресса Бринелля: 1 – маховик; 2 – опора образца; 3 – шарик; 4 – метки; 5 – рычаг 1:4; 6 – рычаг 1:10; 7 – подвижная опора; 8 – грузы; 9, 12 – кулачки; 10 – кнопка пуска; 11 – концевой переключатель; 13 – электродвигатель; ч - часть

Диаметр шарика D зависит от марки исследуемого материала и его предполагаемой твердости и может выбираться из ряда: 10; 5; 2,5; 2 и 1 мм. Нагрузка P может составлять 30000 Н, 10000 Н или 7500 Н (3000 кг, 1000 кг и 750 кг соответственно) в зависимости от материала. Время выдержки под нагрузкой составляет 10 с для черных металлов и 30, 60 – для цветных. После снятия нагрузки в испытуемом материале образуется отпечаток (лунка) диаметром d (рис. 2.1)

Чем тверже материал, тем меньше диаметр отпечатка d , который измеряется с помощью лупы Бринелля (компаратора) или отсчетного микроскопа с точностью до 0,05 мм в двух взаимно перпендикулярных направлениях. По двум измерениям находят их среднее арифметическое, по которому определяют твердость по Бринеллю по формулам:

$$HB = \frac{P}{S}, \text{ либо } HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})};$$

где P – величина нагрузки;

S – площадь отпечатка;

D – диаметр шарика;

d – диаметр лунки.

На практике расчеты по приведенным формулам не выполняют. Твердость по Бринеллю определяют из таблиц, прилагаемых к прибору, по среднему диаметру отпечатка в зависимости от принятой нагрузки и диаметра шарика (Приложение А).

Метод Бринелля не рекомендуется применять для металлов с твердостью более HB 450 (4500 МПа), так как шарик может деформироваться, что приведет к неправильному результату и для изделий, имеющих небольшую толщину, так как шарик может продавить тонкий слой металла.

Для получения достоверных результатов шероховатость поверхности должна быть не ниже $Ra2,5$ мкм, а толщина не менее десятикратной толщины отпечатка.

2.2.2. Измерение твердости методом Роквелла

Твердость по Роквеллу (HRB , HRC , HRA) – условная величина, обратная глубине вдавливания стального закаленного шарика диаметром 1,588 мм (1/16”), или алмазного конуса с углом 120° .

Принципиальное отличие измерения твердости по способу Роквелла от измерения по способу Бринелля состоит в том, что её измеряют не по диаметру, а по глубине отпечатка, получаемого в результате вдавливания наконечника с инденторами в испытуемый образец (изделие) под действием последовательно прилагаемой предварительной P_0 и основной P_1 нагрузок на глубину h_0 или h_1 соответственно (рис. 2.2).

Величина твердости определяется разностью между глубиной впадин, получаемых на испытуемом изделии от вдавливания алмазного конуса или стального шарика под основной и предварительной нагрузкой. Предварительная нагрузка равна 100 Н (10 кг). Она дается для того, чтобы исключить влияние различной степени чистоты на результаты измерений. За единицу твердости принята величина, соответствующая осевому перемещению наконечника на 0,002 мм. Для численной характеристики твердости введена условная шкала с цифрами, нанесенными в порядке, обратном движению стрелки в момент приложения нагрузки.

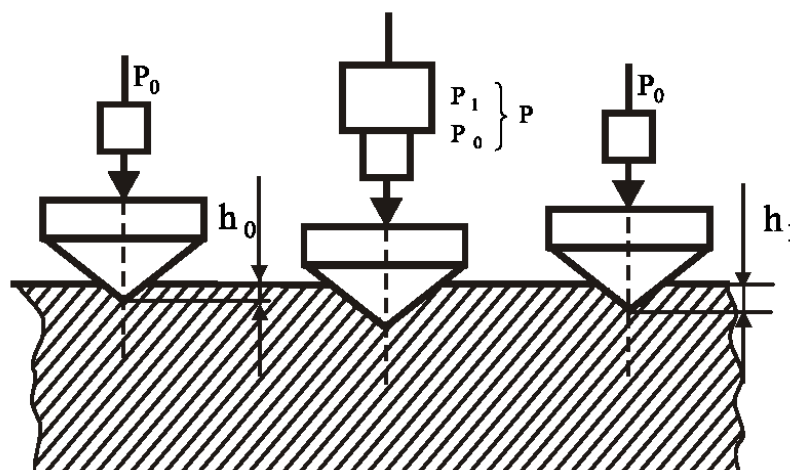


Рис. 2.2. Схема определения твёрдости по Роквеллу

Твёрдость по Роквеллу обозначается цифрами и буквами HR с указанием шкалы твёрдости (*A*, *B*, *C*).

Шкала «*A*» используется для измерения твёрдости изделий из твердых сплавов. Испытательная нагрузка в этом случае составляет 60 кгс (600 Н), индентором является алмазный конус, отсчет выполняется по шкале «*A*», твёрдость обозначается *HRA*.

Стальной закаленный шарик используют для испытания мягких металлов (незакаленная сталь, латунь, бронза, алюминиевые сплавы), твёрдость которых находится в пределах 25-100 единиц, при этом общая испытательная нагрузка составляет 100 кгс (1000 Н). Отсчет твёрдости ведется по шкале «*B*» и она обозначается *HRB*.

Шкала «*C*» применяется для измерения твёрдости изделий прошедших упрочняющую обработку. Общая испытательная нагрузка составляет 150 кгс (1500 Н), индентор – алмазный конус. Отсчет ведется по шкале «*C*» и обозначают *HRC*. В этом случае допускаются испытания материалов с твёрдостью 20-70 ед.

Схема пресса Роквелла представлена на рис. 2.3. Для обеспечения достоверности получаемых результатов поверхность изделия должна быть сухой чистой без трещин, выбоин, наклепа и следов предыдущих испытаний, кроме того шероховатость должна быть не ниже *Ra*1,25 мкм. Изделие не должно качаться, прогибаться, пружинить. При измерении изделий с цилиндрической поверхностью радиус кривизны должен быть не меньше 15 мм.

2.2.3. Измерение твёрдости методом Виккерса

Существует еще один метод определения твёрдости металла – по Виккерсу (*HV*). Метод используют для определения твёрдости деталей малой толщины и тонких поверхностных слоев, имеющих высокую твёрдость. Твёрдость определяют вдавливанием в испытываемую поверхность четырехгранной алмазной пирамиды с углом при вершине 136° (рис. 2.4).

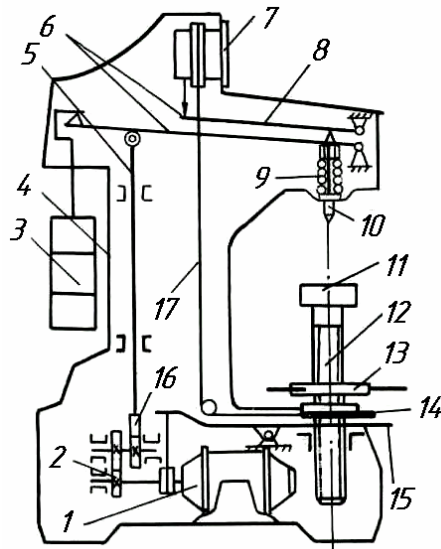


Рис. 2.3. Схема пресса Роквелла: 1 – электродвигатель; 2 – червячный редуктор; 3 – грузы; 4 – корпус; 5 – шток; 6 – грузовой рычаг; 7 – индикатор; 8 – рычаг; 9 – пружина; 10 – индентор; 11 – подъёмный столик; 12, 13 – пара винт-маховик; 14 – механизм подъёмного столика; 15 – кнопка «Пуск»; 16 – кулачковый блок; 17 – трос управления индикатором

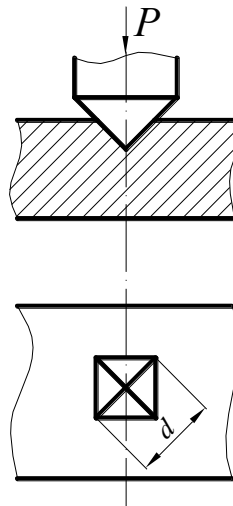


Рис. 2.4. Схема определения твердости по методу Виккерса

В зависимости от типа испытываемого материала применяют нагрузки 1, 2, 5, 10, 20, 30, 50, 100 кгс. Время выдержки под нагрузкой 10-15 сек (основным является режим: 30 кгс, 10-15 с). После снятия нагрузки с помощью отсчетно-проекционной системы прибора измеряют диагонали отпечатка d , и вычисляют твердость по формуле:

$$HV = \frac{2p \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2} = 1,854 \frac{p}{d^2}, \text{ кгс/мм}^2.$$

На практике значение твердости определяют по таблицам в зависимости от длины диагоналей отпечатка. Твердость материалов 8-2000 ед.

Поверхность испытываемого образца должна быть чистой, без окисных пленок, посторонних веществ, наклепа и иметь шероховатость не выше Ra0,16 мкм.

Значения, полученные при измерении твёрдости разными методами, получатся тоже различными. Для сопоставления этих результатов составляются специальные таблицы (Приложение Б).

Описанные методы твёрдости характеризуют среднюю твёрдость сплава. Для того чтобы определить твёрдость отдельных структурных составляющих, тонких поверхностных слоев, полученных в результате химико-термической, термической обработки, гальванических покрытий, тонких лент, фольги и т.д. необходимо резко локализовать деформацию. Т.е. нужно вдавливать алмазную пирамиду на определённое место, найденное на шлифе при увеличении 100-400 раз под очень небольшой нагрузкой (от 0,01 до 2 Н) с последующим измерением под микроскопом диагоналей отпечатка. Полученная характеристика (H_μ) называется микротвёрдостью и характеризует твёрдость определённой структурной составляющей.

2.2.4. Теоретическое определение твердости

Теоретическое определение твердости стали в состоянии поставки основывается на формулах, учитывающих твердость структурных составляющих металла и относительных весовых количествах структур.

Для доэвтектоидной стали:

$$HB = \frac{HB_\phi Q_\phi + HB_n Q_n}{100};$$

для заэвтектоидной стали:

$$HB = \frac{HB_n Q_n + HB_u Q_u}{100},$$

где: Q_ϕ , Q_n , Q_u – относительные весовые количества соответственно феррита, перлита, цементита. Определяются в зависимости от количества углерода в исследуемой стали:

- для доэвтектоидной стали

$$Q_\phi = \frac{0,8 - \%C}{0,8} \cdot 100\%;$$

$$Q_n = \frac{\%C}{0,8} \cdot 100\%;$$

- для заэвтектоидной стали

$$Q_n = \frac{6,67 - \%C}{6,67 - 0,8} \cdot 100\%;$$

$$Q_u = \frac{\%C - 0,8}{6,67 - 0,8} \cdot 100\%;$$

HB_ϕ , HB_n , HB_u – твёрдость соответственно, феррита, перлита и цементита (табл. 2.1).

Механические характеристики структурных составляющих

Структурные составляющие	Содержание углерода, %	Механические свойства после								
		литья			отжига			проката		
		НВ, МПа	σ_s , МПа	δ , %	НВ, МПа	σ_s , МПа	δ , %	НВ, МПа	σ_s , МПа	δ , %
Феррит	0,006	970	320	23	1000	350	40	1250	430	28
Перлит	0,8	2200	720	7	2300	800	10	2750	960	6
Цементит	6,67	8000	50	0	8000	50	0	8000	50	0

2.3. Контрольные вопросы

1. Что такое твердость?
2. Какие методы существуют для измерения твердости?
3. В чем суть метода измерения по Бринеллю?
4. Твердость каких изделий нельзя измерить на прессе Бринелля?
5. Что является индентором при измерении твердости по Бринеллю?
6. В чем суть метода измерения по Роквеллу?
7. Зачем при измерении твердости по методу Роквелла используют разные инденторы и шкалы отсчета?
8. В чем суть метода измерения по Викерсу?
9. Каким образом содержание углерода влияет на твердость стали?
10. Каким методом можно измерить твердость деталей малой толщины?

3. ТЕОРИЯ СПЛАВОВ

3.1. Основные вопросы по теории сплавов

Весь материал, подлежащий изучению студентами по разделу «Теория сплавов» делится на следующие группы:

1. Вид кривой охлаждения и кристаллизующая твёрдая фаза для сплава с заданной концентрацией компонентов.
2. Химический состав жидкой и твёрдой фаз при условиях, определяемых заданной точкой в температурном интервале кристаллизации на диаграмме состояний.
3. Реакция первичной кристаллизации и эвтектическая реакция для исследуемого сплава.
4. Относительное весовое количество жидкой или твёрдой фаз при условиях, определяемых заданной точкой на диаграмме состояний.
5. Количество фаз и структурных составляющих, их относительное весовое количество (доля) у изучаемого сплава в любой точке диаграммы состояний.
6. Название фаз и структурных составляющих при комнатной температуре для любого исследуемого сплава.

7. Избыточная фаза, её название и относительное весовое количество при условиях, определяемых заданной точкой на диаграмме состояний.

8. Из каких фаз состоит эвтектика или эвтектоид у любого изучаемого сплава при комнатной температуре.

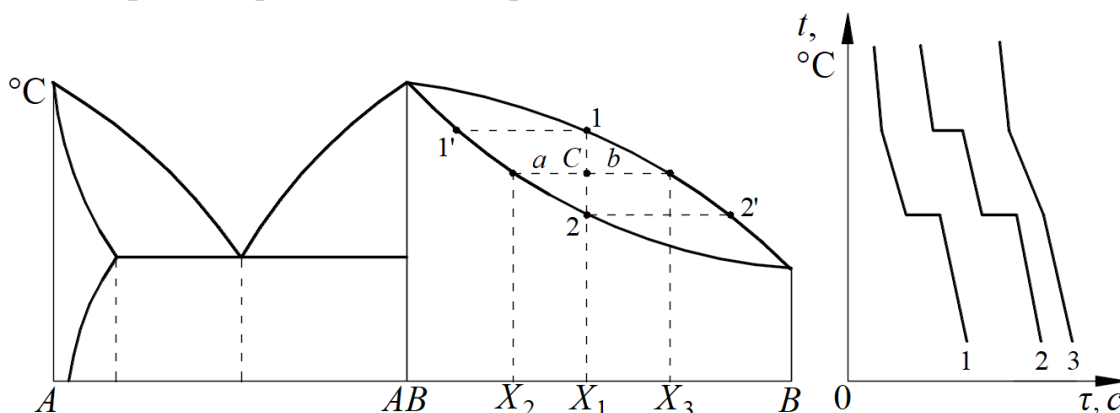
9. Относительное весовое количество эвтектики (эвтектоида) у рассматриваемого сплава при условиях, определяемых заданной точкой на диаграмме состояний.

10. Изменение предела прочности, твёрдости, пластичности и других свойств при комнатной температуре при изменении химического состава сплава в заданных интервалах.

3.2. Типовые формы заданий и ответов

Типовой бланк заданий представлен на рис. 3.1. В верхней части бланка, слева, приведена диаграмма состояний. Справа – кривые охлаждения. В нижней части – таблица. В ней содержатся 6 вопросов и по 3 варианта ответа. Из приведённых ответов только один является верным.

Далее рассмотрим основные правила написания теста.



№ п/п	Вопросы	Ответы		
		а	б	в
1	Вид кривой охлаждения для сплава состава X_1	1	2	3
2	Химический состав жидкой фазы при условиях, определяемых точкой C	X_1	X_2	X_3
3	Реакция кристаллизации для сплава X_1	$Ж_{1-2} \xrightarrow{t_1...t_2} AB$	$Ж_{1-2'} \xrightarrow{t_1...t_2} \alpha_{2-2'}$	$Ж_{1-2'} \xrightarrow{t_1...t_2} \alpha_{1'-2}$
4	Число фаз при условиях, определяемых точкой C	одна	две	три
5	Количество жидкой фазы при условиях, определяемых точкой C	$\frac{a}{a+b} \cdot 100\%$	$\frac{a}{b} \cdot 100\%$	$\frac{b}{a+b} \cdot 100\%$
6	Характер изменения относительного удлинения сплавов при изменении их составов от X_2 до X_3	по прямой	по вогнутой	по выпуклой

Рис. 3.1. Типовой бланк заданий

3.2.1. Вид кривой охлаждения

Типовые элементы кривых охлаждения приведены на рис. 3.2. Аномалии (площадки и перегибы) на кривых охлаждения являются результатом тепловых эффектов, связанных с выделением скрытой теплоты кристаллизации (первичной или вторичной), а также вследствие аллотропических превращений.

Площадки 1-2, 6-7 (см. рис. 3.2) на кривых охлаждения имеют место при кристаллизации чистых металлов, химических соединений, эвтектик, эвтектоидов, а также в случае аллотропии одного из компонентов. Это связано с тем, что процесс их кристаллизации совершается без изменения состава жидкой и твёрдой фаз.

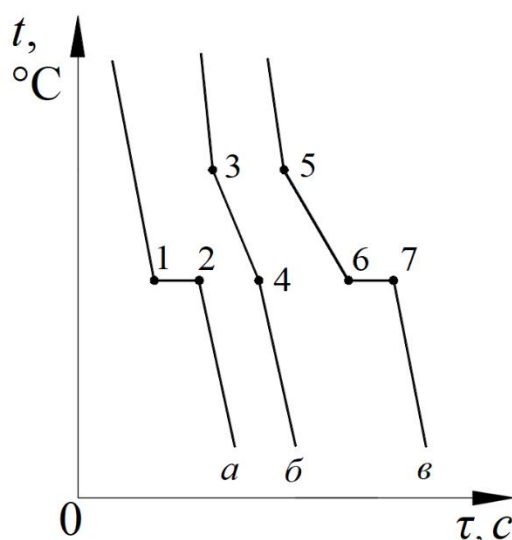


Рис. 3.2. Характерные виды кривых охлаждения

Перегибы, связанные с изменением темпа охлаждения (точки 3, 4 и 5, рис. 3.2), наблюдаются всегда, когда процессы кристаллизации сплава сопровождаются изменением составов жидкой фазы. Они имеют место в начале кристаллизации, когда выделяются избыточные фазы (чистый металл, химическое соединение, либо твёрдый раствор) (точки 3 и 5, рис. 3.2), или при затвердевании остатка жидкой фазы, образующей твёрдый раствор, а также при его аллотропии.

Примеры.

На рис. 3.3 приведены характерная диаграмма состояний для сплавов с частичным распадом твёрдого раствора (рис. 3.3, а) и кривые охлаждения, полученные для сплавов различных химических составов (рис. 3.3, б).

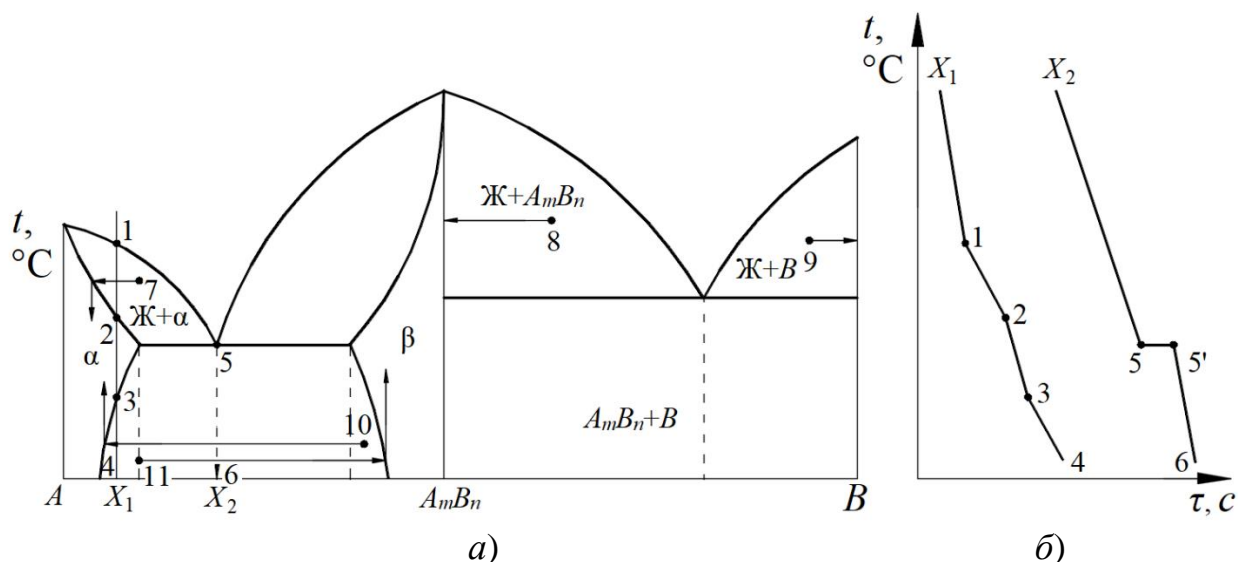


Рис. 3.3. Диаграмма состояний (а) и кривые охлаждения (б)

Сплав с химическим составом X_1 до точки 1 находится в жидком состоянии. В т. 1 начинается кристаллизация с выделением избыточного твёрдого раствора (перегиб с замедлением скорости охлаждения). В т. 2 кристаллизация заканчивается (перегиб с ускорением). При охлаждении сплава состава X_2 до т. 5 он находится в жидком состоянии. Из жидкости на отрезке 5-5' (см. рис. 3.3, б) сразу кристаллизуется двухфазная смесь постоянного состава. Затем от т. 5 до т. 6 – охлаждение затвердевшего сплава.

3.2.2. Определение кристаллизующейся твёрдой фазы

При решении задач данного типа возможны два варианта:

1. Определение кристаллизующейся фазы из жидкости.

Через заданную точку, например 7, 8 или 9 (см. рис. 3.3, а), нужно провести коноду (горизонталь) до пересечения с линией солидус и уточнить, что находится ниже точки пересечения. Кристаллизующимися фазами могут быть: твёрдый раствор, химические соединения, чистый металл. В частности, в т. 7 – твёрдый раствор α , в т. 8 – химическое соединение A_mB_n , в т. 9 – чистый металл B .

2. Определение кристаллизующейся фазы из твёрдого раствора.

Через заданную точку, например 10 или 11 (см. рис. 3.3, а), нужно провести коноду в противоположную сторону от фазовой линии, из которой идёт кристаллизация, до ближайшей (другой) фазовой линии и выявить, что находится выше точки пересечения. Кристаллизующимися избыточными фазами в рассматриваемых точках 10 и 11 будут кристаллы α и β твёрдых растворов соответственно.

3.2.3. Определение химического состава жидкой или твёрдой фаз

В интервале кристаллизации между линиями ликвидус и солидус в равновесии всегда находятся две фазы: жидкая и твёрдая. Отдельные точки кривой ликвидуса и солидуса характеризуют изменение химического состава жидкой и твёрдой фаз соответственно при любой температуре в интервале кристаллизации. Поэтому для определения в заданной точке химического состава жидкой или твёрдой фаз нужно провести через неё коноду, а затем точки пересечения с линиями ликвидус и солидус спроектировать на ось концентрации.

Например, химический состав в т. 1 (рис. 3.4) будет соответствовать X_1 , в т. 2 – X_2 (чистый металл B), в т. 3 химический состав жидкой фазы будет соответствовать X_4 , а твёрдой – химическому соединению A_mB_n .

3.2.4. Реакция первичной кристаллизации и эвтектическая реакция для исследуемого сплава

Реакцию первичной кристаллизации принято записывать в виде:

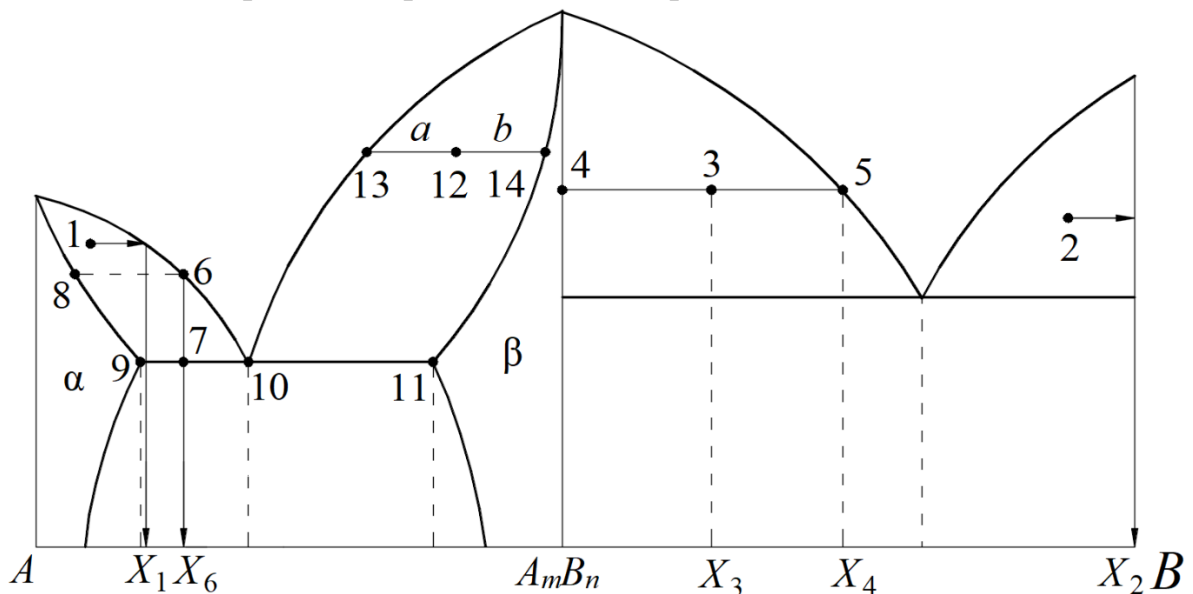
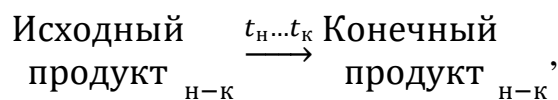


Рис. 3.4. Примеры построений при определении химических составов твёрдой или жидкой фаз

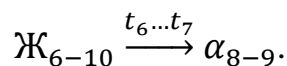


где $t_{\text{н}}$, $t_{\text{к}}$ – температуры начала и конца кристаллизации;

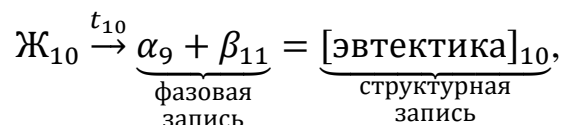
н, к – химические составы исходного и конечного продуктов соответственно в начале и конце кристаллизации.

Примеры.

1. Реакция первичной кристаллизации для сплава X_6 (см. рис. 3.4):



2. Эвтектическая реакция кристаллизации для сплава химсостава т. 10 (см. рис. 3.4):



где $Ж_{10}$ – жидкая фаза состава т. 10;

α_9 и β_{11} – кристаллы твёрдых растворов соответственно составов т. 9 и 11.

Аналогичную эвтектическую смесь кристаллов двух предельно насыщенных твёрдых растворов α_9 и β_{11} образуют остатки жидкой фазы, кристаллизующейся при постоянной температуре t_{10} для любых сплавов, находящихся между т. 9 и 11 (см. рис. 3.4).

3.2.5. Относительное весовое количество жидкой или твёрдой фаз в заданной точке интервала кристаллизации

Относительное весовое количество равновесных фаз при любой температуре в заданном интервале кристаллизации подчиняется известному правилу противолежащих отрезков.

Через заданную точку на диаграмме состояний нужно провести коноду до точек пересечения с линиями ликвидуса или солидуса.

Например, при температуре, соответствующей т. 12 (см. рис. 3.4), количество твёрдой Q_β и жидкой Q_α фаз определяется следующими отношениями длин отрезков:

$$Q_\alpha = \frac{b}{a + b} \cdot 100\%;$$

$$Q_\beta = \frac{a}{a + b} \cdot 100\%,$$

где числитель – отрезок, противолежащий искомой фазе; знаменатель – общая длина коноды, в пределах которой количество фаз изменяется от 0 до 100%.

3.2.6. Определение избыточной фазы в заданной точке на диаграмме состояния

Избыточной называется та фаза, которая кристаллизуется при охлаждении из матричной фазы: жидкой или твёрдой. Например, в рассматриваемых точках 1, 2, 3 (рис. 3.5) избыточными фазами будут: в т. 1 – твёрдый раствор α ; в т. 2 – чистый металл; в т. 3 – компонент B (вследствие вторичной кристаллизации).

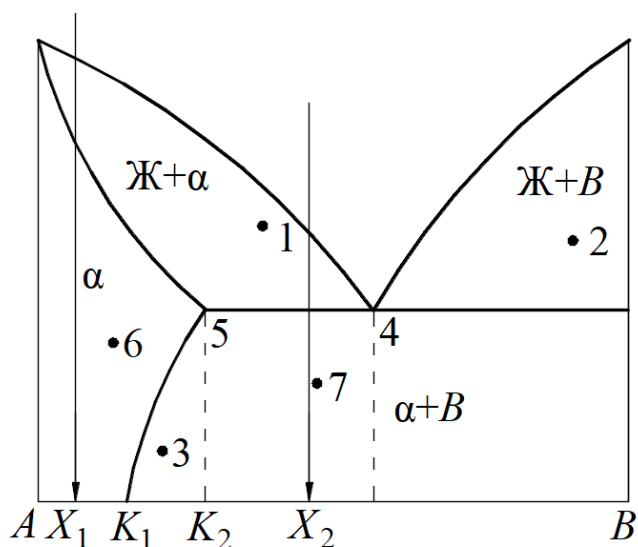


Рис. 3.5. Примеры построений при определении избыточных фаз

3.2.7. Количество фаз и структурных составляющих для любого исследуемого сплава

Определение максимально возможного количества фаз, находящихся в равновесии, осуществляют на основе известного правила фаз Гиббса. Оно устанавливает связь между количеством компонентов K , количеством фаз Φ , находящихся в равновесии, и количеством степеней свободы S :

$$S = K - \Phi + 1.$$

В рассматриваемых двухкомпонентных системах в интервале кристаллизации (между линиями ликвидус и солидус) в равновесии находятся две фазы – жидкая и твёрдая из избыточных первичных кристаллов.

После затвердевания сплавов-смесей их микроструктура состоит из эвтектики и первичных избыточных кристаллов. Эвтектическую смесь могут образовывать чистые металлы, твёрдые растворы, химические соединения, а также их сочетания. На диаграммах состояний линия солидуса при кристаллизации эвтектики – горизонталь, в пределах которой остатки жидкой фазы, находящиеся между первичными избыточными кристаллами, всегда получают постоянный состав и затвердевают при постоянной температуре.

Системы, компоненты которых образуют непрерывные ряды жидких и твёрдых растворов, имеют ниже солидуса одну фазу и одну структурную составляющую – твёрдый раствор (см. рис. 3.5, т. б).

Сплавы, находящиеся в области концентрации компонентов с частичным распадом твёрдого раствора, под кривой ограниченной растворимости состоят из первичных кристаллов твёрдого раствора и вторичных избыточных кристаллов, выделившихся по границам первичных. Например, в т. 3 (см. рис. 3.5) сплав имеет две фазы и две структурные составляющие (первичные кристаллы твёрдого раствора α и избыточные вторичные кристаллы

компонента B). На участке концентрации 5-4 (см. рис. 3.5, т. 7) микроструктура сплавов состоит из трёх составляющих: эвтектика, первичные кристаллы твёрдого раствора α и вторичные кристаллы компонента B .

3.2.8. Состав эвтектики (эвтектоида) у любого изучаемого сплава

Через заданную точку нужно провести коноду до ближайших фазовых линий диаграммы состояний и определить, каким избыточным фазам они соответствуют.

Необходимо помнить, что под наклонным солиусом всегда находится твёрдый раствор, под горизонтальным – двухфазная смесь, а под вертикальным – чистый компонент или химическое соединение, играющее роль самостоятельного компонента.

Примеры.

Определить составы эвтектики в т. 1 и эвтектоида в т. 2 (рис. 3.6).

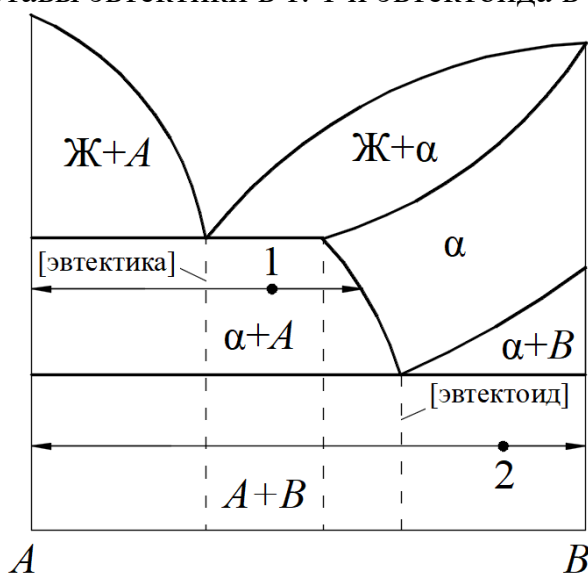


Рис. 3.6. Определение состава эвтектики или эвтектоида

В т. 1 эвтектика состоит из чистого металла A и твёрдого раствора α . В т. 2 эвтектоид состоит из компонентов A и B .

3.2.9. Изменение физико-механических свойств сплавов при комнатной температуре в зависимости от их химических составов

Наличие связи между составом двойных систем и их свойствами (твёрдостью, электропроводностью и др.) установил Н.С. Курнаков совместно с С.Ф. Жемчужным.

Они установили, что у сплавов, кристаллизующихся с образованием эвтектики во всем диапазоне концентраций (диаграммы I рода), свойства изме-

няются по линейному закону в интервале между свойствами чистых компонентов (рис. 3.7, а).

У сплавов, кристаллизующихся с образованием непрерывных твердых растворов (диаграммы II рода), свойства изменяются по криволинейной зависимости (выпуклой для твердости, прочности и электросопротивления – линия 1 на рис. 3.7, б; и вогнутой для показателей пластичности, электропроводности – линия 2 на рис. 3.7, б), значительно отличающейся от свойств компонентов.

При образовании ограниченных твердых растворов (диаграммы III рода) свойства сплавов в области однофазных твердых растворов изменяются по криволинейному закону, а в двухфазной области – по прямолинейному закону, причем крайними точками на прямой являются свойства чистых фаз (рис. 3.7, в).

Если при кристаллизации сплавов образуется химическое соединение (диаграммы IV рода), то свойства сплава при концентрации компонентов, соответствующей образованию этого химического соединения, достигают максимума (или минимума) на кривой изменения свойств с соответствующим переломом самой кривой. Точка перелома кривой, соответствующая составу химического соединения, называется *сингулярной точкой* (рис. 3.7, г).

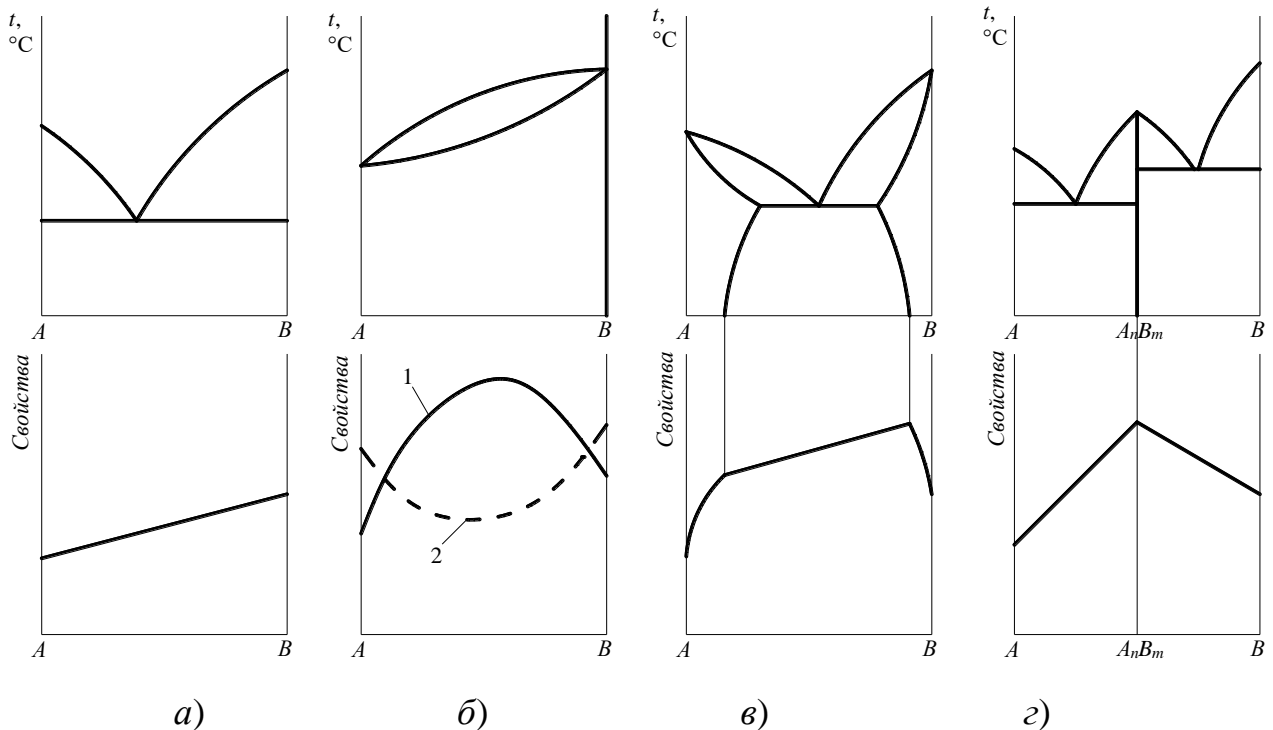


Рис. 3.7. Связь между диаграммами состояния и свойствами сплавов (по Н.С. Курнакову): а – для диаграммы I рода; б – для диаграммы II рода; в – для диаграммы III рода; г – для диаграммы IV рода

Пример.

Рассмотрим изменение предела прочности σ_B в интервале концентраций от X_1 до X_2 (см. рис. 3.5). На участке $X_1 - K_1$ имеется твёрдый раствор α переменной концентрации. В результате σ_B будет изменяться по выпуклой линии, а на участке $K_1 - K_2$ и $K_2 - X_2$ имеются смеси $\alpha + B$, но на первом – вторичного происхождения, а на втором – первичного. Поэтому на каждом из этих участков σ_B будет изменяться по прямым линиям, но с различными наклонами, т.е. в точке K_2 будет наблюдаться перелом.

4. ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Цель работы: изучить метод анализа микроструктуры металлических материалов и приобрести практические навыки исследования микроструктур; ознакомиться и исследовать диаграммы состояния двойных сплавов двух типов.

4.1. Порядок выполнения работы

Группа студентов из трех-четырех человек получает пособие для изучения принципа действия и конструкции металлографического микроскопа МЕТАМ. Заполняя рабочую тетрадь, студенты отвечают на ряд вопросов по данному разделу; затем просматривают микрошлифы технически чистых металлов и сплавов с использованием микроскопов МЕТАМ. Выявляют особенности микроструктуры и выполняют в рабочих тетрадях их схематические зарисовки. Для сплавов, образующих механическую смесь исходных компонентов (на примере сплава Pb-Sb), ведут расчет химического состава каждого из исследуемых микрошлифов. Изучая сплав с неограниченной растворимостью компонентов в жидком и твердом состояниях (на примере сплава Cu-Ni), обращают внимание на структуру сплава до и после диффузионного отжига.

4.2. Теоретическая часть работы

Исследование внутреннего строения металлов и сплавов с помощью оптического или электронного микроскопа называется микроанализом. Внутреннее строение, изучаемое при помощи микроскопа (величина и форма зерен, структурные составляющие, вид и распределение неметаллических включений и т. д.), называется микроструктурой. Металлографические микроскопы обеспечивают увеличение до 1500-2000 раз.

Микроскопический анализ составляют следующие этапы: приготовление шлифов, травление шлифов, исследование шлифов с использованием микроскопа.

1. Приготовление микрошлифов

Микрошлифом называют небольшой образец металла, имеющий поверхность, подготовленную для микроанализа. Этот металлический образец вырезают из детали, подлежащей исследованию. Затем механической обработкой добиваются получения плоской поверхности, которую подвергают шлифованию шлифшкурками с различными номерами зернистости. Шлифование производится только в одном направлении. При переходе на шкурку другого номера (т.е. более мелкозернистую) обработку производят в направлении, перпендикулярном к риску, оставшимся после шлифования на предыдущей шкурке, до полного их исчезновения (т.е. шлиф нужно поворачивать на 90°). После шлифования микрошлифы обязательно промывают предварительно в мыльном водном растворе и окончательно в чистой теплой либо проточной холодной воде. Полирование осуществляют на полировальном круге, обтянутом тонким сукном, фетром, бархатом или другим материалом. В качестве абразивных частичек применяются суспензии различных окислов металлов (Al_2O_3 , Fe_2O_3 , Cr_2O_3 и др.), алмазные пасты и суспензии. Полирование считается законченным, если со шлифа удалены все риски и он имеет зеркальную поверхность. Готовый полированный шлиф последовательно тщательно промывают водой, спиртом и сушат при помощи фильтровальной бумаги.

2. Травление шлифов

Хорошо отполированный микрошлиф под микроскопом имеет светлую блестящую поверхность. В виде темных участков на нем могут наблюдаться только неметаллические включения (графит, сульфиды, окислы и т.д.).

Для выявления микроструктуры шлиф травят. В зависимости от химического состава шлифа, способа обработки, а также целей исследования применяют различные реактивы. Чаще всего используются слабые спиртовые или водные растворы кислот или щелочей, а также смеси различных кислот.

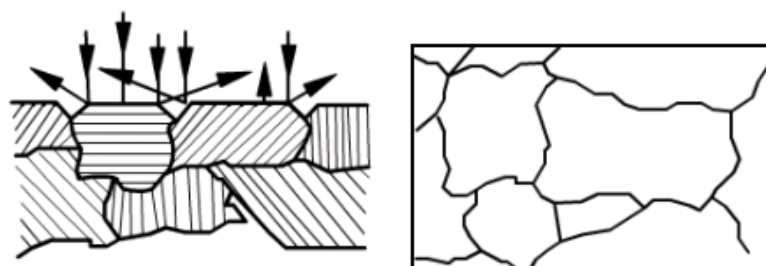
При травлении микрошлиф погружают в реактив на определенное время (от 1 до 40 с и более в зависимости от исследуемого материала), немедленно промывают его водой и окончательно спиртом, просушивают фильтровальной бумагой и просматривают под микроскопом. Если структура выявлена слабо, шлиф травят дополнительно. Если структура слишком затемнена, его необходимо переполлировать и травить с меньшей выдержкой.

После травления чистого металла или однофазного сплава можно определить форму и размер зерна вследствие неодинакового травления пограничных участков и остальной части. Световые лучи, направленные на микрошлиф, отразятся от зерен под различными углами, на участке стыков зерен возникает значительное рассеяние и отраженные лучи не попадают в поле зрения (рис. 4.1, а). Поэтому по границам зерен возникнут темные линии, которые и воспроизведут картину действительных стыков между зернами (рис. 4.1, б).

Фазы, имеющиеся в сплавах, хорошо выявляются под микроскопом за счет различной травимости.

3. Исследование шлифов под микроскопом

Основным оборудованием лаборатории являются микроскопы, которые для изучения металлов впервые применил русский инженер П.П. Аносов в 1831 году.



a)

б)

Рис. 4.1. Выявление микроструктуры сплава:
a – схема падения световых лучей; *б* – границы зёрен

Металлографический микроскоп ЕС МЕТАМ РВ-21 предназначен для изучения структуры металлов и сплавов. Его основные узлы и агрегаты представлены на рис. 4.2. Микроскоп состоит из штатива 1, внутри которого смонтированы механизмы грубого перемещения тубуса 6 и микрометрической фокусировки. Рукоятки грубой и микрометрической фокусировки располагаются с правой стороны микроскопа (не видны на рисунке) и находятся на одной оси. В верхней части штатива расположена направляющая типа «ласточкин хвост» для установки предметного столика 2.

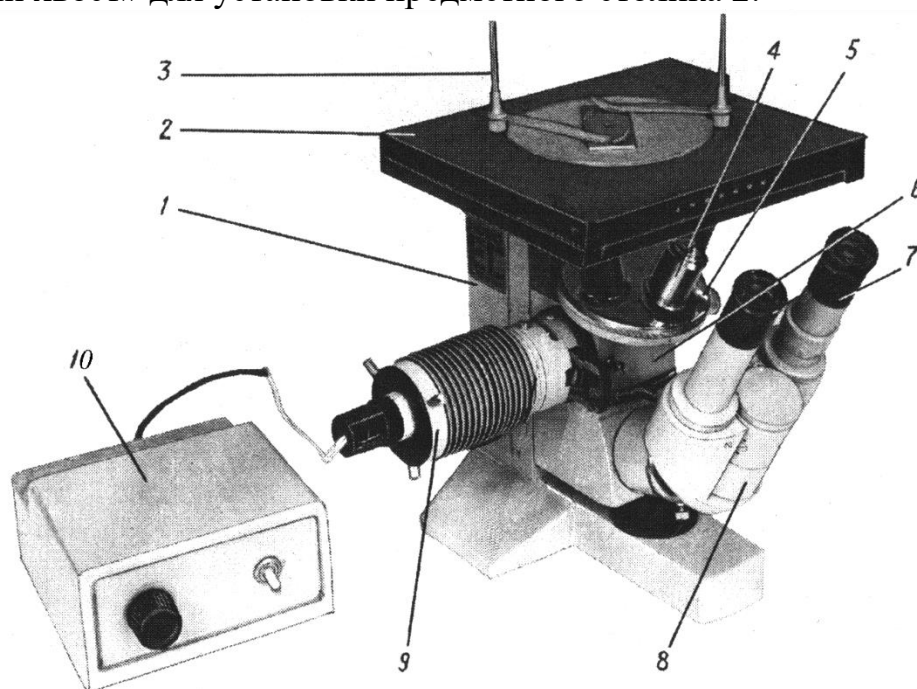


Рис. 4.2. Общий вид микроскопа ЕС МЕТАМ РВ-21:
1 – штатив; 2 – предметный столик; 3 – пружинные клеммы; 4 – объективы; 5 – револьверная головка; 6 – тубус; 7 – окуляр; 8 – бинокулярная насадка; 9 – источник света; 10 – источник питания

Столик 2 с помощью рукояток может перемещаться в горизонтальной плоскости в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Исследуемый материал закрепляется на предметном столике пружинными клеммами 3.

Тубус 6 устанавливается на направляющие штатива 1 и закрепляется винтом. В верхней части тубуса расположено гнездо для установки револьвера 5 с объективами 4. На револьвере установлено четыре объектива с различным фокусным расстоянием (25, 16, 6,3, 4,0 мм). Переключать объективы можно только вращением револьвера 5 за накатку. Также на тубусе закрепляется бинокулярная насадка 8. В бинокулярную насадку устанавливаются окуляры 7. В комплект микроскопа входят компенсационные окуляры с увеличением $\times 6,3$; $\times 10$; $\times 12,5$; $\times 16$ и $\times 20$. Увеличение микроскопа определяется как произведение увеличений объектива и окуляра.

В микроскопе реализована оптическая схема, позволяющая изучать объект в отраженном свете, характерная для металлографических микроскопов. Луч от источника света 9, отражаясь от поверхности микрошлифа, через объектив 4 попадает на окуляр 7. Питание лампы источника света осуществляется от источника питания 10.

При микроисследовании чистых металлов (например, железа, меди, никеля) прежде всего выявляются размеры отдельных зерен, их форма и характер границ между ними. При травлении шлифов происходит растворение металла. Однако на поверхности зерна оно протекает с меньшей скоростью, чем на границах. Поэтому границы зерен после травления обозначаются тонкими темными линиями – из-за потери отраженного света в углублениях между зернами. Одновременно с выявлением границ наступает стадия селективного окрашивания зерен, что связано с различной ориентировкой их атомно-кристаллических плоскостей относительно полированной поверхности.

После просмотра ряда шлифов технически чистых металлов необходимо сделать вывод, в котором должно быть отражено сходство или различие среди просмотренных шлифов по размерам зерен, их форме и характеру границ между ними.

4.3. Изучение сплавов двойных систем

Приступая к изучению сплавов, прежде всего, необходимо ознакомиться с некоторыми вопросами теории сплавов: видами сплавов, кривыми охлаждения, правилом фаз, методом построения диаграмм состояния и правилом отрезков. Большое значение для теоретического изучения и практического использования сплавов имеют их диаграммы состояния. Они отражают взаимосвязь между химическим составом, температурой и фазово-структурным строением сплавов.

Диаграммы состояния представляют собой графическое изображение состояния сплава. Они позволяют определять температуры начала и конца плавления сплавов, судить о структуре, а следовательно, и о свойствах сплава

при различных видах термического воздействия, выбирать оптимальные режимы термообработки, сварочных и наплавочных работ и т.д.

Диаграммы состояния показывают устойчивые состояния, т.е. состояния, которые при данных условиях обладают минимумом свободной энергии. Поэтому диаграмма состояния может также называться диаграммой равновесия, так как она показывает, какие при данных условиях существуют равновесные фазы.

В металловедении широко используются понятия компоненты, фаза, система, структура.

Система – это совокупность фаз, находящихся в состоянии равновесия.

Компоненты – это вещества, образующие систему. Следовательно, чистый металл представляет собой однокомпонентную систему, сплав двух металлов – двухкомпонентную и т.д. Химические соединения можно рассматривать как компоненты лишь в том случае, если они не диссоциируют на составные части в исследуемых интервалах температур.

Фаза – это однородная часть системы, отделённая от других частей системы (фаз) поверхностью раздела при переходе через которую химический состав или структура вещества резко меняется. На диаграмме области с различным фазовым составом разделяются сплошными линиями.

Следовательно, однородная жидкость является однофазной системой, а механическая смесь двух видов кристаллов – двухфазной, так как каждый кристалл отличается от другого по составу или по строению и они отделены друг от друга поверхностью раздела.

Структура – это форма, размеры и характер взаимного расположения соответствующих фаз в металлах и сплавах.

Структурные составляющие – это обособленные части сплава, имеющие одинаковое строение с присущими им характерными особенностями.

Каждая диаграмма соответствует системе, образующей при кристаллизации какой-либо характерный вид сплава, например: механическую смесь компонентов, твердые растворы с неограниченной и ограниченной растворимостью и др. Условно они пронумерованы.

4.3.1. Диаграмма состояния I рода

Диаграмма состояния сплавов I рода соответствует сплавам, компоненты которых в жидком состоянии неограниченно растворяются друг в друге, а в твердом - образуют механическую смесь.

В соответствии с этой диаграммой плавятся и затвердевают, например, сплавы: Pb-Sb, Sn-Zn, Ag-Al и др. Они имеют следующие особенности:

- обладают неограниченной взаимной растворимостью в жидком состоянии, т.е. смешиваются друг с другом в любых отношениях, образуя при этом однородный жидкий раствор;

- в процессе кристаллизации исходные компоненты выпадают в виде самостоятельных включений, образуя механическую смесь.

На рис. 4.3 приведена диаграмма состояния сплава свинец-сурьма (Pb-Sb). Линия *ABC* диаграммы, являющаяся началом затвердевания сплавов, называется *ликвидусом*. Выше неё все сплавы находятся в жидком состоянии.

Линия *DBE* – *солидус* - является концом затвердевания сплава. Ниже этой линии все сплавы в твердом состоянии.

В интервале между линиями ликвидус и солидус в сплаве одновременно находятся две фазы: жидкая и твердая. Этот промежуток является интервалом кристаллизации сплавов.

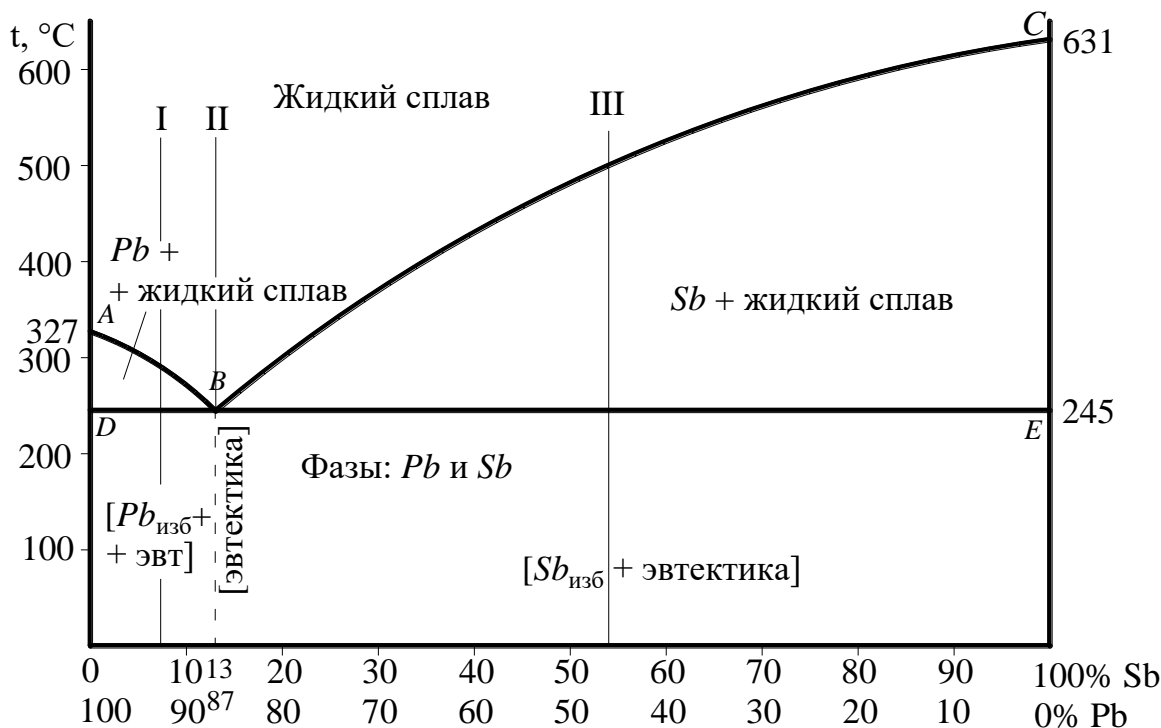


Рис. 4.3. Диаграмма состояний сплавов *Pb-Sb*

Кристаллизация эвтектического сплава (сплав II (рис. 4.3))

Эвтектикой называется механическая смесь двух фаз, образующаяся в сплаве строго определенного химического состава при определенной температуре затвердевания, являющейся низшей из всех температур затвердевания сплавов данной системы. Сплав, обладающий данными особенностями, называется *эвтектическим*.

Из диаграммы (рис. 4.3) видно, что одновременная кристаллизация обоих компонентов протекает на всей линии нонвариантного эвтектического превращения *DBE*. Эти компоненты будут чистыми и, следовательно, разделены друг от друга. Левее и правее точки *B* предварительно кристаллизуются чистые избыточные компоненты, являющиеся твёрдыми фазами в рассматриваемой системе. Таким образом, получается механическая смесь двух фаз, которыми и будут являться в данном случае чистые компоненты. Из диаграммы следует, что сплав, отвечающий по составу точке *B*, отличается от всех прочих сплавов тем, что имеет лишь одну критическую точку, т.е. его кристаллизация происходит при строго определенной температуре и, значит, весь жидкий сплав перейдет при этой температуре в твердое состояние, а

именно, в смесь двух твердых фаз. Видно также, что температура начала и конца затвердевания этого сплава одна и та же и, кроме того, самая низкая среди прочих сплавов данной системы. Состав этого сплава отвечает только точке *B*, т.е. является постоянным (рис. 4.4, *a*).

Сплавы, находящиеся левее эвтектического, называются доэвтектическими, а правее – заэвтектическими.

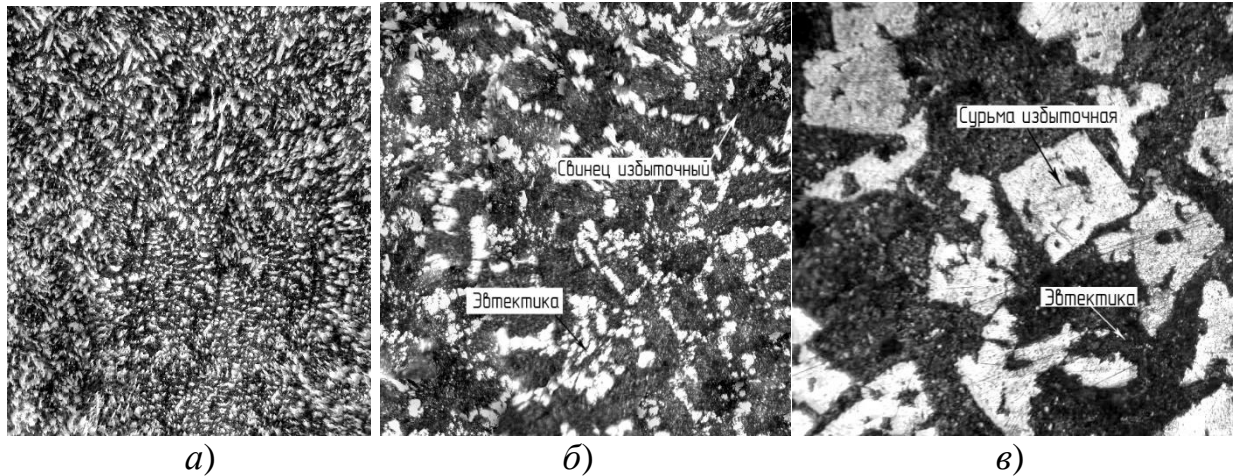


Рис. 4.4. Сплавы системы *Pb-Sb*: *a* – эвтектического состава; *б* – доэвтектический; *в* – заэвтектический

Кристаллизация доэвтектического сплава (сплав I (рис. 4.3))

При достижении линии ликвидус (*AB*) при охлаждении из жидкости начинают образовываться кристаллы твёрдой фазы (в данном случае, свинца). В данных сплавах ниже этой линии существуют две фазы - кристаллы выпадающего из раствора *Pb* и жидкий раствор переменного состава. При охлаждении количество кристаллов свинца возрастет, а концентрация жидкого раствора изменяется по линии ликвидус (*AB*) и при температуре 245 °С, т.е. на линии *DE*, достигает эвтектического состава. При этой температуре жидкость, кристаллизуясь, образует эвтектику. В процессе кристаллизации эвтектики на линии *DB* сплавы имеют три фазы: жидкий раствор эвтектического состава; кристаллы избыточного свинца и свинца из эвтектики; кристаллы сурьмы из эвтектики. После окончательного затвердевания доэвтектические сплавы будут иметь две фазы *Pb* и *Sb*, а их структура будет состоять из кристаллов свинца и эвтектики (рис. 4.4, *б*).

Кристаллизация заэвтектических сплавов (сплав III (рис. 4.3))

Она протекает по той же схеме, что и для доэвтектических. Однако избыточной фазой в заэвтектических сплавах будет не свинец, а сурьма (рис. 4.4, *в*).

При нагревании сплавов все превращения протекают в обратной последовательности.

Для сплавов, компоненты которых образуют механическую смесь и не имеют ликвации, можно выполнить расчет их химического состава. Последовательность расчета следующая.

1. При микроисследовании визуально определяется количество избыточной структурной составляющей, т.е. определяется занятая ею площадь и выражается в процентах от всей видимой площади микрошлифа.

2. Выполняется расчет химического состава сплава:

а) для доэвтектических сплавов

$$A = A_{изб} + \frac{(100 - A_{изб}) \cdot A_{эвт}}{100};$$

б) для заэвтектических сплавов

$$B = B_{изб} + \frac{(100 - B_{изб}) \cdot B_{эвт}}{100},$$

где A , B и $A_{изб}$, $B_{изб}$ – количество соответственно искомым и избыточных компонентов (определенных визуально), %;

$A_{эвт}$ и $B_{эвт}$ – содержание искомым компонентов в эвтектике, %.

Второй элемент сплава в каждом случае определяется как разность между всем количеством сплава и рассчитанным компонентом.

Пример. При микроисследовании сплава Pb-Sb видны темные вытянутые кристаллы (рис. 4.4, б). Это избыточный свинец. Следовательно, сплав доэвтектический. Визуально определено, что занимаемая избыточным свинцом площадь составляет примерно 90% ($Pb_{изб} = 90\%$). Количество свинца в эвтектике $Pb_{эвт} = 87\%$ (см. рис. 4.3). По выше приведённой формуле определяем количество свинца, содержащегося в сплаве:

$$Pb = 90 + \frac{(100 - 90) \cdot 87}{100} = 98,7\%.$$

Соответственно, количество сурьмы:

$$Sb = 100 - Pb = 100 - 98,7 = 1,3\%.$$

Известно, что свинец и сурьма различаются по удельной массе. В процессе медленного охлаждения сплавов системы Pb-Sb в них выделяется избыточный свинец или сурьма, значительно отличающиеся по удельному весу от остального (маточного) раствора. Поэтому избыточные компоненты либо всплывают вверх (избыточная Sb), либо оседают на дно (избыточный Pb). В подобных случаях сплавы по всему объему будут неоднородны (рис. 4.5). Этот процесс называется ликвацией I рода или ликвацией по удельной массе. По макрошлифам с подобной ликвацией определить химический состав сплава нельзя, так как при изменении места расположения исследуемой поверхности шлифа меняется количество избыточного компонента.



Рис. 4.5. Сплав Pb-Sb с ликвацией по удельной массе

Ликвация является негативным явлением, поэтому для её устранения необходимо применять определённые меры. Это:

- ускоренное охлаждение жидкого сплава в процессе кристаллизации;
- перемешивание;
- добавление третьего, более тугоплавкого компонента (например, меди), который, кристаллизуясь первым, образует каркасную решётку, не дающую всплыть сурьме и осесть свинцу.

4.3.2. Диаграмма состояния II рода

Сплавы, компоненты которых образуют твердые растворы с неограниченной растворимостью, относятся к сплавам II рода. Их диаграммы состояний характеризуют системы, компоненты которых полностью растворяются друг в друге как в жидком, так и в твердом состоянии. В соответствии с этой диаграммой затвердевают и плавятся такие системы, как Fe-Ni, Cu-Au, Cu-Ni и др. После затвердевания эти сплавы имеют структуру твердого раствора.

Рассмотрим диаграмму состояния сплавов системы Cu-Ni (рис. 4.6).

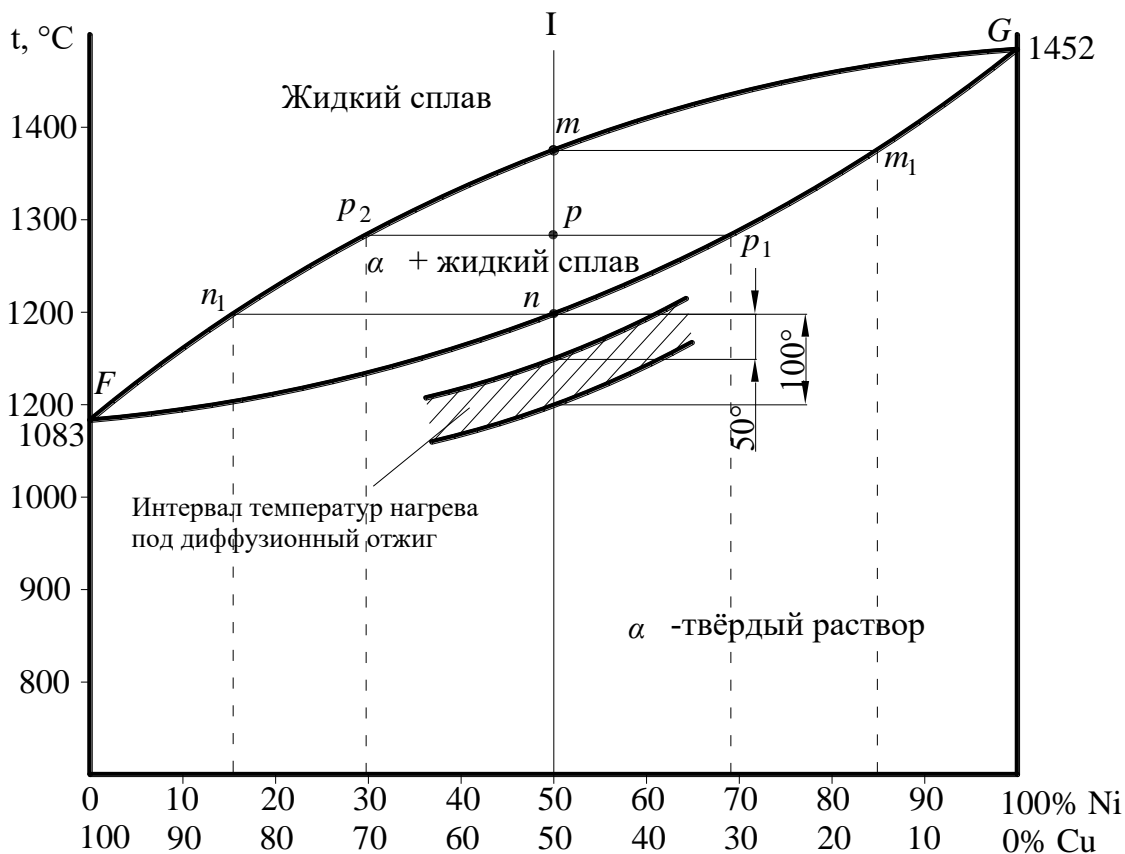


Рис. 4.6. Диаграмма состояний сплавов Cu-Ni

Выше линии ликвидус (FmG) сплавы находятся в жидком состоянии. Ниже линии солидус (FnG) - в твердом. Кристаллизация сплава (например, состоящего из 50% Cu и 50% Ni) протекает следующим образом. При темпе-

ратуре выше точки m сплав находится в жидком состоянии. При охлаждении несколько ниже нее из сплава выделяются первые кристаллы твердого раствора. Дальнейшее охлаждение приводит к увеличению количества твердого раствора и уменьшению жидкого компонента сплава. Между линиями ликвидус и солидус сплавы находятся в двухфазном состоянии и состоят из жидкости и кристаллов твердого раствора. Достигнув температуры точки n , т.е. солидус, кристаллизуется последняя капля жидкости, превращаясь в твердый раствор.

В процессе кристаллизации сплава концентрации образующегося твердого раствора и остающейся жидкости непрерывно меняются. Так, в точке m (рис. 13) выпадают кристаллы твердого раствора концентрации точки m_1 , в точке p - концентрации p_1 . Таким образом, в интервале температур между точками m и p состав твердого раствора меняется по участку линии солидус m_1p_1 . Состав жидкой фазы рассматриваемого сплава меняется по участку линии ликвидус mp_2 . Следовательно, в интервале между линиями ликвидус и солидус состав образующегося твердого раствора меняется по линии солидус, а остающейся жидкости - по линии ликвидус.

В результате кристаллизации оси образующихся кристаллов твердого раствора будут иметь один, а пространства между ними - другой, резко отличающийся состав. Подобная химическая неоднородность в пределах кристалла (дендрита) называется ликвацией II рода (или внутрикристаллической, дендритной) (рис. 4.7, а). Она приводит к возникновению разности электрохимических потенциалов, вследствие чего в процессе эксплуатации деталей развивается особо опасный вид межкристаллитной коррозии.

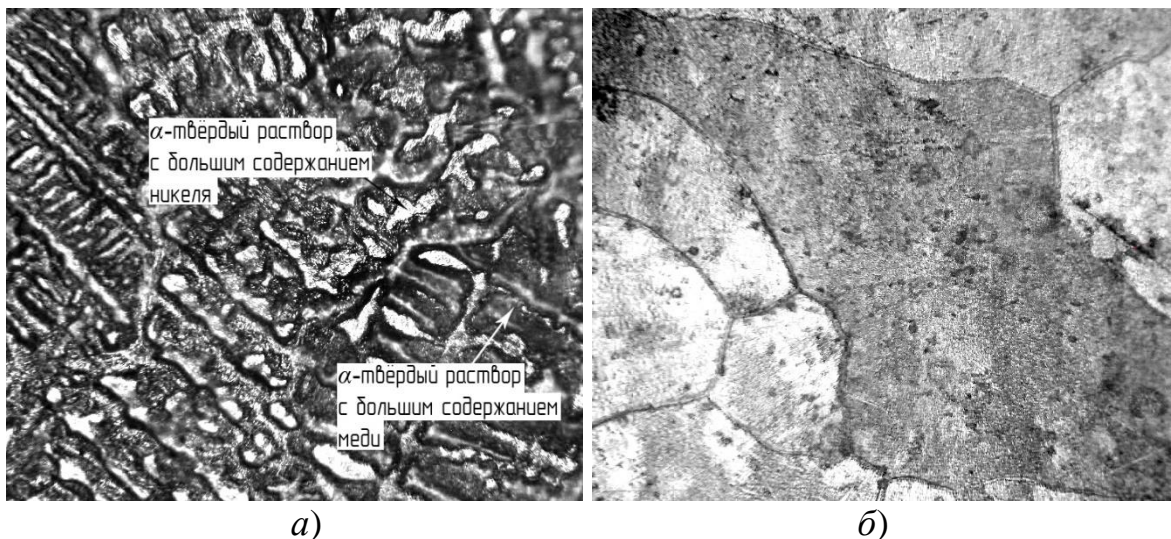


Рис. 14. Сплав Cu-Ni: а – с внутрикристаллической ликвацией; б – после диффузионного отжига (α-твёрдый раствор)

Дендритная ликвация может быть устранена посредством диффузионного отжига. С этой целью сплав нагревают до температуры, лежащей ниже линии солидус на 50...100 °С (см. рис. 4.6). Вследствие протекающей диффузии

химический состав кристалла выравнивается. Такой сплав будет обладать одинаковыми свойствами по всему объему (рис. 4.7, б).

4.4. Контрольные вопросы

1. Сущность и назначение микроструктурного анализа.
2. Типы и особенности микроскопов, применяемых при металлографических исследованиях.
3. Принцип действия металлографического микроскопа.
4. Основные конструктивные элементы оптической системы металлографического микроскопа.
5. Основные требования к поверхности металла при микроисследовании.
6. Назначение микрошлифа и технология его изготовления.
7. Что называется сплавом? Основные типы сплавов двойных систем.
8. Назначение диаграмм состояний сплавов.
9. Сплавы I типа и их особенности.
10. Что называется эвтектикой? Ее особенности.
11. Особенности кристаллизации доэвтектических сплавов I типа.
12. Особенности кристаллизации заэвтектических сплавов I типа.
13. Причины возникновения ликвации I рода и способы борьбы с ней.
14. Сплавы II типа и их особенности.
15. Как протекает кристаллизация в сплавах II типа?
16. Причины возникновения ликвации II рода. Способы борьбы с ней.

5. ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ Fe-Fe₃C

Цель работы: изучить диаграмму состояния сплавов системы железо-углерод, положение критических точек, основы фазовых и структурных превращений в сплавах с различным содержанием углерода при медленном нагревании и охлаждении; получить практические навыки по основам расчета фаз, структурных составляющих и механических свойств сталей и чугунов.

5.1. Задание и порядок выполнения работы

Согласно своему варианту, студент получает два задания: одно по сталям, другое по чугунам. Исходные данные к заданиям приведены в Приложении В. Используя данное пособие и литературу, на основе которой оно разработано, в отчете необходимо вычертить в масштабе диаграмму Fe-Fe₃C, расшифровать по данным ГОСТов марку заданной стали. Пользуясь соответствующими ГОСТами или Приложением Г указать химический состав стали и ее назначение. Рассчитать среднее или приведенное (для материалов со средним содержанием марганца, превышающим 0,56%) процентное содер-

жание углерода. Описать фазовые и структурные превращения, происходящие при нагреве и охлаждении рассматриваемых сплавов; рассчитать относительное весовое количество фаз и структурных составляющих при комнатной температуре и при какой-либо другой, равной или выше 727 °С. Определить механические свойства, указать применение заданных сплавов в железнодорожной технике.

5.2. Теоретическая часть работы

Диаграмма фазового равновесия Fe-Fe₃C, представленная на рис. 5.1, является плодом многочисленных исследований российских и зарубежных ученых: Д.К. Чернова, Н.М. Гутовского, Н.Л. Чижевского, Г.В. Курдюмова, П. Геренса, Ф. Осмонда, Г. Розебума, Р. Аустена, А. Мартенса, Э. Бейна и др. Предпосылкой к созданию диаграммы состояния явились опубликованные в 1868 году исследования Д.К. Чернова, впервые установившего существование в стали критических температур и их зависимость от содержания углерода.

Практическое применение нашли сплавы железа с углеродом (стали и чугуны), содержащие до 5% углерода. Остальные являются весьма хрупкими и тугоплавкими. Поэтому диаграммой железо-углерод охвачены не все сплавы от 0 до 100% углерода, а только небольшой участок концентрации углерода от 0 до 6,67%, т.е. до ближайшего химического соединения Fe₃C.

Положение общепринятых точек на диаграмме состояния приведено в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Положение основных точек на диаграмме Fe-Fe₃C

Характерные точки	A	H	J	B	N	D	E
Температура, °С	1539	1499	1499	1499	1392	1252	1147
Концентрация углерода, %	0	0,1	0,16	0,51	0	6,67	2,14
Характерные точки	C	F	G	P	S	K	Q
Температура, °С	1147	1147	911	727	727	727	20
Концентрация углерода, %	4,3	6,67	0	0,025	0,8	6,67	0,006

Фазы и структурные составляющие в различных областях диаграммы состояния указаны на рис. 5.1. Закономерности фазовых и структурных превращений, происходящих при медленном охлаждении из жидкого состояния сплава с заданным содержанием углерода, а также при его медленном нагреве рассмотрим на примерах.

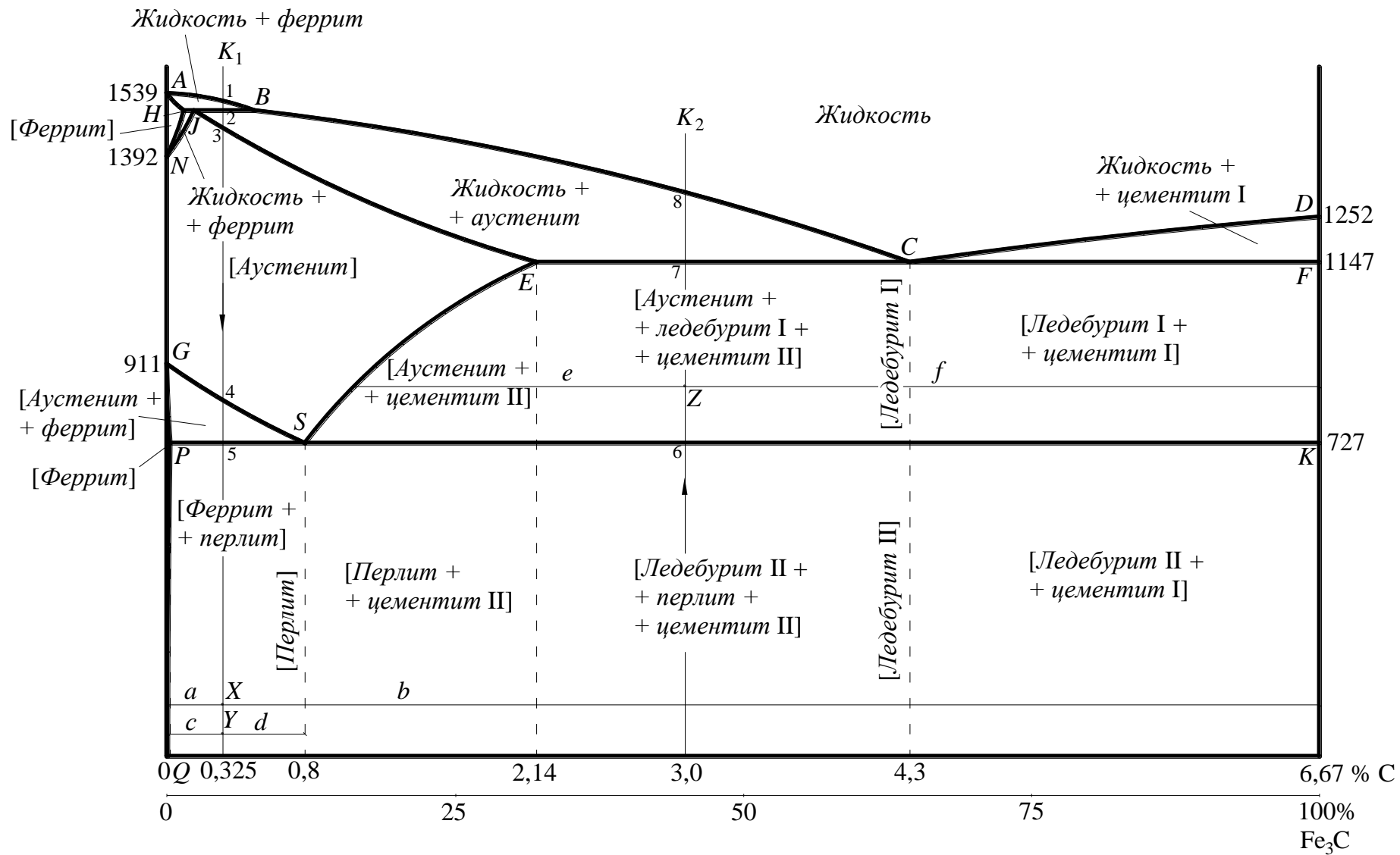
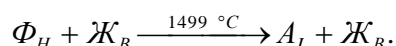


Рис. 5.1. Диаграмма состояния Fe-Fe₃C

5.2. Превращения при охлаждении сплавов

Пример 1. Охлаждается расплавленная сталь марки Ст5, содержащая 0,28-0,37% углерода (ГОСТ 380-2005). Среднее количество углерода в ней составляет 0,325% (вертикаль K_1 на рис. 5.1). Затвердевание происходит в интервале температур между точками 1 и 3. Когда температура достигает точки 1, из жидкой фазы выделяются первичные кристаллы дельта-феррита, химический состав которого изменяется по линии AH , а жидкой фазы - по линии AB (см. рис. 5.1).

При температуре 1499 °С (точка 2) в связи с избытком жидкой фазы затвердевание сплава не заканчивается, происходит перитектическая реакция. Кристаллы дельта-феррита состава H взаимодействуют с жидкой фазой состава B , образуя кристаллы аустенита состава точки J и остаток жидкой фазы состава точки B :

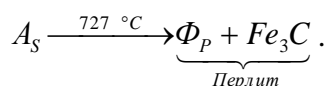


При дальнейшем охлаждении в интервале температур точек 2-3 из остатков жидкой фазы непрерывно возникают центры кристаллизации Fe_γ , из которых растут дендриты, образуя кристаллы аустенита, химический состав которых изменяется по линии JE . Количество жидкой фазы непрерывно уменьшается, а концентрация углерода в ней возрастает по линии BC (см. рис. 5.1). В точке 3 кристаллизация аустенита заканчивается. Сплав находится в твердом состоянии и приобретает однофазную структуру – аустенит, отличающуюся химической неоднородностью, так называемой дендритной (внутрикристаллической) ликвацией.

При дальнейшем охлаждении сплава от точки 3 до точки 4 за счет выравнивающей диффузии ликвация частично снижается.

В интервале температур точек 4 и 5 происходит аллотропическое $Fe_\gamma \rightarrow Fe_\alpha$ превращение. На границах зерен аустенита возникают зародыши (центры кристаллизации) феррита, которые растут и развиваются за счет атомов аустенитной фазы. Имеет место перераспределение углерода между аустенитом и ферритом. Состав аустенита изменяется по линии GS , феррита - по линии GP . Концентрация углерода в кристаллах аустенита возрастает, что приводит к снижению температуры перехода Fe_γ в Fe_α .

При температуре 727 °С (точка 5) концентрация углерода в аустените достигает 0,8% и из него образуется эвтектоид – феррито-цементитная смесь (Fe_α и Fe_3C), получившая название перлит:



Превращение аустенита состава 0,8% углерода в перлит заключается в перестройке решетки $Fe_\gamma \rightarrow Fe_\alpha$ и диффузионном перераспределении углерода между фазами Fe_α и Fe_3C . Ведущей фазой в этом превращении является цементит. Зародыши новой фазы Fe_3C возникают на границах зерен исходного аустенита, в местах скопления дислокаций или вакансий, неметаллических включений и различных примесей, дефектов упаковки. Рост частиц карбида Fe_3C (6,67% С) вызывает в прилегающих к нему объемах аустенита резкое снижение углерода (обезуглероживание). В этих участках происходит аллотропическое $Fe_\gamma \rightarrow Fe_\alpha$ превращение, т.е. образование феррита (почти чистое железо).

Рост кристалликов Fe_α в свою очередь ведет к обогащению окружающего аустенита углеродом и способствует зарождению и росту новых частиц Fe_3C . Совместный рост кристалликов Fe_α и Fe_3C наблюдается в форме пластинок. Пластины феррита и цементита непрерывно возникают непосредственно друг возле друга до полного исчезновения аустенита, образуя одну перлитную колонию. В различных участках аустенита возникают и

формируются несколько перлитных колоний с различной ориентацией пластин феррита и цементита¹.

Дальнейшее охлаждение сплава от 727 °С (точка 5) до комнатной температуры приводит к выделению незначительного количества третичного цементита вследствие уменьшения растворимости углерода в феррите по линии PQ от 0,025% при 727 °С до 0,006% при 20°С. Однако в микроструктуре при наличии перлита обнаружить цементит невозможно. При температуре 210 °С наблюдается магнитное превращение цементита.

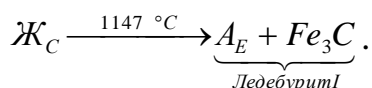
Рассмотрим кратко другие общие закономерности процессов затвердевания, формирования первичной структуры, фазовых и структурных превращений в твердом состоянии при медленном охлаждении во всех остальных сплавах.

Первичная кристаллизация

1. В сталях с содержанием углерода до 0,1% затвердевание на начальной стадии протекает так же, как и в сплаве K_1 . Перитектическое превращение в них отсутствует, а при охлаждении до температур, лежащих ниже AN , их структура состоит из Fe_α , которое в интервале температур между линиями NH и NJ претерпевает аллотропическое превращение в Fe_γ .
2. Стали, содержащие углерода 0,1...0,16%, при температуре 1499 °С полностью затвердевают, испытывая при этом перитектическое превращение с образованием аустенита состава точки J . Феррит состава точки H остаётся. При дальнейшем охлаждении протекает аллотропическое $Fe_\alpha \rightarrow Fe_\gamma$ превращение, в результате которого структура сплавов ниже линии NJ становится аустенитной.
3. В сплавах, содержащих 0,51-4,3% углерода из жидкой фазы в интервале температур между линиями BC и JE кристаллизуется γ -твердый раствор (аустенит), состав которого в интервале затвердевания изменяется по линии JE , а жидкой фазы - по линии BC . Кристаллы аустенита имеют форму крупных дендритов, обладающих химической неоднородностью, называемой внутрикристаллической (дендритной) ликвацией.
4. В заэвтектических чугунах (более 4,3% углерода) в интервале затвердевания между линиями CD и CF вследствие избытка углерода из жидкой фазы выделяются кристаллы первичного цементита, состав которого не изменяется, но содержание углерода в жидкой фазе непрерывно уменьшается по линии CD до 4,3% при достижении температуры 1147 °С.
5. В любом сплаве, содержащем углерода более 2,14%, при температуре 1147 °С остаток жидкой фазы, находящейся между первичными кристаллами аустенита (доэвтектические чугуны) либо цементита (заэвтектические чугуны), всегда получает постоянный состав 4,3% С и затвердевает, образуя отдельную структурную составляющую – эвтектику (ледебурит первичный).

¹ Аналогичный механизм распада аустенита при 727 °С на перлит характерен и для всех остальных сплавов. В чугунах, кроме того, имеется аустенит, входящий составной частью в эвтектику (ледебурит первичный). Этот эвтектический аустенит также по рассмотренному механизму при 727 °С превращается в перлит.

Она состоит из смеси двух типов кристаллов с предельным насыщением углерода: Fe_γ (2,14%) и Fe_3C (6,67%):



Полностью затвердевшие сплавы при эвтектической температуре 1147 °С получают фазовый состав: Fe_3C и Fe_γ , а структурный - эвтектика и аустенит для доэвтектических, либо цементит первичный – для заэвтектических.

Превращения с твердом состоянии

1. В сплавах, содержащих углерода более 0,8%, в процессе охлаждения от 1147 до 727 °С растворимость углерода в аустените непрерывно уменьшается соответственно от 2,14 до 0,8% согласно линии ограниченной растворимости SE , поэтому из первичных и эвтектических кристаллов аустенита происходит выделение избыточного углерода в виде цементита вторичного. В инструментальных углеродистых сталях и доэвтектических чугунах вторичный цементит окружает зерна аустенита, создавая вокруг них оболочку. Избыточные вторичные кристаллы эвтектического цементита присоединяются (сливаются) к кристаллам первичного эвтектического цементита.
2. Если при температурах выше 727 °С ледебурит первичный представляет смесь аустенита с цементитом, то при температуре 727 °С образуется смесь из перлита и цементита – ледебурит вторичный.

5.3. Превращения при нагреве сплавов

Пример 2. Нагревается доэвтектический белый чугун, содержащий 3% углерода (вертикаль K_2 на рис. 5.1).

При нагреве до 727 °С исходные фазы Fe_α и Fe_3C , а также структура, состоящая из эвтектоида (ледебурита вторичного) и крупных зерен перлита, окруженных вторичным цементитом, сохраняются.

В точке 6 (температура 727 °С) происходит превращение перлита в аустенит, в результате чего из двух гетерогенных фаз (Fe_α и Fe_3C) путем перестройки решетки $Fe_\alpha \rightarrow Fe_\gamma$ и диффузионного перераспределения углерода возникает одна - Fe_γ . Этот процесс состоит в следующем.

В местах соприкосновения пластин Fe_α и Fe_3C возникают центры кристаллизации Fe_γ , которые растворяют в себе пластинки Fe_3C , входящие в состав перлита. Зарождение и рост кристаллов Fe_γ вызывает в примыкающих к ней новых участках Fe_α под действием углерода $Fe_\alpha \rightarrow Fe_\gamma$ превращение. Этот процесс продолжается до полного исчезновения перлитного зерна. При медленном нагреве он начинается и заканчивается при 727 °С. Поскольку каждая перлитная колония имеет большое количество пластин цементита и феррита, зарождается несколько центров кристаллизации аустенита, что приводит к получению мелких зерен, концентрация углерода в них выравнивается и составляет 0,8%².

² Аналогичное превращение перлита, в том числе эвтектоидного, в аустенит происходит в остальных сплавах, содержащих до 6,67% углерода.

Исходная перлитно-цементитная смесь (ледебурит II) становится аустенито-цементитной (ледебурит I).

При дальнейшем нагреве сплава K_2 растворимость углерода в аустените возрастает по линии SE с 0,8 при 727 °С до 2,14% при 1147 °С. Происходит растворение ледебуритного и избыточного вторичного цементита в аустените. При достижении температуры 1147 °С (точка 7) осуществляется диффузия углерода из ледебуритного и вторичного цементита в аустенит. Ледебурит I полностью расплавляется, а при дальнейшем повышении температуры начнут плавиться кристаллы аустенита. В точке 8 сплав находится в жидком состоянии.

В доэвтектоидных сталях при нагреве в интервале температур между линиями PS и GS в отличие от заэвтектоидных сталей и чугунов в результате диффузии углерода происходит растворение избыточного феррита в аустените. На линии GS этот диффузионный процесс завершается, сталь получает мелкозернистую аустенитную структуру. Дальнейший нагрев стали в аустенитной области, начиная с температуры около 1100 °С, вызывает рост зерен аустенита. Атомы углерода переходят от одного зерна к другому через границу раздела. Это приводит к постепенному уменьшению, а затем и исчезновению одних зерен и укрупнению других. Чем выше температура нагрева, тем крупнее зерна аустенита

Пример 3. Рассчитать относительное весовое количество фаз и структурных составляющих при комнатной температуре (20 °С) у сплава K_1 и при температуре выше 727 °С у сплава K_2 .

Количество фаз или структурных составляющих Q в заданной точке на диаграмме состояний определяют по известному правилу отрезков:

$$Q = \frac{l}{L} \cdot 100\%,$$

где l – отрезок, противолежащий определяемой фазе или структуре относительно заданной точки;

L – общая длина отрезка (коноды), в пределах которого количество определяемых фаз или структур изменяется от 0 до 100%.

1. В сплаве K_1 (как и в любых других сплавах) при комнатной температуре (точка X на рис. 5.1) фазами являются α и Fe_3C . Общая длина коноды равна сумме отрезков a и b , на границах которых соотношение между фазами изменяется от 0 до 100%.

Отрезок a является противолежащим для Fe_3C . Отрезок b является противолежащим для α -фазы. Длины этих отрезков можно измерить линейкой по диаграмме или посчитать по количеству углерода.

Отсюда относительные весовые количества α -фазы (Q_α) и Fe_3C (Q_{Fe_3C}) составят:

$$Q_\alpha = \frac{b}{a+b} \cdot 100\%;$$

$$Q_{Fe_3C} = \frac{a}{a+b} \cdot 100\%.$$

2. Сплав K_1 при $t = 20^\circ\text{C}$ имеет структуру феррита и перлита (точка Y на диаграмме). Общая длина коноды $c + d = 0,8\% \text{ C}$ (см. рис. 5.1). В пределах этой коноды соотношение между ферритом и перлитом изменяется от 0 до 100%.

Отсюда относительное весовое количество перлита (Q_n) и феррита (Q_ϕ):

$$Q_n = \frac{c}{c+d} \cdot 100\%;$$

$$Q_\phi = \frac{d}{c+d} \cdot 100\%.$$

3. В сплаве K_2 при температуре, соответствующей точке Z (см. рис. 5.1) фазами являются γ и Fe_3C . Общая длина коноды равна сумме отрезков e и f , на границах которых соотношение между фазами изменяется от 0 до 100%.

Отрезок e является противоположащим для Fe_3C . Отрезок f является противоположащим для γ -фазы.

Отсюда относительные весовые количества γ -фазы (Q_γ) и Fe_3C (Q_{Fe_3C}) составят:

$$Q_\gamma = \frac{f}{e+f} \cdot 100\%;$$

$$Q_{Fe_3C} = \frac{e}{e+f} \cdot 100\%.$$

Пример 4. Рассчитать физико-механические характеристики (HB , σ_ϕ , δ) стали при комнатной температуре для отожженного состояния.

Расчет физико-механических характеристик сплавов выполняют по формуле

$$W = \frac{\sum W_i \cdot Q_i}{100},$$

где W - определяемое свойство (HB , σ_ϕ , δ);

W_i – свойство i -ой структурной составляющей (феррита, перлита или цементита), принимаемое по данным справочной литературы или табл. 2.1.

Q_i – весовая доля или доля площади, занимаемой в структуре i -ой составляющей, %.

Структура сплава K_1 при ($t = 20$ °С) состоит из феррита и перлита. Расчетные выражения для определения твердости по Бринеллю, прочности и относительного удлинения будут иметь вид:

$$HB = \frac{HB_\phi \cdot Q_\phi + HB_n \cdot Q_n}{100};$$

$$\sigma_B = \frac{\sigma_{B\phi} \cdot Q_\phi + \sigma_{Bn} \cdot Q_n}{100};$$

$$\delta = \frac{\delta_\phi \cdot Q_\phi + \delta_n \cdot Q_n}{100}.$$

Здесь, Q_ϕ и Q_n вычислены в примере 3

5.4. Контрольные вопросы

1. Дайте определение аустенита, феррита, перлита и цементита.
2. Приведите названия структурных составляющих и фаз в системе железо-углерод (цементит).
3. Сколько углерода при комнатной температуре содержат феррит, перлит, цементит, ледебурит?
4. В каких железоуглеродистых сплавах присутствует перлит?
5. В сталях какого химического состава при комнатной температуре встречается феррит как самостоятельная структурная составляющая?
6. Чем различаются структуры до- и заэвтектоидной стали?

7. Определите при комнатной температуре весовые доли структурных составляющих в сплавах с содержанием углерода 0,3; 1,2; 5,3%.
8. Сколько углерода имеет жидкая фаза при температуре 1147 °С, если чугун содержит 2,9% С?
9. Назовите структурные составляющие стали марки Ст3 при температуре 550 °С.
10. Чем отличается эвтектическое превращение от эвтектоидного?
11. Укажите температуру превращения перлита в аустенит. Каким образом оно проходит?
12. Когда и каким образом ледебурит I превращается в ледебурит II?
13. Приведите кинетику возникновения и роста перлитного зерна.
14. Какие диффузионные процессы, происходящие в железоуглеродистых сплавах в твердом состоянии, вы знаете?

6. СТАБИЛЬНЫЕ И НЕКОТОРЫЕ ОСОБЫЕ СТРУКТУРЫ СТАЛИ

Цель работы – исследовать и выявить особенности микроструктуры сталей обыкновенного качества, качественных конструкционных и углеродистых инструментальных в состоянии поставки; установить ее связи с изменением свойств стали, освоить и получить практические навыки по методике расчета процентного содержания углерода, механических свойств стали и работе на прессе Бринелля.

6.1. Порядок выполнения работы

Группа студентов из трех-четырех человек получает коллекцию микрошлифов из различных марок сталей в нормализованном, отожженном и литом состояниях. Просматривают микрошлифы, используя металлографический микроскоп, выявляют особенности микроструктуры, тщательно ее зарисовывают, указывают фазы и структурные составляющие. Ориентировочно (на глаз) определяют площади, занятые структурными составляющими, рассчитывают содержание углерода и устанавливают марку стали и ее назначение (см. Приложение Г). В одной из марок сталей необходимо рассчитать теоретически значение твердости и предела прочности при растяжении. В процессе исследования микроструктуры сталей в литом, деформированном и перегретом состояниях выявить характерные признаки, объяснить влияние деформации, перегрева, литья на размеры, форму зерна и свойства стали, указать недостатки и способы их устранения. По микроструктуре контрольного шлифа определить теоретическую твердость, а затем проверить испытанием на прессе Бринелля.

6.2. Теоретическая часть работы

Для изготовления и ремонта элементов конструкций, деталей многообразной железнодорожной техники, подъемно-транспортных механизмов, технологической оснастки и инструмента широко применяют углеродистые конструкционные и инструментальные стали (Приложение Г). Различные виды проката, поковок, штамповок и других полуфабрикатов поставляют в отожженном, нормализованном, термически обработанном, нагартованном и др. состояниях. Наиболее характерным состоянием поставки сталей являются нормализованная или отожженная.

Прежде чем рассматривать термообработку стали, необходимо привести общепринятые обозначения критических точек.

Критические точки обозначаются буквой *A*. Нижняя критическая точка, обозначаемая A_1 , лежит на линии *PSK* и соответствует превращению аустенит ↔ перлит. Верхняя критическая точка A_3 лежит на линии *GSE* и соответствует началу выпадения или концу растворения феррита в доэвтектоидных сталях или цементита (вторичного) в заэвтектоидных. Для заэвтектоидных сталей точка A_3 часто обозначается как A_m .

Чтобы отличить критическую точку при нагреве от критической точки при охлаждении, рядом с буквой *A* ставят букву *c*, в первом случае и *r* – во втором. Следовательно, критическая точка превращения аустенита в перлит обозначается A_{r1} , а перлита в аустенит – A_{c1} ; начало выделения феррита из аустенита обозначается A_{r3} ; конец растворения феррита в аустените – A_{c3} . Начало выделения вторичного цементита из аустенита – A_{r3} (A_{rm}), а конец растворения вторичного цементита в аустените – A_{c3} (A_{cm}) (рис. 6.1).

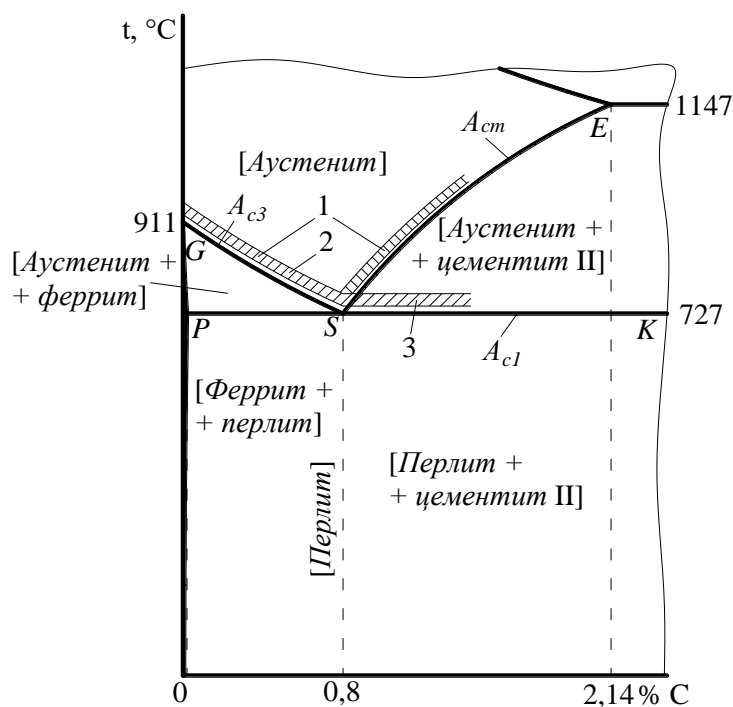


Рис. 6.1. Оптимальный температурный интервал нормализации и отжига углеродистых сталей

Теперь дадим определения нормализации и отжига.

Нормализация – нагрев выше критических точек A_{c3} или A_{cm} на 30-50 °С (область 1, рис. 6.1), непродолжительная выдержка при этих температурах и охлаждение на воздухе или в воздушной струе. Нередко нормализацию проводят с ковочного нагрева. В результате фазовой перекристаллизации нормализация устраняет крупнозернистую структуру видманштетта. Также исправляет структуру, полученную при прокатке, ковке, штамповке, литье, в зоне термического влияния сварных швов и наплавов. В результате прочность и твердость увеличивается до 25% по сравнению с отжигом.

Отжиг – нагрев стали до температуры выше точек A_{c3} или A_{c1} (области 2, 3, рис. 6.1), выдержке и последующем медленном охлаждении вместе с печью со скоростью не более 100 °С в час до 500-550°С, а затем - на воздухе. Повышенная скорость охлаждения приведет к образованию структуры с более высокой твердостью. Отжиг по режиму 2 (рис. 6.1) приводит к полной фазовой перекристаллизации, устраняет дендритную внутрикристаллическую ликвацию, видманштеттову структуру, частично, при необходимости, исправляет строчечность.

После полного отжига структура приобретет равновесное состояние, представляющее сравнительно одинаковые по форме равноосные зерна (полиэдры). Неполный отжиг 3 (рис. 6.1) применяют преимущественно для заэвтектоидных сталей. В результате получают структуру зернистого перлита (цементита). В результате отжига сталь приобретет более высокую пластичность, вязкость.

Маркируется сталь следующим образом:

- стали обыкновенного качества по ГОСТ 380-2005 (Ст0, Ст1кп, Ст1пс, Ст1сп, Ст2кп, ..., Стбсп): буквы «Ст» обозначают «Сталь»; цифры – условный номер марки в зависимости от химического состава; буквы «кп», «пс», «сп» - степень раскисления («кп» - кипящая, «пс» - полуспокойная, «сп» - спокойная;

- стали углеродистые качественные конструкционные по ГОСТ 1050-2013 (марки: 08, 10, 15, 20, ..., 60): здесь, цифра соответствует средней массовой доле углерода в сотых долях процента. Например, сталь марки 45 содержит примерно 0,45% углерода;

- стали углеродистые инструментальные по ГОСТ 1435-99 (У7, У8, ..., У12 или У7А, ..., У12А): буква «У» обозначает «Углеродистая», следующая за ней цифра – средняя массовая доля углерода в десятых долях процента (например, У10 – сталь содержит примерно 1,0% углерода), буква «А» показывает, что сталь повышенного качества, т.е. в ней понижено содержание таких вредных примесей, как сера и фосфор (серы меньше или равно 0,018%, фосфора – 0,025%).

Стали углеродистые качественные конструкционные и стали углеродистые обыкновенного качества являются доэвтектоидными, и поэтому имеют феррито-перлитную структуру (рис. 6.2, а), а углеродистые инструментальные – перлитную и перлито-цементитную (рис. 6.2, б) (кроме стали У7

(У7А), которая тоже является доэвтектоидной). После травления микрошлифов 2-4%-ным раствором азотной кислоты в этиловом спирте при рассмотрении в микроскоп зерна феррита и вторичного цементита выглядят светлыми, а перлита – темными.

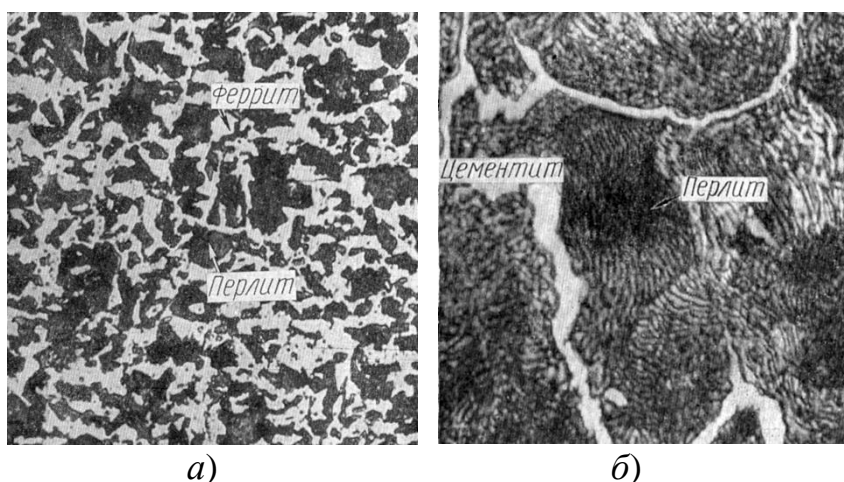


Рис. 6.2. Микроструктура стали: *а* – доэвтектоидной; *б* – заэвтектоидной

Основной структурной составляющей заэвтектоидных сталей является перлит. Незначительное количество избыточного вторичного цементита распределено в виде тонкой светлой сетки вокруг зерен перлита. При травлении такой стали пикратом натрия происходит окрашивание цементита вторичного в темный цвет, феррит и перлит остаются светлыми. Этот прием применяют для распознавания феррита и цементита.

При содержании в стали углерода 0,6-0,7% феррит выделяется вокруг зерен перлита в виде сетки. Физико-механические и другие свойства сталей зависят от процента содержания углерода и характера сформированной микроструктуры. С увеличением процентного содержания углерода прочность, твердость возрастают, а пластичность, вязкость снижаются. Крупнозернистые структуры по сравнению с мелкозернистыми, обладают пониженной пластичностью и вязкостью.

Определение концентрации углерода в стали, твердости, прочности, пластичности и др. характеристик выполняют по долям площадей, занимаемых структурными составляющими.

Для доэвтектоидных и заэвтектоидных сталей содержание углерода (C) рассчитывают по формулам:

$$C = \frac{0\% \cdot S_{\phi} + 0,8\% \cdot S_n}{100} \text{ - для доэвтектоидных сталей;}$$

$$C = \frac{0,8\% \cdot S_n + 6,67\% \cdot S_{\psi}}{100} \text{ - для заэвтектоидных сталей,}$$

где 0; 0,8; 6,67 – количество углерода соответственно в феррите, перлите и цементите, %;

S_{ϕ} , S_n , S_{ψ} – доли площадей, занимаемые в структуре соответственно ферритом (Φ), перлитом (Π) и цементитом вторичным (ψ).

Теоретическое значение твердости по Бринеллю, прочности и относительного удлинения определяется аналогично, как и в лабораторной работе «Диаграмма состояния железо-углерод (цементит)».

В процессе исследования микроструктуры литой, перегретой стали следует иметь в виду, что избыточные фазы: Fe_{α} в доэвтектоидных и Fe_3C в заэвтектоидных сталях, выделившиеся из γ -твёрдого раствора, могут образовывать кристаллы (зерна) игольчатой, зернистой формы, либо сетку по границам зерен (так называемая структура видмандштетта (рис. 6.3, а)).

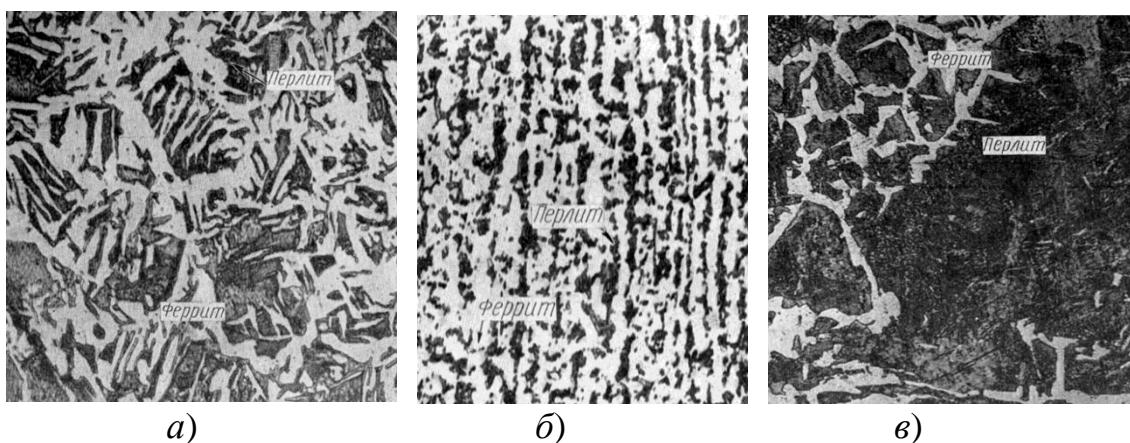


Рис. 6.3. Пороки микроструктуры стали:

а – структура видмандштетта; б – строчечная; в - крупнозернистая

В катаной углеродистой стали участки перлита и феррита, а также имеющиеся в ней неметаллические включения вытянуты вдоль направления прокатки. Сталь имеет полосчатое (строчечное) строение (рис. 6.3, б). Ударная вязкость поперек волокон является более высокой, чем при испытании вдоль волокон. Предел прочности при растяжении наибольшее значение имеет вдоль прокатки. Различие свойств вдоль и поперек прокатки учитывают на стадии проектирования элементов конструкций, Этот недостаток нельзя устранить и, как правило, его не требуется устранять, так как пластическая деформация существенно увеличивает конструкционную прочность материала. В случае необходимости (частично отжигом) микроструктуре можно придать равноосный характер, но строчечность и различие свойств по направлению сохраняются.

Литая сталь обычно характеризуется крупнозернистостью, дендритным строением, внутрикристаллической ликвацией (рис. 6.3, в). Это связано с особенностями роста избыточной фазы в процессе затвердевания сплава. Из образовавшихся разномасштабных кристаллов аустенита при медленном охлаждении возникают различные по величине и форме зерна феррита и перлита. Такая структура не обладает стабильными и высокими свойствами, создает внутренние напряжения, приводящие к возникновению трещин и последующему разрушению детали. Отжиг или нормализация отливок позволяют по-

лучить в них равновесную структуру, состоящую из сравнительно одинаковых по форме и размерам равноосных зёрен (полиэдров). Возрастают предел текучести, пластичность, вязкость. Например, в качественной конструкционной стали 40 относительное удлинение с 10-12% (до отжига) возрастает до 15-16% (после отжига).

Температуры нагрева, значительно превышающие A_3 и A_{cm} , или продолжительная выдержка приводят к образованию в сталях перегретой, видманшеттовой структуры, отличающейся крупнозернистостью. При этих температурах многие мелкие зерна аустенита в результате собирательной рекристаллизации объединяются в одно крупное. Этому слиянию способствуют и сосредоточения на границах зерен аустенита различных дефектов, в первую очередь, дислокаций, вакансий. Их миграция приводит к уничтожению границ зерен. Скорость роста кристаллов зависит от исходного структурного состояния, предшествующей пластической деформации и др. факторов. Особенно интенсивный рост зёрен обуславливает малая степень деформации (~5%), называемая критической. Поэтому, если после деформации предусмотрен нагрев материала, то следует избегать данной критической степени деформации,

При медленном охлаждении перегретой стали (например отжиге) по границам зерен аустенита кристаллизуется феррит или вторичный цементит, а при температуре 727 °С аустенит превращается в перлит, сохраняя крупнозернистую форму.

В случае более быстрого охлаждения (например, нормализации) из области перегретого крупнозернистого аустенита избыточные α -фаза (феррит) или Fe_3C (цементит) не успевают полностью выделиться на границы зёрен и образуют внутри их пластины (иглы) структурно свободного феррита, либо цементита вторичного.

Видманшеттова структура характерна для отливок, сильно перегретой нормализованной стали, зон термического влияния сварных швов и наплавов. Она отличается пониженной пластичностью и ударной вязкостью. В доэвтектоидных сталях ее можно устранить отжигом или нормализацией, а в заэвтектоидных сталях, как правило, нормализацией.

Если допущены еще более значительные нагревы, то происходит на границах зерен аустенита интенсивное образование окислов железа. Имеет место пережог стали, который устранить нельзя.

6.3. Контрольные вопросы

1. Дайте определение нормализации и отжига.
2. Назовите фазовые и структурные составляющие сталей 45, Ст3 после полного отжига.
3. Влияние углерода на механические свойства и микроструктуру отожженных сталей.

4. Какую структуру должна получить сталь марки Ст5 после нагрева до 1050-1100 °С и охлаждения на воздухе? То же, вместе с печью.
5. Назовите фазовые и структурные составляющие сталей 40, Ст4, У12 при температуре 760 °С.
6. Для изготовления каких элементов конструкции железнодорожной техники применяют стали марок Ст3, 20?
7. В чем состоит различие между литой и катаной низкоуглеродистой сталью?
8. Можно ли по микроструктуре отличить металл, деформированный в горячем состоянии, от металла, деформированного в холодном состоянии?
9. Какое влияние на форму и размеры зерен в процессе отжига окажет замедленное или ускоренное охлаждение?
10. Каким образом получают в стали структуру зернистого перлита?
11. Почему в прокате, имеющем строчечную структуру, отжигом или нормализацией нельзя полностью устранить различие свойств по направлению?
12. Каким образом в доэвтектоидной стали устранить внутрикристаллическую ликвацию?
13. Каким образом в заэвтектоидной стали устранить цементитную сетку?
14. Укажите и объясните, в какой форме и где выделится избыточный феррит или вторичный цементит в случае медленного и ускоренного охлаждения перегретой стали?

7. ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ЧУГУНОВ

Цель работы – изучение условий получения, структур, свойств и назначения чугунов, используемых на железнодорожном транспорте.

7.1. Порядок выполнения работы

Бригада из трех-четырех студентов получает микроскоп и коллекцию шлифов. При их исследовании обращают внимание на характерные особенности структуры, зарисовывают в отчет и отвечают на вопросы, поставленные в бланке отчета. Для этого необходимо пользоваться данным методическим пособием, плакатами в лаборатории и слушать пояснения ведущего занятия преподавателя.

В конце занятия каждая из бригад студентов должна по микроструктуре определить тип чугуна у двух контрольных шлифов, охарактеризовать отличительные признаки в его структуре и отметить особенности условий его получения.

7.2. Теоретическая часть работы

Чугуны представляют собой тройные системы Fe-C-Si со сравнительно небольшими температурами плавления (около 1200-1350 °С), поэтому чело-

вещество самые простые из них – серые – освоило более 2000 лет назад. Более сложные по технологии производства чугуны удалось человечеству получить только в последнее столетие, когда люди установили существование четкой зависимости свойств материалов от их структуры. Большой вклад в металлографию чугуна внесли советские ученые А.А. Бочвар, М.Г. Окнов И.Н. Богачев, М.Г. Гиршович, К.П. Бунин, К.И. Таран и др.

Большое содержание кремния, а также медленная скорость охлаждения способствуют при кристаллизации выделению углерода в свободном виде – в виде графита. Этот процесс называется *графитизация*. В зависимости от того, каким образом будет протекать графитизация, основа чугуна тоже будет меняться. Рассматривать процесс графитизации удобно по схеме, представленной на рис. 7.1.

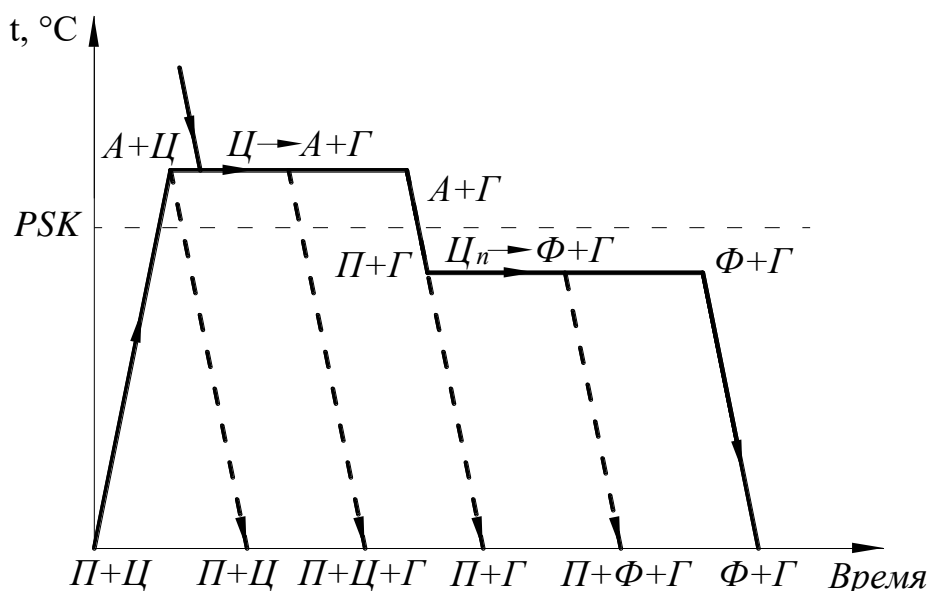


Рис. 7.1. Схема образования структур при графитизации чугуна

Предположим, что охлаждение было достаточно быстрое и получился белый чугун (перлит + цементит), - исходное состояние. В результате нагрева белого чугуна выше линии PSK перлит превращается в аустенит; выдержка при этой температуре приводит к графитизации избыточного нерастворившегося цементита. Если процесс закончился полностью, то при высокой температуре структура будет состоять из аустенита и графита, а после охлаждения из перлита и графита (рис. 7.1). При незавершённости процесса первичной графитизации (выше линии PSK) сохраняется цементит, и структура состоит из аустенита, графита и цементита при высокой или перлита, графита и цементита при низкой температуре.

При переходе через критическую точку (линия PSK) аустенит превращается в перлит и выдержка при температурах, близких, но ниже критической точки, может привести к распаду цементита перлита (вторая стадия графитизации). При полностью завершённом процессе весь цементит перлита разложится и в результате образуется феррито-графитная структура, а при частич-

ном превращении – феррито-перлитно-графитная (феррито-перлитный чугун).

Кремний особенно сильно влияет на структуру чугуна, усиливая графитизацию. Содержание кремния в чугунах колеблется в широких пределах: от 0,3-0,5 до 3-5%. Изменяя содержание кремния, можно получить чугуны, совершенно различные по свойствам и структуре – от малокремнистого белого до высококремнистого ферритного.

Количество графита и форма его выделений (розетки, чешуйки, толстые чешуйки, тонкие, мелкие, хлопья и глобулы), а также количество связанного углерода в металлической основе чугуна, зависящие от условий его получения, в конечном итоге определяют его тип и группу (ферритный, феррито-перлитный, перлитный), а следовательно, и его свойства, назначение.

7.3. Белый чугун (ГОСТ 805-95)

Такое название получил по виду излома, который имеет матово-белый цвет. Фазовый состав белого чугуна (при нормальной температуре) цементит и феррит. Следовательно, в белом чугуне весь углерод находится в форме цементита, степень графитизации равна нулю. Белый чугун обладает высокой твёрдостью и хрупкостью, практически не поддаётся обработке режущим инструментом.

На практике используют три группы белых чугунов:

1) доэвтектические с содержанием 2,5-3,5% углерода, которые применяются для передела в сталь и ковкий чугун (поэтому их ещё называют передельными), а также из него производят износостойкие ($HV \approx 4000-4500$ МПа, $\delta = 0\%$) детали (шары для шаровых мельниц, катки и т.д.) и посуду: сковородки, котлы и т.д.;

2) эвтектический, с содержанием 4,2-4,4% углерода, который вынужденно используется для производства стали, если не хватает доэвтектического; для других целей он практически неприменим, так как очень тверд ($HV = 5500$ МПа) и хрупок ($\delta = 0\%$);

3) заэвтектические, с содержанием 5-6% углерода, которые нашли применение для изготовления стационарных защит от радиации. Механические свойства этих чугунов ($HV \approx 6000-6500$ МПа и $\delta = 0\%$) не позволяют их использовать для нагруженных деталей.

Структура ледебурита вторичного у эвтектического чугуна показана на рис. 7.2, а; у доэвтектического чугуна дополнительно будут перлит и цементит вторичный (рис. 7.2, б), а у заэвтектического – пластины цементита первичного (рис. 7.2, в).

7.4. Серый чугун (ГОСТ 1412-85)

Такое название получил по виду излома, который имеет серый цвет. В структуре серого чугуна имеется графит пластинчатой или вермикулярной формы.

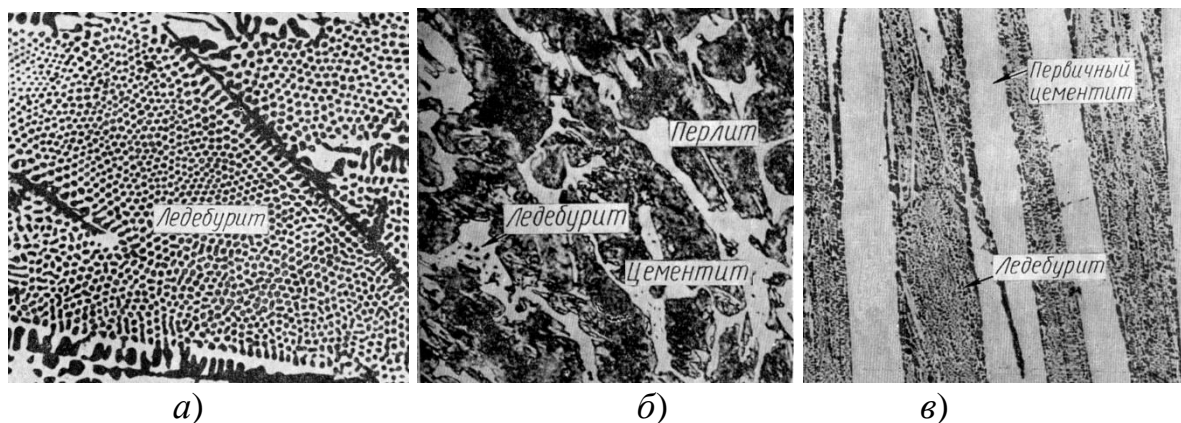


Рис. 7.2. Структуры белых чугунов:
а – эвтектического; *б* – доэвтектического; *в* – заэвтектического

Серые чугуны обладают высокими литейными свойствами, хорошо работают на сжатие и трение, почти нечувствительны к надрезам, так как пронизаны графитными чешуйками с острыми краями. При обработке резанием получается ломкая стружка, условия резания – оптимальные.

Графит в чугуне служит естественной смазкой и впитывает хорошо нанесенную смазку, поэтому детали пар трения работают с низким коэффициентом трения и мало изнашиваются.

Применяется обычно доэвтектический серый чугун с содержанием углерода 2,8-3,5% и кремния 1,2-2,5%. Из него изготавливают большое количество деталей для железнодорожного транспорта: скользуны, тормозные колодки, диски, детали пневмосистемы, блоки цилиндров, направляющие гидравлических гасителей колебаний и т.д.

В микроструктуре чугуна следует различать металлическую основу и графитные включения. По строению металлической основы он может быть ферритным, феррито-перлитным и перлитным. Чем больше в металлической основе чугуна перлита, тем больше его твердость, прочность и износостойкость, но меньше пластичность. Структуры серых чугунов показаны на рис. 7.3.

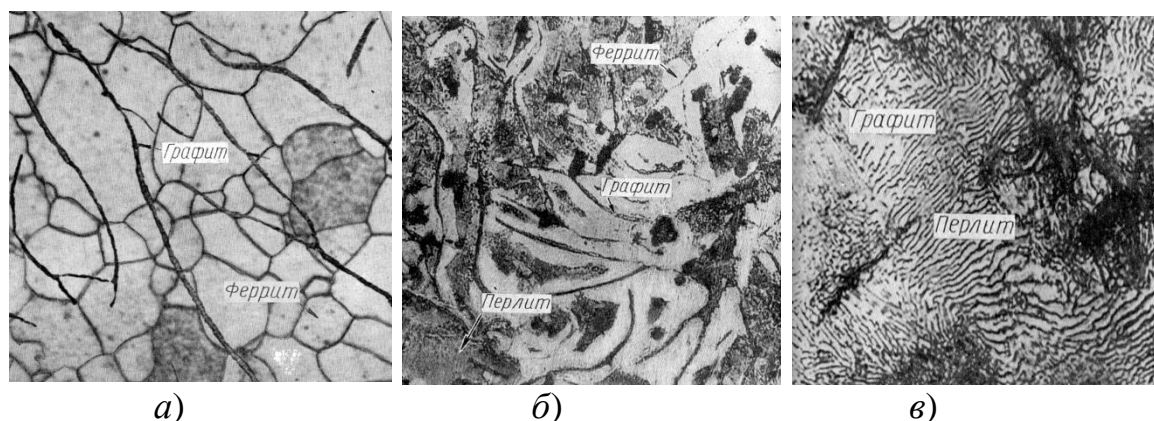


Рис. 7.3. Структуры серого чугуна:
а – ферритного; *б* – феррито-перлитного; *в* – перлитного

Поскольку структура чугуна состоит из металлической основы и графита, то и свойства чугуна будут зависеть как от свойств металлической основы, так и от количества и характера графитных включений (табл. 7.1).

Таблица 7.1

Механические свойства чугунов

Название чугуна	Механические свойства		
	σ_v , МПа	δ , %	НВ, МПа
Серые чугуны:			
ферритные	120-150	до 0,5	143-229
перлитные	210-240	до 0,2	170-241
Модифицированные перлитные чугуны	280-440	до 0,5	187-269
Ковкие чугуны:			
ферритные	300-370	6-12	149-163
перлитные	600-630	2-3	≤ 201
Высокопрочные чугуны:			
ферритные	380-420	12-17	140-200
перлитные	500-1200	2-4	200-369

Графит по сравнению со сталью обладает низкими механическими свойствами, и поэтому графитные включения можно считать в первом приближении просто пустотами, трещинами. Отсюда следует, что чугун можно рассматривать как сталь, испещрённую большим количеством пустот и трещин. Чем больший объём занимают пустоты, тем ниже свойства чугуна. При одинаковом объёме пустот (т.е. количестве графита) свойства чугуна будут зависеть от их формы и расположения. Следовательно, чем больше в чугуне графита, тем ниже его механические свойства, чем грубее включения графита, тем больше они разобщают металлическую основу, тем хуже свойства чугуна.

Для измельчения графитовых включений и повышения механических свойств серого чугуна, его модифицируют.

Модифицированные серые чугуны начали применять с 1942 г. Обычно содержание углерода в них до 3%, а кремний вводится в два приема: в самом расплаве чугуна его поддерживается около 1,2%, а в ковш за 10-15 мин перед разливкой добавляется еще примерно 0,4% в виде $FeSi$, $SiCa$, их смесей.

Кремний и кальций взаимодействуют с кислородом, растворенным в чугуне, и дают мельчайшие твердые частицы SiO_2 и CaO , которые служат центрами принудительной кристаллизации графита. В результате их огромного количества графит получается более мелкочешуйчатый, что положительно сказывается на увеличении прочности чугуна.

Применяют модифицированный чугун для ответственного литья деталей топок и двигателей внутреннего сгорания, например, изготавливают компрессионные и маслоъемные кольца дизелей.

Серый чугун маркируется буквами СЧ (серый чугун) и двумя цифрами, которые показывают минимальное значение предела прочности чугуна на растяжение. Например, у чугуна СЧ25 $\sigma_{\sigma} = 245$ МПа (25 кгс/мм²).

7.5. Ковкий чугун (ГОСТ 1215-79)

Ковкий чугун отличается от серого формой графита: в серых чугунах графит в виде тонких чешуек, а в ковких - в виде хлопьев, которые меньше подрезают металлическую основу (рис. 7.4). Поэтому прочность ковкого чугуна в 2,5-3 раза больше, чем у серого, а его пластичность может достигать 12% (см. табл. 7.1).

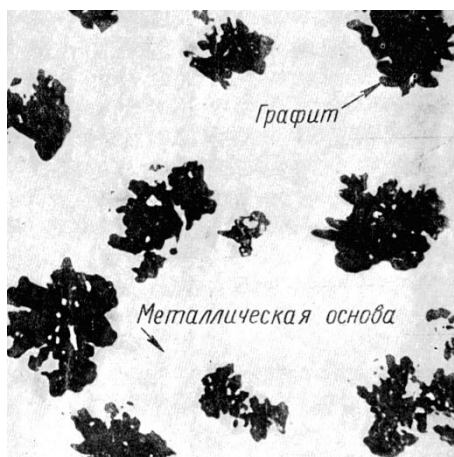


Рис. 7.4. Нетравленный ковкий чугун с графитом хлопьевидной формы

Производство деталей из ковкого чугуна делится на две стадии:

1) из белого доэвтектического чугуна получают отливки с толщиной стенки не более 50 мм. При большой толщине внутри стенки получается серый чугун по причине малой скорости охлаждения;

2) отжиг при температуре 900-1000 °С в течение 2-4 суток и до 1-1,5 недель с целью графитизации Fe₃C в твердом состоянии. В зависимости от степени графитизации количество связанного углерода остается не более 0,8% и можно получить ферритный, феррито-перлитный и перлитный ковкие чугуны.

Ковкий чугун маркируется следующим образом: КЧ означает ковкий чугун. Затем ставят число, показывающее предел прочности, кгс/мм², и число, показывающее относительное удлинение, %. Например, КЧ30-6; КЧ37-12.

Применяется ковкий чугун на железнодорожном транспорте как дешёвый заменитель стали: муфты, оголовки соединительных рукавов воздушной тормозной магистрали и т.д.

7.6. Высокопрочный чугун (ГОСТ 7293-85)

Отличительной особенностью этих чугунов является шаровидная форма графита, которая получена была впервые в 1949 г. путём использования довольно сложной технологии:

- в доэвтектическом белом чугуна первоначальное содержание кремния должно составлять в пределах 1-1,2%.

- перед разливкой чугун подвергается двойной обработке: рафинированию металлическим магнием (0,1%), а затем модифицированию FeSi или Si-Ca, но двойной дозой (0,8%).

- при кристаллизации обеспечивается достаточно высокая скорость охлаждения для получения около 0,6% связанного углерода, т.е. чисто перлитной металлической основы;

- для смягчения выполняется отжиг из расчета 3-4 ч на 100 мм толщины стенки отливки при температуре 800-850 °С.

В результате применения такой технологии производства графит получается шаровидной формы и каждая его частица заблокирована мягким ферритом (рис. 7.5). Это в свою очередь резко повышает прочность чугуна (см. табл. 7.1).

С самого начала этот чугун предназначался для сверхответственного литья. Это назначение он сохранил и по настоящее время: на железнодорожном транспорте этот чугун применяется для изготовления литых сплошных или секционных коленчатых валов ДВС.

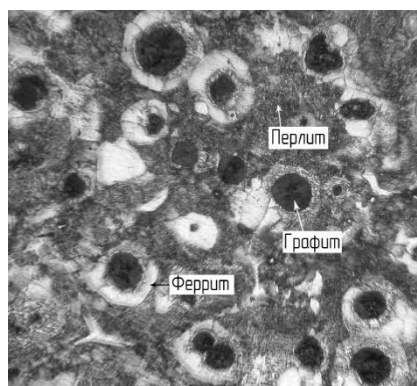


Рис. 7.5. Высокопрочный перлитный чугун

Высокопрочный чугун (ВЧ) также подразделяется на отдельные марки в зависимости от механических свойств. Обозначается подобно ковкому чугуну.

Контрольные вопросы

1. Чем отличается чугун от стали по технологическим свойствам?
2. Какая структурная составляющая характерна для белого чугуна?
3. Почему белый чугун называется "белым"?
4. Какая структурная составляющая характерна для серого, модифицированного, ковкого и высокопрочного чугунов?
5. В чем сущность рафинирования высокопрочных чугунов?
6. В чем сущность модифицирования чугунов?
7. Почему первоначальное высокое содержание кремния в чугуне не приводит к получению мелких чешуек графита?

8. По какой закономерности Н.С.Курнакова зависит изменение твердости у белых чугунов при изменении содержания в них углерода?
9. Можно ли ковать ковкий чугун?
10. Почему ковкий чугун назван "ковким"?
11. Влияет ли скорость охлаждения в момент кристаллизации (песчаная или металлическая форма) на форму графитных выделений?
12. Чем отличаются формы графитных частиц, полученных при первичной кристаллизации чугуна и при отжиге?
13. Для чего необходим в высокопрочном чугуне блокирующий феррит вокруг графитных выделений?
14. Почему концентраторы напряжений: подрезы, отверстия и т.д., - практически не сказываются на работоспособности деталей из серого или модифицированного чугуна, а в то же время очень опасны в деталях из ковкого или высокопрочного чугунов?
15. Почему детали из белого чугуна имеют высокий коэффициент трения при работе в паре со сталью, а из всех остальных чугунов - сравнительно низкий и стабильный?
16. Почему чугуны успешно конкурируют со сталью при изготовлении литых деталей, хотя прочность последних обычно выше?

8. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТАСТАБИЛЬНЫХ СТРУКТУР СТАЛЕЙ

Цель работы – изучение условий получения, особенностей микроструктуры и свойств метастабильных состояний сталей.

8.1. Порядок выполнения работы

Бригада из трех-четырех студентов получает микроскоп и коллекцию шлифов. При их изучении обращают внимание на характерные особенности структуры, зарисовывают в бланке отчета общепринятые схемы условных обозначений метастабильных структур и приводят ответы на поставленные вопросы. Условия получения метастабильных структур студенты должны взять из материала лекций и данной работы, а также из рекомендуемой литературы.

В конце занятия каждая из бригад студентов должна изучить микроструктуры двух контрольных шлифов, определить вероятные условия получения стали с такой структурой и ожидаемые ее свойства.

8.2. Теоретическая часть работы

Метастабильной (ложноустойчивой) называют такую структуру стали, которая при температуре окружающей среды может сохраняться довольно

долго (десятки и сотни лет), а при нагреве ниже A_{c1} быстро разлагается, что приводит к получению более стабильных структур с иными свойствами. Метастабильные структуры у стали могут быть получены различными путями: быстрым охлаждением стали, нагретой до аустенитного состояния, т.е. закалкой, наклепом, радиационным повреждением и т.д. Общим признаком метастабильных структур является повышенный уровень внутренней энергии, реализованный в виде особой структуры, нехарактерной для стали в стабильном состоянии. При нагревании дислокации и атомы приобретают подвижность, что позволяет им занять более устойчивое положение, т.е. создать стабильную структуру с меньшим энергетическим уровнем. Явления ползучести приводят при нагреве к релаксации внутренних напряжений. На практике метастабильные структуры чаще всего создаются преднамеренно различными технологическими способами, так как чем более выражено метастабильное состояние стали, тем она обычно обладает большей твердостью и прочностью, но пониженной пластичностью. На предприятиях железнодорожного транспорта для этой цели наиболее распространена закалка, а для регулирования уровня свойств - отпуск.

Исходные стабильные структуры стали: феррит и перлит в доэвтектоидной и перлит с незначительным количеством цементита вторичного в заэвтектоидной, - обладают сравнительно небольшой твердостью (см. лабораторную работу «Стабильные и некоторые особые структуры стали»).

Причиной этого является то, что углерод практически нерастворим в феррите, а присутствующий цементит из-за его небольшого количества не может обеспечить высокую твердость стали. Для обеспечения стали большой твердости, необходимо сначала растворить углерод в аустените, т.е. нагреть сталь до аустенитного состояния, а затем охлаждением со скоростью, более критической, зафиксировать пересыщенный твердый раствор, т.е. мартенсит. Эта структура является наиболее метастабильной у стали. Она обладает наибольшей твердостью, износостойкостью и т.д.

8.3. Закалка стали

Температура нагрева стали при закалке назначается по диаграмме Fe-Fe₃C (рис. 8.1).

Для доэвтектоидной стали характерна полная закалка при нагреве до температуры, °С:

$$t = A_{c3} + (20 \div 50).$$

С увеличением температуры нагрева под закалку (t_1) и времени выдержки происходит образование крупноигльчатого мартенсита, что приводит к повышению внутренних напряжений, а следовательно, и хрупкости. Также могут образовываться микротрещины, что является неисправимым браком. При недостаточной температуре нагрева (t_2) в структуре останется феррит, который не успеет раствориться в аустените, в следствие чего твердость стали снизится.

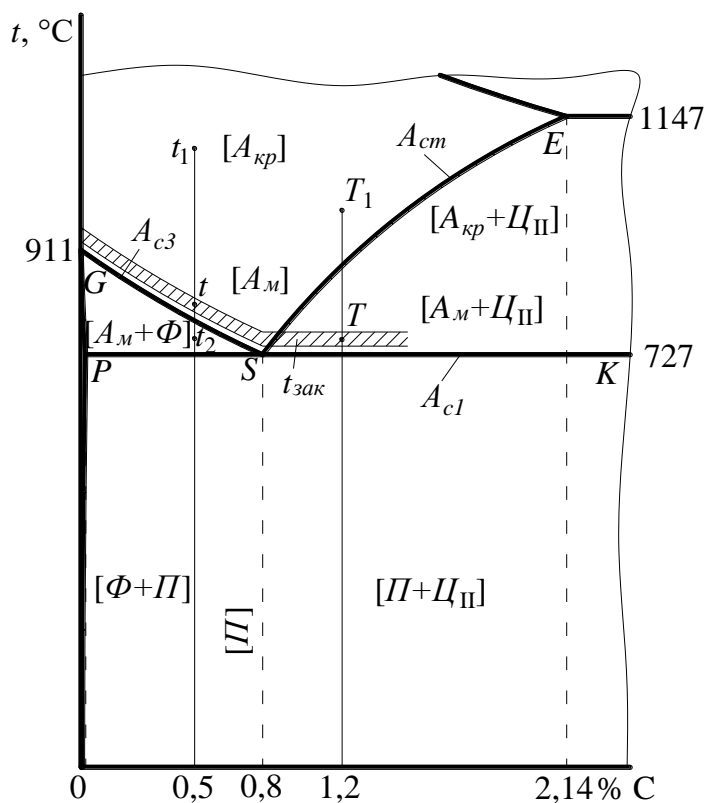


Рис. 8.1. Интервал оптимальных температур нагрева при закалке углеродистых сталей

Для заэвтектоидной стали желательно сохранить цементит вторичный, имеющий твердость 8000-1000 МПа по Бринеллю, поэтому используют закалку неполную при нагреве до температуры, °С:

$$T = A_{c1} + (20 \div 50).$$

При нагреве до более высокой температуры (T_1) помимо образования крупноигльчатого мартенсита в заэвтектоидной стали происходит утрата карбидной фазы.

Основной закалочной структурой будет мартенсит мелкоигльчатый, либо мартенсит с зернами цементита соответственно для до- и заэвтектоидных сталей. Микроструктура мартенсита представлена на рис. 8.2.

В структуре заэвтектоидной стали после нормальной неполной закалки наблюдаются кристаллики цементита вторичного и более светлые участки с остаточным аустенитом и чем выше температура закалки, тем его будет больше (от 3-5 до 15-20%). Если скорость охлаждения при закалке будет ниже критической (охлаждение в масле вместо охлаждения в воде), то в структуре можно наблюдать темные гнезда менее метастабильной структуры - троостита закалки, что приведет к пропорциональному снижению твердости стали.

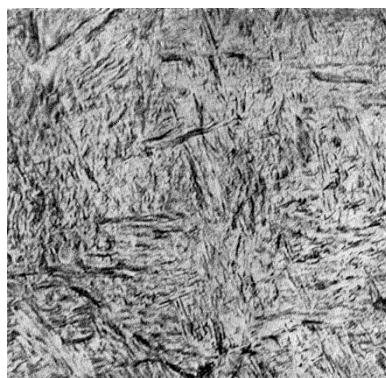


Рис. 8.2. Мартенсит (x1000)

8.4. Отпуск стали

После нормально выполненной закалки сталь приобретает структуру преимущественно мартенсита с твёрдостью от $HV = 5800$ МПа до $HV = 6300-6600$ МПа при изменении содержания углерода в ней от 0,38 до 1,4%. Кроме того, мартенсит будет иметь большие остаточные напряжения и низкую пластичность. Отпуском эти недостатки закаленной стали можно исправить и довести ее структуру и свойства до необходимых по техническим условиям. Основным процесс при отпуске – это выделение карбидной фазы из мартенсита.

Главное влияние на свойства стали оказывает температура отпуска. Различают три вида отпуска: низкий, средний и высокий.

Низкий отпуск проводят с нагревом до 150-240 °С. При этом снижаются внутренние напряжения, мартенсит закалки переводится в отпущенный мартенсит, повышается прочность и немного улучшается вязкость без заметного снижения твёрдости. Закалённая сталь после низкого отпуска сохраняет твёрдость в пределах HRC 58-63, а следовательно, высокую износостойкость. Однако такое изделие (если оно не имеет вязкой сердцевины) не выдерживает значительных динамических нагрузок.

Низкий отпуск обычно назначается для изделий, у которых желательно сохранить максимальную твердость: детали подшипников качения, шестерни, режущий инструмент и т.д. Продолжительность отпуска обычно 1-2,5 ч.

Средний отпуск выполняют при 250-450 °С и применяют для деталей, обладающих большой упругостью: рессоры, пружины и т.д. При отпуске течение 1-1,5 ч наблюдается разложение пересыщенного мартенсита на две фазы: $\alpha(C) + Fe_3C$ (троостит отпуска) (рис. 8.3).

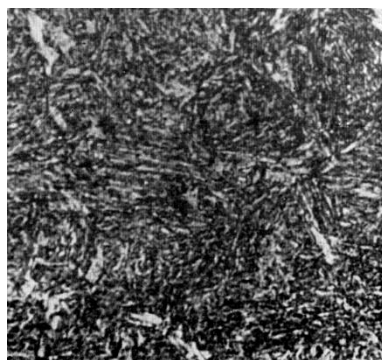


Рис. 8.3. Троостит отпуска (x1000)

Фаза $\alpha(\text{C})$ может содержать повышенное содержание углерода (до 0,1-0,3%), а фаза Fe_3C исключительно дисперсна, что приводит к некоторому снижению твердости стали и заметному увеличению ее пластичности (табл. 8.1). Температуру отпуска надо выбирать таким образом, чтобы не вызвать необратимой отпускной хрупкости.

Таблица 8.1

Свойства структурных составляющих после отпуска

Структура	Свойства стали:					
	доэвтектоидной (0,5% C)		эвтектоидной (0,8% C)		заэвтектоидной (1,2% C)	
	НВ, МПа	δ , %	НВ, МПа	δ , %	НВ, МПа	δ , %
Троостит	4000	5	5000	3	5500	2
Сорбит	2700	8	3200	5	3500	4

Охлаждение после отпуска при 400-450 °С рекомендуется проводить в воде, что способствует образованию на поверхности сжимающих остаточных напряжений, которые увеличивают предел выносливости деталей.

Высокий отпуск проводят при 450-650 °С. При его выполнении в течение 0,5-1 ч пересыщенный твердый раствор практически полностью разлагается с образованием смеси $\text{Fe}_\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$, образуя структуру – сорбит отпуска (рис. 8.4), которая является уже почти стабильной структурой, но по свойствам значительно превышает свойства стали в исходном состоянии (см. табл. 8.1). Причиной этого является большая дисперсность и округлая форма фазы Fe_3C .

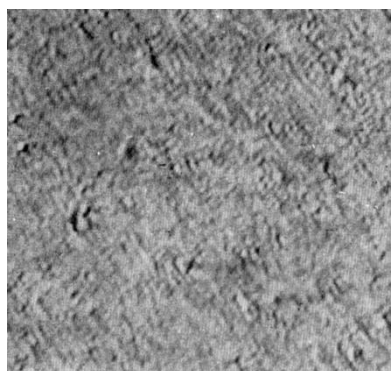


Рис. 8.4. Сорбит отпуска (x1000)

Операцию термического дробления структуры без изменения формы изделия (закалка + высокий отпуск) принято называть *улучшением* стали. Применяется для наиболее ответственных изделий. Назначается для деталей, работающих в условиях большой динамики (шатуны ДВС, оси, валы и т.д.). Однако износостойкость улучшенной стали вследствие её пониженной твёрдости не является высокой. Улучшение значительно повышает конструктивную прочность стали, уменьшая чувствительность к концентраторам напряжений, увеличивая работу пластической деформации при движении трещины (работу развития трещины) и снижая температуру верхнего и нижнего порога хладноломкости.

8.5. Контрольные вопросы

1. В чем заключается физический смысл метастабильного состояния стали?
2. Какие метастабильные структуры можно получить при закалке?
3. Как влияет температура нагрева стали при закалке на структуру и свойства закаленной стали?
4. Как влияет скорость охлаждения при закалке стали на получаемые ею структуру и свойства?
5. Почему с повышением содержания углерода повышается твердость стали после закалки?
6. Почему малоуглеродистые стали ($C < 0,23\%$) не способны приобретать высокую твердость после закалки?
7. Что представляет собой мартенсит - основная структура в закаленной стали?
8. Почему не рекомендуется перегревать сталь при закалке?
9. В чем физическая сущность закалки с точки зрения фазовых превращений?
10. Почему в принципе равномерный пересыщенный твердой раствор углерода в Fe_α , т.е. мартенсит, под микроскопом имеет игольчатое строение?
11. Почему при низком отпуске наблюдается только уменьшение остаточных напряжений в закаленной стали?
12. Как назначается температура среднего отпуска для реальных деталей?
13. Как назначается температура высокого отпуска при улучшении стали в заготовках?
14. В чем заключается существенное различие между превращениями при низком и среднем отпуске?
15. В чем заключается существенное различие между превращениями при среднем и высоком отпуске?
16. Почему троостит закалки обычно имеет строение в виде гнезд сложной конфигурации, а троостит отпуска - равномерный по всему сечению образца?

II. ТЕХНОЛОГИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

1. ФИЗИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СВАРОЧНОЙ ДУГИ

Цель работы – ознакомиться с условиями возникновения, строения, свойствами и условиями устойчивого горения электрической сварочной дуги.

Задача работы: получение практических навыков по зажиганию, поддержанию устойчивого горения сварочной дуги при ручной дуговой сварке плавящимися и неплавящимися электродами на постоянном и переменном токе.

1.1. Возникновение дуги

Электрическая сварочная дуга используется в качестве концентрированного источника тепла при ручной, полуавтоматической и автоматической сварке.

Сварочная дуга – это мощный, стабильный разряд электричества в сильно ионизированной атмосфере газов и паров металлов, характеризующийся высокой плотностью тока, высокой температурой и ослепительным световым излучением.

В обычных условиях газы являются изоляторами и не проводят электрический ток. Чтобы ток пошёл через газ, последний должен содержать достаточное количество электронов и ионов. Ионизация газа между электродом и деталью достигается путём эмиссии электронов с поверхности катода. Эмиссия электронов может быть:

- а) термоэлектронной, когда электроны отрываются от раскалённого катода;
- б) автоэлектронной, вызываемой действием силового электрического поля;
- в) фотоэлектронной, вызываемой действием световых лучей дуги на поверхность катодного пятна;
- г) от ударов положительных ионов о поверхность катода.

При зажигании дуги ионизация газа между электродами происходит за счёт термо- и автоэлектронной эмиссии. Электроны, движущиеся с большой скоростью, встречаясь с нейтральными атомами газа, оказывают на них ударное действие, выбивая электроны и ионизируя при этом атом. Ионизация соударением является основным видом ионизации, обуславливающим возникновение дугового разряда в газах. Ионизация поддерживается в процессе горения дуги.

Электрод и свариваемая деталь подключаются к источнику питания дуги. Для зажигания дуги нужно прикоснуться оголённым торцом электрода к очищенной детали, замыкая сварочную цепь, и сразу отвести электрод на расстояние от 1 до 5 мм. Мгновенно разогревается торец электрода и точка касания на детали, происходит термо и автоэлектронная эмиссия. Сгорают частицы электродного покрытия, выделяются газы. Молекулы газов и паров металлов соударяются с электронами, при этом образуются новые электроны и ионы (рис. 1.1). Расстояние между электродом и деталью называется длиной дуги, она гаснет при расстоянии более 10 мм.

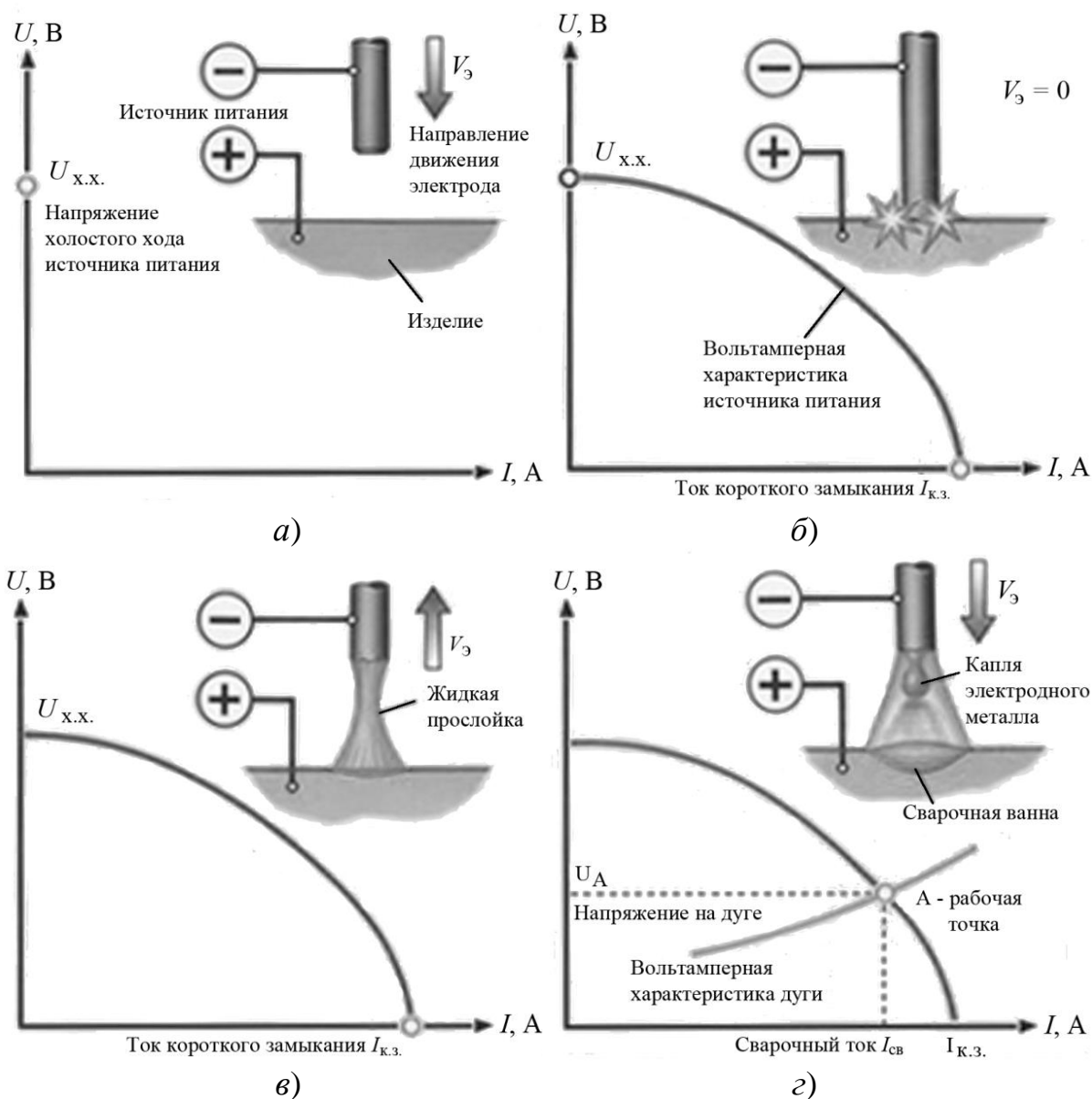


Рис. 1.1. Образование сварочной дуги:

а – режим холостого хода; *б* – режим короткого замыкания;
в – образование жидкой прослойки и шейки; *г* – возникновение дуги

При ионизации газа в дуговом промежутке происходит отрыв электронов от ядра и образование положительных ионов. При этом также начинает действовать механизм фотоэлектронной эмиссии. Энергия, затрачиваемая на отрыв электрона, называется работой ионизации. Работа ионизации, выраженная в электро-вольтах, называется *потенциалом ионизации*. Различные элементы имеют свой потенциал ионизации.

При сварке в дуговом промежутке находится смесь газов и паров, поэтому ионизация газов, входящих в смесь, протекает иначе, чем отдельного газа. В связи с этим вводится понятие *эффективного потенциала ионизации*. Под ним понимают потенциал ионизации некоторого однородного газа, при одинаковых условиях образующего такое же количество заряженных частиц, как и газовая смесь (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Эффективный потенциал ионизации

Материал электродного покрытия	Na	Cs	O ₂	He	Ca
Эффективный потенциал ионизации	5,1	3,8	12,5	24,47	6,1

Введение в атмосферу дуги веществ с низким потенциалом ионизации способствует стабильности дугового разряда.

1.2. Строение сварочной дуги при ручной дуговой сварке штучным покрытым электродом

В сварочной дуге дуговой промежуток делится на три основные области: катодную (l_k), анодную (l_a) и столб дуги ($l_{ст}$) (рис. 1.2). Основаниями столба дуги являются резко ограниченные области на поверхности электродов – катодное и анодное пятна, которые обладают ослепительной яркостью, превышающей яркость столба дуги.

Катодная область является источником электронов, ионизирующих газы в дуговом промежутке. В свою очередь ионы бомбардируют катод, который получает значительное количество энергии. Материал катода нагревается, плавится и испаряется. Температура в катодной области достигает 2400...3200 °С. Анодная область бомбардируется электронами. Здесь температура нагрева достигает 2600...3900 °С. Меньшие температуры соответствуют металлическим электродам, большие – угольным.

Температура в столбе дуги достигает 6000...7000 °С и зависит от состава газовой среды дуги, материала, диаметра электрода и плотности тока. Температуру столба дуги приблизительно можно определить по формуле:

$$T_{ст} = 810 \cdot V_{эф}, \quad (1)$$

где $T_{ст}$ – температура столба дуги, °С;

$V_{эф}$ – эффективный потенциал ионизации, эВ.

Общая длина сварочной дуги равна сумме длин трёх областей:

$$l_{д} = l_{к} + l_{ст} + l_{а}.$$

Катодная область $l_{к} = 10^{-5} - 10^{-3}$ см

Анодная область $l_{а} = l_{к}$

Столб дуги $l_{ст}$

Длина дуги $l_{д} = l_{а} + l_{к} + l_{ст}$

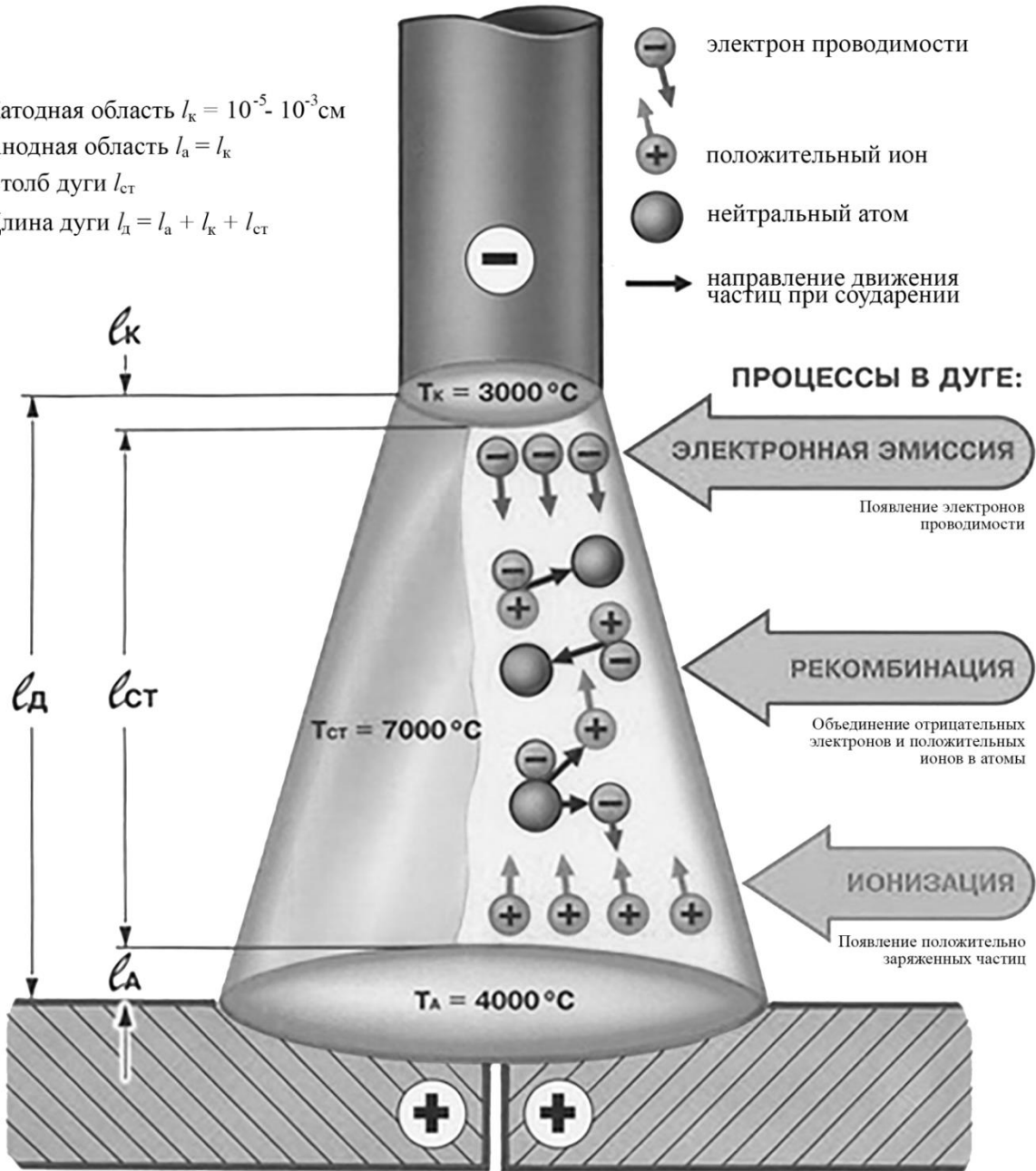


Рис. 1.2. Схема сварочной дуги на постоянном токе с прямой полярностью включения электрода

В зависимости от длины, различают дуги:

- короткую: $l_d = 2 \dots 4$ мм;
- нормальную: $l_d = 4 \dots 6$ мм;
- длинную: $l_d > 6$ мм.

1.3. Устойчивое горение дуги

Устойчивое горение дуги – необходимое условие для получения качественного сварного соединения. Равномерное горение дуги без обрывов, требующих повторного её зажигания, зависит от ряда факторов: длины дуги, чистоты свариваемых кромок, рода и полярности тока, его напряжения и частоты, свойств и состава атмосферы дуги, характеристики источника питания, режима сварки.

Устойчивое горение дуги обеспечивается применением короткой дуги и тщательной очисткой кромок деталей перед сваркой.

На постоянном токе дуга более устойчива, чем на переменном. Сварка выполняется на прямой или обратной полярности. При прямой полярности минус источника тока подключают к электроду, а при обратной полярности – к свариваемому изделию. При сварке на прямой полярности дуга устойчивее. Сварку на обратной полярности применяют в тех случаях, когда требуется уменьшить выделение тепла на свариваемом изделии, например, при сварке тонкого или легкоплавкого металла.

При сварке на переменном токе промышленной частоты направление электронов меняется и горение дуги становится менее устойчивым. В каждом полупериоде ток и напряжение дуги изменяются от нуля до максимума, что влечёт за собой изменение температуры столба дуги и ионизации дугового пространства. Поэтому после прохождения тока через нулевое значение для возбуждения дуги необходимо рост напряжения до значения напряжения при зажигании дуги.

Повысить устойчивость дуги переменного тока можно, увеличив напряжение или частоту. Повышение напряжения нежелательно по условиям техники безопасности. Поэтому увеличивают частоту основного сварочного тока до 150...450 Гц или применяют наложение токов высокой частоты на основной ток дуги, подавая от осциллятора ток частотой 150...450 кГц и напряжением 2500...6000 В, который непрерывно ионизирует дуговой промежуток и способствует устойчивому горению дуги.

Преимуществами дуги переменного тока являются: относительная простота и меньшая стоимость оборудования, отсутствие магнитного дутья и наличие катодного распыления оксидной плёнки при аргоно-дуговой сварке алюминия.

Магнитное дутьё проявляется в отклонении дуги за счёт влияния магнитных полей и ферромагнитных масс, расположенных вблизи дуги. Это приводит к ухудшению формирования шва.

Катодное распыление – это процесс бомбардировки сварочной ванны положительными ионами в том момент, когда изделие является катодом. В результате этого разрушается окисная плёнка.

Влияние свойств и состава атмосферы дуги на устойчивость её горения определяется применяемыми сварочными материалами. Они должны обеспечивать невысокий потенциал ионизации газов и паров металла в дуговом промежутке. Поэтому в покрытия электродов и флюсов вводят такие элементы, как калий, натрий, кальций, обладающие наименьшим потенциалом ионизации.

Сварочная дуга и источник питания дуги образуют взаимосвязанную энергетическую систему, функционирование которой во многом определяется источником питания, призванным обеспечивать лёгкое и надёжное возбуждение дуги, а также устойчивое её горение.

Для обеспечения устойчивого горения дуги основные её параметры - сила тока и напряжение – должны находиться в функциональной зависимости, которая определяет электрические свойства сварочной дуги.

1.4. Электрические свойства дуги

Электрические свойства дуги определяются зависимостью между её током и напряжением в период горения. Это статическая вольт-амперная характеристика сварочной дуги (рис. 1.3).

На участке I увеличение тока до 80 А приводит к резкому падению напряжения. Это обусловлено тем, что увеличение тока вызывает увеличение площади сечения столба дуги и его электропроводности. На этом участке характеристика дуги – падающая. Дуга имеет низкую устойчивость и применяется при ручной дуговой сварке малых толщин.

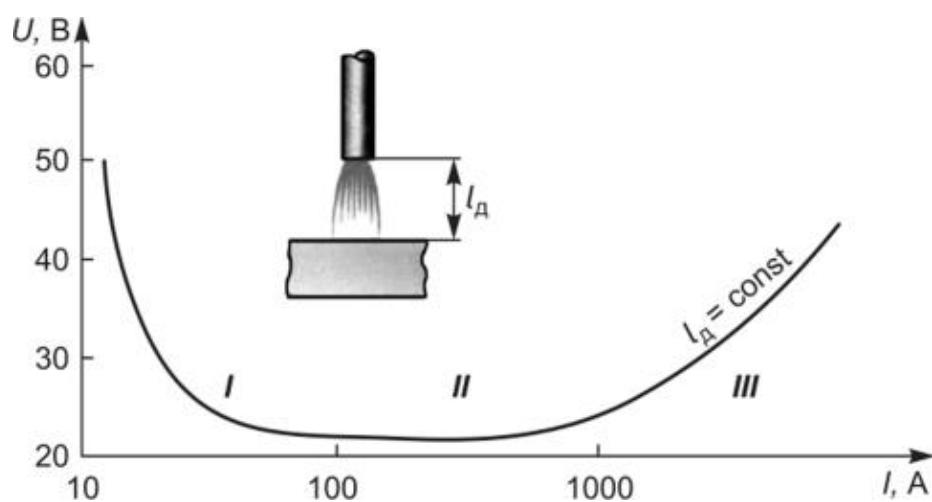


Рис. 1.3. Статическая вольт-амперная характеристика сварочной дуги

На участке II (80...800 А) напряжение дуги не изменяется, что объясняется увеличением столба дуги и активных пятен пропорционально изменению тока. Характеристика дуги – жёсткая. Такая дуга широко применяется в сварочной технике для ручной дуговой сварки, в автоматической сварке под флюсом и др.

На участке III при увеличении тока более 800 А характеристика дуги становится возрастающей, так как увеличение плотности тока происходит без роста катодного пятна, для которого площадь поверхности электрода оказывается уже недостаточной для размещения катодного пятна с нормальной плотностью тока. Такая дуга широко применяется при сварке в среде защитных газов.

Моменту зажигания дуги соответствует напряжение $U_з$, зависящее от силы тока, параметров источника питания дуги, физических свойств электродов, ионизационного потенциала газовой среды и других факторов.

Для зажигания дуги в воздухе между стальными электродами достаточно напряжения 45...50 В, между угольными – 55...65 В. После зажигания дуги напряжение падает и составляет 18...28 В при стальных электродах, 30...40 В – при угольных.

Напряжение дуги связано с длиной дуги линейной зависимостью:

$$U_d = a + b \cdot l_d,$$

где a – сумма падения напряжений на катоде и аноде, В;

b – падение напряжения в столбе дуги, В/мм;

l_d – длина дуги, мм.

Значения a и b зависят от материала электродов и от окружающей среды. Для стальных электродов $a = 15,5$ В, $b = 2,5$ В/мм.

Длина дуги зависит от диаметра электрода $d_э$ и при ручной дуговой сварке металлическим электродом её оптимальное значение составляет

$$l_d = (0,6 \dots 0,8)d_э.$$

1.5. Тепловые свойства сварочной дуги

Полную тепловую мощность сварочной дуги, кал/с, приближённо считают равной тепловому эквиваленту её электрической мощности

$$Q = 0,24 \cdot U_d \cdot I,$$

где Q – тепловой эквивалент электрической мощности сварочной дуги;

0,24 – коэффициент перевода электрических величин в тепловые, кал/Вт·с;

U_d – падение напряжения на дуге, В;

I – величина сварочного тока, А.

Количество тепла, кал/с, введённое сварочной дугой в изделие в процессе его нагрева за единицу времени, называется эффективной мощностью сварочной дуги:

$$q_n = 0,24 \cdot U_d \cdot I \cdot \eta_n, \quad (2)$$

где q_n – эффективная тепловая мощность сварочной дуги;

η_n – эффективный КПД нагрева изделия, характеризующий эффективность процесса выделения теплоты и теплообмена в дуговом промежутке, который зависит от технологических условий сварки (табл. 1.2).

Таблица 1.2

Эффективный коэффициент полезного действия нагрева

Способ сварки	η_n
Открытой дугой металлическими электродами	0,70...0,85
Неплавящимся электродом в защитном газе	0,50...0,60
Под флюсом	0,85...0,95
Электрошлаковый	0,70...0,85

При увеличении длины дуги эффективный КПД падает. Он возрастает с углублением дуги в ванну. При сварке металлическими электродами этот коэффициент мало зависит от рода, полярности и величины сварочного тока.

1.6. Классификация сварочных дуг

Сварочную дугу различают:

- по подключению к источнику питания – прямого действия, косвенного действия, комбинированная (рис. 2.4, а, б, в);
- применяемым электродам – при плавящемся электроде и при неплавящемся электроде (рис. 2.4, г, д);
- степени сжатия дуги – свободная и сжатая (рис. 2.4, е, ж);
- полярности постоянного тока – прямая и обратная (рис. 2.4, з, и);
- длине дуги – короткая, нормальная, длинная (рис. 2.4, к).

Выбор типа дуги зависит от способа сварки и условий её выполнения. Так, дуга прямого действия, горящая между электродом и изделием, используется при сварке: покрытым плавящимся электродом, неплавящимся электродом в защитных газах, плавящимся электродом под флюсом или в защитных газах. Дуга косвенного действия, горящая между двумя электродами, применяется при специальных видах сварки и атомно-водородной сварке и наплавке. Комбинированная дуга, представляющая два дуговых разряда между электродами и изделием, а третий – между электродами,

используется при сварке спиралешовных труб на станках автоматической сварки под флюсом.

1.7. Порядок выполнения работы

1. Определить температуру столба дуги, горящей в парах Na, Ca, Cs, He, O₂, пользуясь формулой (1) и табл. 1.1.

2. Выбрать величину сварочного тока, пользуясь формулой

$$I_{св} = k \cdot d_{э},$$

где k – коэффициент, зависящий от диаметра металлического стержня электрода $d_{э}$. Определяется по табл. 1.3.

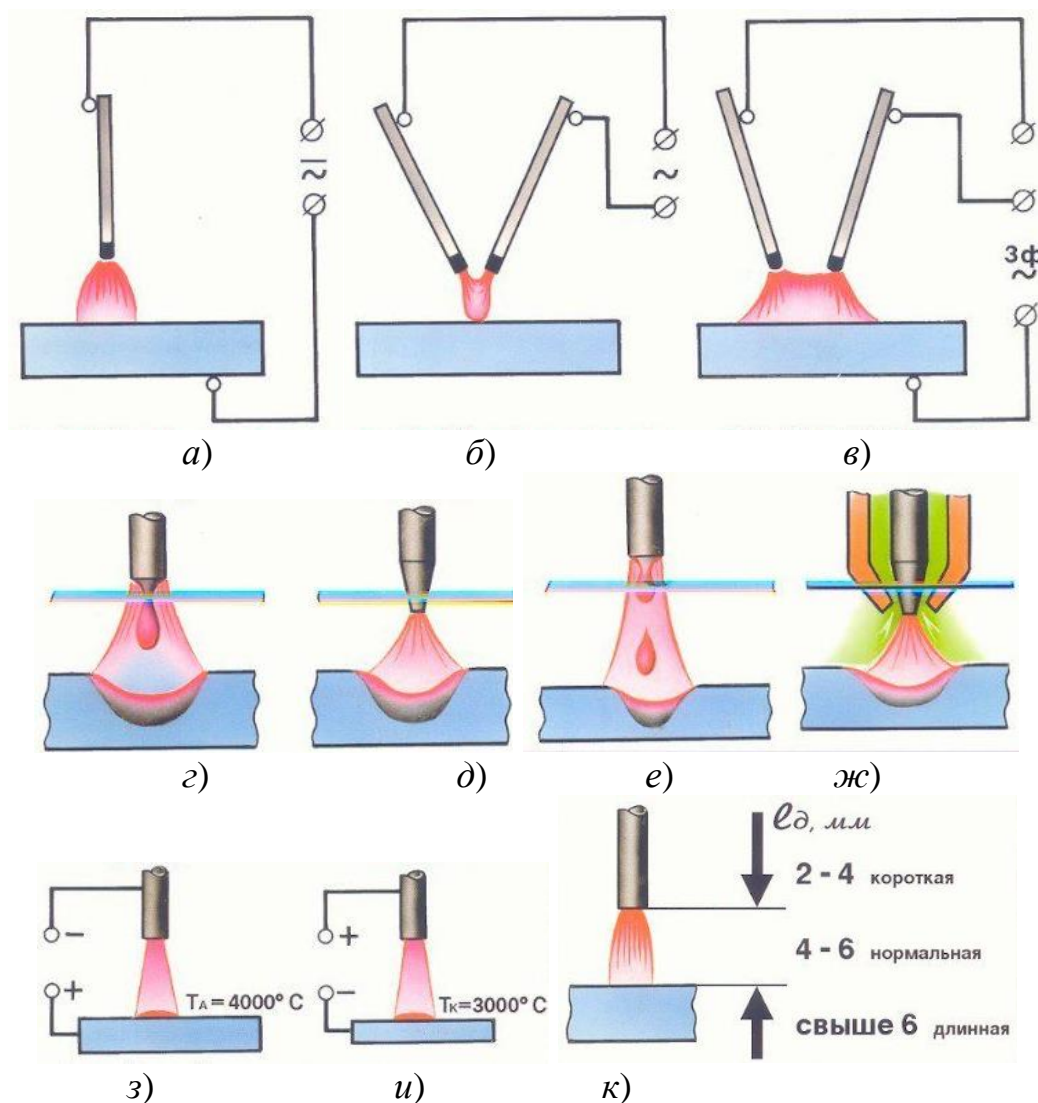


Рис. 1.4. Разновидности сварочной дуги:

a – прямого действия; b – косвенного действия; v – комбинированная;
 $г$ – при плавящемся электроде; $д$ – при неплавящемся электроде;
 e – свободная; $жс$ – сжатая; $з$ – прямая; $и$ – обратная; $к$ – по длине

Таблица 1.3

Зависимость коэффициента k от диаметра
металлического стержня электрода

d_3 , мм	1...2	3...4	5...6
k , А/мм	25...30	30...45	45...60

3. Выполнить наплавку пластины из малоуглеродистой стали штучными электродами при выбранной силе тока в следующих условиях:

- 1) $d_3 = 3$ мм, постоянный ток, прямая полярность;
- 2) $d_3 = 3$ мм, постоянный ток, прямая полярность, длина дуги < 4 мм;
- 3) $d_3 = 3$ мм, постоянный ток, прямая полярность, длина дуги > 6 мм;
- 4) $d_3 = 5$ мм, постоянный ток, прямая полярность;
- 5) $d_3 = 3$ мм, постоянный ток, обратная полярность;
- 6) $d_3 = 5$ мм, постоянный ток, обратная полярность;
- 7) $d_3 = 3$ мм, переменный ток;
- 8) $d_3 = 3$ мм, переменный ток, длина дуги < 4 мм;
- 9) $d_3 = 3$ мм, переменный ток, длина дуги > 6 мм;
- 10) $d_3 = 5$ мм, переменный ток.

В процессе наплавки зафиксировать по показаниям приборов силу сварочного тока и напряжение дуги. Данные занести в табл. 1.4.

Таблица 1.4

Результаты экспериментов

№ режи- ма	Электрод			Ток			Напряже- ние дуги U , В	Эффектив- ная тепловая мощность q_n , кал/с
	Ти п	Мар- ка	Диа- метр	Ро д	Поляр- ность	Сила $I_{св}$, А		
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								

4. Определить эффективную тепловую мощность дуги, пользуясь формулой (2) и табл. 1.2.

5. Заполнить табл. 1.4.

6. Сделать выводы о влиянии на эффективную тепловую мощность дуги: диаметра электрода, рода тока, полярности постоянного тока, длины дуги.

2.8. Контрольные вопросы

1. Дайте определение сварочной дуги.
2. Каковы условия возникновения сварочной дуги?
3. Какие виды эмиссии электронов катодом осуществляются в дуговом промежутке?
4. Укажите этапы зажигания дуги при сварке плавящимся электродом.
5. Приведите схему сварочной дуги.
6. Что называется статической вольт-амперной характеристикой сварочной дуги?
7. Какова длина дуги – короткой, нормальной, длинной?
8. Факторы, влияющие на устойчивость горения дуги.
9. Способы повышения устойчивости дуги переменного тока.
10. Что называется эффективным потенциалом ионизации?
11. Каково напряжение сварочной дуги?
12. Что называется эффективной тепловой мощностью?
13. Что характеризует эффективный КПД нагрева и от чего он зависит?
14. Каковы разновидности сварочной дуги?
15. Как выбрать силу сварочного тока?

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА И КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ

Цель работы: ознакомиться с основами технологии электрической контактной сварки.

Задача работы: изучить имеющиеся в лаборатории стыковую, точечную и шовную машины, произвести сварку стыковую для нескольких стержней и точечную внахлест для листов нержавеющей стали.

2.1. Общие теоретические сведения

Электрическая контактная сварка – это технологический процесс получения неразъемного соединения металлических заготовок путем нагрева электрическим током, проходящем в месте их контакта, до пластического состояния (или до оплавления торцов) и последующего совместного сдавливания (осадки).

Контактная сварка относится к классу термомеханических и включает в себя:

- стыковую;
- точечную;
- шовную;
- рельефную.

Контактная сварка характеризуется большой скоростью нагрева и резкими градиентами температур.

2.1.1. Стыковая контактная сварка

При стыковой сварке *сопротивлением* (рис. 2.1) заготовки 1 закрепляются в зажимах машины – токоподводах 2, один из которых при опрессовке перемещается. При сварке сначала осуществляют предварительную осадку усилием $P_{ос}$ и подают напряжение на вторичную обмотку трансформатора 4, что вызывает появление тока I_2 во вторичном контуре. После разогрева материала производят окончательную осадку, в результате чего происходит образование сварного соединения в твёрдом состоянии.

Температура разогрева T_p зависит от температуры плавления материала $T_{пл}$:

$$T_p = (0,8 \dots 0,9)T_{пл}, \text{ } ^\circ\text{K}.$$

Для низкоуглеродистой стали она составляет $1473 \dots 1623 \text{ } ^\circ\text{K}$ и называется температурой белого каления.

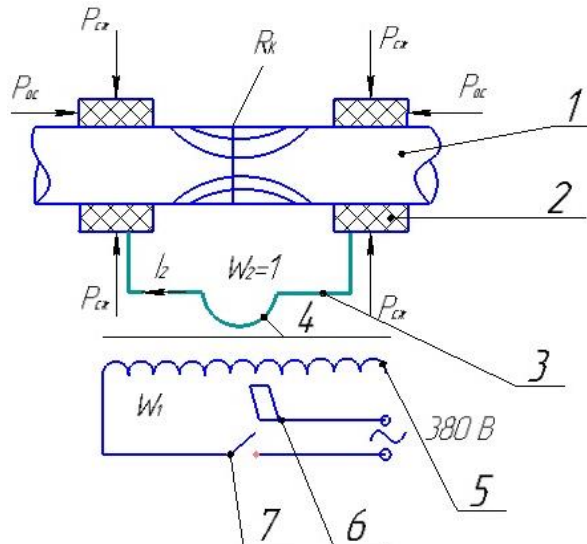


Рис. 2.1. Схема стыковой контактной сварки:

- 1 – свариваемые изделия; 2 – токоподводящие зажимы из меди;
 3 – токоведущие шины из меди; 4 – вторичная обмотка трансформатора из одного или двух витков, охлаждаемая водой; 5 – первичная обмотка трансформатора; 6 – регулятор тока; 7 – прерыватель тока; $P_{ос}$ – осаживающее устройство; $P_{сж}$ – усилие сжатия изделий токоподводящими зажимами

Выделившаяся теплота находится по закону Джоуля – Ленца, Дж:

$$Q = \int_0^{t_{св}} I^2(t) \cdot R(t) \cdot t \cdot dt,$$

где: $I(t)$ – ток сварки, А;

$R(t)$ – электрическое сопротивление всей вторичной цепи, зависящее от температуры во времени t ;

$t_{св}$ – время сварки, с.

Приближённая формула:

$$Q \approx 0,24 \cdot K \cdot I^2 \cdot R \cdot t,$$

где: K – коэффициент снижения мощности дуги при сварке на переменном токе, $K = 0,7 \dots 0,97$.

Электрическое сопротивление всей вторичной цепи определяется по формуле:

$$R = R_{ц} + R_{к},$$

где $R_{к}$ – сопротивление в зоне контакта деталей: $R_{к} \approx 1 \cdot 10^{-4}$ Ом;

$R_{ц}$ – сопротивление вторичной цепи.

Чтобы все тепло выделилось в зоне контакте, должно быть выполнено условие:

$$R_{ц} \ll R_{к}.$$

Для этого вся вторичная цепь: вторичная обмотка, токоподводы и зажимы должны быть изготовлены из меди и иметь большую площадь поперечного сечения.

При стыковой сварке сопротивлением не обеспечивается равнопрочное соединение из-за отдельных окислов и неравномерного нагрева всего сечения. Поэтому она рекомендуется только для неответственных деталей с максимальным сечением ≤ 250 мм² или для заготовок сплошного сечения диаметром ≤ 18 мм. Свариваемые изделия: арматура, профильный прокат, уголки, тавр, трубы, провода, рельсы.

В таблице 2.1 даны рекомендации по выбору припусков и параметров режима стыковой контактной сварки сопротивлением.

Таблица 2.1

Параметры режима стыковой сварки сопротивлением для круглых и квадратных заготовок из углеродистой стали при $P_{ос} = 10 \dots 30$ МПа

Параметр режима сварки	Площадь поперечного сечения заготовки, мм ²			
	7	25	50	100
Установленная длина на обе заготовки, мм	7	12	16	100
Припуск на осадку, мм:				
общий	1,2	2,5	2,7	3,0
под током	1,6	1,7	1,8	2,0
без тока	0,6	0,8	0,9	1,0
Плотность тока, А/мм ²	300	200	160	140
Время нагрева, с	0,2...0,3	0,6...0,8	0,8...1,0	1,0...1,5

Для заготовок с другой площадью поперечного сечения можно пользоваться интерполяционным методом с учётом значений табл. 2.1.

При сварке *оплавлением* заготовки сближаются лишь до лёгкого соприкосновения друг с другом, пропускается ток, и образуются перемычки

жидкого металла, которые затем взрываются в результате пинч-эффекта. Далее торцы полностью оплавляются и при последующей опрессовке жидкий металл с возможными загрязнениями и окислами выдавливается. Для более равномерного нагрева деталей применяют предварительный подогрев током, непосредственно пропускаемым через заготовки. Площадь сечения заготовок в зоне сварки может составлять 100 000 мм². Так свариваются ответственные детали, например, рельсы.

В табл. 2.2 приведены рекомендации по выбору припусков и параметров режима стыковой контактной сварки оплавлением.

Сила сварочного тока определяется как и при сварке сопротивлением. Плотность тока для стальных заготовок при сварке непрерывным оплавлением составляет 3...500 А/мм², а при сварке с подогревом – 3...15 А/мм² (нижние пределы соответствуют сварке заготовок большого сечения. Давление осадки дано в табл. 2.3.

Таблица 2.2

Припуски, мм, при стыковой сварке оплавлением стержней
из низкоуглеродистых и низколегированных конструкционных сталей
(на оба стержня)

Диаметр стержня, мм	Площадь сечения, мм ²	Припуск при сварке с подогревом			Припуск при сварке непрерывным оплавлением		
		общий	на оплавление	на осадку	общий	на оплавление	на осадку
5	20	-	-	-	6	4,0	2,0
10	78	7,3	5,0	2,3	8	5,7	2,3
14	154	9,3	6,5	2,8	12	9,5	2,5
18	254	11,2	8,0	3,2	16	13,0	3,0
22	380	12,6	9,0	3,6	18	14,8	3,2
26	530	15,0	11,2	3,8	22	18,5	3,5
30	707	16,0	12,0	4,0	25	21,5	3,5

Примечания. 1. Суммарная установочная длина равна 1,5 диаметра стержня при сварке низкоуглеродистых сталей и 2...2,4 диаметра стержня при сварке низколегированных сталей.

2. Припуск на осадку под током составляет 40...50% общего припуска на осадку.

Таблица 2.3

Давление осадки при сварке оплавлением

Сталь	Способ сварки	
	непрерывным оплавлением	оплавлением с подогревом
Низкоуглеродистая	60...80	40...60
Среднеуглеродистая	80...120	40...60
Высокоуглеродистая	100...120	40...60
Низколегированная	100...120	40...60
Ферритная	100...180	60...80
Аустенитная	150...220	100...140

На рис. 2.2 представлена схема машины для стыковой сварки с основными элементами.

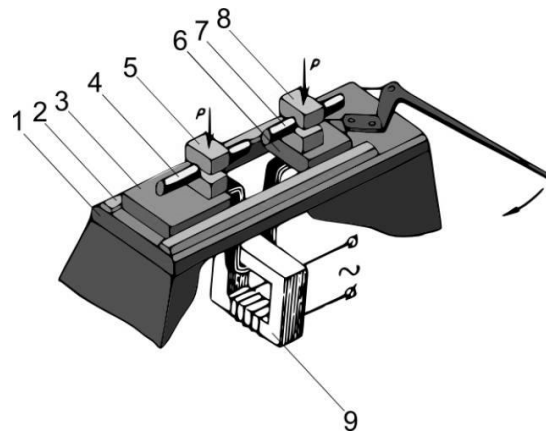


Рис. 2.2. Схема машины для стыковой контактной сварки:
1 – станина машины; 2 – направляющие; 3 – неподвижная плита; 4, 7 – свариваемые заготовки; 5, 8 – зажимы-электроды; 6 – подвижная плита; 9 – сварочный трансформатор; P – сжимающее усилие

2.1.2. Точечная контактная сварка

Точечная сварка (рис. 2.3) применяется для получения нахлесточных соединений из листов 1, которые сжимаются электродами-токоподводами 2, связанными с трансформатором, при включении которого заготовки нагреваются кратковременным импульсом тока продолжительностью 0,01...0,5 с до появления расплавленной зоны или ядра точки. Глубина проплавления должна составлять 30...80% от суммы толщин листов. В ряде случаев требуется проковка уже закристаллизовавшегося ядра.

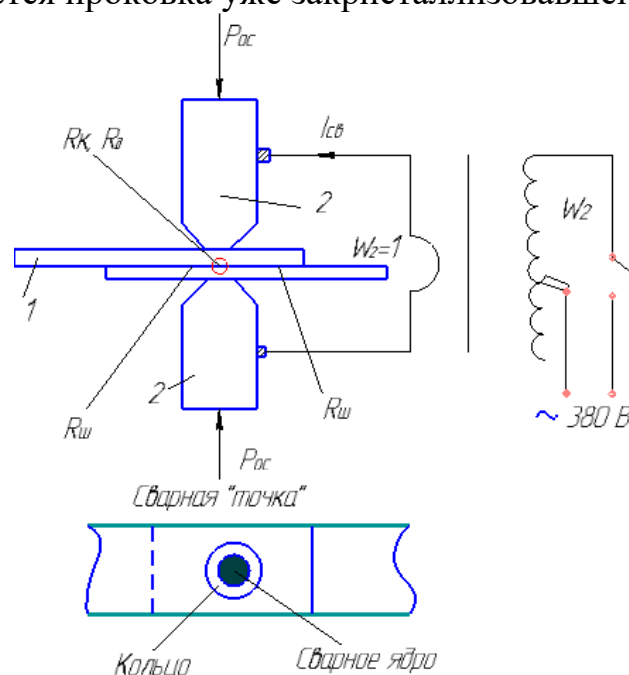


Рис. 2.3. Схема точечной контактной сварки:
1 – свариваемые заготовки; 2 – электроды-токоподводы

На рис. 2.4 представлена схема машины для точечной сварки. К механической части этой машины относятся корпус 2, внутри которого размещены все основные элементы и узлы машины, пневматический привод сжатия электродов 6 с направляющими устройствами 7, нижний кронштейн 3 с консолью 4 и электрододержателем 5, пневматическое устройство 8 и система водяного охлаждения 1, обеспечивающая охлаждение сварочного контура и силового контактора.

Электрическая часть включает в себя источник питания – сварочный трансформатор 9 с переключателем ступеней 10 и сварочный контур, к элементам которого относится токоподвод 11 с верхними и нижними консолями с электрододержателями и электродами. К электрической части машины относится и аппаратура управления сварочными процессами 12. Это устройство обеспечивает коммутацию первичного тока сварочного трансформатора, регулирование режимов сварки и выполнение заданной последовательности всех сварочных операций различными механизмами перемещения вспомогательных устройств.

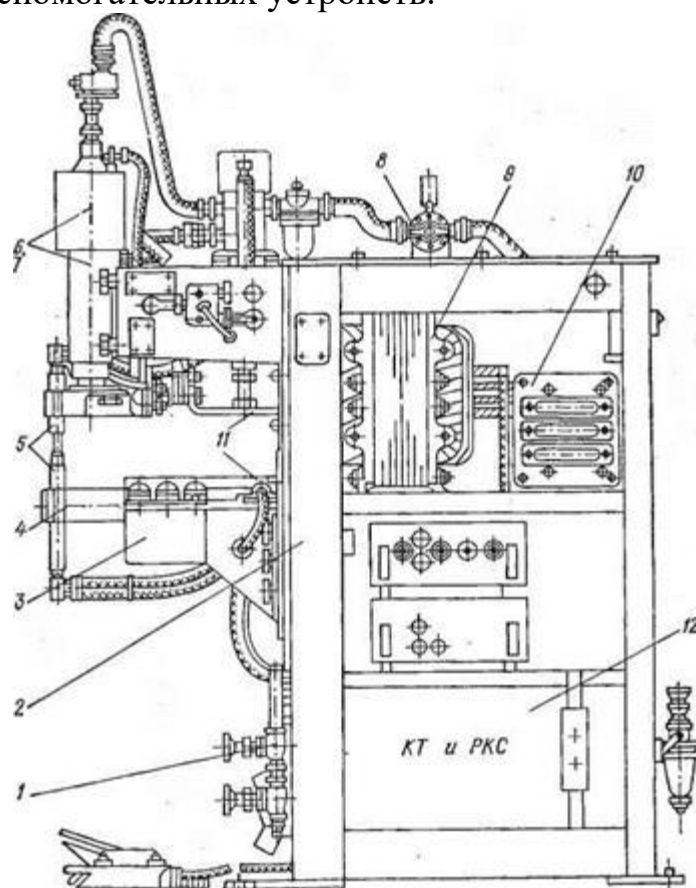


Рис. 2.4. Машина для точечной сварки:

- 1 – система водяного охлаждения; 2 – корпус; 3 – нижний кронштейн;
- 4 – консоль; 5 – электрододержатель; 6 – пневматический привод сжатия электродов; 7 – направляющее устройство; 8 – пневматическое устройство;
- 9 – сварочный трансформатор; 10 – переключатель ступеней; 11 – токоподвод; 12 – аппаратура управления сварочными процессами

Параметры режима точечной сварки приведены в табл. 2.4.

Таблица 2.4

Параметры режима точечной сварки низкоуглеродистой стали

Параметр режима сварки	Толщина заготовок, мм			
	0,5 + 0,5	1,0 + 1,0	1,5 + 1,5	2,0 + 2,0
Диаметр контактной поверхности, мм: начальный	5	5	6	7
перед запиливанием	6	6	7	8
Продолжительность прохождения сварочного тока, с	0,2...0,3	0,2...0,3	0,25...0,35	0,4...0,6
Усилие на электродах, Н	300...400	800...1200	1200...1600	1600...2000
Сила тока, кА	4...5	6...7	7...8	8...9

2.1.3. Шовная контактная сварка

При шовной сварке (рис. 2.5) ставятся точки с перекрытием, что достигается подачей напряжения на трансформатор через определённые промежутки времени. Подвод тока и передача усилия опрессовки к заготовкам осуществляется через вращающиеся дисковые электроды – ролики. По положению роликов в момент прохождения тока различают непрерывную и шаговую (прерывистую) шовную сварку. Если в первом случае ток проходит при вращающихся роликах, то во втором – при неподвижных.

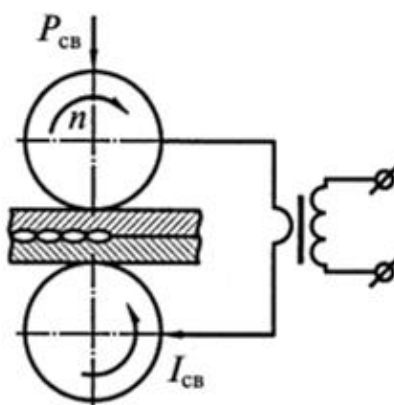


Рис. 2.5. Схема шовной контактной сварки

На рис. 2.6 показана схема машины для шовной сварки. Параметры режима шовной сварки приведены в табл. 2.5 и 2.6.

Таблица 2.5

Параметры режима непрерывной шовной сварки низкоуглеродистой стали

Параметр режима сварки	Толщина заготовок, мм					
	0,2 + 0,2	0,5 + 0,5	1,0 + 1,0	0,2 + 0,2	0,5 + 0,5	1,0 + 1,0
Ширина роликов, мм	4	5	5	4	5	5
Усилие сжатия, Н	800	1000	1200	800	1000	1200
Скорость сварки, м/мин.	1,0			1,5		
Сила тока, А	2500	3000	3500	3000	3500	5000

Таблица 2.6

Параметры режима прерывистой шовной сварки низкоуглеродистой стали

Параметр режима сварки	Толщина заготовок, мм				
	0,25 + 0,25	0,5 + 0,5	0,75 + 0,75	1,0 + 1,0	1,25 + 1,25
Ширина контактной поверхности, мм	5	5	6	6	8,5
Усилие сжатия, Н	175	225	300	400	450
Продолжительность включения тока	0,04	0,04	0,06	0,06	0,08
Приблизительное число прерываний: в секунду на 1 мм шва	16	12,5	10	8	7
	500	400	333	386	252
Сила тока, А	8000	11000	13000	15000	16500
Примерный шаг точек, мм	2	2,5	3	3,5	3,9

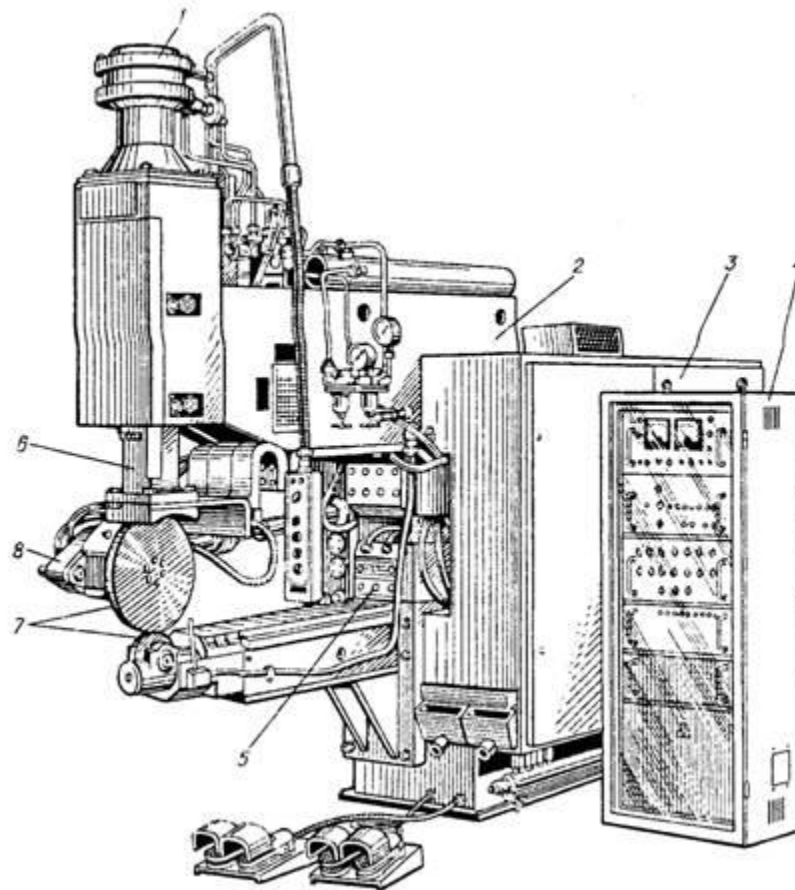


Рис. 2.6. Машина для шовной сварки:

- 1 – привод для сжатия электродов; 2 – корпус; 3 – выпрямитель;
4 – шкаф управления; 5 – вторичный контур; 6 – направляющая;
7 – электроды-ролики; 8 – привод роликов

2.2. Порядок выполнения работы

При помощи измерительных приборов осуществляется подбор параметров режима всех разновидностей контактной сварки на основе приведённых табличных данных. Затем заготовки свариваются, и контролируется качество сварных соединений. Данные сводятся в единую таблицу 2.7.

2.3. Контрольные вопросы

1. В чём принципиальное отличие стыковой сварки сопротивлением от стыковой сварки оплавлением?
2. В чём состоит физическая сущность стыковой, точечной и шовной сварки?
3. Какие существуют основные параметры режима всех разновидностей электрической контактной сварки?
4. Какова область применения электрической контактной сварки?

Таблица 2.7

Исходные данные и параметры режима сварки

1. Стыковая сварка									
Исходные данные			Параметры режима сварки						
Материал	Диаметр заготовки	Площадь поперечного сечения, мм ²	Длина вылета заготовки, мм	Плотность тока, А/мм ²	Сила тока, А	Давление осадки, МПа	Усилие осадки, Н	Вторичное напряжение, В	Сопротивление сварочной цепи, Ом
2. Точечная сварка									
Материал	Толщина заготовки, мм	Диаметр контактной поверхности, мм	Усилие сжатия, Н	Продолжительность прохода сварочного тока, с	Сила тока, А	Вторичное напряжение, В			
3. Шовная сварка									
Материал	Толщина заготовки, мм	Ширина роликов, мм	Усилие сжатия, Н	Скорость сварки, м/мин	Сила тока, А	Вторичное напряжение, В			

3. ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ. СНЯТИЕ И ПОСТРОЕНИЕ ВНЕШНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Цель работы: изучить схемы и конструкции источников питания переменного и постоянного тока, а также снять и построить их внешние характеристики.

3.1. Краткие общие и теоретические сведения

Источником теплоты при дуговой сварке является электрическая дуга, в которой электрическая энергия преобразуется в тепловую. Для питания сварочной дуги применяют специальные источники тока, отвечающие определённым техническим требованиям:

- напряжение холостого хода должно быть достаточным для зажигания дуги, но не превышать значений, безопасных для сварщика;
- источники питания должны быть снабжены специальным устройством для регулирования сварочного тока в регламентированных пределах;
- источники питания должны иметь заданную внешнюю характеристику.

Внешней характеристикой источника называется зависимость напряжения на дуге U от величины сварочного тока I (рис. 3.1).

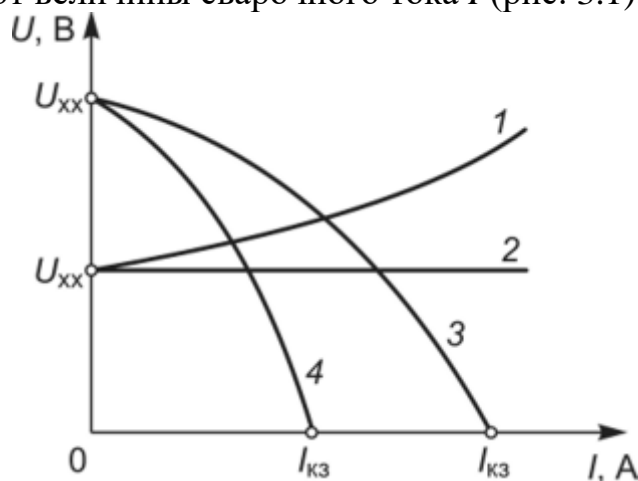


Рис. 3.1. Внешние характеристики источников сварочного тока: 1 – возрастающая; 2 – жёсткая; 3 – пологопадающая; 4 – крутопадающая

По виду внешней характеристики источники тока классифицируются как источники с крутопадающей, пологопадающей, жесткой и возрастающей характеристикой. Некоторые источники при переключении режима работы могут иметь крутопадающую и жесткую характеристики. Такие источники называются универсальными. В зависимости от количества постов они могут быть однопостовыми или многопостовыми. К однопосто-

вому может быть подключен только один сварочный пост, к многопостовому – несколько одновременно.

Источники тока с крутопадающей внешней характеристикой используются при дуговой ручной сварке. Пологопадающую характеристику имеют источники питания автоматов для сварки под флюсом. Источники с жёсткой и возрастающей внешними характеристиками работают совместно с полуавтоматами для дуговой сварки в защитном газе.

По роду тока источники делятся на две группы: источники переменного тока (сварочные трансформаторы) и источники постоянного тока (сварочные преобразователи (инверторы) и выпрямители).

Сварочный трансформатор состоит из трансформаторного пакета с первичной (сетевой) и вторичной (сварочной) обмотками. Схема его дана на рис. 3.2. В конструкции трансформатора предусмотрено перемещение одной из обмоток относительно другой.

Напряжение на дуге можно принять равным напряжению на вторичной обмотке трансформатора:

$$U_d = \sqrt{U_{xx}^2 - I^2 \cdot X^2}, \quad (3)$$

где U_d – напряжение на дуге;

U_{xx} – напряжение холостого хода во вторичной обмотке;

I – сварочный ток;

X – индуктивное сопротивление.

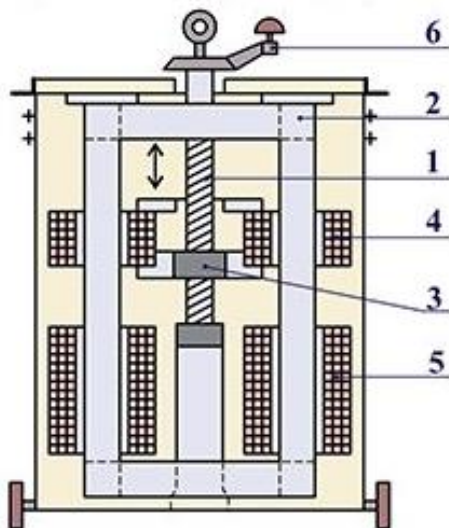


Рис. 3.2. Принципиальная схема сварочного трансформатора с раздвижными катушками:

- 1 – ходовой винт; 2 – магнитопровод; 3 – ходовая гайка;
4 – вторичная обмотка; 5 – первичная обмотка; 6 – рукоятка

Крутопадающая внешняя характеристика трансформатора с увеличенным магнитным рассеянием создаётся за счёт падения напряжения на индуктивном сопротивлении. Так, с возрастанием тока в сварочной цепи произведение квадрата тока на квадрат индуктивного сопротивления уве-

личивается (ф. (3)), а подкоренное выражение уменьшается – напряжение на дуге снижается.

Величина сварочного тока определяется по формуле:

$$I = \frac{\sqrt{U_{xx}^2 - U_d^2}}{X} \quad (4)$$

Регулирование сварочного тока осуществляется за счёт изменения индуктивного сопротивления, значения которого зависят от электрических и геометрических параметров трансформатора:

$$X = \frac{\omega \cdot W_2^2 \cdot \sigma}{R_\mu}, \quad (5)$$

где ω – угловая частота тока: $\omega = 2\pi f$;

f – частота тока;

W_2 – число витков во вторичной обмотке;

σ – коэффициент магнитного рассеяния;

R_μ – эквивалент магнитного сопротивления потоку рассеяния.

Если учесть, что угловая частота постоянна, а эквивалент меняется незначительно, следовательно индуктивное сопротивление зависит от числа витков во вторичной обмотке трансформатора и коэффициента магнитного рассеяния. Этот коэффициент находится в прямой зависимости от расстояния между первичной и вторичной обмотками. С увеличением расстояния между обмотками он возрастает, и вместе с ним, согласно выражению (5), повышается индуктивное сопротивление, что, в свою очередь, в соответствии с формулой (4) ведёт к уменьшению сварочного тока.

Таким образом, плавное регулирование сварочного тока осуществляют за счёт сближения или удаления обмоток трансформатора. Ступенчатую регулировку тока производят переключением числа витков во вторичной обмотке трансформатора.

Блок-схема сварочного инвертора приведена на рис. 3.3.

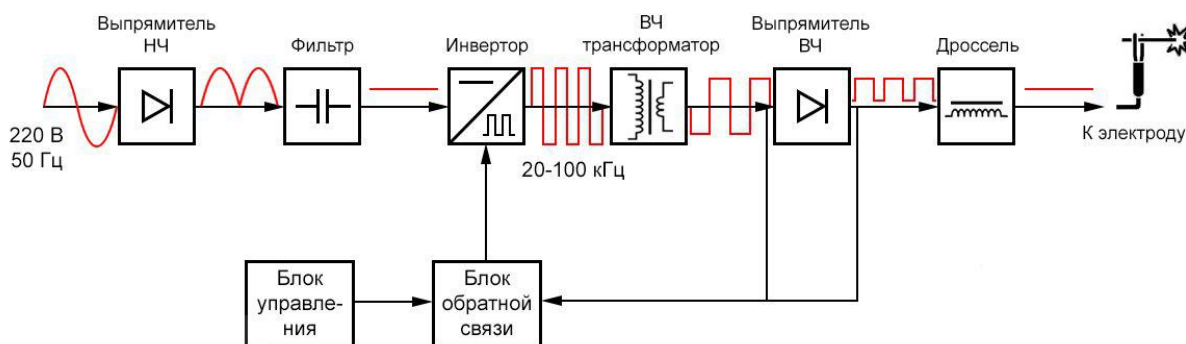


Рис. 3.3. Блок-схема сварочного инверторного аппарата

В первичном низкочастотном выпрямителе переменное напряжение преобразуется в постоянное, которое подается на вход инвертора. Инвертор преобразует постоянное напряжение в переменное напряжение высокой частоты (десятки кГц). Высокочастотный трансформатор понижает

напряжение и увеличивает ток, который может превышать 250 А. Вторичный выпрямитель преобразует переменное напряжение в постоянное, а дроссель завершает преобразование и на электрод уходит постоянный ток (рис. 3.3).

Работой всех элементов такого сварочного аппарата, отличающегося компактными габаритами, небольшим весом и высокой мощностью, управляет специальный ШИМ-контроллер. Электрические сигналы поступают на контроллер от операционного усилителя, питающегося выходным током самого инвертора. На основе характеристик этих сигналов контроллер формирует корректирующие выходные сигналы, которые могут подаваться на диоды выпрямителя и транзисторы инверторного блока – генератора высокочастотных электрических импульсов.

Сварочный выпрямитель (рис. 3.4) состоит из понижающего трансформатора трёхфазного тока с неподвижной 2 и подвижной 5 обмотками, механизма перемещения подвижной обмотки 4 и блока полупроводниковых вентилей 6.

Внешняя характеристика выпрямителя может быть определена зависимостью

$$U_d = \sqrt{\frac{3}{4}(U_{xx}^2 - 3I^2 \cdot X^2)},$$

где U_{xx} – напряжение холостого хода выпрямителя.

Здесь, как и в формуле (3), с увеличением сварочного тока подкоренное выражение уменьшается, напряжение на дуге падает.

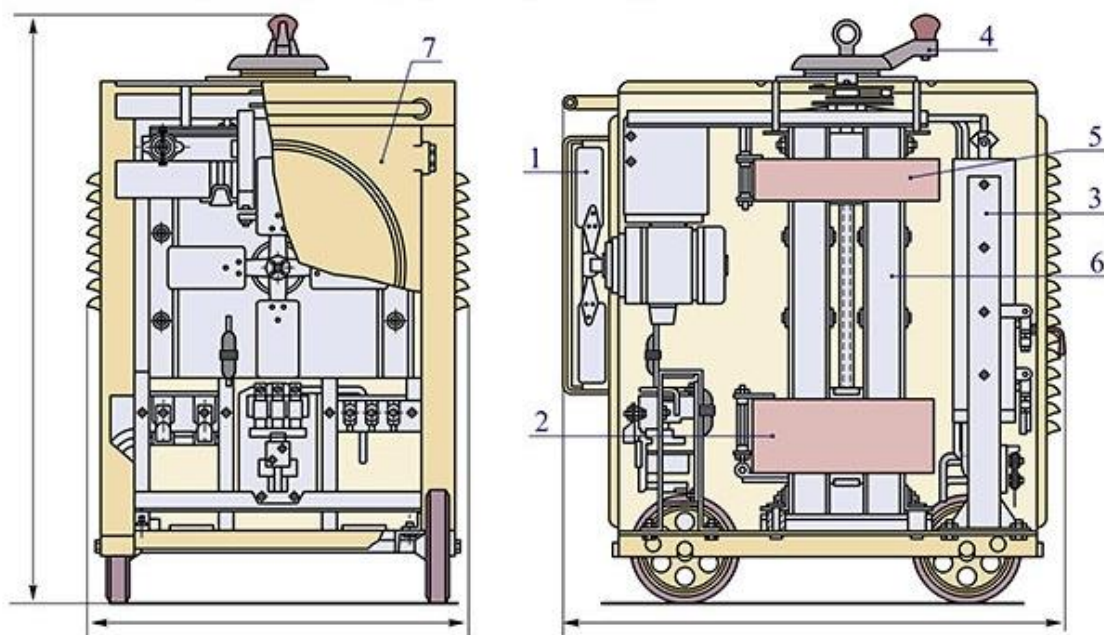


Рис. 3.4. Конструктивное исполнение сварочного выпрямителя: 1 – вентилятор; 2 – неподвижная обмотка; 3 – магнитопровод трансформатора; 4 – рукоятка с механизмом перемещения подвижной обмотки трансформатора; 5 – подвижная обмотка трансформатора; 6 – блок выпрямителей; 7 – кожух

Плавное регулирование сварочного тока осуществляется за счёт изменения расстояния между первичными и вторичными обмотками трёхфазного трансформатора. Ступенчатая регулировка тока обычно выполняется путём переключения первичных обмоток трансформатора с «треугольника» на «звезду».

3.2. Порядок выполнения работы

1. Изучить конструкцию сварочного трансформатора, инвертора и выпрямителя.
2. Снять внешние характеристики источников сварочного тока.
3. Построить графические зависимости напряжения на дуге от величины сварочного тока.

3.3. Содержание отчёта

1. Привести электрическую схему сварочного поста и коротко описать основные его элементы, указать тип источника сварочного тока и паспортные данные.
2. Изобразить конструктивную схему источника тока и пояснить принцип работы его узлов.
3. Коротко изложить методику эксперимента.
4. Привести таблицу опытных измерений тока и напряжения.
5. Представить графические зависимости напряжения от тока для нескольких режимов сварки, проанализировать их и сделать выводы по работе.

В выводах указать: характер (вид) полученных кривых, различие кривых по крутизне, какая из кривых характеризует наибольшую динамичность источника тока; объяснить с помощью аналитических зависимостей, за счёт чего это может быть получено.

3.4. Контрольные вопросы

1. Какие основные требования предъявляются к источникам питания сварочного поста?
2. Как создаётся крутопадающая внешняя характеристика сварочных источников переменного и постоянного тока?
3. Каким образом регулируется сварочный ток на трансформаторе, инверторе и выпрямителе?
4. Какие меры предосторожности должны быть приняты для безопасной работы на источниках сварочного тока?

4. РУЧНАЯ ЭЛЕКТРОДУГОВАЯ СВАРКА СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ ШТУЧНЫМ ПОКРЫТЫМ ЭЛЕКТРОДОМ. РАСЧЁТ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА СВАРКИ.

Цель работы – изучение техники и технологии ручной дуговой сварки. При выполнении лабораторной работы необходимо:

- 1) изучить сущность ручной сварки, оценить роль и влияние покрытия электродов на качество сварного шва;
- 2) освоить методику определения основных сварочно-технологических характеристик плавящихся электродов и оценить производительность сварки различными электродами;
- 4) ознакомиться с техникой и технологией ручной дуговой сварки.

4.1. Сущность ручной дуговой сварки. Исследование влияния покрытия электродов на качество сварного шва

Для ручной дуговой сварки обычно применяют металлические электроды, состоящие из стержня и покрытия (рис. 4.1). Плавление электрода и свариваемого металла в процессе сварки осуществляется теплотой электрической (сварочной) дуги, горящей между электродом и свариваемым металлом. Электродный металл в виде капель переходит в жидкую металлическую (сварочную) ванну, которая после удаления дуги кристаллизуется, образуя сварной шов.

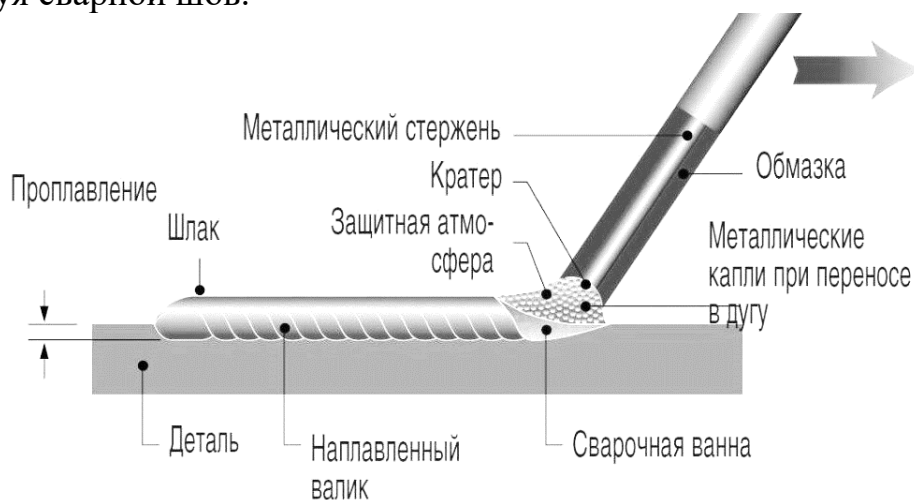


Рис. 4.1. Схема процесса ручной дуговой сварки

Образуемая при сварке сварочная дуга является мощным устойчивым электрическим разрядом в газовой среде. Сварочная дуга состоит из трех областей: анодной, катодной и столба дуги. При коротком замыкании электрода с деталью происходит разогрев этого участка. С разогретых

участков, в основном с катодной области, начинается эмиссия электронов, которые, сталкиваясь с молекулами газов и атомами паров металла, вызывают их ионизацию. В результате этого дуговой промежуток становится электропроводным и возникает устойчивая сварочная дуга, температура в которой достигает 6000...12 000 °С. Тепловой мощности такой дуги достаточно для плавления металла.

Металлические стержни электродов изготавливают из сварочной проволоки диаметром 0,3...12 мм. Длина стержня 250...450 мм. Для сварки сталей ГОСТом предусмотрено 77 марок стальной сварочной проволоки.

Покрытие электрода выполняет следующие функции:

1) защищает расплавленный металл сварочной ванны от вредного влияния кислорода, азота и водорода воздуха. Из паров и газов материалов покрытия над жидким металлом образуется локальная газовая атмосфера, которая препятствует контакту жидкого металла с воздухом. Одновременно материал покрытия образует жидкий слой шлака, после затвердевания которого остается легко отслаивающаяся шлаковая корка;

2) легирует, т. е. вводит в металл шва химические элементы (кремний, марганец и др.), чтобы придать ему необходимые свойства (прочность, твердость и т. д.);

3) раскисляет расплавленный металл сварочной ванны, удаляет кислород из жидкого металла. Окислы металлов, остающиеся в металле шва, снижают его механические свойства;

4) рафинирует расплавленный металл сварочной ванны, т. е. очищает его от серы и фосфора. Повышенное содержание серы и фосфора в металле шва ухудшает его механические свойства;

5) повышает устойчивость горения сварочной дуги (в покрытии содержатся элементы, обладающие низким потенциалом ионизации).

Покрытие состоит из порошкообразных материалов, сцементированных клеящим раствором. В покрытие входят стабилизирующие, шлакообразующие, газообразующие, раскисляющие, легирующие и другие вещества. Покрытия бывают кислые, основные, рутиловые, целлюлозные и пр.

4.2. Определение сварочно-технологических характеристик электродов и производительности сварки

Коэффициент наплавки α_n характеризует массу наплавленного на изделие электродного металла в единицу времени при токе 1 А:

$$\alpha_n = \frac{G_n \cdot 3600}{I_{св} \cdot t},$$

где G_n – масса наплавленного металла, которая определяется взвешиванием пластины до и после сварки, г;

$I_{св}$ – сила сварочного тока, А;

t – время горения дуги, с.

Коэффициент расплавления α_p характеризует массу расплавленного электродного стержня в единицу времени при токе 1 А:

$$\alpha_p = \frac{G_p \cdot 3600}{I_{св} \cdot t},$$

где G_p – масса расплавленного электродного металла, рассчитываемая по разности масс металлического стержня электрода до и после сварки:

$$G_p = \frac{\pi d^2}{4} (l_{эл} - l_{св}) \rho,$$

где d – диаметр стержня электрода, см;

$l_{эл}$ – длина стержня электрода до сварки, см;

l – длина стержня электрода после сварки, см;

ρ – плотность стали ($\rho = 7,85$ г/см³).

Коэффициент потерь электродного металла при сварке на угар и разбрызгивание, %:

$$\Psi = \frac{G_p - G_n}{G_p} \cdot 100 = \frac{\alpha_p - \alpha_n}{\alpha_p} \cdot 100.$$

Производительность наплавки (сварки) обычно оценивают как

$$П = \alpha_n \cdot I_{св}.$$

Скорость однопроходной сварки

$$V_{св} = \frac{П}{F_{н1} \cdot \rho} \cdot 100,$$

где $F_{н1}$ – площадь сечения наплавленного металла за один проход, см².

Коэффициент расплавления α_p зависит от ряда факторов (состав покрытия, род тока и полярность, плотность тока и др.) и равен для электродов с качественным покрытием 8...16 г/А·ч. Вследствие потерь электродного металла ($\Psi = 3...20$ %) значения коэффициента наплавки α_n обычно на 1...3 г/А·ч меньше значения α_p . Нормативные значения коэффициента α_n для различных марок электродов приведены в справочной литературе.

4.3. Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с типом и маркой электродов, подлежащих испытанию. Записать технический паспорт электродов, рекомендуемые пределы изменения тока, установить диаметр электрода и его длину до сварки.
2. Взвесить предварительно очищенные стальные пластины и произвести их маркировку.
3. Произвести наплавку на пластины, расплавляя каждый электрод на отдельную пластину. Во время наплавки по показаниям приборов зафиксировать силу сварочного тока I (среднее значение) и время горения дуги t .
4. Охладить пластины с наплавленным валиком, очистить их от шлака и брызг.

5. Взвесить каждую пластину с наплавленным валиком и измерить длину электродов, оставшихся после сварки.
6. Полученные результаты занести в табл. 4.1, провести необходимые расчеты коэффициентов и производительности сварки. Сравнить производительность ручной дуговой сварки при условии ее выполнения двумя различными электродами.

Таблица 4.1

Результаты эксперимента

Номер опыта	Марка электрода	Диаметр электрода d , мм	Длина электрода до наплавки $l_{эл}$, мм	Длина электрода после наплавки $l_{св}$, мм	Масса расплавленного металла G_p , г	Масса до наплавки $G_{пл}^д$, г	Масса после наплавки $G_{пл}^п$, г	Масса наплавленного металла G_m , г	Сила тока I , А	Время горения дуги t , ч	Коэффициент расплавления α_n , г/А·ч	Коэффициент потерь Ψ , %	Производительность P , г/ч	Скорость сварки $V_{св}$, см/ч

4.4. Техника и технология выполнения ручной дуговой сварки

Ручная дуговая сварка широко применяется для сварки самых различных металлов и сплавов толщиной от 2 до 100 мм. Особенно ручная сварка выгодна и удобна при выполнении коротких швов и швов криволинейной формы в любом пространственном положении, а также при положении швов в труднодоступных местах. Ручная дуговая сварка обеспечивает хорошее качество сварных соединений. Недостатком ручной дуговой сварки является ее малая производительность по сравнению с механизированными способами дуговой сварки. Студентам необходимо самостоятельно установить причины вышеуказанного недостатка изучаемого способа сварки.

Выполнение данного раздела работы рекомендуется осуществлять на примере разработки процесса сварки конкретного изделия. Все необходимые исходные данные задаются студентам преподавателем.

Пользуясь плакатами и справочными данными, представленными в лаборатории, студенты совместно с преподавателем выбирают или назначают:

1) вид сварочного соединения и тип сварного шва. Применяемые при сварке сварные соединения условно разделяют на четыре вида: стыковые, тавровые, нахлесточные и угловые. Сварные швы бывают однопроходными и многопроходными, односторонними и многосторонними и т. д. Пользуясь ГОСТ 5264-80 и плакатами, необходимо схематично изобразить основные типы сварных соединений и швов, а также выбрать конкретное решение применительно к заданию;

2) форму и элементы подготовки кромок под сварку. Перед сваркой кромки свариваемого металла тщательно подготавливаются: зачищают поверхности до металлического блеска, соединяют детали друг с другом прихватками – короткими сварными швами, служащими для сборки деталей под сварку. Кромки свариваемых деталей при толщине металла более 4 мм подвергаются специальной операции – разделке. Эта технологическая операция предшествует сварке и выполняется на строгальных и фрезерных станках или с помощью кислородной резки. При сварке разделка кромок заполняется присадочным металлом за один или несколько проходов. При изучении этого вопроса необходимо по плакатам ознакомиться с различными формами разделки кромок и ее элементами, по ГОСТ 5264-80 выбрать конкретное решение применительно к заданию. Положение, в котором выполняется сварка, может быть нижнее, горизонтальное, вертикальное и потолочное;

3) тип и марку электрода в зависимости от физико-механических свойств, химического состава, толщины металла и требований, предъявляемых к сварному соединению. Для сварки углеродистых и низколегированных сталей предусмотрено 9 типов электродов (Э38, Э42, Э42А, Э46, Э46А, Э50, Э50А, Э55, Э60). Цифра в обозначении указывает гарантируемый предел прочности металла шва в кгс/мм², а буква А – повышенную пластичность металла шва. Каждому типу электродов может соответствовать несколько марок электродов. Марка электрода – это его промышленное обозначение, характеризующее стержень и покрытие;

4) род тока, полярность, диаметр электрода и силу сварочного тока. При выборе учитываются химический состав свариваемого металла, его толщина, пространственное положение шва, требования к сварному соединению и т.д.

При работе экономичнее пользоваться сварочным оборудованием на переменном токе, но повышения качества сварки можно скорее добиться на постоянном токе. Род и полярность тока влияют на форму и размеры шва. Обычно пользуются прямой полярностью, обеспечивающей лучшее проплавление свариваемого металла. Обратную полярность рекомендуют применять при сварке тонкого металла в целях исключения прожога и для сварки высоколегированных сталей для исключения их перегрева.

Ручная дуговая сварка углеродистых и низколегированных сталей в нижнем положении осуществляется при следующих ориентировочных размерах:

Толщина металла, мм	1...2	2...5	5...10	Свыше 10
Диаметр электрода, мм	2	3, 4	4, 5, 6	6
Сила тока, А	45...65	80...100	130...150	210...240

5) скорость сварки, число слоев и порядок их нанесения.

Под руководством учебного мастера студенты:

а) знакомятся с техникой манипулирования электродом при выполнении ниточных и уширенных швов;

б) изучают порядок выполнения швов различной протяженности и толщины;

в) знакомятся с особенностями техники выполнения сварочных швов в различных пространственных положениях;

г) выполняют операции заданных образцов в следующей последовательности:

- устанавливают на источнике питания требуемый ток;

- закрепляют выбранный электрод в электродержателе;

- включают органы управления в присутствии учебного мастера;

- наносят валик расплавленного металла на пластину выбранным способом, при этом стремятся получить валик требуемой формы и размеров.

5. ПОЛУАВТОМАТИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОДУГОВАЯ СВАРКА СТАЛЬНОЙ ПРОВОЛОКОЙ В СРЕДЕ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА

Цель работы – изучение особенностей способов дуговой сварки в защитных газах, сварочного оборудования и техники выполнения сварки.

При выполнении лабораторной работы необходимо:

1) ознакомиться с сущностью и особенностями способов дуговой сварки в защитных газах;

2) изучить устройство, принципы работы и технологические возможности постов ручной аргонодуговой сварки неплавящимся электродом и механизированной сварки в углекислом газе;

3) получить практическое представление о технических возможностях дуговой сварки в аргоне и углекислом газе.

5.1. Сущность и особенности способов дуговой сварки в защитных газах

При сварке в защитном газе электрод, дуга и сварочная ванна защищены от воздействия окружающего воздуха струей защитного газа. В ка-

честве защитных газов применяют инертные газы (аргон, гелий) и активные газы (углекислый газ, азот, водород и др.), для чего используют иногда смеси двух газов и более. Наибольшее применение нашли аргон и углекислый газ.

Аргонодуговая сварка. Сварку осуществляют неплавящимися и плавящимися электродами. Сварку неплавящимся (вольфрамовым) электродом ведут на постоянном токе прямой полярности (рис. 5.1). В этом случае дуга легко зажигается и горит устойчиво при напряжении 12...18 В. При обратной полярности возрастает напряжение дуги, уменьшается устойчивость ее горения и снижается стойкость электрода.

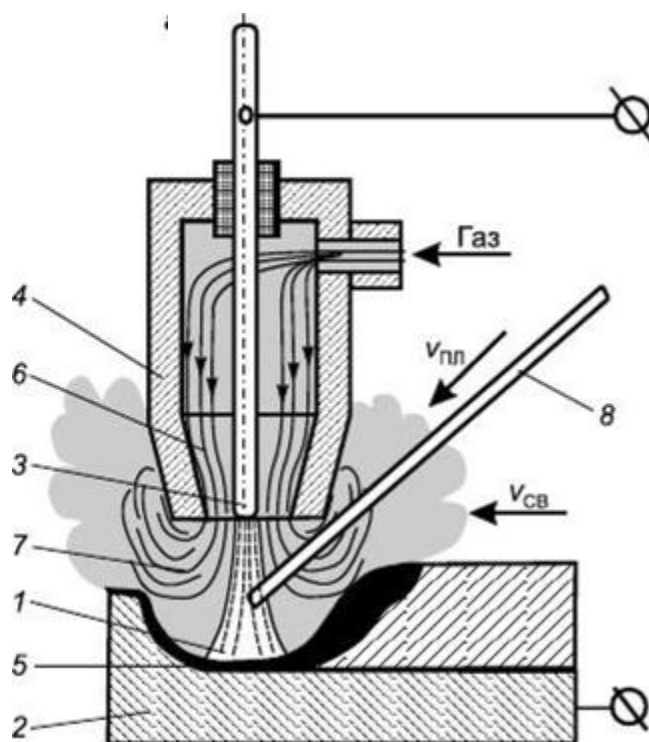


Рис. 5.1. Схема процесса дуговой сварки в защитных газах неплавящимся электродом: 1 – дуга; 2 – изделие; 3 – электрод; 4 – сопло; 5 – сварочная ванна; 6 – поток газа; 7 – защитное облако; 8 – присадочный пруток

Однако при обратной полярности под воздействием дуги с поверхности свариваемого металла удаляются оксиды. Это свойство дуги используют при сварке алюминия, магния и их сплавов, применяя для питания дуги переменный ток.

При сварке неплавящимся электродом на переменном токе сочетаются преимущества дуги на прямой и обратной полярностях. Для повышения эффективности и устойчивости процессов питание дуги переменным током осуществляют от специальных источников тока. Сварку в аргоне плавящимся электродом выполняют на автоматах или в виде механизированного варианта. Нормальное протекание процессов и хорошее формирование шва достигается при высоких плотностях тока (100 А/мм^2 и более), при этом

перенос расплавленного металла с электрода становится мелкокапельным или струйным, обеспечивается глубокое проплавление основного металла, формирование плотного шва с ровной и чистой поверхностью и разбрызгивание в допустимых пределах. Сварку выполняют на постоянном токе обратной полярности. В данном случае дуга горит устойчиво, так как ее электрические свойства в значительной мере определяются наличием ионизированных атомов металла электрода в столбе дуги.

Дуговая сварка в углекислом газе. Сварку в углекислом газе выполняют только плавящимся электродом на повышенных плотностях постоянного тока обратной полярности. Такой режим обусловлен теми же особенностями переноса электродного металла и формирования шва, которые свойственны сварке плавящимся электродом в аргоне.

При использовании CO_2 в качестве защитного газа необходимо учитывать металлургические особенности процесса сварки, связанные с окислительным действием CO_2 .

При высоких температурах сварочной дуги CO_2 диссоциирует на CO и атомарный кислород O , который окисляет свариваемый металл и легирующие элементы. Окислительное действие кислорода нейтрализуется введением в проволоку дополнительного количества раскислителей марганца и кремния. Они восстанавливают железо из закиси FeO , а образующиеся окислы SiO_2 и MnO всплывают на поверхность сварочной ванны и переходят в шлак. Поэтому для сварки в CO_2 углеродистых и низколегированных сталей применяют сварочную проволоку с повышенным содержанием этих элементов (Св-10ГС, Св-08Г2С).

Сварка в углекислом газе в ряде случаев рентабельнее ручной дуговой и некоторых видов сварки под флюсом. Она обладает высокой производительностью, большой проплавляющей способностью, малой токсичностью и низкой себестоимостью.

Сварочный полуавтомат для сварки в защитных газах (рис. 5.2) состоит из сварочной горелки 8, которая представляет собой ручной инструмент, обеспечивающий направление подачи проволоки, токоподвод к ней и газовую защиту зоны горения дуги; блока подачи проволоки 6, обеспечивающего поступление проволоки в сварочную горелку по специальному гибкому шлангу; блока управления процессом сварки 1, который имеет электрическую связь со всеми элементами полуавтомата. Защитный газ поступает в горелку из баллона 7. На сварочной горелке предусмотрена клавиша управления, с помощью которой сварщик подаёт сигнал в блок управления о начале и окончании сварки. Остальные технологические команды выдаёт блок управления: продувка газом шланга, включение источника, подача проволоки и сварка, последующее замедление и прекращение подачи проволоки, выключение тока и, после некоторой выдержки, прекращение подачи газа.

Регулируют силу сварочного тока путем изменения скорости подачи проволоки при выбранном для данной проволоки напряжении холостого тока. Дуга должна гореть с легким шипением и без интенсивного разбрызгивания капель металла.

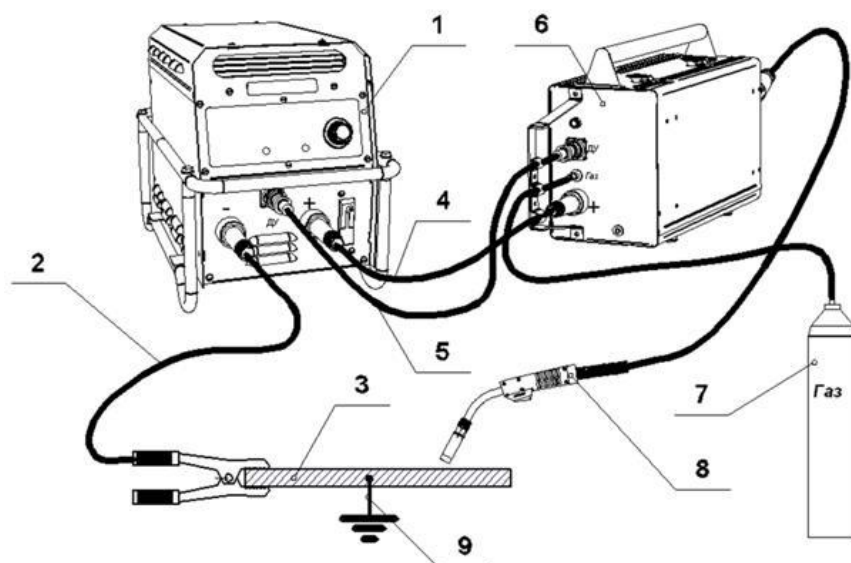


Рис. 5.2. Схема сварочного полуавтомата:

- 1 – источник; 2 – зажим заземления; 3 – свариваемое изделие;
- 4 – сварочный кабель (перемычка); 5 – кабель управления;
- 6 – блок подачи проволоки; 7 – баллон с защитным газом и газовая аппаратура (редуктор, шланги, фитинги);
- 8 – горелка для полуавтоматической сварки;
- 9 – подключение к контуру защитного заземления

5.2. Порядок выполнения работы

1. Изучить конструкцию сварочного полуавтомата.
2. Выполнить на холостом ходу команды полуавтомата: «Пуск», «Стоп», измерить скорость подачи электродной проволоки, а также проверить исполнение команды «Подача газа».
3. Проследить за работой полуавтомата в режиме сварки.
4. Нанести на стрелках управления блок-схемы полуавтомата очередность выполнения команд.

5.3. Содержание отчёта

1. Представить блок-схему сварочного полуавтомата с расшифровкой обозначений и указанием очередности выполнения команд управления.
2. Привести технические характеристики сварочных систем.
3. Указать рабочие режимы, на которых выполнялась сварка.

5.4. Контрольные вопросы

1. Какие существуют способы защиты металла шва и околошовной зоны от воздействия азота, водорода, кислорода воздуха?
2. В чём состоит преимущество полуавтоматической сварки перед ручной?
3. В чём сущность и назначение аргонодуговой сварки? Достоинства и недостатки.
4. В чём сущность и назначение дуговой сварки в углекислом газе? Достоинства и недостатки.
5. Как регулируют силу тока во полуавтоматах?

6. АВТОМАТИЧЕСКАЯ СВАРКА ПОД ФЛЮСОМ

Цель работы – изучение возможностей автоматической дуговой сварки и влияния автоматизации на качество и производительность процессов сварки.

В лабораторной работе необходимо:

- 1) изучить особенности процессов автоматической дуговой сварки;
- 2) изучить схему, конструкцию и принцип действия автоматической сварочной головки, сварочного трансформатора;
- 3) исследовать влияние силы сварочного тока и скорости сварки на форму и геометрические размеры сварного шва.

6.1. Особенности процесса дуговой сварки под флюсом

Процесс автоматической дуговой сварки под флюсом имеет следующие особенности:

- 1) в качестве электрода используется голая сварочная проволока, поступающая в зону горения дуги с определенной скоростью V_0 (рис. 6.1);
- 2) подвод тока к электроду осуществляется через скользящий контакт на расстоянии 30...50 мм от дуги, что позволяет применять при сварке большую силу тока (до 2000 А) без опасности перегрева электрода джоулевой теплотой. Благодаря такому решению производительность процесса сварки в 5...20 раз больше, чем при ручной дуговой сварке. Увеличение силы тока позволяет сваривать металл большой толщины (до 20 мм) за один проход без разделки кромок;
- 3) сварочная ванна и электрическая дуга находятся под слоем расплавленного флюса. Флюс выполняет те же функции, что и покрытие штучных электродов, но обеспечивает лучшую металлургическую обработку расплавленного металла, более медленное охлаждение шва, предотвращает разбрызгивание и угар расплавленного металла. В результате качество сварных швов, выполненных автоматической дуговой сваркой, выше, а потери электродного металла меньше, чем при ручной дуговой сварке;

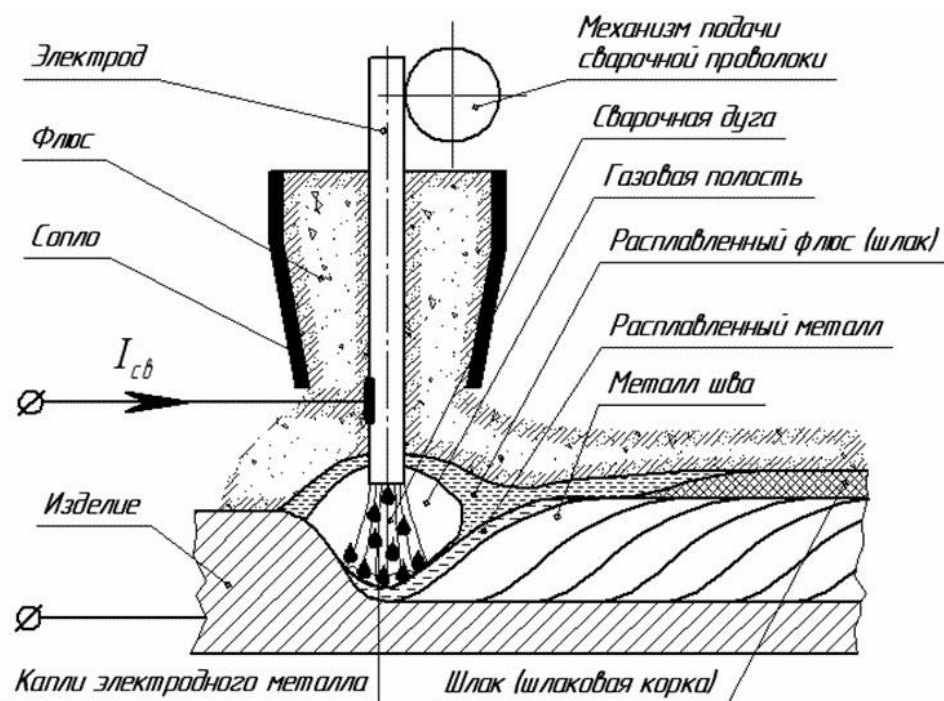


Рис. 6.1. Схема процесса автоматической дуговой сварки под флюсом

4) параметры режима сварки поддерживаются автоматически с высокой степенью точности. В частности, благодаря поддержанию постоянства длины дуги, механизированной подаче проволоки и ее перемещению вдоль изделия улучшается форма и поверхность шва, обеспечивается постоянство его размеров по всей длине.

6.2. Устройство, принцип действия и технологические возможности автоматов для дуговой сварки под флюсом

Процесс дуговой сварки включает следующие основные операции:

- 1) зажигание сварочной дуги;
- 2) подачу электрода в зону сварки по мере его плавления и поддержание устойчивого горения дуги и постоянства ее длины;
- 3) перемещение дуги вдоль свариваемого изделия;
- 4) прекращение горения дуги по окончании сварки. Наиболее сложным является автоматическое поддержание постоянства заданной длины дуги, которое определяет устойчивость процесса и постоянство режима сварки. В автоматах дуговой сварки используются два принципа поддержания постоянства длины сварочной дуги:
 - автоматическое принудительное регулирование длины дуги;
 - саморегулирование длины дуги при постоянной независимой скорости подачи электродной проволоки.

В сварочных головках с принудительным регулированием длины дуги для поддержания постоянства длины дуги используется взаимосвязь между длиной дуги L , напряжением дуги U и скоростью подачи электродной проволоки V_s . Поскольку $U \sim L$, регулирование постоянства напряжения дуги эквивалентно регулированию постоянства длины, так как $U = \text{const}$, если $L = \text{const}$. По этой причине в сварочной головке в качестве регулируемой величины используется напряжение дуги, а регулирующей величиной является скорость подачи электродной проволоки. При этом способе регулирования временное нарушение постоянства длины дуги, а следовательно и напряжения, автоматически устраняется установкой соответствующей скорости подачи электродной проволоки.

Современные автоматы поддерживают заданное напряжение дуги с точностью $\pm 0,5$ В, что соответствует точности поддержания длины дуги $\pm 0,2 \dots 0,3$ мм.

Схема автоматической сварочной головки представлена на рис. 6.2.

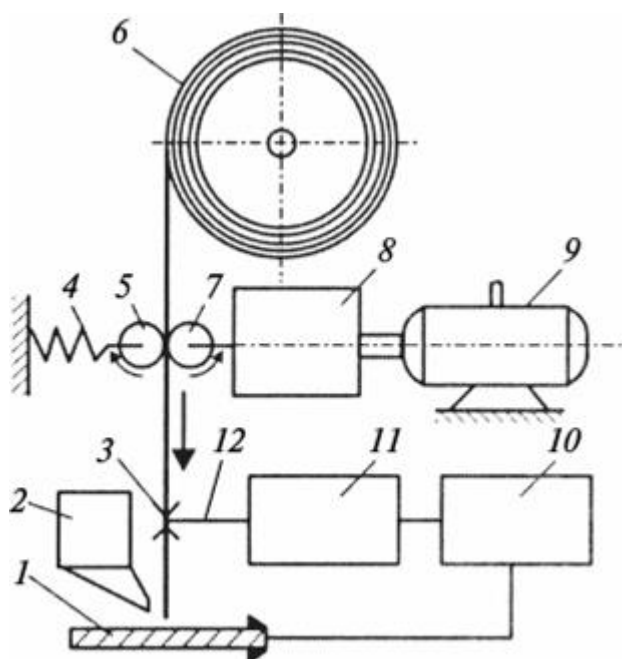


Рис. 6.2. Схема автоматической сварочной головки:

- 1 – свариваемая деталь; 2 – бункер для подачи флюса; 3 – мундштук;
- 4 – пружина; 5, 7 – ролики; 6 – электродная проволока; 8 – редуктор;
- 9 – электродвигатель; 10 – пускорегулирующая аппаратура;
- 11 – аппаратный ящик; 12 – провод источника сварочного тока

Электродная проволока из бухты, вложенной в кассету 6, подается ведущим 7 и прижимным 5 роликами к поверхности свариваемой детали 1. Подающий ролик 7 приводится во вращение электродвигателем 9 через специальный редуктор 8. После роликов 5 и 7 электродная проволока проходит в мундштук 3, к которому подведен через аппаратный ящик 11 один

провод источника сварочного тока 12. Другой провод присоединяется к изделию 1. В аппаратном ящике расположена пускорегулирующая аппаратура. На сварочной головке крепится бункер 2 для подачи и отсоса флюса.

Важнейшее условие устойчивого горения дуги – ее постоянная длина. При нормальной длине дуги и ее нормальном напряжении скорость подачи электродной проволоки должна быть примерно равна скорости ее плавления. Длина дуги прямо пропорциональна напряжению; увеличивается длина дуги, возрастает напряжение и наоборот. Изменение же длины дуги или ее напряжения может произойти в результате колебания напряжения сети источника тока, пробуксовки проволоки в подающем механизме, неровности свариваемой детали. Сварочная головка должна «реагировать» на эти изменения и восстанавливать заданную длину дуги. С уменьшением длины дуги скорость подачи проволоки снижается и с увеличением возрастает.

В основу регулирования работы сварочных головок положены два основных принципа регулирования: регулирование скорости подачи электродной проволоки и поддержание постоянной скорости подачи проволоки.

Сварочные головки с переменной скоростью подачи электродной проволоки имеют сложную электрическую схему и поэтому получили ограниченное применение (при низких напряжениях и малых сварочных токах). На рис. 6.3, *а* представлена принципиальная схема сварочной головки с регулируемой скоростью подачи электродной проволоки.

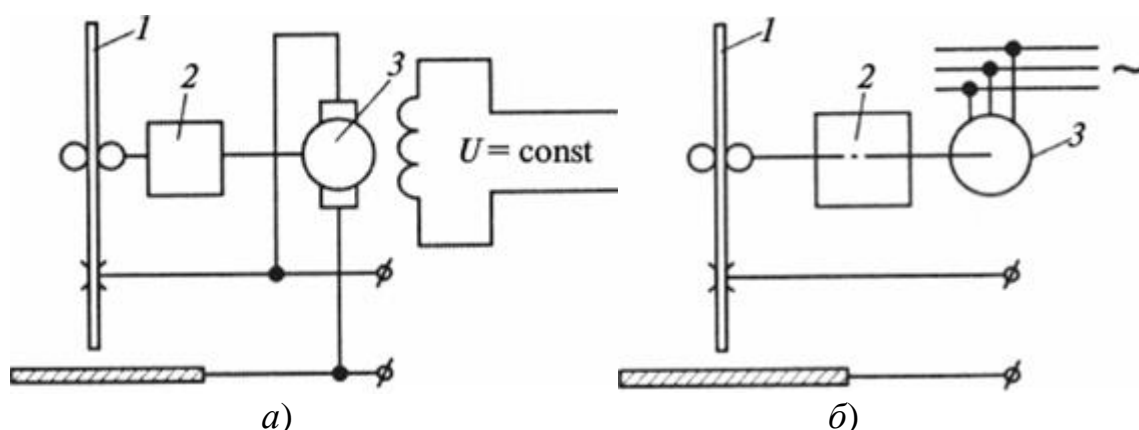


Рис. 6.3. Принципиальная схема сварочной головки с регулируемой (*а*) и с постоянной (*б*) скоростью подачи электродной проволоки:

1 – электродная проволока; 2 – подающий механизм; 3 – электродвигатель

Электродвигатель 3 постоянного тока для привода подающего механизма 2 электродной проволоки 1 включается так, что частота вращения его ротора зависит от напряжения дуги. При увеличении длины дуги во время сварки возрастает напряжение дуги и частота вращения ротора электродвигателя, в связи с чем проволока подается быстрее и длина дуги восстанавливается. Если длина дуги становится короче, ее напряжение падает,

частота вращения ротора электродвигателя уменьшается, соответственно снижается скорость подачи проволоки.

У автоматов, например АДС-1000-4, АДФ-1003, скорость подачи проволоки автоматически устанавливается и регулируется при сварке в зависимости от длины сварочной дуги. Сварщик задает на пульте управления величину напряжения дуги, электрическая схема сравнивает фактическое напряжение в данный момент с заданным и, меняя скорость подачи проволоки, поддерживает длину дуги постоянной.

Наибольшее распространение в сварочном производстве получили установки с постоянной скоростью подачи электродной проволоки. Принципиальная схема такой установки показана на рис. 6.3, б. Асинхронный трехфазный электродвигатель 3, питающийся непосредственно от сети, через редуктор 2 с постоянной скоростью подает электродную проволоку 1 к месту сварки. Поэтому скорость вращения электродвигателя постоянна, независимо от длины (следовательно, и напряжения) дуги. Примерное равенство скорости подачи проволоки и скорости ее плавления поддерживается саморегулированием.

Для сварки и наплавки под флюсом установками с постоянной скоростью подачи электродной проволоки (с саморегулированием) применяются источники как переменного, так и постоянного тока с жесткой или пологопадающей внешней характеристикой.

Саморегулирование осуществляется следующим образом. Если в процессе сварки длина дуги уменьшится (например, из-за неровностей на поверхности свариваемых кромок), то напряжение на дуге понизится. Так как внешняя характеристика источника сварочного тока жесткая или пологопадающая, то даже незначительное уменьшение напряжения приведет к значительному возрастанию сварочного тока и тем самым к увеличению скорости плавления электродной проволоки (скорость плавления проволоки почти пропорциональна сварочному току).

Повышение скорости плавления проволоки при постоянной скорости ее подачи приведет к удлинению дуги, т.е. к восстановлению установленного режима сварки. Если же длина дуги возрастет, сварочный ток понизится. Следовательно, скорость плавления электродной проволоки уменьшится, что при постоянной скорости ее подачи приведет к сокращению дугового промежутка.

Механизмы с постоянной скоростью подачи электродной проволоки просты и надежны в работе. Однако процесс саморегулирования протекает нормально при питании дуги постоянным током. При сварке на переменном токе для устойчивости процесса колебания напряжения в сети не должны превышать 6...8%.

Автоматическая сварочная головка является основным элементом механизированных систем сварки (полуавтомата и автомата). В полуавтоматах механизирована только подача проволоки в зону горения дуги, пере-

мещение дуги вдоль изделия осуществляется вручную. При автоматической – механизированы оба движения: подача проволоки и перемещение дуги вдоль изделия. Механизированные системы сварки, кроме сварочной головки, включают источники тока, блоки управления и другие элементы в зависимости от назначения системы.

Универсальный автомат для дуговой сварки, например, сварочный трактор, позволяет выполнять сварку стыковых швов с разделкой и без разделки кромок, угловых и нахлесточных швов вертикальным и наклонным электродом, а так же угловых швов в лодочку. Трактор может выполнять сварку закрытой (под флюсом), так и открытой (в защитных газах) дугой. С этой целью он комплектуется дополнительным мундштуком для сварки в углекислом газе. В тракторе предусмотрены два электродвигателя переменного тока, один из которых установлен на ходовой тележке, а второй на подающем механизме.

Сварочный автомат для сварки под флюсом состоит из следующих основных элементов (рис. 6.4).

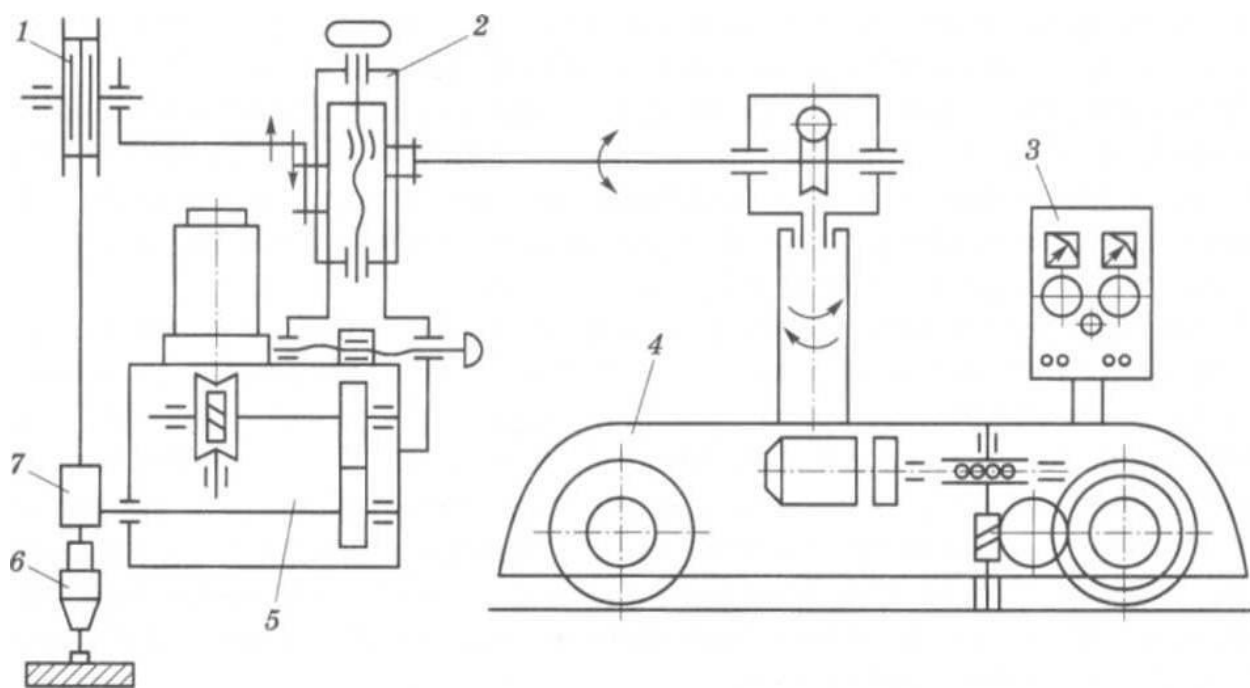


Рис. 6.4. Блок-схема сварочного автомата:

- 1 – катушка для сварочной проволоки; 2 – устройство для установочных перемещений головки; 3 – панель управления автоматом; 4 – тележка;
- 5 – механизм подачи проволоки; 6 – мундштук; 7 – подающие ролики

Тележка 4 предназначена для перемещения автомата над или рядом со свариваемым стыком. В большинстве конструкций тележка выполняет роль базового элемента. На ее корпусе устанавливают головку, катушку для сварочной проволоки 1 и панель управления автоматом 3. Тележка должна обеспечивать плавность хода в широком диапазоне скоростей сварки. Раз-

личают тележки тракторного и кареточного типов. Тележка тракторного типа перемещаются при помощи бегунковых колес либо по направляющим стапеля, либо непосредственно по свариваемому изделию. Тележка кареточного типа перемещается только по направляющим стапеля или самого автомата. Конструкция направляющих элементов зависит от формы свариваемого стыка. Для сварки продольных прямолинейных стыков часто применяют консольные направляющие. Консольные автоматы для дуговой сварки универсальны. Их можно использовать и для сварки поворотных кольцевых швов. В этом случае каретку автомата устанавливают неподвижно. В автоматах для сварки неповоротных кольцевых стыков каретка перемещается по направляющим, имеющим форму окружности. Для перемещения каретки применяют бегунковые колеса, зубчатые рейки, ходовые винты. Тележки автоматов для дуговой сварки перемещаются с помощью электродвигателя через редуктор. В автоматах для дуговой сварки с электроприводом переменного тока настройку скорости перемещения тележки регулируют с изменением оборотов электродвигателя. В автоматах с электроприводом переменного тока настройку скорости перемещения осуществляют сменными шестернями в редукторе.

6.3. Порядок выполнения работы

1. Изучить конструкцию автоматической сварочной головки.
2. Выполнить на холостом ходу команды автомата: «Пуск», «Стоп», «Электрод вверх», «Электрод вниз», «Каретка вперед», «Каретка назад» и проконтролировать их выполнение.
3. Проследить за процессом работы сварочного автомата в режиме сварки, записать ток, напряжение на дуге и скорость сварки.
4. Нанести на стрелках управления блок-схемы автомата очередность выполнения команд.

6.4. Содержание отчёта

1. Дать схему сварочной головки с цифровым обозначением элементов и расшифровать их.
2. Представить блок-схему сварочного автомата с расшифровкой обозначений и указанием очередности выполнения команд управления.
2. Привести технические характеристики сварочных систем.
3. Указать рабочие режимы, на которых выполнялась сварка.

6.5. Контрольные вопросы

1. Как устроена и как работает автоматическая сварочная головка?
2. В чём разница между сварочными головками первого и второго типов?
3. В чём состоит преимущество автоматической сварки перед ручной?
4. Чем отличается сварочный автомат от полуавтомата?

7. ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ НАПЛАВКЕ ПЛАСТИН

Цель работы: овладение инженерным методом расчёта деформаций и получение навыков при их экспериментальном определении.

7.1. Общие сведения

При наплавке валика на кромку полосы валик и нагретая часть полосы расширяются и растягивают холодную часть полосы, создавая в ней растяжение с изгибом (рис. 7.1, *a*). Сам же валик и нагретая часть полосы будут сжаты, поскольку их тепловому расширению препятствует холодная часть полосы. Полоса прогнется выпуклостью вверх.

При остывании (рис. 7.1, *б*) валик и нагретая часть полосы, претерпев пластические деформации, будут укорачиваться, но этому снова воспрепятствуют слои холодного металла. Валик и нагретая часть полосы будут стягивать верхние волокна, и полоса прогнется выпуклостью вниз.

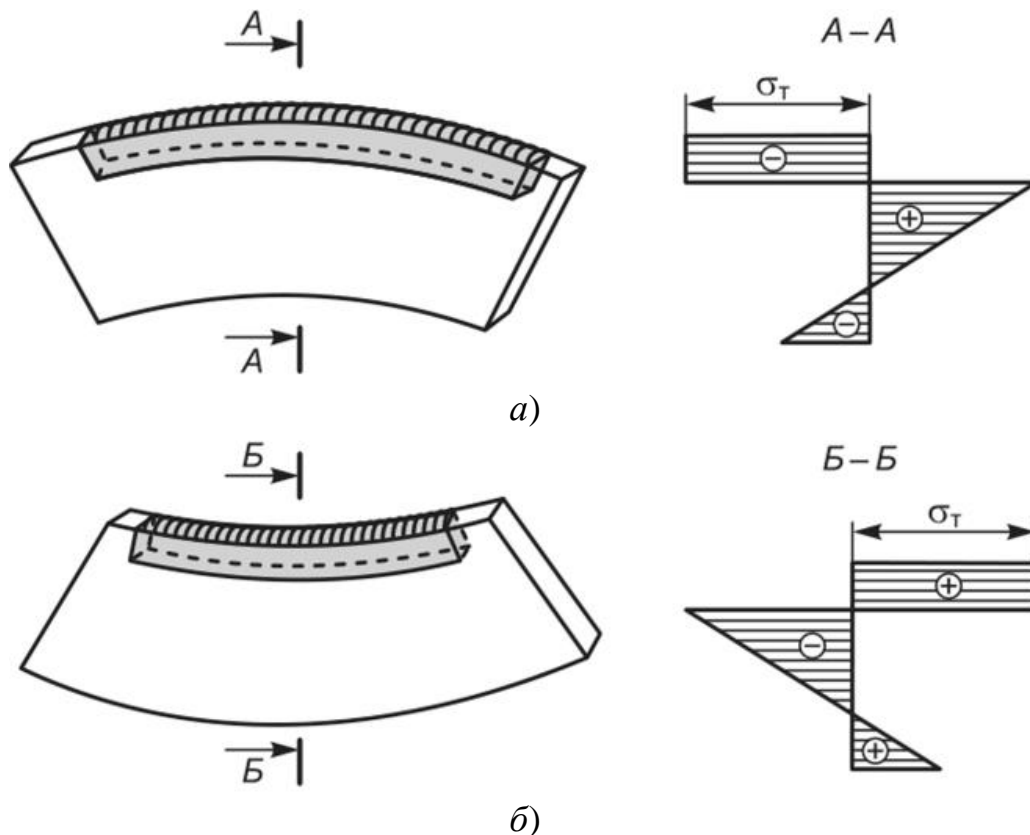


Рис. 7.1. Неравномерный нагрев металла:
a – при наплавке (нагревании); *б* – при остывании;
 σ_T – напряжение текучести; «+» - растяжение; «-» - сжатие

При остывании металл становится более плотным, его объем уменьшается, и в сварном соединении возникают внутренние напряжения (рис.

7.2). Из-за продольных напряжений изделие коробится в продольном направлении (рис. 7.3, а), а поперечные приводят, как правило, к угловым деформациям – короблению в сторону большего объема расплавленного металла (рис. 7.3, б).

Внутренние напряжения возникают только в том случае, если свободному расширению и сокращению детали что-либо препятствует, например соседние участки металла, оставшиеся более холодными вследствие неравномерного нагрева и потому менее расширившиеся.

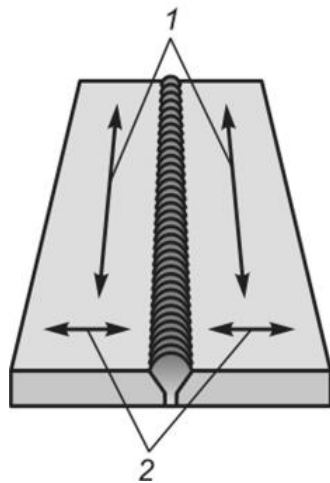


Рис. 7.2. Литейная усадка наплавленного металла:
1 – продольное напряжение; 2 – поперечное напряжение

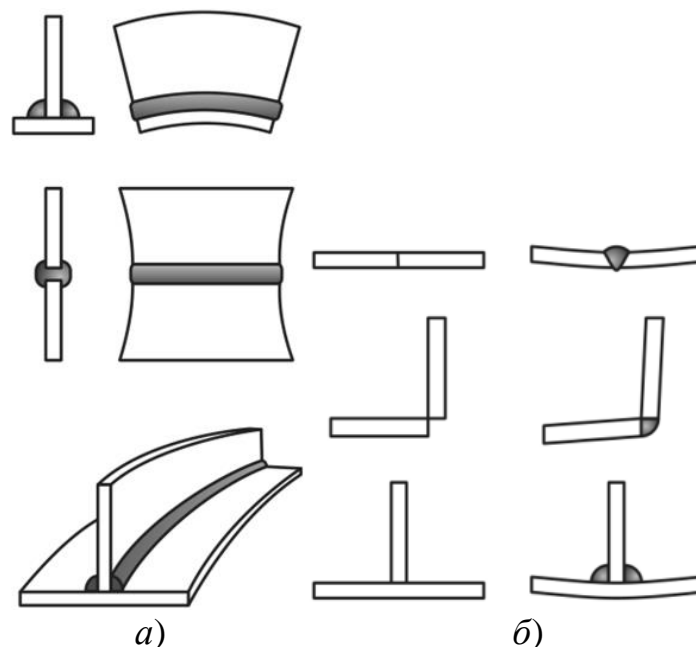


Рис. 7.3. Деформация изделия: а – от продольной усадки;
б – от поперечной усадки

Наличие сосредоточенного источника теплоты (электрической дуги), перемещающегося вдоль шва с определенной скоростью и вызывающего

неравномерное нагревание металла при сварке, является основной причиной возникновения внутренних напряжений и деформаций в сварных изделиях.

При переходе наплавленного металла из жидкого состояния в твердое происходит *усадка наплавленного металла*. Явление усадки объясняется тем, что при затвердевании металла он становится более плотным, вследствие чего объем его сокращается. Различные металлы имеют разную усадку. Она обычно измеряется в процентах от первоначального линейного размера образца или детали. Так, усадка алюминия 1,7-1,8%; бронзы – 1,45-1,6%; латуни – 2,06%; меди – 2,1%; малоуглеродистой стали – 2%.

Напряжения, вызванные усадкой, возрастают до тех пор, пока металл не начнет вытягиваться. Если он недостаточно пластичен, деталь может дать трещину в наиболее слабом месте. Этим местом часто бывает околошовная зона, т.е. зона термического влияния. Вследствие усадки или сокращения объема металла в процессе сварки образуются горячие трещины.

Деформация и связанные с ней напряжения зависят от зоны нагрева при сварке. Чем больший объем металла разогревается при сварке, тем сильнее деформации и коробления.

Размеры и положения швов влияют на величину деформации при сварке. Наибольшие деформации возникают в длинных швах, расположенных несимметрично относительно сечения свариваемого профиля. Чем сложнее форма детали, чем больше в ней различных швов, тем сильнее она деформируется.

Во время сварки теплота дуги расходуется не только на расплавление металла сварочной ванны, но и на нагрев изделия. При этом оно нагревается неравномерно: на границе с ванной – почти до температуры плавления, а чем дальше от ванны, тем температура ниже.

В результате усадки при затвердевании наплавленного металла, неравномерного нагрева и охлаждения различных участков сварного соединения в процессе сварки, изменения объема металла, вызванного изменением структуры металла при сварке, в металлической конструкции возникают напряжения.

7.2. Содержание работы

При наплавке прямолинейной пластины (рис. 7.4, а) расчётная схема определения деформаций включает в себя условия закрепления и нагрузку (рис. 7.4, б).

Прогиб балки находится по зависимости:

$$f_1 = \frac{C \cdot l_{\text{н}}^2}{2},$$

где C – кривизна от сварки или фиктивная нагрузка, 1/см:

$$C = \mu \cdot q_{\text{п}} \frac{y'}{l_x},$$

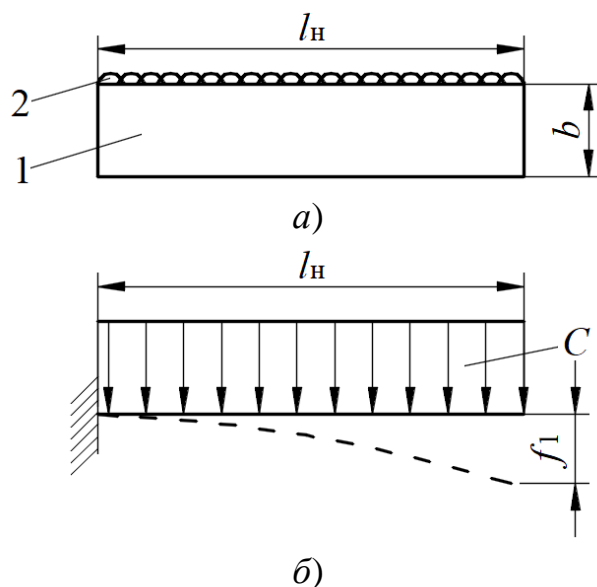


Рис. 7.4. Исследуемая прямолинейная пластина:

a – геометрические параметры пластины;

б – расчётная схема; 1 – пластина; 2 – наплавленный валик

где μ – коэффициент деформации, равный $0,843 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{Дж}$ при $q_{\text{п}}/F \leq 628$;

F – площадь поперечного сечения пластины, см^2 ;

$q_{\text{п}}$ – погонная энергия при наплавке, $\text{Дж}/\text{см}$:

$$q_{\text{п}} = \frac{I \cdot U \cdot \eta}{V_{\text{н}}},$$

где I – сварочный ток, А ;

U – напряжение дуги, В ;

η – КПД использования тепла дуги, $\eta = 0,75$ при наплавке покрытыми электродами и $\eta = 0,9$ – при автоматической наплавке под слоем флюса;

$V_{\text{н}}$ – скорость наплавки, $\text{см}/\text{с}$;

y' – расстояние от линии центров тяжести пластины до наплавки, см ;

I_x – момент инерции сечения пластины относительно оси x , см^4 ;

$l_{\text{н}}$ – длина балки или наплавляемой пластины, см .

В результате:

$$f_1 = \frac{\mu}{2} \cdot \frac{IU\eta}{V_{\text{н}}} \cdot l_{\text{н}}^2 \cdot \frac{y'}{I_x}.$$

Деформации при наплавке криволинейной пластины (рис. 7.5) определяются по формуле:

$$f_2 = \beta' C \rho^2 (1 - \cos \varphi),$$

где β' – коэффициент, зависящий от геометрических параметров пластины и от величины смещения центра её тяжести при деформации:

$$\beta' = \beta \cdot \chi,$$

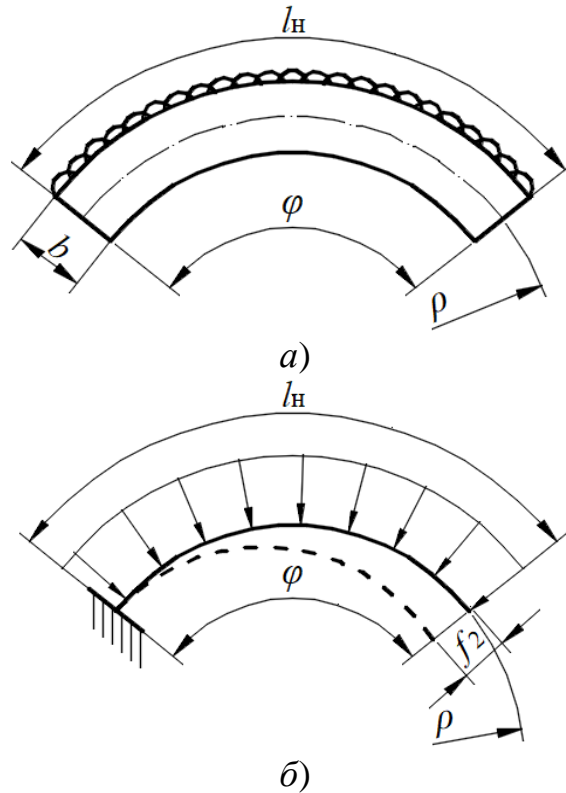


Рис. 7.5. Исследуемая криволинейная пластина:
a – геометрические параметры; *б* – расчётная схема

где β – коэффициент, зависящий от геометрических параметров пластины;

χ – коэффициент, зависящий от величины смещения центра тяжести пластины при её деформации.

В свою очередь,

$$\beta = 1 - \frac{0,06}{\rho_0^2},$$

где ρ_0 – относительный радиус кривизны бруса:

$$\rho_0 = \frac{\rho}{b},$$

где b – ширина пластины, см.

$$\chi = 1 - \left(\frac{i}{\rho}\right)^2,$$

где i – радиус инерции, см:

$$i = \sqrt{\frac{I_x}{F}}.$$

В результате:

$$f_2 = \left(1 - \frac{0,06}{\rho_0^2}\right) \cdot \left(1 - \frac{I_x}{F\rho^2}\right) \cdot \mu \cdot \frac{IU\eta}{V_H} \cdot \frac{y'}{I_x} \cdot \rho^2 (1 - \cos\varphi).$$

7.3. Порядок выполнения работы

Экспериментальная проверка расчётных величин f_1 и f_2 осуществляется на установке, представленной на рис. 7.6. Остаточные деформации определяются по разности показаний индикатора до и после наплавки (с учётом охлаждения пластины). Характер изменения временных деформаций и их величины выявляются следующим образом. Поскольку наиболее интенсивно они меняются в начальный период, т.е. в момент нагревания, а затем медленно устанавливаются в виде остаточных деформаций, целесообразно первые 20 значений фиксировать через 10 с, затем 5 значений через 50 с и далее 4 значения через 300 с. Графическое представление $f(t)$ необходимо не только для определения динамики поведения пластины при нагревании и охлаждении, но и для избегания случайных ошибок при расчётах остаточных деформаций.

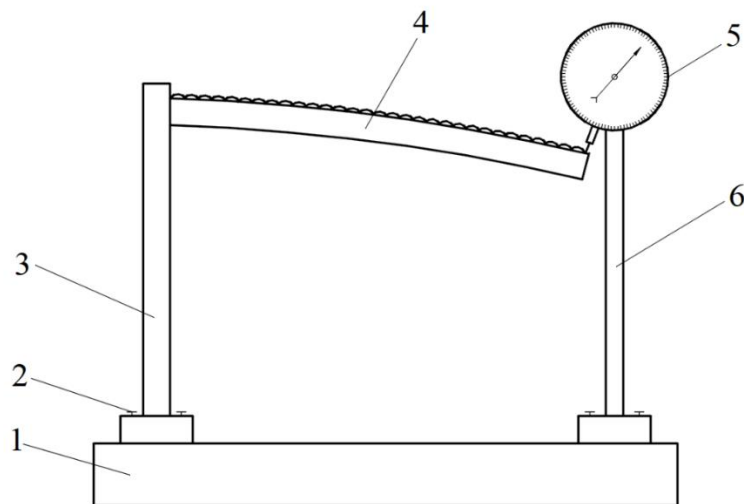


Рис. 7.6. Экспериментальная установка для определения деформаций при наплавке пластин различной кривизны:

1 – основание; 2 – винт; 3 – левая стойка; 4 – исследуемая пластина;
5 – индикатор часового типа; 6 – правая стойка

Исходные данные заносятся в табл. 7.1, 7.2.

Таблица 7.1

Геометрические параметры пластин

Исследуемая пластина	Толщина δ , см	Ширина b , см	Длина наплавляемой кромки l_n , см
1. Прямолинейная			
2. Криволинейная: $\rho =$ см, $\varphi =$ °			

Параметры режима наплавки

Исследуемая пластина	Сварочный ток I, A	Напряжение дуги U, B	Время наплав- ки t, c
1. Прямолинейная 2. Криволинейная: $\rho =$ см, $\varphi =$ °			

7.4. Контрольные вопросы

1. Каковы достоинства инженерного метода расчёта?
2. Какие расчётные схемы используются в работе?
3. Как определяются временные деформации?
4. Как определяются остаточные деформации?

8. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА И КАЧЕСТВА ГАЗОВОЙ СВАРКИ

Цель работы: овладение основами технологии газовой сварки, изучение оборудования и техники безопасности.

8.1. Содержание работы

Газовая сварка в основном применяется для тонколистовых стальных конструкций; сварки углеродистых и легированных сталей, подверженных трещинообразованию при нагреве; для цветных металлов и их сплавов, имеющих сравнительно малую температуру плавления; для сварки деталей из материалов, требующих предварительного подогрева, например из чугуна; для ремонтных и наплавочных работ.

На рис. 8.1 представлен пост газовой сварки. Газообразным кислородом наполняют кислородные баллоны голубого цвета ёмкостью 40 л под давлением 15 МПа. Количество кислорода V_k , л, определяется по формуле:

$$V_k = E \cdot P_k,$$

где E – водяная ёмкость баллона, л;

P_k – давление кислорода в баллоне по манометру, МПа.

Так, в заполненном баллоне кислорода содержится 6 м³.

Ацетиленовый баллон белого цвета, заполненный пористой массой из активированного угля, пропитанной ацетоном, наполняется газом при давлении 1,9 МПа. Его количество в баллоне V_a , л, находится по формуле:

$$V_a = 7 \cdot E \cdot P_a,$$

где 7 – поправочный коэффициент, учитывающий растворимость ацетилена;

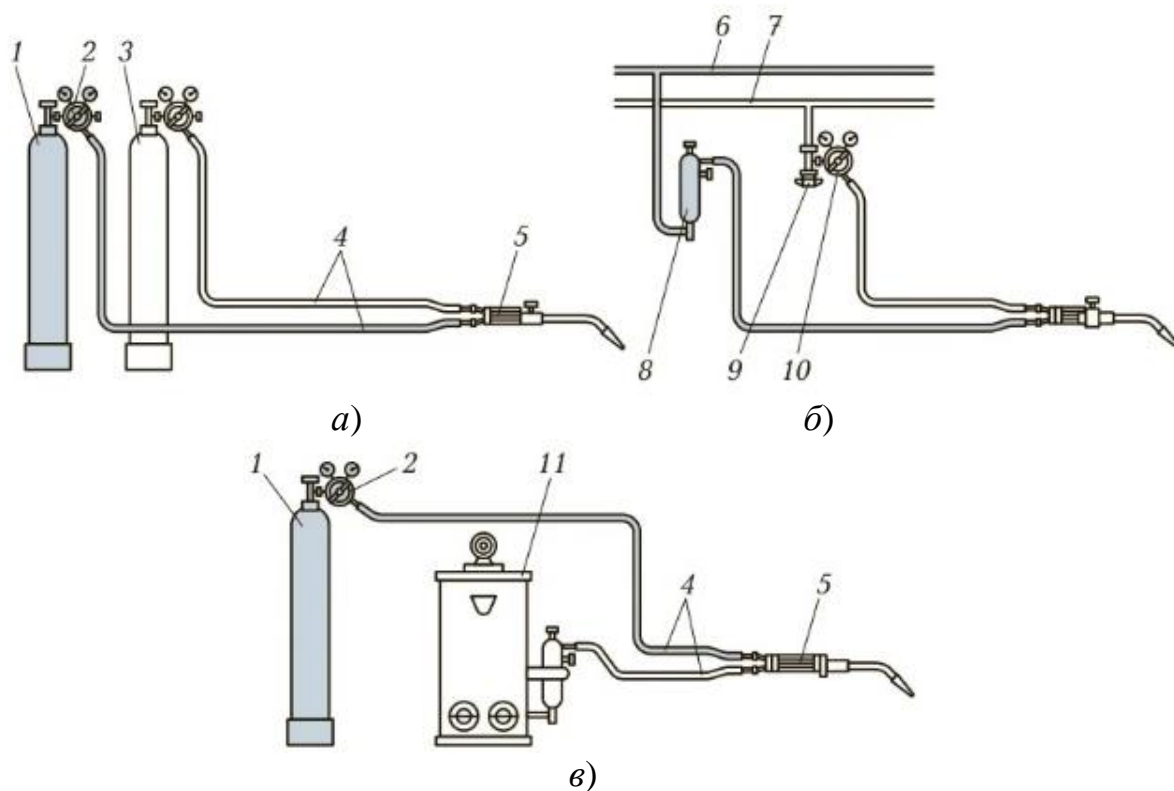


Рис. 8.1. Схемы газопитания рабочего поста: *а* – от баллонов; *б* – от газопроводов; *в* — от ацетиленового генератора; 1 – баллон с кислородом; 2 – кислородный редуктор; 3 – баллон с ацетиленом; 4 – шланги; 5 – горелка; 6 – кислородный трубопровод; 7 – ацетиленовый трубопровод; 8 – водяной затвор; 9 – кислородный вентиль; 10 – кислородный постовой редуктор; 11 – ацетиленовый генератор

P_a – давление ацетилена в баллоне по манометру, МПа.

В полном баллоне ацетилена содержится $5,32 \text{ м}^3$.

Ацетиленовый генератор служит для получения ацетилена из карбида кальция при взаимодействии его с водой:

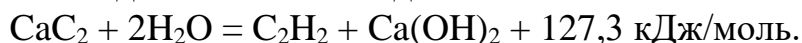


Схема ацетиленового генератора представлена на рис. 8.2. Вода заливается через горловину. При достижении уровня переливной трубки 4 вода по трубке переливается в промыватель 1, который заполняется до уровня контрольной пробки. Карбид кальция загружают в корзину 11. Уплотнение между крышкой 9 и горловиной обеспечивается мембраной усилием, создаваемым винтом 8. Ацетилен, образующийся в газообразователе 5, по трубке 4 поступает в промыватель 1, барботируя через слои воды, охлаждается и промывается. Из промывателя 1 ацетилен через вентиль предохранительного клапана 10 по шлангу поступает в предохранительный затвор 12 и далее к горелке или резаку. По мере повышения давления в газообразователе 5 пружина, находящаяся под крышкой 9, сжимается, в ре-

зультате чего корзина 11 перемещается вверх, а вода вытесняется в вытеснитель 2.

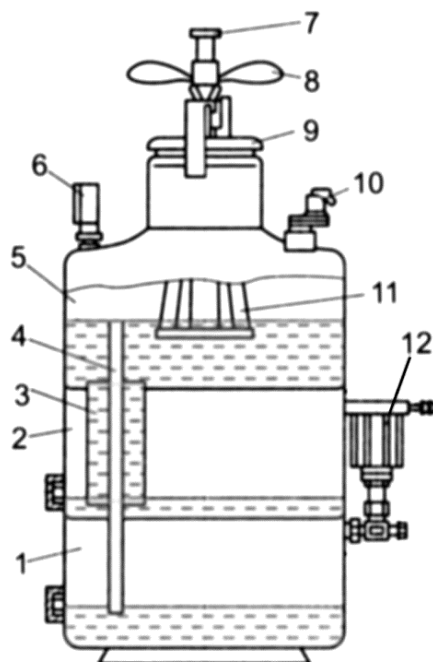


Рис. 8.2. Схема ацетиленового генератора:

- 1 – промыватель; 2 – вытеснитель; 3 – патрубок; 4 – переливная трубка;
5 – газобразователь; 6 – манометр; 7 – шток; 8 – винт; 9 – крышка;
10 – предохранительный клапан; 11 – корзина; 12 – затвор

В результате уровень замочки карбида уменьшается, выработка ацетилена ограничивается, и повышение давления прекращается. Давление ацетилена контролирует манометр 6.

Предохранительными жидкостными (водяными) затворами называются устройства, предназначенные для защиты ацетиленовых генераторов и трубопроводов для горючих газов от проникновения в них пламени при обратном ударе. Причинами появления обратного удара могут быть следующие: малая скорость горючего газа на выходе из горелки, касание горелкой изделия, засоренность мундштука горелки и др.

При нормальной работе (рис. 8.3, а) ацетилен из генератора или газопровода через кран 3 и внутреннюю (газоподводящую) трубу 4 поступает в корпус затвора 1, проходит через слой воды и через ниппель 6 выходит в шланг. При этом вода, имеющаяся в корпусе затвора, частично вытесняется давлением газа в межтрубное пространство, поскольку наружная (предохранительная) труба 5 имеет сверху открытую воронку 2, т. е. сообщается с атмосферой. Разность уровней воды в наружной трубе и корпусе затвора 1 и представляет собой величину давления газа в данный момент. Длина (высота) наружной трубы должна соответствовать максимальному давлению газа в генераторе или газопроводе, а поэтому по данной схеме постовые затворы выпускаются лишь на низкое давление – до 0,1 кгс/см²,

при большом давлении такие затворы были бы весьма громоздкими или вообще неприменимыми для работы.

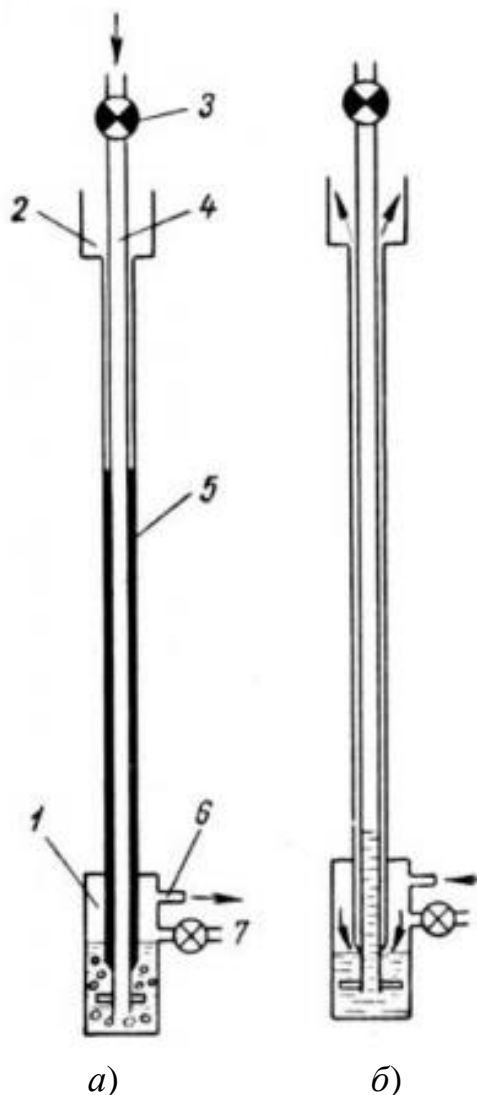


Рис. 8.3. Водяной затвор низкого давления:
а – нормальная работа; *б* – обратный удар

При обратном ударе пламени (рис. 8.3, *б*) взрывчатая смесь из горелки или резака попадает через ниппель 6 в корпус затвора 1, создавая в нем давление, которым вода вытесняется в трубы 5 и 4, причем в трубе 4 создается водяная пробка, препятствующая проникновению в нее взрывчатой смеси и дальнейшему поступлению ацетилену в затвор, а через короткую трубу 5 при понижении уровня воды до ее обреза взрывчатая смесь выбрасывается в атмосферу.

Имеющийся в воронке отражательный экран препятствует значительному выбросу воды вместе со смесью. Перед возобновлением работы после обратного удара необходимо при закрытом кране 3 проверить контрольным краном 7 уровень воды в затворе и при необходимости долить ее.

Газовые редукторы предназначены для понижения давления газа, поступающего из баллона или распределительного трубопровода, регулирования давления в инструменте (горелке или резаке) в зависимости от внешних возмущений и автоматического поддержания заданного рабочего давления на выходе инструмента независимо от изменения расхода газа потребителями.

Редуктор обратного действия (рис. 8.4) работает следующим образом.

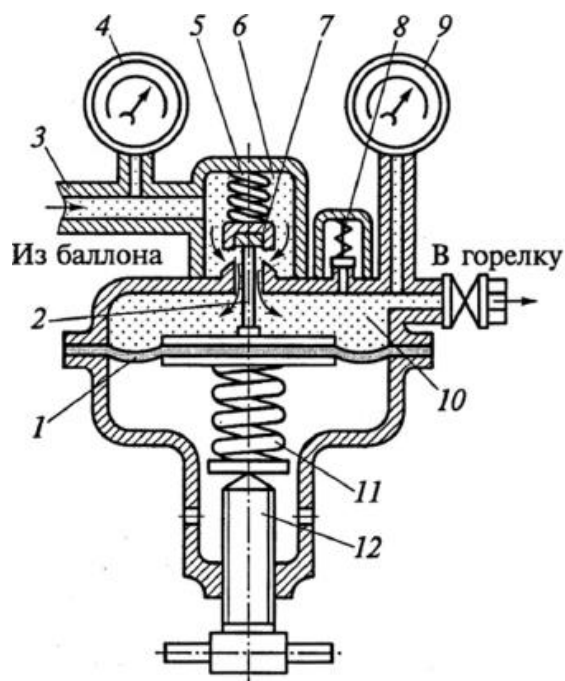


Рис. 8.4. Редуктор обратного действия:

- 1 – мембрана; 2 – передаточный диск со штоком;
- 3 – штуцер впуска газа; 4 – манометр высокого давления;
- 5 – вспомогательная пружина; 6 – камера высокого давления;
- 7 – редуцирующий клапан; 8 – предохранительный клапан;
- 9 – манометр низкого (рабочего) давления; 10 – камера низкого давления;
- 11 – главная нажимная пружина; 12 – регулировочный винт

Сжатый газ из баллона поступает в камеру высокого давления 6 и препятствует открыванию клапана 7. Для подачи газа в горелку или резак необходимо вращать по часовой стрелке регулирующий винт 12, который ввертывается в крышку. Винт сжимает нажимную пружину 11, которая в свою очередь выгибает гибкую резиновую мембрану 1 вверх. При этом передаточный диск со штоком сжимает обратную пружину 5, поднимая клапан 7, который открывает отверстие для прохода газа в камеру низкого давления 10. Открыванию клапана препятствует не только давление газа в камере высокого давления, но и пружина 5, имеющая меньшую силу, чем пружина 11. Автоматическое поддержание рабочего давления на заданном уровне происходит следующим образом. Если отбор газа в горелку или ре-

зак уменьшится, то давление в камере низкого давления повысится, нажимная пружина 11 сожмётся и мембрана 1 выправится, а передаточный диск со штоком 2 опустится и редуцирующий клапан 7 под действием пружины 5 прикроет седло клапана, уменьшив подачу газа в камеру низкого давления. При увеличении отбора газа процесс будет автоматически повторяться. Давление в камере высокого давления 6 измеряется манометром 4, а в камере низкого давления 10 – манометром 9. Если давление в рабочей камере повысится сверх нормы, то при помощи предохранительного клапана 8 произойдет сброс газа в атмосферу.

Для выполнения сварки применяется сварочный инструмент, который называется горелка. В инжекторной горелке (рис. 8.5) кислород идёт через ниппель 10 и трубку 5, расположенную внутри рукоятки А, и поступает в сопло инжектора 13. За счёт создаваемого им разрежения ацетилен, поступающий через ниппель 11, подсасывается в смесительную камеру, где образуется горючая смесь, которая, выходя из мундштука 16, сгорает. При этом образуется сварочное пламя. На корпусе 1 расположены кислородный 2 и ацетиленовый 3 вентили для регулирования скорости подачи газов в смесительную камеру. Сменный наконечник Б присоединён к корпусу горелки накидной гайкой 17.

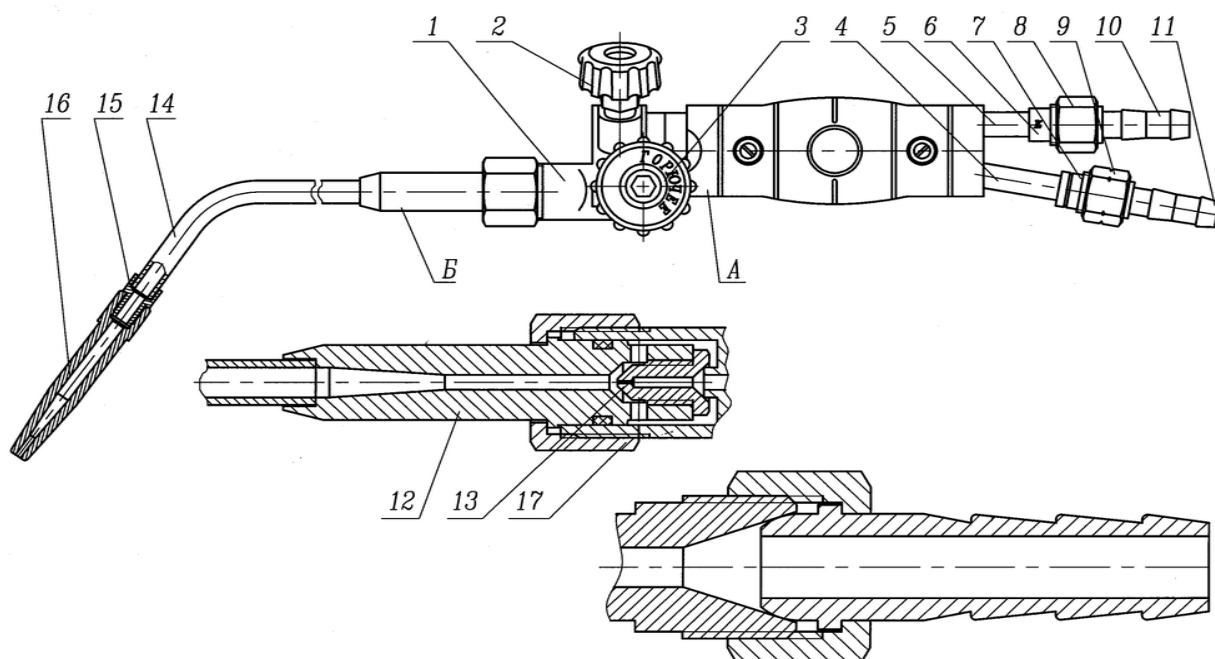


Рис. 8.5. Инжекторная горелка:

- А – ствол; Б – наконечник; 1 – корпус; 2 – вентиль кислорода;
- 3 – вентиль горючего газа; 4, 5 – трубки; 6, 7 – штуцеры;
- 8, 9 – накидные гайки; 10, 11 – ниппели; 12 – смесительная камера;
- 13 – инжектор; 14 – трубка; 15 – ниппель; 16 – мундштук;
- 17 – накидная гайка

Пламя (рис. 8.6) имеет три разновидности в зависимости от состава горючей смеси, характеризуемого коэффициентом β :

- нормальное: $\beta = 1,0$;
- окислительное: $\beta > 1,0$;
- науглероживающее: $\beta < 1,0$.

$$\beta = \frac{O_2}{C_2H_2}$$

Наиболее широко используется нормальное пламя. Окислительное применяется при сварке латуни или для подогрева изделия. Восстановительным пламенем пользуются, чтобы упрочнить поверхностные слои изделия.

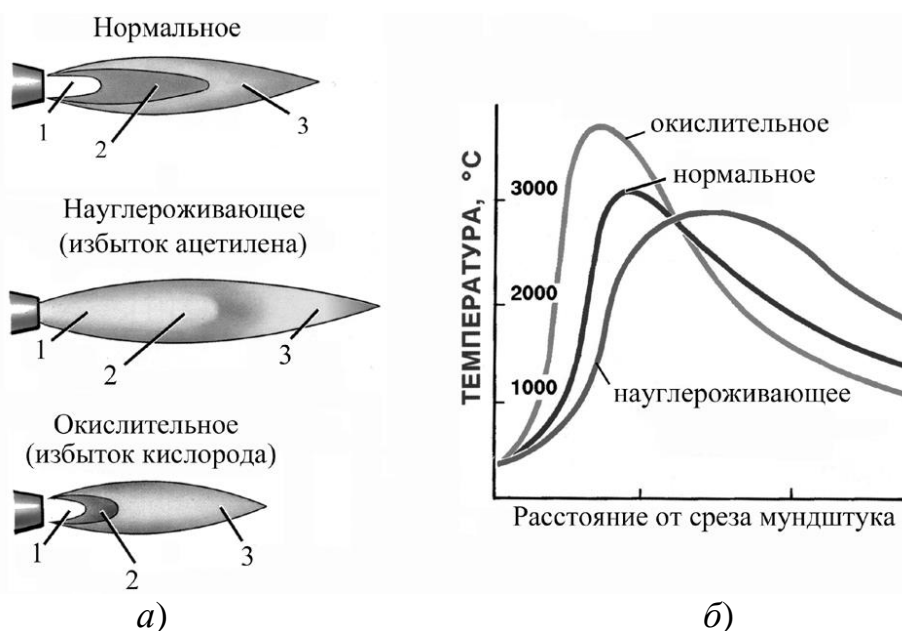


Рис. 8.6. Строение и виды газового пламени (а) и их температурная характеристика (б): 1 – ядро; 2 – восстановительная зона; 3 – факел

8.2. Порядок выполнения работы

Для изучения влияния вида пламени на качество сварного шва в работе используются две стальные пластины. Каждым видом пламени они провариваются на участке, равном одной трети длины шва. Затем изучается излом в местах сварки. Параметры режима и данные визуального наблюдения заносятся в табл. 8.1. Диаметр присадочного прутка равен половине толщины изделия.

Мощность пламени определяется по зависимости, л/ч:

$$V_{C_2H_2} = k \cdot \delta,$$

где $V_{C_2H_2}$ – расход ацетилена, л/ч;

k – коэффициент пропорциональности, $k = 130$;

δ – толщина изделия.

Таблица 8.1

Параметры режима сварки

Материал	Толщина δ , мм	Тип горелки	Номер накопечника	Диаметр присадочно-го прутка d , мм	Мощность пламени $V_{C_2H_2}$, л/ч	Скорость сварки V , м/ч	Вид пламени	Наличие дефектов
							нормальное	
							окислительное	
							науглероживающее	

Скорость сварки определяется ориентировочно в зависимости от толщины свариваемого изделия и рассчитывается исходя из зафиксированного времени сварки.

8.3. Контрольные вопросы

1. Как работает газовый генератор?
2. Как работает газовый редуктор?
3. Каково назначение водяного затвора?
4. Как определить содержание газов в баллоне?
5. Как влияет вид пламени на качество сварного шва?

9. ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФЕКТОВ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Цель работы: развитие практических навыков в обращении с оборудованием и приборами, предназначенными для контроля сварных швов и наплавов.

9.1. Содержание работы

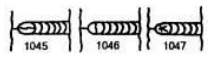
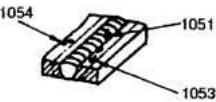

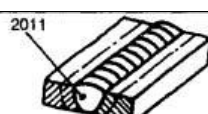

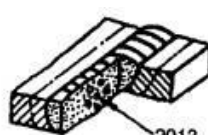

Контроль качества сварных соединений имеет важнейшее значение среди элементов технологического процесса изготовления или ремонта деталей и конструкций в целом. Целью предварительного контроля является проверка подготовки производства к выполнению сборочно-сварочных работ (материалы, приборы, оборудование и т.д.). Текущий контроль обеспечивает проверку правильности выполнения технологии сборки-сварки в процессе изготовления изделий (параметры режима сварки, показания измерительных приборов, внешний вид шва и т.д.). Окончательный контроль даёт оценку качества изготовленного изделия. При этом осуществляются механические испытания, исследования специальных свойств металла шва (износ и коррозионная стойкость, жаропрочность и др.) и поиск дефектов с помощью физических методов: гамма- и рентгенографии, акустических, магнитных, электромагнитных и др.

Основные дефекты сварки и причины их образования представлены в табл. 9.1 согласно ГОСТ 30242.

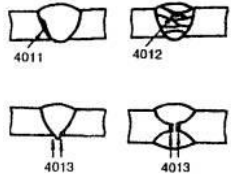
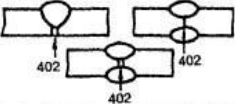
Таблица 9.1

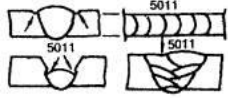
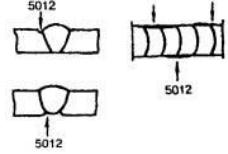
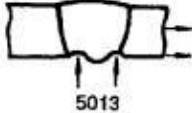
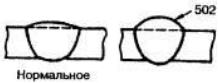
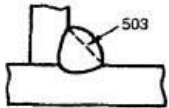
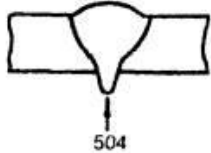
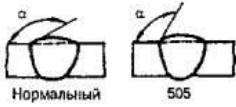
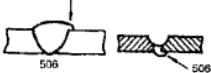

Дефекты соединений при сварке металлов плавлением

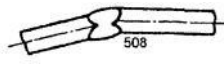
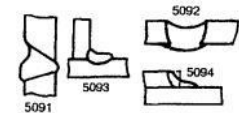
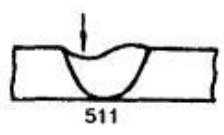
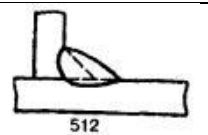
Обозначение дефекта		Наименование дефекта	Определение и/или пояснение дефекта	Рисунки сварных швов и соединений с дефектами
цифровое	используемое МИС*			
Группа 1. Трещины				
100	Е	Трещина	Несплошность, вызванная местным разрывом шва, который может возникнуть в результате охлаждения или действия нагрузок	
1001		Микротрещина	Трещина, имеющая микроскопические размеры, которую обнаруживают физическими методами не менее чем при пятидесятикратном увеличении	
101	Еа	Продольная трещина	Трещина, ориентированная параллельно оси сварного шва. Она может располагаться:	
1011			в металле сварного шва;	
1012			на границе сплавления;	
1013			в зоне термического влияния;	
1014			в основном металле	
102	Еб	Поперечная трещина	Трещина, ориентированная поперек оси сварного шва. Она может располагаться:	
1021			в металле сварного шва;	
1023			в зоне термического влияния;	
1024			в основном металле	
103	Е	Радиальные трещины	Трещины, радиально расходящиеся из одной точки. Они могут быть:	
1031			в металле сварного шва;	
1033			в зоне термического влияния;	
1034			в основном металле	

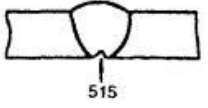
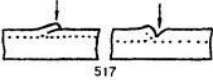
Обозначение дефекта		Наименование дефекта	Определение и/или пояснение дефекта	Рисунки сварных швов и соединений с дефектами
цифровое	используемое МИС*			
104	Ес	Трещина в кратере	Трещина в кратере сварного шва, которая может быть:	
1045			продольной;	
1046			поперечной;	
1047			звездообразной	
105	Е	Раздельные трещины	Группа трещин, которые могут располагаться:	
1051			в металле сварного шва;	
1053			в зоне термического влияния;	
1054			в основном металле	
106	Е	Разветвленные трещины	Группа трещин, возникших из одной трещины. Они могут располагаться:	
1061			в металле сварного шва;	
1063			в зоне термического влияния;	
1064			в основном металле	
Группа 2. Поры				
200	А	Газовая полость	Полость произвольной формы, образованная газами, задержанными в расплавленном металле, которая не имеет углов	
2011	Аа	Газовая пора	Газовая полость обычно сферической формы	
2012		Равномерно распределенная пористость	Группа газовых пор, распределенных равномерно в металле сварного шва. Следует отличать от цепочки пор (2014)	
2013		Скопление пор	Группа газовых полостей (три или более), расположенных кучно с расстоянием между ними менее трех максимальных размеров большей из полостей	
2014		Цепочка пор	Ряд газовых пор, расположенных в линию, обычно параллельно оси сварного шва, с расстоянием между ними менее	

Обозначение дефекта		Наименование дефекта	Определение и/или пояснение дефекта	Рисунки сварных швов и соединений с дефектами
цифровое	используемое МИС*			
			трех максимальных размеров большей из пор	
2015	Ab	Продолговатая полость	Несплошность, вытянутая вдоль оси сварного шва. Длина несплошности не менее чем в два раза превышает высоту	
2016	Ab	Свищ	Трубчатая полость в металле сварного шва, вызванная выделением газа. Форма и положение свища определяются режимом затвердевания и источником газа. Обычно свищи группируются в скопления и распределяются елочкой	
2017		Поверхностная пора	Газовая пора, которая нарушает сплошность поверхности сварного шва	
202	R	Усадочная раковина	Полость, образующаяся вследствие усадки во время затвердевания	
2024	K	Кратер	Усадочная раковина в конце валика сварного шва, не заваренная до или во время выполнения последующих проходов	
Группа 3. Твердые включения				
300	Ba	Твердое включение	Твердые инородные вещества металлического или неметаллического происхождения в металле сварного шва. Включения, имеющие хотя бы один острый угол, называются остроугольными включениями	
301		Шлаковое включение	Шлак, попавший в металл сварного шва. В зависимости от условий образования такие включения могут быть:	
3011			линейными;	

Обозначение дефекта		Наименование дефекта	Определение и/или пояснение дефекта	Рисунки сварных швов и соединений с дефектами
цифровое	используемое МИС*			
3012			разобщенными;	
3013			прочими	
302	G	Флюсовое включение	Флюс, попавший в металл сварного шва. В зависимости от условий образования такие включения могут быть:	См. 3011-3013
3021			линейными;	
3022			разобщенными;	
3023			прочими	
303	J	Оксидное включение	Оксид металла, попавший в металл сварного шва во время затвердевания	
304	H	Металлическое включение	Частица инородного металла, попавшая в металл сварного шва. Различают частицы из:	
3041			вольфрама;	
3042			меди;	
3043			другого металла	
Группа 4. Несплавление и непровар				
401		Несплавление	Отсутствие соединения между металлом сварного шва и основным металлом или между отдельными валиками сварного шва. Различают несплавления:	
4011	по боковой стороне;			
4012	между валиками;			
4013	в корне сварного шва			
402	D	Непровар (неполный провар)	Несплавление основного металла по всей длине шва или на участке, возникающее вследствие неспособности расплавленного металла проникнуть в корень соединения	
Группа 5. Нарушение формы шва				
500		Нарушение формы	Отклонение формы наружных поверхностей сварного шва или геометрии соединения от установленного значения	

Обозначение дефекта		Наименование дефекта	Определение и/или пояснение дефекта	Рисунки сварных швов и соединений с дефектами
цифровое	используемое МИС*			
5011	F	Подрез непрерывный	Углубление продольное на наружной поверхности валика сварного шва, образовавшееся при сварке	
5012	F			
5013		Усадочная канавка	Подрез со стороны корня одностороннего сварного шва, вызванный усадкой по границе сплавления (см. также 512)	
502		Превышение выпуклости стыкового шва	Избыток наплавленного металла на лицевой стороне стыкового шва сверх установленного значения	
503		Превышение выпуклости углового шва	Избыток наплавленного металла на лицевой стороне углового шва (на всей длине или на участке) сверх установленного значения	
504		Превышение проплава	Избыток наплавленного металла на обратной стороне стыкового шва сверх установленного значения	
5041		Местное превышение проплава	Местный избыточный проплав сверх установленного значения	
505		Неправильный профиль сварного шва	Угол α между поверхностью основного металла и плоскостью, касательной к поверхности сварного шва, менее установленного значения	
506		Наплав	Избыток наплавленного металла сварного шва, натекающий на поверхность основного металла, но не сплавленный с ним	
507		Линейное смещение	Смещение между двумя свариваемыми элементами, при котором их поверхности располагаются	

Обозначение дефекта		Наименование дефекта	Определение и/или пояснение дефекта	Рисунки сварных швов и соединений с дефектами
цифровое	используемое МИС*			
			параллельно, но не на требуемом уровне	
508		Угловое смещение	Смещение между двумя свариваемыми элементами, при котором их поверхности располагаются под углом, отличающимся от требуемого	
509		Натек	Металл сварного шва, осевший вследствие действия силы тяжести и не имеющий сплавления с соединяемой поверхностью	
5091		Натек	В зависимости от условий это может быть: натек при горизонтальном положении сварки;	
5092			натек в нижнем или потолочном положении сварки;	
5093			натек в угловом сварном шве;	
5094			натекание в шве нахлесточного соединения	
510			Прожог	
511		Не полностью заполненная разделка кромок	Продольная непрерывная или прерывистая канавка на поверхности сварного шва из-за недостаточности присадочного металла при сварке	
512		Чрезмерная асимметрия углового шва	Чрезмерное превышение размеров одного катета над другим	
513		Неравномерная ширина шва	Отклонение ширины от установленного значения вдоль сварного шва	
514		Неровная поверхность	Грубая неравномерность формы поверхности усиления шва по длине	

Обозначение дефекта		Наименование дефекта	Определение и/или пояснение дефекта	Рисунки сварных швов и соединений с дефектами
цифровое	используемое МИС*			
515		Вогнутость корня шва	Неглубокая канавка со стороны корня одностороннего сварного шва, образовавшаяся вследствие усадки (см. также 5013)	
516		Пористость в корне сварного шва	Наличие пор в корне сварного шва вследствие возникновения пузырьков во время затвердевания металла	
517		Возобновление	Местная неровность поверхности в месте возобновления сварки	
Группа 6. Прочие дефекты				
600		Прочие дефекты	Все дефекты, которые не могут быть включены в группы 1-5	
601		Случайная дуга	Местное повреждение поверхности основного металла, примыкающего к сварному шву, возникшее в результате случайного горения дуги	
602		Брызги металла	Капли наплавленного или присадочного металла, образовавшиеся во время сварки и прилипшие к поверхности затвердевшего металла сварного шва или околошовной зоны основного металла	
6021		Вольфрамовые брызги	Частицы вольфрама, выброшенные из расплавленной зоны электрода на поверхность основного металла или затвердевшего металла сварного шва	
603		Поверхностные задиры	Повреждение поверхности, вызванное удалением временно приваренного приспособления	
606		Утонение ме-	Уменьшение толщины	

Обозначение дефекта		Наименование дефекта	Определение и/или пояснение дефекта	Рисунки сварных швов и соединений с дефектами
цифровое	используемое МИС*			
		талла	металла до значения менее допустимого при механической обработке	

* Международный институт сварки

Дефекты классифицированы на шесть следующих групп:

- 1 - трещины;
- 2 - полости, поры;
- 3 - твердые включения;
- 4 - несплавления и непровары;
- 5 - нарушение формы шва;
- 6 - прочие дефекты, не включенные в вышеперечисленные группы.

При проверке качества сварного соединения наиболее целесообразно использовать комбинированный контроль – рентгенографический и ультразвуковой, чаще всего практикуемый при проверке наиболее ответственных сварных конструкций: несущих ферм мостов, опорных балок строительных конструкций, котлов и др.

Дефектоскоп, схема которого представлена на рис. 9.1, работает следующим образом.

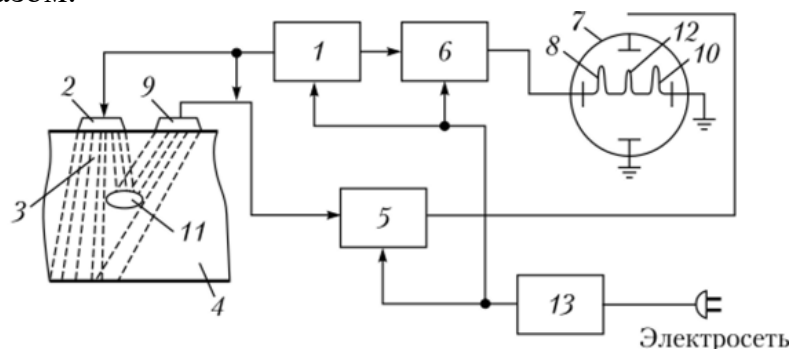


Рис. 9.1. Блок-схема импульсного ультразвукового дефектоскопа с приемом отраженного сигнала: 1 – импульсный генератор; 2 – излучающая пластинка; 3 – ультразвуковой пучок; 4 – исследуемое изделие; 5 – усилитель; 6 – генератор развёртки; 7 – электронно-лучевая трубка; 8 – начальный импульс;

9 – приёмная пластинка; 10 – донный импульс; 11 – дефект;
12 – импульс от дефекта; 13 – блок питания

От импульсного генератора 1 на излучающую пластинку 2 подаётся кратковременный импульс переменного напряжения (продолжительностью 3...5 мкс). Под действием его в пластинке возбуждаются колебания, которые в виде узкого пучка ультразвука 3 передаются в исследуемое изделие 4. Одновременно с подачей переменного напряжения на излучающую пла-

стинку такой же импульс подается в усилитель 5, а также в специальное устройство 6, заставляющее электронный луч в электронно-лучевой трубке 7 быстро передвигаться по горизонтали слева направо.

Этот луч прочеркивает светящуюся линию на экране трубки, где появлялся всплеск 8, называемый начальным импульсом. При отсутствии дефектов в исследуемом изделии узкий ультразвуковой пучок 3 пройдет до противоположной его поверхности, отразится от нее и, дойдя до первой (верхней на рисунке) поверхности, попадет на приемную пластинку 9 и заставит ее колебаться. Возникшая на приемной пластине разность потенциалов усиливается. Усиленные сигналы, подключенные к электронно-лучевой трубке, вызовут на правой стороне ее экрана всплеск 10, называемый донным импульсом.

Если внутри исследуемого изделия есть дефект 11, то ультразвук дойдет до него раньше, чем до противоположной грани, частично отразится от границы дефекта и попадет на приемную пластину раньше. Вследствие этого на экране трубки между начальным импульсом 8 и донным импульсом 10 возникнет третий импульс 12, показывающий присутствие дефекта в исследуемом изделии. По расстоянию между импульсами, отраженными на экране трубки, можно определить глубину залегания дефекта, а положение искательных щупов на поверхности изделия показывает расположение дефекта в горизонтальной проекции. Дефектоскоп питается от сети переменного тока через специальный блок питания 13.

Металлографический контроль необходим для исследования структуры металла шва и зоны термического влияния (ЗТВ). Для надёжности контроля зачастую пользуются различными методами определения макро- и микротвёрдости. Структура и твёрдость сварных соединений из горяче- и холоднокатаной малоуглеродистой стали показаны на рис. 9.2. Характеристика участков сварного шва приведена в табл. 9.2.

Таблица 9.2

Строение зоны термического влияния сварного шва

№	Структура металла	Температура, °С	Ширина, мм
1	Столбчатая, литая, с пониженными механическими свойствами	1530 ± 5	½ ширины шва
2	Рост зерна, образование игольчатой структуры с повышенной хрупкостью	1530...1470	0,1...0,4
3	Крупнозернистое строение с пониженной ударной вязкостью и пластичностью	1470...1100	3...4
4	Измельчение зерна, повышение механических свойств	1100...880	0,2...4,0
5	Смешанное строение из мелких и крупных зёрен с пониженными механическими свойствами	880...720	0,1...1,0
6	Восстановление формы и размеров зёрен металла	720...510	0,1...1,5
7	Структурных изменений не имеет	510...200	0,8...12

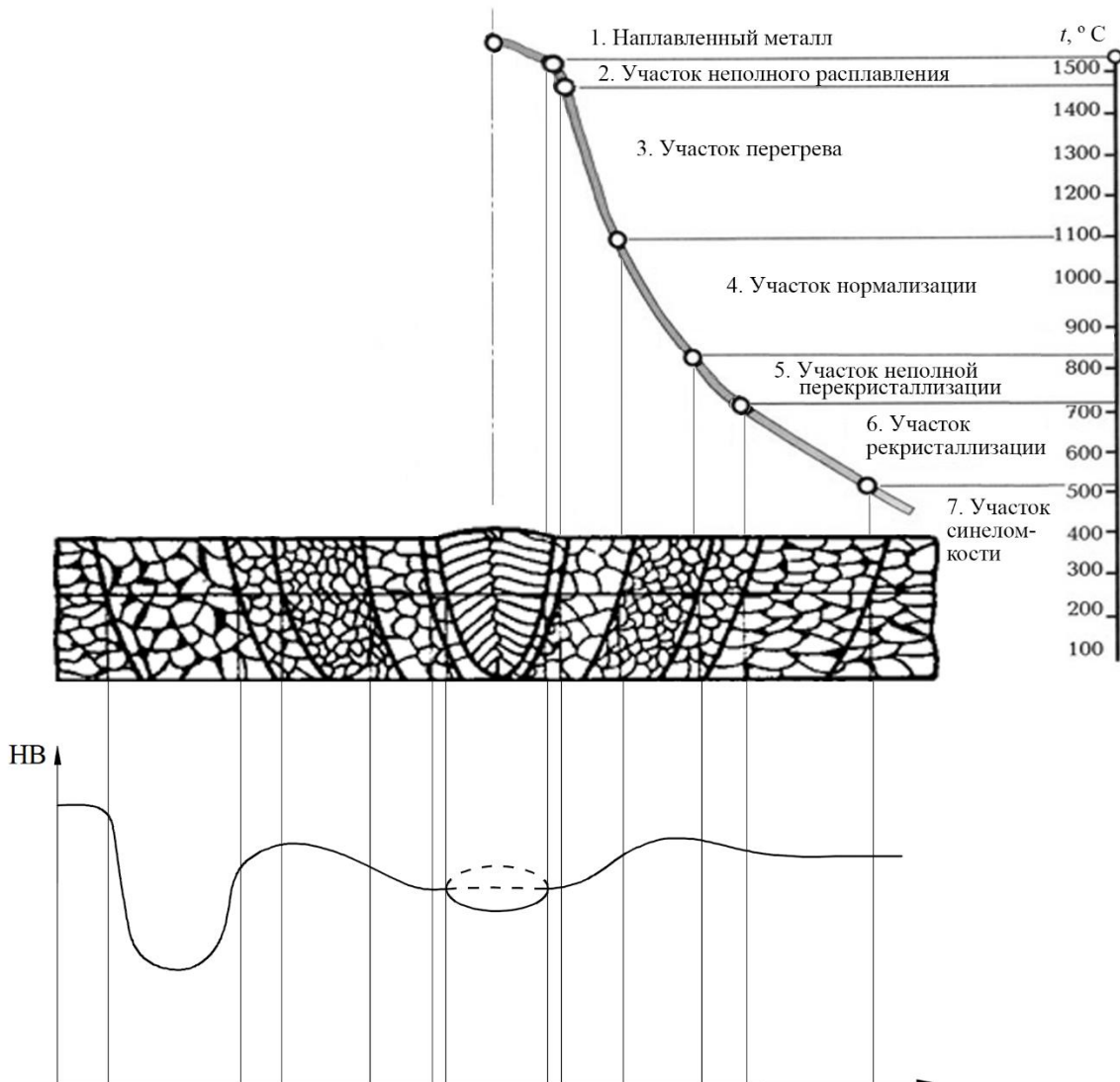


Рис. 9.2. Структура и твёрдость сварных соединений малоуглеродистой нелегированной стали: горячекатаной (справа) и холоднокатаной (слева)

9.2. Контрольные вопросы

1. Какие дефекты могут обнаруживаться в сварном шве или при наплавке?
2. Из каких основных элементов состоит ультразвуковой дефектоскоп?
3. Как осуществляется поиск дефекта сварки с помощью ультразвукового метода?
4. В чём принцип ультразвукового контроля несплошностей материала?
5. На какие участки делится зона термического влияния сварки (наплавки)?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Арзамасов В.Б. Материаловедение: учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по машиностроительным направлениям / В. Б. Арзамасов, А. А. Черепашин. – М.: Академия, 2013. – 172 с.
2. Гуляев А.П. Металловедение / А.П. Гуляев – М.: Книга по Требованию, 2013. – 542 с
3. Диаграммы состояния двойных и многокомпонентных систем на основе железа: Справ. изд. / Банных О.А., Будберг П.Б., Алисова С.П. и др. М.: Металлургия, 1986 г. 440 с.
4. Материаловедение: учебное пособие по лабораторным работам по дисциплине «Материаловедение». Часть 1 / Д.А. Жуков, Д.П. Кононов, Н.Ю. Шадрина, А.А. Соболев. – СПб.: ПГУПС, 2010. – 72 с.
5. Материаловедение: учебное пособие по лабораторным работам по дисциплине «Материаловедение». Часть 2 / А.А. Воробьев, Д.А. Жуков, Д.П. Кононов, Н.Ю. Шадрина, А.А. Соболев. – СПб.: ПГУПС, 2011. – 78 с.
6. Юхин Н.А. Механизированная дуговая сварка плавящимся электродом в защитных газах / Н.А. Юхин. – М.: Изд-во «Союзло», 2008. – 72 с.
7. Юхин Н.А. Ручная дуговая сварка неплавящимся электродом в защитных газах / Н.А. Юхин. – М.: Изд-во «Союзло», 2007. – 48 с.
8. Лосев В.А. Иллюстрированное пособие сварщика / В.А. Лосев, Н.А. Юхин. – М.: Изд-во «Союзло», 2000. – 58 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица твердости по Бринеллю

Диаметр лунки, мм	Твердость НВ, МПа	Диаметр лунки, мм	Твердость НВ, МПа
3,00	4150	4,80	1560
3,05	4010	4,85	1520
3,10	3880	4,90	1490
3,15	3750	4,95	1460
3,20	3630	5,00	1430
3,25	3520	5,05	1400
3,30	3410	5,10	1370
3,35	3310	5,15	1340
3,40	3210	5,20	1310
3,45	3110	5,25	1280
3,50	3020	5,30	1260
3,55	2930	5,35	1230
3,60	2850	5,40	1210
3,65	2770	5,45	1180
3,70	2690	5,50	1160
3,75	2620	5,55	1140
3,80	2550	5,60	1110
3,85	2480	5,65	1090
3,90	2410	5,70	1070
3,95	2350	5,75	1050
4,00	2290	5,80	1030
4,05	2230	5,85	1010
4,10	2170	5,90	992
4,15	2120	5,95	973
4,20	2070	6,00	955
4,25	2010	6,05	937
4,30	1970	6,10	920
4,35	1920	6,15	903
4,40	1870	6,20	887
4,45	1830	6,25	871
4,50	1790	6,30	855
4,55	1740	6,35	840
4,60	1700	6,40	825
4,65	1670	6,45	810
4,70	1630	6,50	796
4,75	1590		

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Таблица сопоставления единиц твердости

<i>HV</i>	<i>HB</i>	<i>HRA</i>	<i>HRB</i>	<i>HRC</i>	<i>HV</i>	<i>HB</i>	<i>HRA</i>	<i>HRB</i>	<i>HRC</i>
2263	-	90	-	-	217	2170	60	98	17
2044	-	89	-	-	212	2120	59	97	15
1839	-	88	-	-	207	2070	59	95	14
1648	-	87	-	-	201	2010	58	94	13
1486	-	86	-	-	197	1970	58	93	12
1346	-	86	-	-	192	1920	57	92	11
1224	7800	84	-	72	187	1870	57	91	9
1116	7450	83	-	70	183	1830	56	90	8
1022	7120	82	-	68	179	1790	56	90	7
941	6820	81	-	66	174	1740	55	89	6
868	6530	80	-	64	170	1700	55	88	4
804	6270	79	-	62	167	1670	54	87	3
746	6010	78	-	60	163	1630	53	86	2
694	5780	78	-	58	159	1590	53	85	1
650	5550	77	-	56	156	1560	52	84	0
606	5340	76	-	54	152	1520	-	83	-
587	5140	75	-	52	149	1490	-	82	-
551	4950	74	-	50	146	1460	-	81	-
534	4770	74	-	49	143	1430	-	80	-
502	4610	73	-	48	140	1400	-	79	-
474	4440	73	-	46	137	1370	-	78	-
460	4290	72	-	45	134	1340	-	77	-
435	4150	72	-	43	131	1310	-	76	-
423	4010	71	-	42	128	1280	-	75	-
401	3880	71	-	41	126	1260	-	74	-
390	3750	70	-	40	123	1230	-	73	-
380	3630	70	-	39	121	1210	-	72	-
361	3520	69	-	38	118	1180	-	70	-
344	3410	68	-	36	116	1160	-	65	-
334	3310	67	-	35	115	1150	-	64	-
322	3210	67	-	33	111	1110	-	63	-
311	3110	66	-	32	110	1100	-	62	-
302	3020	66	-	31	109	1090	-	61	-
293	2930	65	-	30	107	1070	-	60	-
285	2850	65	-	29	106	1060	-	59	-
277	2770	64	-	28	105	1050	-	58	-
269	2690	64	-	27	103	1030	-	57	-
262	2620	63	-	26	101	1010	-	56	-
255	2550	63	-	25	99	990	-	55	-
248	2480	62	-	24	98	980	-	54	-
241	2410	62	102	23	97	970	-	53	-
235	2350	61	101	21	96	960	-	52	-
229	2290	61	100	20	95	950	-	51	-
223	2230	60	99	19			-	50	-

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Исходные данные к контрольному заданию

№ варианта	Сталь:		Содержание углерода в белом чугуне	№ варианта	Сталь:		Содержание углерода в белом чугуне
	марка	ГОСТ			марка	ГОСТ	
1	Ст0	380	2,25	28	У8ГА	1435	3,65
2	Ст1кп	380	2,30	29	У9А	1435	3,70
3	Ст1пс	380	2,35	30	У10А	1435	3,75
4	Ст1сп	380	2,40	31	У12А	1435	3,80
5	Ст2кп	380	2,45	32	05кп	1050	3,85
6	Ст2пс	380	2,50	33	08кп	1050	3,90
7	Ст2сп	380	2,55	34	08пс	1050	3,95
8	Ст3кп	380	2,60	35	08	1050	4,00
9	Ст3пс	380	2,65	36	10кп	1050	4,05
10	Ст3сп	380	2,70	37	10пс	1050	4,10
11	Ст3Гпс	380	2,75	38	10	1050	4,15
12	Ст3Гсп	380	2,80	39	11кп	1050	4,20
13	Ст4кп	380	2,85	40	15кп	1050	4,25
14	Ст4пс	380	2,90	41	15пс	1050	4,30
15	Ст4сп	380	2,95	42	15	1050	4,35
16	Ст5пс	380	3,00	43	18кп	1050	4,40
17	Ст5сп	380	3,05	44	20кп	1050	4,45
18	Ст5Гпс	380	3,10	45	20пс	1050	4,50
19	Ст6пс	380	3,15	46	20	1050	4,55
20	Ст6сп	380	3,20	47	25	1050	4,60
21	У7	1435	3,25	48	30	1050	4,65
22	У8	1435	3,30	49	35	1050	4,70
23	У8Г	1435	3,35	50	40	1050	4,75
24	У9	1435	3,40	51	45	1050	4,80
25	У10	1435	3,45	52	50	1050	4,85
26	У12	1435	3,50	53	55	1050	4,90
27	У7А	1435	3,55	54	58 (55mm)	1050	4,95
28	У8А	1435	3,60	55	60	1050	5,00
56	15Г	4543	5,05	71	15Л	977	5,80
57	20Г	4543	5,10	72	20Л	977	5,85
58	25Г	4543	5,15	73	25Л	977	5,90
59	30Г	4543	5,20	74	30Л	977	5,95
60	35Г	4543	5,25	75	35Л	977	6,00
61	40Г	4543	5,30	76	40Л	977	6,05
62	45Г	4543	5,35	77	45Л	977	6,10
63	50Г	4543	5,40	78	50Л	977	6,15
64	10Г2	4543	5,45	79	20ГЛ	977	6,20
65	30Г2	4543	5,50	80	35ГЛ	977	6,25
66	35Г2	4543	5,55	81	15ГЛ	977	6,30
67	40Г2	4543	5,60	82	30ГЛ	977	6,35
68	45Г2	4543	5,65	83	45ГЛ	977	6,40
69	50Г2	4543	5,70	84	70ГЛ	977	6,45
70	47ГТ	4543	5,75	85	ОС	4728	6,50

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Химический состав и примерное назначение некоторых марок сталей

Марка стали	Массовая доля элементов:		Примерное назначение
	углерода, %	марганца, %	
1	2	3	4
Сталь углеродистая качественная конструкционная (ГОСТ 1050)			
0,5кп	≤ 0,06	≤ 0,40	Тонкие листы для штамповки в холодном состоянии, детали кузовов и кабин, кожухи системы охлаждения, капоты, змеевики, прокладки, шайбы, глушители, гайки, шурупы и др.
0,8кп	0,05-0,12	0,25-0,50	
08пс	0,05-0,11	0,35-0,65	
08	0,05-0,12	0,35-0,65	
10кп	0,07-0,14	0,25-0,50	
10пс, 10	0,07-0,14	0,35-0,65	
11кп	0,05-0,12	0,30-0,50	
15кп	0,12-0,19	0,25-0,50	Корпусы букс для подшипников скольжения и роликовых, предохранитель замка и валик подъёмника автосцепки, корпус автосцепки, тормозные башмаки, трубы карданных передач, вилки переключения передач, поршневые пальцы и др.
15пс, 15	0,12-0,19	0,35-0,65	
20кп	0,17-0,24	0,25-0,50	
20пс, 20	0,17-0,24	0,35-0,65	
25	0,22-0,30	0,50-0,80	Колёсные центры, головки шатунов, центры зубчатых колёс, корпуса букс, остовы электродвигателей, муфты, валики, упорные и установочные кольца, вкладыши подшипников и др.
30	0,27-0,35	0,50-0,80	Полуоси задних мостов, фланцы и вилки карданные, оси, болты, шпильки, шестерни, серьги, цилиндры прессов, поршневые и золотниковые штоки, тяги и др.
35	0,32-0,40	0,50-0,80	
40	0,37-0,45	0,50-0,80	Коленчатые валы, распределительные валы двигателей и компрессоров, штоки, шатуны и головки шатунов, колёса зубчатых передач, шестерни, роторы, оси, поршневые пальцы, ведомые диски сцепления, опорные катки, пальцы звеньев гусениц и др.
45	0,42-0,50	0,50-0,80	
50	0,47-0,55	0,50-0,80	
55	0,52-0,60	0,50-0,80	Цилиндрические и конические пружины, пружинные кольца и шайбы, фрикционные диски, амортизаторы, цанги, тормозные барабаны и ленты, лопатки вентиляторов и др.
58 (55пп)	0,55-0,63	≤ 0,20	
60	0,57-0,65	0,50-0,80	
Сталь углеродистая обыкновенного качества (ГОСТ 380)			
Ст0	≤ 0,023	-	Шайбы, прокладки, заклёпки, гвозди и др.
Ст1кп,	0,06-0,12	0,25-0,50	
Ст1пс,	0,06-0,12	0,25-0,50	
Ст1сп	0,06-0,12	0,25-0,50	
Ст2кп,	0,09-0,15	0,25-0,50	Трубы, заклёпки, стяжки, цементируемые и цинкируемые детали и др.
Ст2пс,	0,09-0,15	0,25-0,50	
Ст2сп	0,09-0,15	0,25-0,50	
Ст3кп,	0,14-0,22	0,30-0,60	Рамы и кузова локомотивов, вагонов, путевых и

Марка стали	Массовая доля элементов:		Примерное назначение
	углерода, %	марганца, %	
Ст3пс,	0,14-0,22	0,40-0,65	дорожных строительных машин, подъёмно-транспортных механизмов, тормозные рачаги и тяги, цементируемые и цианируемые детали и др.
Ст3сп,	0,14-0,22	0,40-0,65	
Ст3Гпс	0,14-0,22	0,80-1,10	
Ст3Гсп	0,14-0,20	0,80-1,10	
Ст4кп,	0,18-0,27	0,40-0,70	Валики, пальцы гусеничных траков, соединительные муфты и др.
Ст4пс,	0,18-0,27	0,40-0,70	
Ст4сп	0,18-0,27	0,40-0,70	
Ст5пс,	0,28-0,37	0,50-0,80	Оси, валы электродвигателей и редукторов, цилиндры прессов, валики под листовые рессоры, шатуны, шестерни, коллекторные болты, серьги, люлечные подвески и др.
Ст5сп	0,28-0,37	0,50-0,80	
Ст5Гпс	0,22-0,30	0,80-1,20	
Ст6пс,	0,38-0,49	0,50-0,80	Шатуны, шестерни, штоки
Ст6сп	0,38-0,49	0,50-0,80	
Сталь инструментальная нелегированная (ГОСТ 1435-99)			
У7	0,65-0,74	0,17-0,33	Стамески, долота, топоры, зубила, обжимки, бойки, кузнечные штампы, слесарно-монтажный инструмент и др.
У7А	0,65-0,74	0,17-0,28	
У8	0,75-0,84	0,17-0,33	Инструмент для обработки дерева: фрезы, зенковки, продольные и дисковые пилы, стамески, долота; накатные ролики, обжимки для заклёпок, бородки, клейма, пассатижи и др.
У8А	0,75-0,84	0,17-0,28	
У8Г, У8ГА	0,80-0,90	0,33-0,58	
У9	0,85-0,94	0,17-0,33	Инструмент для обработки дерева, слесарно-монтажный инструмент, калибры простой формы и др.
У9А	0,85-0,94	0,17-0,28	
У10	0,95-1,09	0,17-0,33	Инструмент для обработки дерева: пилы ручные и машинные, свёрла спиральные; штампы для холодной штамповки, калибры, накатные ролики, шаберы и др.
У10А	0,95-1,09	0,17-0,28	
У12	1,10-1,29	0,17-0,33	Метчики ручные, напильники, шаберы, штампы, калибры, хирургический и гравировальный инструмент, бритвенные ножи и лезвия и др.
У12А	1,10-1,29	0,17-0,28	
Сталь легированная конструкционная (ГОСТ 4543)			
15Г	0,12-0,19	0,70-1,00	То же, что для сталей по ГОСТ 1050 с соответствующим содержанием углерода
20Г	0,17-0,24	0,70-1,00	
25Г	0,22-0,30	0,70-1,00	
30Г	0,27-0,35	0,70-1,00	
35Г	0,32-0,40	0,70-1,00	
40Г	0,37-0,45	0,70-1,00	
45Г	0,42-0,50	0,70-1,00	
50Г	0,48-0,56	0,70-1,00	
10Г2	0,07-0,15	1,20-1,60	
30Г2	0,26-0,35	1,40-1,80	
35Г2	0,31-0,39	1,40-1,80	

Марка стали	Массовая доля элементов:		Примерное назначение
	углерода, %	марганца, %	
40Г2	0,36-0,44	1,40-1,80	
45Г2	0,41-0,49	1,40-1,80	
50Г2	0,46-0,55	1,40-1,80	
47ГТ	0,44-0,52	0,90-1,20	
Сталь литая конструкционная (ГОСТ 977)			
15Л	0,12-0,20	0,45-0,90	Диски, звездочки, зубчатые венцы, барабаны и др. детали, к которым предъявляются требования по прочности и вязкости, работающие под действием статических и динамических нагрузок
20Л	0,17-0,25	0,45-0,90	
25Л	0,22-0,30	0,45-0,90	
30Л	0,27-0,35	0,45-0,90	
35Л	0,32-0,40	0,45-0,90	
40Л	0,37-0,45	0,45-0,90	
45Л	0,42-0,50	0,45-0,90	
50Л	0,47-0,55	0,45-0,90	
20ГЛ	0,15-0,25	1,20-1,60	
35ГЛ	0,30-0,40	1,20-1,60	
15ГЛ	0,12-0,18	0,70-1,00	
30ГЛ	0,25-0,32	1,40-1,70	
45ГЛ	0,40-0,50	0,80-1,20	
70ГЛ	0,65-0,80	1,10-1,60	
Сталь осевая (ГОСТ 4728)			
ОС	0,42-0,50	0,60-0,90	Оси локомотивов, электропоездов, дизель- и электропоездов, вагонов железных дорог и вагонов метрополитена