

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ**

**ВЯТСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

Факультет автоматизации
машиностроения

Кафедра металловедения
и технологии материалов

**ПРАКТИКУМ ПО
МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЮ**

Часть I

*Рекомендовано Ученым советом
Вятского государственного
университета в качестве учебного
пособия*

Киров 2004

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Вятского государственного университета

УДК 620.22:621.7: (07)
К 75

Рецензент: кандидат технических наук, доцент кафедры технологии
автоматизированного машиностроения Ю.Л.Апатов

Кочеткова Л.П. Практикум по материаловедению. Часть 1: Учебное пособие/Л.П.
Кочеткова, Л.Я. Кабешова. – Киров: Издательство ВятГУ, 2004. – 64с.

Учебное пособие предназначено для студентов-механиков специальностей ТМ и
ММД. Оно соответствует программе по дисциплине «Материаловедение» для
указанных специальностей.

В учебном пособии приведены лабораторные работы по основным разделам
курса, в которых кратко изложены теоретические положения, поставлены задачи
работы и порядок ее выполнения.

Редактор Е.Г. Козвонина

Подписано в печать

Бумага офсетная

Заказ №390

Тираж 102.

Усл.печ.л. 4,1

Печать матричная

Бесплатно.

Текст напечатан с оригинала-макета, представленного авторами.

610000, г. Киров, ул. Московская, 36

Оформление обложки, изготовление – ПРИП ВятГУ.

© Л.П. Кочеткова, 2004

© Л.Я. Кабешова, 2004

© Вятский государственный университет, 2004

Содержание:

Лабораторная работа №1. ПОСТРОЕНИЕ ДИАГРАММЫ СОСТОЯНИЯ «СВИНЕЦ - СУРЬМА» МЕТОДОМ ТЕРМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА.....	4
1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ	4
2. ЗАДАНИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ	11
3. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	11
Лабораторная работа №2. ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ «ЖЕЛЕЗО-УГЛЕРОД»	13
1. АНАЛИЗ ДИАГРАММЫ «ЖЕЛЕЗО-УГЛЕРОД»	13
2. ЗАДАНИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ	23
3. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	23
Лабораторная работа № 3. МИКРОСТРУКТУРА УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ И СЕРЫХ ЧУГУНОВ	24
1. УГЛЕРОДИСТЫЕ СТАЛИ	24
2 СЕРЫЕ ЧУГУНЫ	28
3. ЗАДАНИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ	33
4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	34
Лабораторная работа №4. ЗАКАЛКА И ОТПУСК УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ	35
1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ	35
2. ЗАДАНИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ	40
3. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	41
Лабораторная работа №5. ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СТАЛИ	42
1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ	42
2. ЗАДАНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ	50
3. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	51
4. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ	51
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	52

Лабораторная работа №1. ПОСТРОЕНИЕ ДИАГРАММЫ СОСТОЯНИЯ «СВИНЕЦ - СУРЬМА» МЕТОДОМ ТЕРМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Цель работы: научиться определять методом термического анализа критические точки заданных сплавов системы по кривым охлаждения этих сплавов; усвоить принцип построения диаграмм состояния и их анализ; опытным путем построить диаграмму состояния «свинец-сурьма».

1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ

1.1. Диаграмма состояния представляет собой графическое изображение состояния сплавов в зависимости от температуры и концентрации компонентов сплава. По ней можно установить, какие превращения происходят в сплавах при нагреве и охлаждении; определить, при каких температурах произойдет затвердевание и расплавление любого сплава данной системы, что необходимо при назначении режимов термической обработки, горячей обработки давлением и других процессов. Поскольку важнейшие свойства сплавов обусловлены их фазовым и структурным состоянием, важно знать не только, из каких фаз состоит сплав, но и какую долю всей массы сплавов занимает каждая фаза, а также какова форма и размеры кристаллов отдельных фаз (микроструктура).

Дадим определение терминам и понятиям, используемым при изучении диаграмм состояния.

Система – совокупность бесконечно большого числа сплавов, образованных данными элементами. Когда говорят «система Cu-Zn» или «система Fe-C», это значит, что изучают сплавы, состоящие из этих элементов.

Компоненты – это вещества, образующие систему, т.е. сплав. Компонентами могут быть чистые металлы и неметаллы (элементы) или химические соединения. Чистые металлы представляют однокомпонентные системы, сплавы из двух компонентов – двухкомпонентные системы и т.д.

Фаза – однородная часть системы, отделенная от другой части системы поверхностью раздела, при переходе через которую свойства вещества изменяются скачком. В сплавах фазами могут быть чистые металлы, жидкие или твердые растворы, химические соединения. Фазы отличаются одна от другой по агрегатному состоянию (жидкая медь и твердая медь – две разные фазы), химическому составу, типу кристаллической решетки (α Fe с решеткой ОЦК и γ Fe с решеткой ГЦК – две разные фазы).

Под *структурой* понимают форму, размеры и характер взаимного расположения соответствующих фаз в металлах и сплавах. Структурными составляющими сплава называют обособленные части сплава (зерна), имеющие одинаковое строение с присущими им характерными особенностями. Структура может состоять из одной или нескольких фаз. Структура формируется при кристаллизации металлов и сплавов. Она зависит от того, как взаимодействуют друг с другом компоненты и фазы.

Диаграммы состояния строят для условий равновесия или условий, достаточно близких к ним.

Равновесными считают условия, при которых процессы протекают обратимо, т.е. в данном случае процессы, протекающие при охлаждении, в точности возмещаются процессами, происходящими при нагреве. Это значит, что если какой-то процесс начался и идет во время охлаждения при данной температуре, то в равновесных условиях при нагреве он должен идти в обратном направлении при той же температуре.

Состояние равновесия может быть достигнуто только при *очень малых скоростях нагрева и охлаждения*.

Диаграммы строят в координатах: температура – концентрация сплавов. Общее содержание обоих компонентов в сплаве равно 100%, а каждая точка на оси абсцисс соответствует сплаву определенного состава (концентрации).

Вид диаграммы состояния зависит от того, как реагируют оба компонента друг с другом в твердом и жидком состояниях, т.е. растворимы ли они в твердом и жидком состояниях, образуют ли они химические соединения или механические смеси.

Диаграммы состояния строят экспериментально, чаще всего на основе результатов термического анализа.

1.2. Термический анализ базируется на построении кривых охлаждения сплавов в координатах «температура – время» и определении по ним критических точек. *Критическими точками* называются температуры, при которых происходят какие-либо фазовые превращения.

Так как фазовые превращения в металлах и сплавах сопровождаются тепловыми эффектами, то на кривых охлаждения можно наблюдать либо остановки (площадки) – тогда фазовые превращения происходят при постоянной температуре, либо перегибы за счет изменения скорости охлаждения – тогда фазовые превращения протекают в интервале температур. Горизонтальные участки на кривой охлаждения являются показателем того, что в системе происходит одно из следующих превращений: первичная кристаллизация и полиморфное превращение в чистых металлах, эвтектическое и эвтектоидное в сплавах. Перегибы на кривой охлаждения позволяют фиксировать температуры начала и конца фазового превращения.

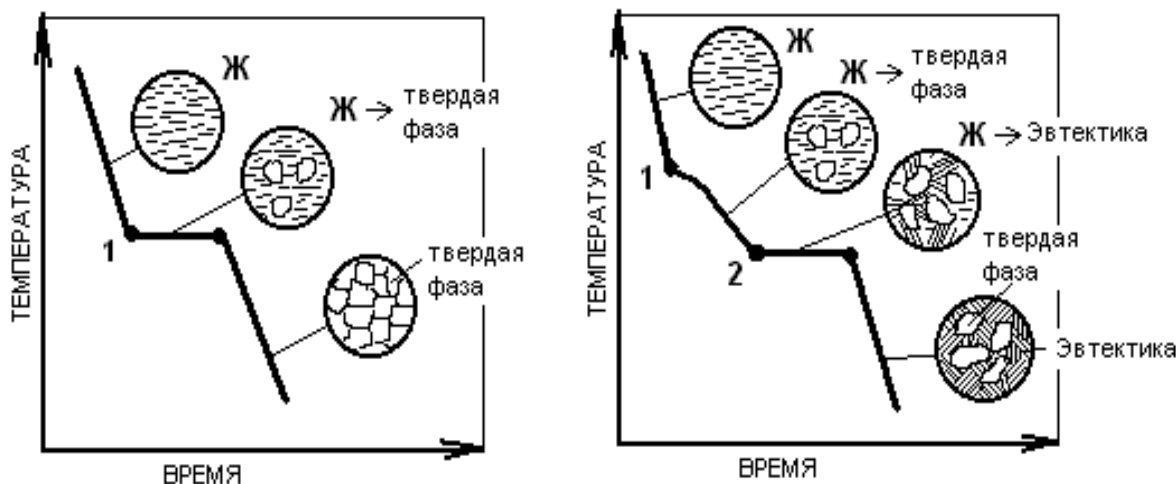


Рисунок 1 – Кривые охлаждения: а – чистых металлов, химических соединений, эвтектических сплавов; б – доэвтектических и заэвтектических сплавов

Кривые охлаждения чистых металлов, химических соединений и эвтектики будут иметь одну критическую точку – площадку (рисунок 1а). Кривые охлаждения доэвтектических и заэвтектических сплавов будут иметь две критические точки (рисунок 1б): 1 – начало плавления сплава, 2 – конец плавления сплава.

1.3. Установка для термического анализа состоит из тигля с расплавленным металлом, термопары и гальванометра (рисунок 2). Температура сплава измеряется при помощи термопары. Принцип измерения температуры следующий. Термопара состоит из двух проволок разных металлов, сваренных на одном конце (так называемый «горячий спай»), а два других конца подключены к гальванометру (милливольтметру) – прибору, измеряющему ток очень малой разности потенциалов.

Если горячий спай будет нагреваться, то в термопаре, присоединенной к гальванометру, возникает термоэлектродвижущая сила (т.э.д.с.), что приводит к отклонению стрелки гальванометра; чем выше температура, тем больше отклонение стрелки.

Для проведения точных экспериментов надо предварительно проградуировать термопару, т.е. установить зависимость между т.э.д.с. и температурой в изучаемом интервале.

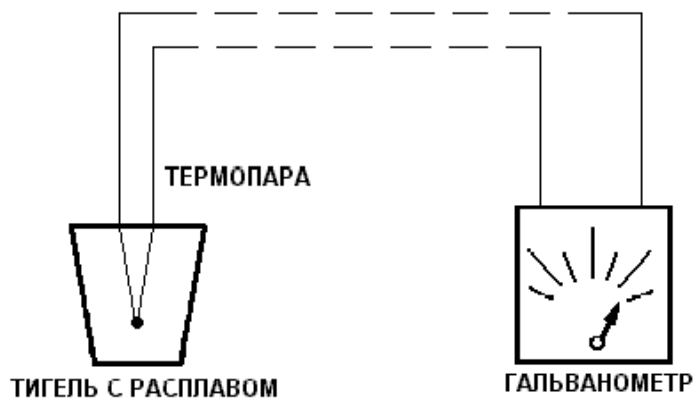


Рисунок 2 – Схема установки для термического анализа

Градуировочная кривая строится по температуре плавления (кристаллизации) нескольких чистых веществ – металлов или солей, так как эти температуры имеют неизменную величину. Чистые вещества расплавляют в тигле, а затем, опуская термопару в расплавленные вещества, фиксируют изменение т.э.д.с. при их охлаждении.

По полученным значениям т.э.д.с. строят кривые охлаждения чистых металлов, на которых отмечают температурную остановку (горизонтальный участок на рисунке 1а). Значение т.э.д.с., отвечающее этой остановке, соответствует температуре затвердевания (плавления) чистого вещества. Эти значения, выраженные в милливольтках, и соответствующие им температуры плавления, выраженные в градусах Цельсия, наносят на график в координатах т.э.д.с. – температура; получающаяся прямая называется *градуировочной кривой* (рисунок 3). Для градуировки термопары можно применять следующие металлы: Sn: $t_{пл.}=232^{\circ}\text{C}$; Pb: $t_{пл.}=327^{\circ}\text{C}$; Zn: $t_{пл.}=419^{\circ}\text{C}$; Sb: $t_{пл.}=631^{\circ}\text{C}$; Ag: $t_{пл.}=960^{\circ}\text{C}$.

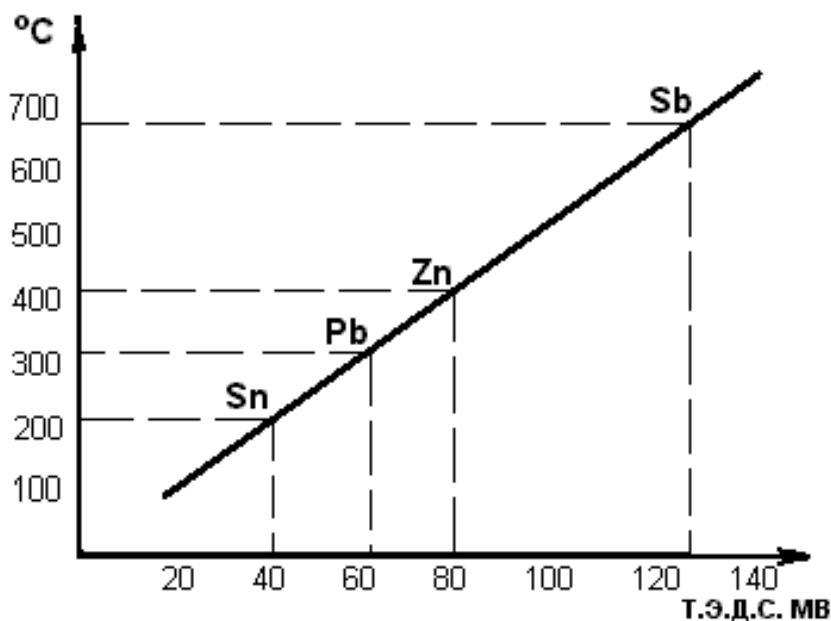


Рисунок 3 – Градуировочная кривая хромель-алюмелевой термопары

1.4. Построение диаграммы состояния термическим методом заключается в приготовлении серии сплавов с различным содержанием компонентов, построение для каждого сплава кривой охлаждения и определении по ней критических точек.

Техника построения диаграммы состояния системы Pb-Sb по критическим точкам показана на рисунке 4.

Для установления температур фазовых превращений (критических точек) рассмотрим сплавы 1-7 следующих составов, %:

Сплав	1	2	3	4	5	6	7
Pb	100	90	87	80	60	40	20
Sb	0	10	13	20	40	60	80

Все сплавы до точек ℓ (рисунок 4а) находятся в расплавленном состоянии. При достижении температур, соответствующих точкам ℓ , в сплавах начинается первичная кристаллизация. На кривых охлаждения наблюдается либо площадка (для чистых металлов – сплава 3), либо перегиб, соответствующий верхним критическим точкам $\ell_2, \ell_4, \ell_5, \ell_6$, которые называются точками *ликвидус*. Кристаллизация заканчивается при достижении температур, соответствующих точкам s_2, s_4, s_5, s_6 , которые называются точками *солидус*. У чистых металлов, а также в сплаве 3 солидус и ликвидус совпадают, т.е. ℓ_1 совпадает с s_1 , ℓ_7 с s_7 , ℓ_3 с s_3 .

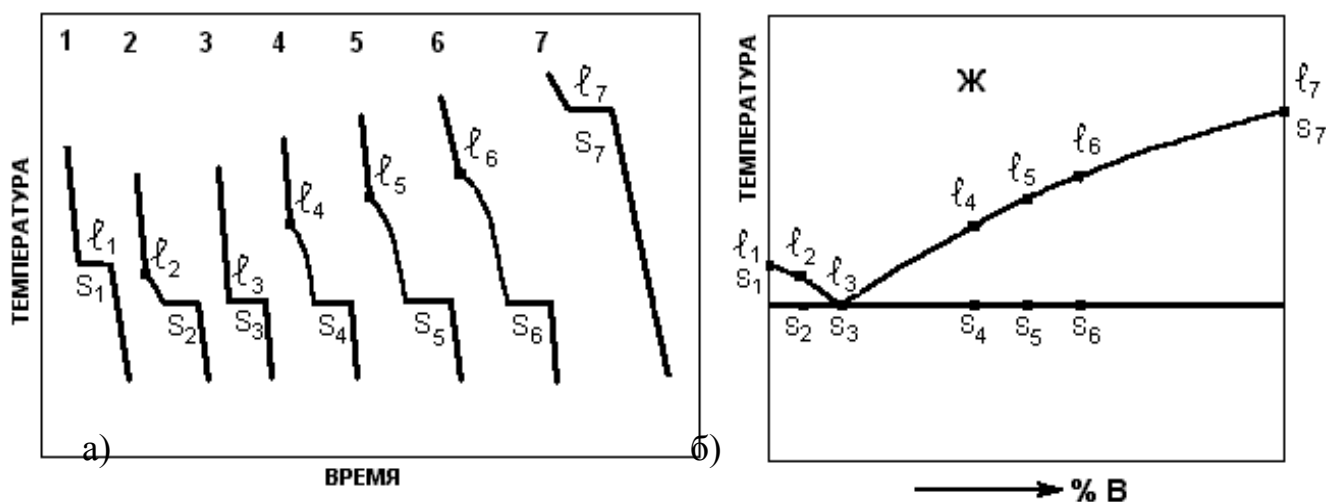


Рисунок 4 – Построение диаграммы состояния по кривым охлаждения (критическим точкам):

а – кривые охлаждения; б – диаграмма состояния

Если перенести с кривых охлаждения критические температуры на сетку в координатах «температура–концентрация» и соединить между собой точки ℓ , т.е. ликвидус, и также точки s , т.е. солидус, то получим диаграмму состояния, приведенную на рисунке 4б и перенесенную на рисунок 5а.

На диаграмме (рисунок 5а) линия ACB – линия ликвидуса; выше температур, образующих эту линию, все сплавы данной системы находятся полностью в жидком состоянии. Линия DCE – линия солидуса; при температурах ниже этой линии все сплавы, состоящие из данной пары компонентов, находятся полностью в твердом состоянии, т.е. представляют собой механическую смесь кристаллов компонента А и В. Между линиями ликвидуса и солидуса часть сплава находится в твердом, часть – в жидком состоянии. Сплав, отвечающий составу С (13%Sb и 87%Pb), называется *эвтектическим*: это смесь двух фаз (в данном случае Pb и Sb), одновременно кристаллизующихся из расплава. Эвтектика имеет постоянный химический состав (13%Sb и 87%Pb), который не

меняется при охлаждении. Эвтектический (легкоплавкий) сплав имеет самую низкую температуру плавления.

Для лучшего понимания диаграммы состояния этого типа рассмотрим кристаллизацию сплава X (рисунок 5а). Сплав имеет две критические точки 1 и 4.

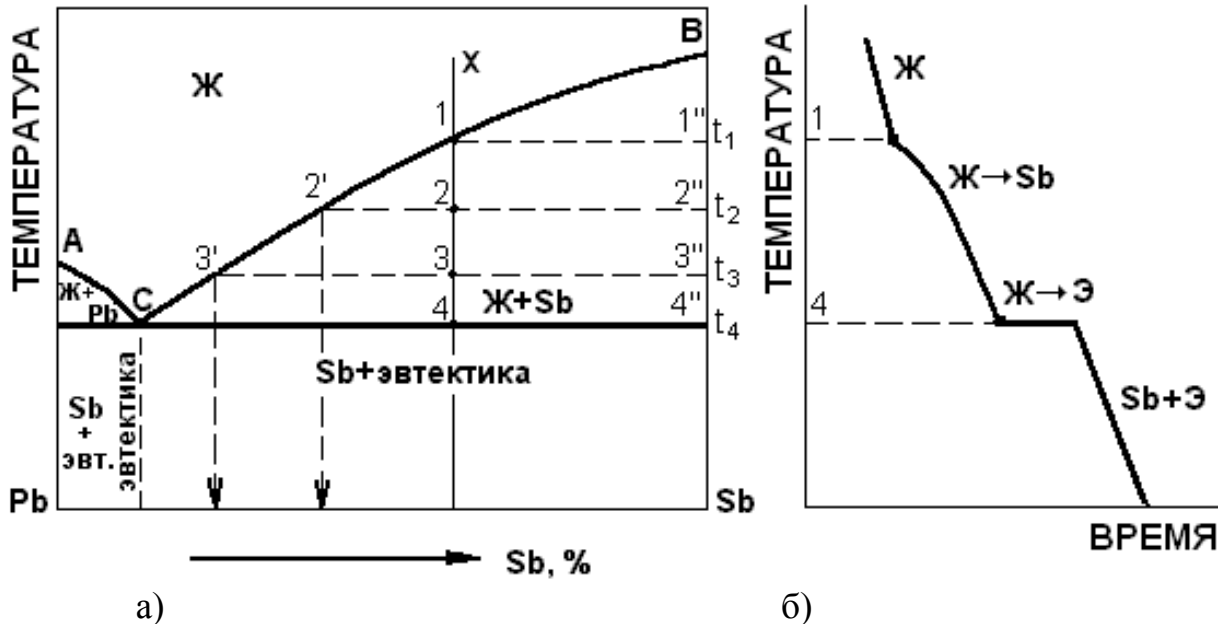


Рисунок 5 – а – диаграмма состояния свинец-сурьма;
б – кривая охлаждения сплава X

До точки ликвидуса (точка 1) сплав находится в жидком состоянии. При температуре, соответствующей точке 1 (t_1), начинается процесс первичной кристаллизации. На кривой охлаждения отмечается перегиб (рисунок 5б), связанный с выделением теплоты кристаллизации. Чтобы определить, какие именно кристаллы выпадают из жидкости: Pb или Sb, надо провести отрезок горизонтали от точки 1 до пересечения с границей данной области диаграммы. Точка пересечения указывает состав кристаллов. В данном случае она соответствует чистому компоненту Sb (рисунок 5а). С понижением температуры от t_1 до t_4 увеличивается количество твердых кристаллов Sb и уменьшается количество жидкой фазы, которая обедняется компонентом Sb.

Каждой температуре в интервале кристаллизации от t_1 до t_4 соответствует жидкий расплав определенного состава. Для определения химического состава жидкой фазы надо при данной температуре провести горизонталь до пересечения с линией ликвидус. Проекция точки пересечения на ось концентрации покажет состав жидкой фазы сплава. Это значит, что в затвердевающем сплаве X (рисунок 5а) жидкая часть его при температуре t_1 будет иметь состав 1, при t_2 – состав 2', при t_3 – состав 3', при t_4 – будет иметь состав, соответствующий точке С. При этой температуре вся оставшаяся часть жидкой фазы затвердевает, образуя эвтектику. Эвтектическое превращение $Ж_c \rightarrow Э_c$ (Pb+Sb) протекает при постоянной температуре до тех пор, пока не исчезнет вся жидкая фаза.

Ниже t_4 в сплаве X никаких изменений не происходит, и образовавшаяся структура сохраняется до полного охлаждения.

Таким образом, сплав X после окончательного охлаждения будет иметь структуру, состоящую из кристаллов Sb (выделившихся от t_1 до t_4) и эвтектики, образующейся при эвтектической температуре t_4 .

Очевидно, что аналогичные превращения и структуру будут иметь все сплавы, состав которых лежит правее точки C.

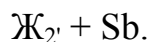
Сплавы, в которых происходит одновременная кристаллизация двух твердых фаз при постоянной и самой низкой температуре, называют *эвтектическими*. В системе Pb-Sb эвтектическим сплавом является сплав 3 (рисунок 4), имеющий состав 87% Pb + 13%Sb, соответствующий точке C (рисунок 5). Сплавы, расположенные левее точки C, называются *доэвтектическими*, правее точки C – *заэвтектическими*. Рассмотренный сплав 6 относится к заэвтектическим сплавам.

Кристаллизация доэвтектических сплавов протекает подобно заэвтектическим, отличие состоит лишь в том, что при температуре ликвидуса AC из жидкости выделяются кристаллы Pb.

1.5. Правило концентраций. В любой точке двухфазной области диаграммы можно определить химический состав (концентрацию) каждой фазы.

Чтобы определить *концентрацию компонентов в фазах*, через данную точку проводят горизонтальную линию (коноду) до пересечения с линиями, ограничивающими данную область; проекции этих точек пересечения на ось концентраций показывают состав фаз.

Следовательно, для сплава X (рисунок 5а) при температуре t_2 состав жидкой фазы соответствует точке 2', а состав твердой фазы – 2" (состоянию чистого Sb). Поэтому состав фаз в точке 2 пишут так:



1.6. Правило отрезков определяет количественное соотношение фаз в двухфазной области. Для определения относительного весового количества фазы (овк) в заданной точке двухфазной области, нужно провести через эту точку коноду и разделить длину отрезка коноды, противолежащего составу данной фазы, на общую длину коноды. Например, в точке 2:

$$\text{овк Ж} = \frac{2'' \cdot 2}{2'' \cdot 2'} \times 100\%,$$

$$\text{овк Sb} = \frac{2 \cdot 2'}{2'' \cdot 2'} \times 100\%.$$

2. ЗАДАНИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

2.1. Приготовьте серию сплавов Pb-Sb следующего состава: 5% Sb, 10% Sb, 13% Sb, 20% Sb, 40% Sb, 60% Sb, 80% Sb и чистые металлы Pb, Sb, Zn.

Группа делится на несколько бригад, каждая бригада получает для исследования определенные сплавы.

2.2. Тигли со сплавами и чистыми металлами загрузите в предварительно нагретую печь и выдержите там до полного расплавления сплавов (с некоторым перегревом).

2.3. Подготовьте термопару к работе, для чего концы ее правильно подсоедините к гальванометру.

2.4. Достаньте тигель с расплавом из печи и тут же установите в него термопару.

2.5. С момента начала охлаждения записывайте показания милливольтметра через каждые 10 секунд вплоть до окончания процесса кристаллизации.

2.6. Результаты записи оформите графически в виде кривых в координатах «термоэлектродвижущая сила – время»; на всех участках кривых охлаждения укажите фазовые и структурные превращения.

2.7. По найденным для чистых металлов (Pb, Sb, Zn) значениям критических точек постройте градуировочный график термопары в координатах «температура – показания гальванометра (милливольтметра)» (рисунок 3а).

2.8. По градуировочному графику определите температуры указанных на кривых охлаждения критических точек сплавов и запишите в общую таблицу 1.

Таблица 1 – Определение критических точек

Концентрация сплава, %	Верхняя критическая точка		Нижняя критическая точка	
	mV	°C	mV	°C

2.9. По данным таблицы 1 постройте диаграмму состояния системы Pb-Sb в координатах «температура – концентрация» (рисунок 5а).

2.10. Укажите фазы и структуры во всех областях диаграммы. Для произвольной точки двухфазной области определите состав и соотношение фаз и структурных составляющих. Зарисуйте структуру изучаемых сплавов.

2.11. Составьте отчет о работе, который должен включать в себя задание и последовательное описание хода работы, схему установки, таблицу критических точек, градуировочный график. Кривые охлаждения, градуировочную кривую и диаграмму состояния строите в масштабе.

3. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

3.1. Что такое система, компонент, фаза и структура?

3.2. Что такое критическая точка?

3.3. Что означает линии на диаграмме состояния? Что такое конода?

- 3.4. Что такое сплав, механическая смесь?
- 3.5. Что такое эвтектика? Эвтектическая температура?
- 3.6. Каким образом определяют химический состав фаз и их количественное отношение в любой точке двухфазной области диаграммы?
- 3.7. Как определить по диаграмме состояния сплавов температуру плавления и кристаллизации конкретного сплава?
- 3.8. Какие существуют методы построения диаграмм состояния, и в чем их сущность?
- 3.9. Как по кривым охлаждения определить критические точки сплава?
- 3.10. В каких координатах строятся диаграммы состояния сплавов?

Лабораторная работа №2. ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ «ЖЕЛЕЗО-УГЛЕРОД»

Цель работы: научиться проводить анализ диаграммы железо-углерод, знать строение и свойства фаз и структурных составляющих железоуглеродистых сплавов: определять характер формирования структуры при охлаждении сталей и чугунов, применять к диаграмме правило концентраций и правило отрезков.

1. АНАЛИЗ ДИАГРАММЫ «ЖЕЛЕЗО-УГЛЕРОД»

1.1. Диаграмма (рисунок 6) состоит из нескольких областей, образованных наклонными и горизонтальными линиями. Линии диаграммы фиксируют начало и конец того или иного превращения. Каждая область включает одну или две фазы, которые в свою очередь образуют структурные составляющие. Любая точка диаграммы показывает: а) химический состав сплава; б) температуру сплава; в) фазовый состав сплава; г) структуру сплава. Температура и концентрация критических точек диаграммы приведены в таблице 2 .

Таблица 2 – Координаты основных точек диаграммы «железо-углерод»

Обозначение точек на диаграмме	Температура, °C	Концентрация углерода, %	Обозначение точек на диаграмме	Температура, °C	Концентрация углерода, %
A	1539	0	D	1500	6,67
B	1499	0,5	G	911	0
H	1499	0,1	P	727	0,02
J	1499	0,16	S	727	0,8
N	1392	0	K	727	6,67
E	1147	2,14	Q	25	0,008
C	1147	4,3	L	25	6,67
F	1147	6,67			

1.2. Компоненты диаграммы Fe-C (рисунок 6).

Железо – переходный металл серебристо-белого цвета, температура плавления - 1539°C (точка A). Железо – полиморфный металл, может существовать в двух модификациях (таблица 3).

Таблица 3 – Характеристика железа

Обозначение	αFe	γFe	δFe
Область существования, °C	до 911	911-1392	1392-1539
Тип кристаллической решетки	ОЦК	ГЦК	ОЦК
Плотность, г/см ³	7,68	8,0	7,68

Температуры 911°C (точка G) и 1392°C (точка N) являются температурами полиморфного превращения железа, их обозначают соответственно A_3 и A_4 . До температуры 768°C железо ферромагнитно. При 768°C в железе происходит магнитное превращение – переход из ферромагнитного в парамагнитное состояние. Эту точку называют точкой Кюри и обозначают A_2 .

Механические свойства железа технической чистоты: $\sigma_B = 250$ МПа; $\sigma_T = 120$ МПа; $\delta = 50\%$; $\psi = 80\%$; НВ 80; $KCU = 2,5$ МДЖ/м².

Углерод – неметалл, температура плавления 3500°C, плотность – 2,5 г/см³. Углерод полиморфен, имеет две аллотропические формы: графит и алмаз. В виде графита углерод находится в серых чугунах. В сталях и белых чугунах углерод находится в виде химического соединения цементита (Fe_3C).

1.3. Фазы диаграммы Fe-C (рисунок 6).

Жидкая фаза (Ж) существует выше линии ликвидус ABCD. Железо хорошо растворяет углерод, образуя однородную жидкую фазу.

Феррит (Ф) – твердый раствор внедрения углерода в αFe , кристаллическая решетка феррита – ОЦК. Различают низкотемпературный (область GPQ) и высокотемпературный (область AHN) феррит, в соответствии с существованием низкотемпературной (αFe) и высокотемпературной (δFe) модификации железа. Максимальная концентрация углерода в низкотемпературном феррите составляет 0,02% при 727°C (точка P), в высокотемпературном феррите – 0,1% C при 1499°C (точка H). При комнатной температуре содержание углерода в феррите очень мало – 0,008% (точка Q). Механические свойства феррита аналогичны техническому железу.

Аустенит (А) – твердый раствор внедрения углерода в γFe , имеет решетку ГЦК. Аустенит занимает довольно большую область диаграммы NJESG; максимальная концентрация углерода в аустените – 2,14% при 1147°C (точка E). Аустенит немагнитен, обладает меньшим удельным объемом, чем феррит, пластичен ($\delta = 40-50\%$), имеет твердость НВ 160-180, ниже $t = 727^\circ C$ аустенит в железоуглеродистых сплавах отсутствует.

Цементит (Fe_3C ; Ц) – химическое соединение железа с углеродом – карбид железа Fe_3C , содержит 6,67% C, ему отвечает правая ордината диаграммы DFKL. Цементит имеет сложную кристаллическую решетку. Особенностью цементита является его исключительно высокая твердость НВ 800 (цементит легко царапает стекло) и хрупкость. При комнатной температуре цементит ферромагнитен и становится немагнитным выше 217°C. Температура плавления цементита точно не определена (цементит не устойчив при повышенных температурах) и находится в пределах 1500-1550°C.

На диаграмме имеются три вышеуказанные однофазные области: жидкого раствора, феррита и аустенита; все остальные области диаграммы являются двухфазными (рисунок 6).

1.4. Первичная кристаллизация железоуглеродистых сплавов. Линия ABCD – линия ликвидус, по этой линии изменяется состав жидкой фазы при кристаллизации сплавов. Участок АВ фиксирует начало выделения из жидкости кристаллов феррита (Ф), участок ВС – кристаллов аустенита (А), участок CD – кристаллов цементита, который называется цементитом первичным ($Ц_1$).

Окончание процесса первичной кристаллизации происходит при температурах, лежащих на линии солидус АНЕСС; по этой линии изменяется состав кристаллизующейся фазы.

Таким образом, *первичная кристаллизация сталей (до 2,14% С) заканчивается образованием аустенита*, независимо от того, какие фазовые превращения протекают ранее.

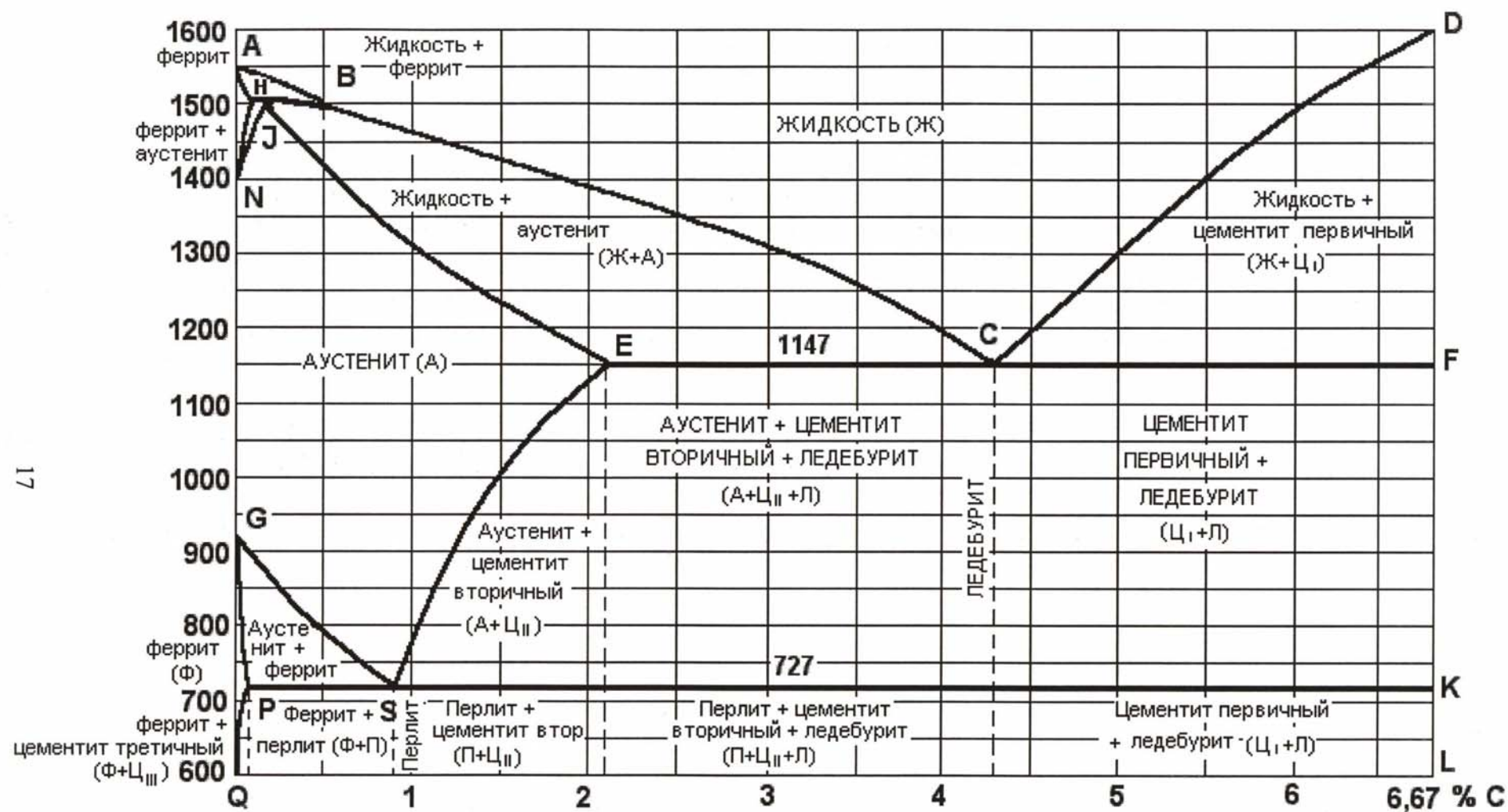
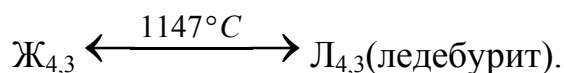
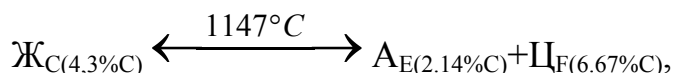


Рисунок 6 – Диаграмма железо-углерод

Первичная кристаллизация чугунов (2,14 - 6,67% С) начинается с образования аустенита (для сплавов с содержанием углерода до 4,3%) или цементита первичного (для сплавов, содержащих 4,3 – 6,67% С). В чугунах с 4,3% С кристаллизация начинается с образованием эвтектики.

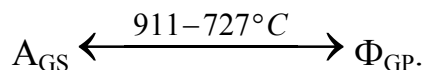
Особенность первичной кристаллизации чугунов заключается в том, что в них она заканчивается *эвтектическим* превращением при 1147°C (по линии ECF), когда жидкость с концентрацией точки С (4,3% С) дает две твердые фазы – аустенит точки Е (2,14% С) и цементит точки F(6,67% С), т.е. образуется *ледебурит (Л)*:



Ледебурит – эвтектика системы Fe-C – механическая смесь аустенита и цементита, содержащая 4,3% С и образующаяся в чугунах при постоянной температуре 1147°C из жидкого расплава того же состава.

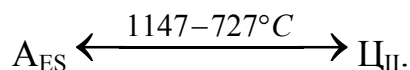
1.5. *Вторичная кристаллизация* железоуглеродистых сплавов. Превращения в железоуглеродистых сплавах после затвердевания связаны с полиморфизмом железа, изменением растворимости углерода в аустените и феррите с понижением температуры и эвтектоидным превращением.

Рассмотрим превращения в твердом состоянии сталей линии: GS и GP соответствуют температурам начала и конца превращения аустенита в феррит.

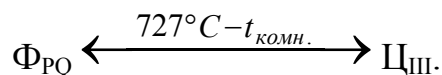


Линия SE – линия предельной растворимости углерода в аустените – при охлаждении соответствует температуре начала выделения из аустенита вторичного цементита Ц_{II} (вследствие уменьшения концентрации углерода в аустените с понижением

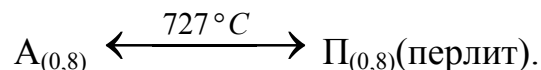
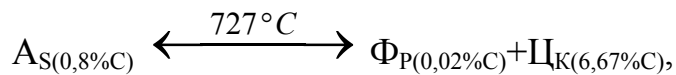
температуры); при нагреве эта линия соответствует концу растворения вторичного цементита в аустените, т.е.



Линия PQ при охлаждении отвечает температурам начала выделения из феррита третичного цементита в результате уменьшения растворимости углерода в феррите с понижением температуры; при нагреве происходит полное растворение цементита в феррите, т.е.



Линия PSK называется *линией эвтектоидного превращения*. Это превращение заключается в распаде аустенита состава точки S (0,8% C) на механическую смесь двух фаз: феррита, состав которого отвечает точке P (0,02% C), и цементита Fe₃C (точка K, 6,67% C), т.е. образуется *перлит*:



Перлит – эвтектоид системы Fe-C – механическая смесь феррита и цементита, содержащая 0,8% C и образующаяся из аустенита при постоянной температуре 727°C практически во всех железоуглеродистых сплавах (от 0,02 до 6,67% C).

Таким образом, при комнатной температуре в сталях, содержащих 0,008% C (точка Q), существует только феррит; в сталях, содержащих 0,008 - 0,02% C, структура состоит из феррита и третичного цементита. Эти стали называют *техническим железом*.

Стали, содержащие от 0,02 до 0,8% C, называют *доэвтектоидными*. Эти стали после окончательного охлаждения состоят из феррита и перлита. Стали с 0,8% C называют *эвтектоидными*. Их конечная структура – перлит. Стали, содержащие от 0,8 до 2,14% C, являются *заэвтектоидными*. После охлаждения эти стали состоят из перлита и вторичного цементита.

Температуры наиболее важных превращений в сталях обозначаются буквами А (от слова *arrest* – остановка). Обозначения линий диаграммы и соответствующих им критических точек приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Обозначение линий диаграммы железо-углерод

Линия диаграммы	PSK	MO	GS	NJ	SE
Обозначения линий	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A _{cm}
Превращение	727°C Π ↔ А	магнитн. → → 768°C немагнит.	нагр. Φ ↔ А охл.	нагр. А ↔ Φ охл.	нагр. ЦΠ ↔ А охл.

Вторичная кристаллизация чугунов связана с превращениями в ледебурите: при температуре 727°C весь имеющийся в чугунах аустенит превращается в перлит. Это значит, что выше температуры 727°C ледебурит состоит из аустенита

и цементита, а ниже 727°C - из перлита и цементита. Кроме того, в чугунах, содержащих 2,14 - 4,3% С, при понижении температуры от 1147°C до 727°C предельная концентрация углерода в аустените уменьшается в соответствии с линией ES от 2,14 до 0,8% и происходит образование цементита вторичного (Ц_{II}).

После окончательного охлаждения структура чугунов будет следующей: доэвтектический чугун (2,4 - 4,3% С) – $\text{П} + \text{Ц}_{\text{II}} + \text{Л}$; эвтектический чугун (4,3% С) – Л ; заэвтектический чугун (4,3 - 6,67% С) – $\text{Ц}_{\text{I}} + \text{Л}$.

1.6. Анализ структурных превращений в железоуглеродистых сплавах. В качестве примера рассмотрим превращения при охлаждении нескольких сплавов диаграммы железо-углерод.

Пример 1. Доэвтектоидная сталь (0,4% С). Отмечаем заданный сплав вертикалью I на диаграмме (рисунок 7а). Обозначаем критические точки 1, 2, 3, 4, 5 и строим кривую охлаждения (рисунок 7б). При температуре t_1 из жидкого сплава начинают выделяться кристаллы феррита состава 1'. На кривой охлаждения наблюдается перегиб, поскольку кристаллизация сопровождается выделением тепла, и скорость охлаждения стали уменьшается. Первичная кристаллизация этого сплава протекает по формуле

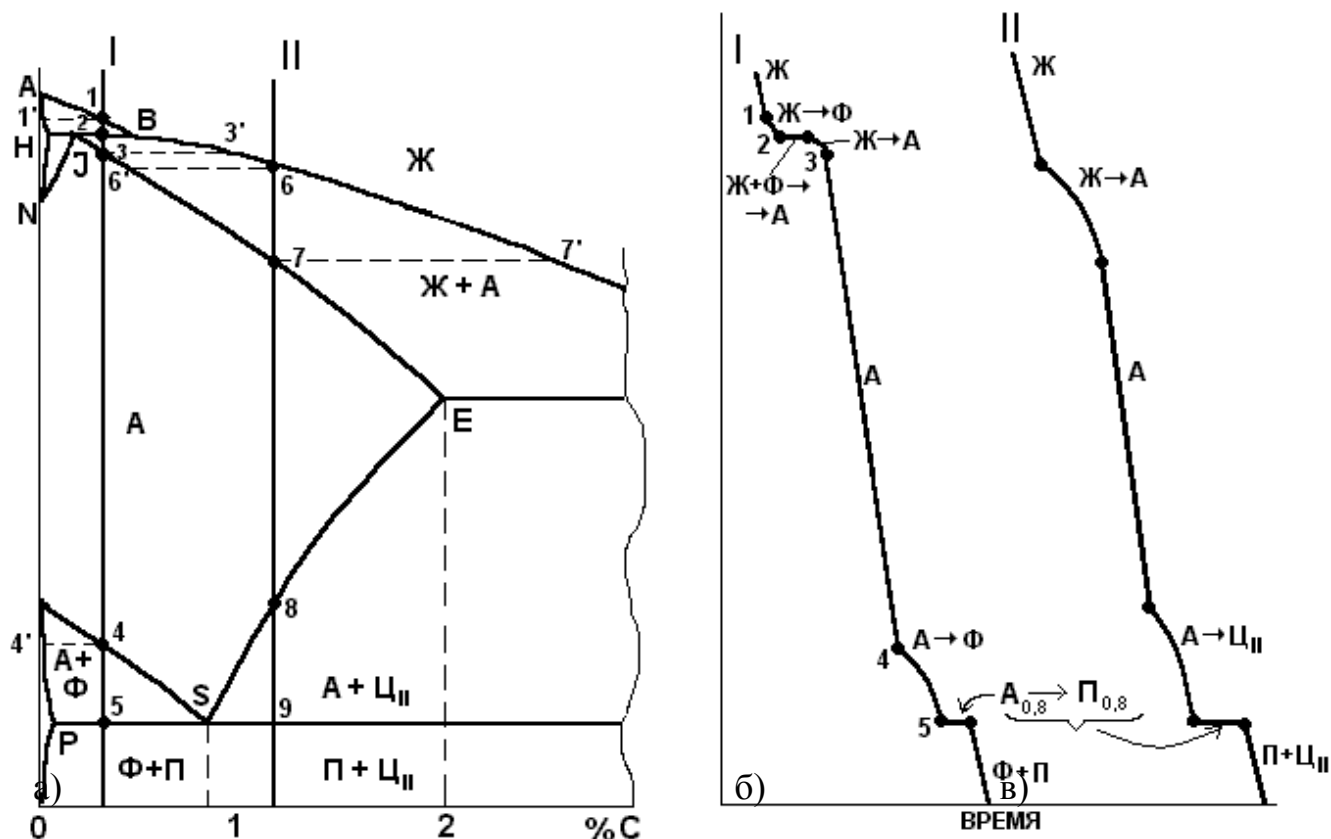
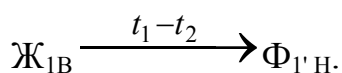
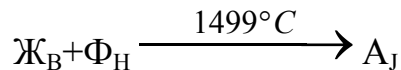
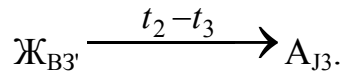


Рисунок 7 – Часть диаграммы состояния железо-углерод (а) и кривые охлаждения сталей с 0,4% С (б) и 1,2% (в).

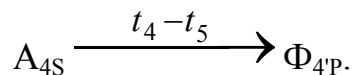
Этот процесс продолжается до температуры t_2 (1499°C). При 1499°C в результате перитектической реакции



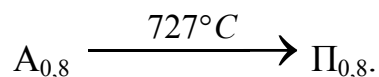
образуются кристаллы аустенита (площадка на кривой охлаждения), но часть жидкости остается в избытке. В интервале температур t_2 - t_3 из оставшейся жидкости сплава выделяются кристаллы аустенита по формуле



Первичная кристаллизация заканчивается при температуре t_3 (перегиб на кривой охлаждения), ниже которой сталь состоит из одного аустенита. В интервале температур t_3 - t_4 происходит физическое охлаждение аустенита. При температуре t_4 начинается вторичная кристаллизация (перегиб на кривой охлаждения) – аустенит превращается в феррит по формуле

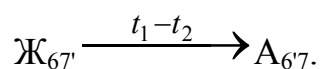


При этом выделении феррит, почти не содержащий углерод, вызывает обогащение углеродом оставшийся аустенит, концентрация которого меняется по кривой 4S. При достижении точки t_5 (727°C) состав аустенита примет эвтектоидную концентрацию (точка S, 0,8% C) и при постоянной температуре будет превращаться в перлит (площадка на кривой охлаждения)



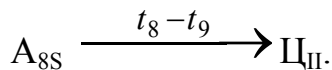
После окончания охлаждения при комнатной температуре структура стали состоит из феррита и перлита.

Пример 2. Заэвтектоидная сталь (1,2% C). Отмечаем заданный сплав вертикалью II на диаграмме (рисунок 7а). Обозначаем критические точки стали 6, 7, 8, 9 и строим кривую охлаждения (рисунок 7б). При температуре t_6 , лежащей на линии ликвидус, начинается первичная кристаллизация аустенита состава 6' (перегиб на кривой охлаждения). По мере охлаждения в интервале температур t_6 - t_7 происходит выделение кристаллов аустенита переменного состава, концентрация которых определяется линией солидус от точки 6' до точки 7; жидкая фаза обогащается углеродом, концентрация которой меняется по линии ликвидус от 6 до 7', т.е. первичная кристаллизация протекает по формуле

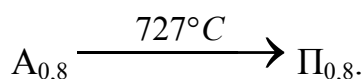


В точке 7 заканчивается первичная кристаллизация аустенита (перегиб на кривой охлаждения). При дальнейшем охлаждении до t_8 сталь имеет однофазную аустенитную структуру. При достижении t_8 (A_{cm}) аустенит оказывается предельно

насыщенным углеродом, и из него начинает выделяться цементит вторичный (перегиб на кривой охлаждения). Вторичная кристаллизация стали идет по формуле



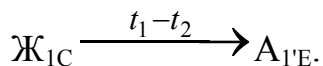
Содержание углерода в аустените при охлаждении от t_8 до t_9 уменьшается по линии 8S, т.е. до концентрации 0,8% С, и при постоянной температуре t_9 (A_1 , 727°C) аустенит претерпевает эвтектоидное превращение (площадка на кривой охлаждения)



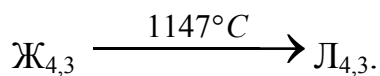
По окончании этого превращения структура стали состоит из перлита и цементита вторичного. Такую структуру будет иметь сталь при комнатной температуре.

Пример 3. Доэвтектический чугун (3,0% С). Отмечаем данный сплав I вертикалью на диаграмме (рисунок 8а). Обозначаем критические точки 1, 2, 3 и строим кривую охлаждения (рисунок 8б).

Первичная кристаллизация чугуна начинается выделением кристаллов аустенита состава 1' при достижении температуры t_1 (перегиб на кривой охлаждения). По мере охлаждения чугуна в интервале температур t_1 - t_2 жидкая фаза обогащается углеродом по линии ликвидус 1С, а твердая (аустенит) – по линии 1'Е. Формула первичной кристаллизации чугуна:



При температуре t_2 (1147°C) оставшаяся часть жидкого сплава достигает концентрации 4,3% С (эвтектическая точка С). Жидкий сплав затвердевает при постоянной температуре 1147°C с образованием эвтектики (ледебурита):



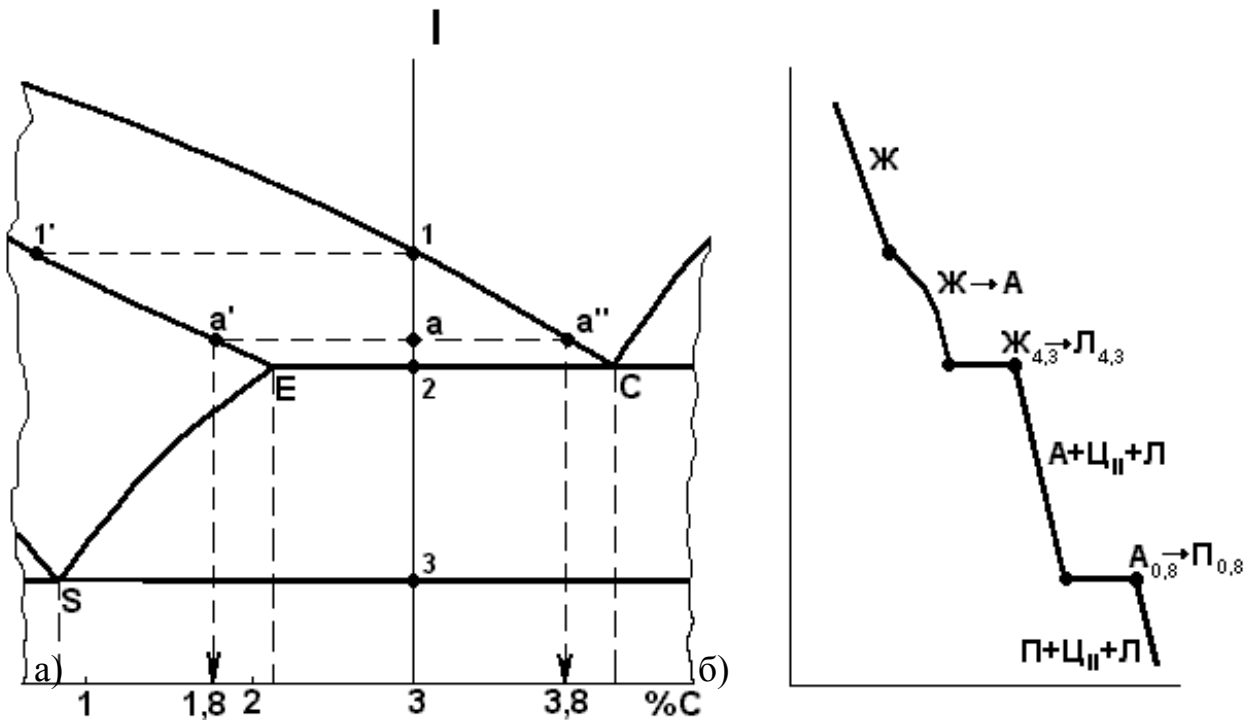
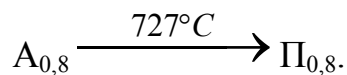


Рисунок 8. Часть диаграммы Fe-C (а) и кривая охлаждения чугуна с 3,0% С (б).

На кривой охлаждения наблюдается площадка. При понижении температуры от 1147 до 727°C аустенит обедняется углеродом и образуется новая высокоуглеродистая фаза – цементит вторичный (Ц_{II}). При температуре t_3 ($A_1, 727^\circ\text{C}$) протекает эвтектоидное превращение аустенита (площадка на кривой охлаждения) как свободного, так и входящего в состав ледебурита:



Структура чугуна после окончательного охлаждения состоит из перлита + цементита вторичного + ледебурита.

1.7. Определение состава фаз (структуры) и их количественного соотношения.

Правило концентраций позволяет определить в любой точке двухфазной области диаграммы химический состав каждой фазы. Для этого через данную точку необходимо провести горизонталь до пересечения с границами области (коноду); проекции точек пересечения на ось концентрации дадут химический состав соответствующих фаз. Например, в точке **a** (рисунок 8а) содержание углерода в жидкой фазе соответствует проекции точки **a''** (3,8% С), а содержание углерода в аустените – проекции точки **a'** (1,8% С). Правило концентраций для точки **a** записывается так: т. **a** Ж_{3,8} + А_{1,8}.

С помощью *правила отрезков* в любой точке двухфазной области диаграммы определяют относительное весовое количество (овк) каждой фазы (структурных составляющих). Для этого через данную точку проводят коноду и

вычисляют отношение длины отрезка коноды, примыкающей к противоположному составу фаз, ко всей коноде.

Например, в точке **a** (рисунок 8а):

$$\text{овк Ж} = \frac{aa'}{a''a'} \times 100\% \quad \text{или} \quad \frac{3,0 - 1,8}{3,8 - 1,8} \times 100\% = 60\%,$$

$$\text{овк А} = \frac{a''a}{a''a'} \times 100\% \quad \text{или} \quad \frac{3,8 - 3,0}{3,8 - 1,8} \times 100\% = 40\%.$$

2. ЗАДАНИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

2.1. Запишите характеристики фазовых и структурных составляющих.

2.2. Обозначьте критические точки на диаграмме Fe-C и укажите концентрацию их по углероду. Укажите фазы и структурные составляющие во всех областях диаграммы. Укажите значения линий диаграммы.

2.3. Постройте кривые охлаждения двух сплавов (сталь и чугун), точную концентрацию которых указывает преподаватель. На каждом участке кривых охлаждения укажите название фаз и структурных составляющих.

2.4. Для четырех точек, соответствующих определенному составу и температуре (точки указывает преподаватель), определите состав и относительное весовое количество фаз и структурных составляющих.

2.5. Опишите превращения, которые происходят при охлаждении этих сплавов из состояния жидкого раствора до комнатной температуры.

3. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какое превращение происходит в сплавах в процессе охлаждения (нагрева) при 1147°C (линия ECF)?
2. Какое превращение происходит в сплавах в процессе охлаждения (нагрева) по линии ES?
3. Какое превращение происходит в сплавах в процессе охлаждения (нагрева) по линии PQ?
4. Какое превращение происходит в сплавах в процессе охлаждения (нагрева) по линии CD?
5. Какое превращение происходит в сплавах в процессе охлаждения (нагрева) при 727°C (линия PSK)?
6. Что такое феррит, аустенит, цементит, перлит, ледебурит?
7. Какие превращения происходят в сплавах при температурах A_1 , A_2 , A_3 , A_4 , A_{cm} ?
8. Как определить состав и соотношение (овк) фаз в любой точке диаграммы Fe-C?

Лабораторная работа № 3. МИКРОСТРУКТУРА УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ И СЕРЫХ ЧУГУНОВ

Цель работы: изучить классификацию и маркировку углеродистых сталей и серых чугунов; научиться самостоятельно проводить микроанализ углеродистых сталей и чугунов.

1. УГЛЕРОДИСТЫЕ СТАЛИ

1.1. Сплавы железа с углеродом, содержащие до 2,14% С, называются *углеродистыми сталями*. Помимо углерода эти стали содержат постоянные примеси – марганец (до 0,8%) и кремний (до 0,5%), вредные примеси – фосфор (до 0,05%) и серу (до 0,05%), газы – водород, азот, кислород и др.

Углеродистые стали классифицируют по назначению, качеству и структуре.

1.2. По назначению стали подразделяются на конструкционные и инструментальные.

Конструкционные стали применяют в машиностроении и строительстве для изготовления деталей машин, конструкций и сооружений, поэтому они должны обладать высокой конструкционной прочностью, т.е. сочетанием высокой прочности (σ_b) и достаточной пластичности (δ , ψ), сопротивлением хрупкому разрушению (КСУ, КСТ) и низким порогом хладноломкости (T_{50}). Содержание углерода в этих сталях обычно не превышает 0,7%. В зависимости от количества углерода, а следовательно, в зависимости от структуры и свойств углеродистые стали подразделяются на четыре группы:

строительные стали, содержащие до 0,25% С и применяемые для изготовления металлических конструкций и сооружений, а также для арматуры железобетона; обязательное требование к этим сталям – хорошая свариваемость;

машиностроительные цементуемые стали с содержанием углерода до 0,25% и используемые для изготовления деталей, которые в процессе работы подвергаются интенсивному изнашиванию (зубчатые колеса, шпиндели, валы шестерен и др.); после цементации, закалки и низкого отпуска получается твердый поверхностный слой (60 HRC) и вязкая, неупрочненная сердцевина (15...20 HRC);

машиностроительные улучшаемые стали, содержащие 0,3...0,5%С и применяемые для деталей, работающих в условиях циклических и ударных нагрузок (валы, оси, штоки, шатуны, детали турбин и компрессорных машин и др.); эти стали подвергают закалке и высокому отпуску (улучшению);

рессорно-пружинные стали с содержанием углерода 0,5...0,7%, предназначенные для изготовления пружин, упругих элементов и рессор малого сечения; после закалки и среднего отпуска эти стали обладают высокими упругими свойствами ($\sigma_{упр} = 800$ МПа) и могут работать при температурах до 100° С.

Инструментальные стали применяют для изготовления различных инструментов, поэтому они обладают высокой твердостью, прочностью и

износостойкостью. Содержание углерода в этих сталях колеблется от 0,7 до 1,3%. Эти стали подвергают закалке и низкому отпуску.

1.3. По качеству в зависимости от содержания вредных примесей (серы и фосфора) и количества неметаллических включений углеродистые стали делят на стали обыкновенного качества, качественные и высококачественные.

Стали *обыкновенного качества* (ГОСТ 380-94) содержат до 0,05% серы и фосфора каждого. В сталях этой группы допускается повышенное содержание неметаллических включений по сравнению с качественными и высококачественными сталями.

Стали обыкновенного качества обозначают буквами Ст, что означает «сталь», и цифрами от 0 до 6, что соответствует условному номеру марки стали. После цифры следуют буквы кп, пс либо сп, указывающие на степень раскисления стали (кп – кипящая, пс – полуспокойная, сп – спокойная). Например, сталь марки Ст3сп означает, что эта сталь обыкновенного качества, порядковый номер 3, спокойная, т.е. полностью раскисленная.

Полуспокойные стали могут иметь повышенное содержание марганца (0,8-1,2 %); в этом случае после номера ставится буква Г. Например, сталь марки Ст3Гпс обозначает, что эта сталь обыкновенного качества, условный порядковый номер 3, полуспокойная, с повышенным содержанием марганца.

С увеличением условного номера марки в стали возрастает содержание углерода от 0,06 до 0,49%, а также растет предел прочности от $\sigma_b = 310$ до 600 МПа и снижается пластичность с $\delta = 22\%$ до 14%.

Стали одного условного номера вне зависимости от степени раскисления имеют одинаковое количество углерода и примерно одинаковую прочность. Кипящие стали (кп) раскислены лишь частично и поэтому содержат пониженное содержание кремния по сравнению со спокойными (сп) и полуспокойными (пс) сталями и вследствие этого обладают повышенной пластичностью. Поэтому из кипящих сталей (Ст1кп, Ст2кп) изготавливают холоднокатаный прокат (листы, прутки).

Кипящие стали содержат повышенное количество кислорода, имеют порог хладноломкости на 30...40 °С выше, чем стали спокойные. Поэтому для ответственных сварных конструкций, а также деталей, работающих при низких температурах, применяют спокойные стали.

Из сталей обыкновенного качества изготавливают горячекатаный прокат: балки, швеллеры, уголки, прутки, а также листы, трубы и поковки. Стали в состоянии поставки широко применяют в строительстве для сварных, клепаных и болтовых конструкций, для малонагруженных деталей машин (валы, оси, болты, гайки и др.).

Стали обыкновенного качества, особенно кипящие, наиболее дешевые.

Качественные углеродистые стали содержат меньшее количество Р и S (до 0,035% каждого) и неметаллических включений. Согласно ГОСТ 1050-88 к качественным углеродистым *конструкционным* сталям относятся стали марок 08, 10, 15, 20, 25...70, 75, 80, 85, где цифры указывают на содержание углерода в сотых долях процента. Например, сталь 15 содержит 0,15% С, сталь 40 - 0,4%С. Если низкоуглеродистые стали ($C \leq 0,20\%$) полностью не раскислены, то в

обозначение добавляют индексы кп – кипящая (08кп); пс – полуспокойная (20пс); для спокойных сталей индекс не указывается.

К качественным сталям относятся также стали с повышенным содержанием марганца (0,7...1,0%). Такие стали имеют в конце марки букву Г, например: сталь 15Г.

В таблице 5 приведены свойства ряда качественных конструкционных сталей.

К углеродистым качественным *инструментальным сталям*, согласно ГОСТ 1435-99, относятся стали У7, У8, У9, У10, У11, У12, У13, где за буквой У (углеродистая) следует цифра, указывающая среднее содержание углерода в десятых долях процента. Так, У8 означает, что сталь углеродистая инструментальная качественная, содержит 0,8% С.

Таблица 5 – Механические свойства некоторых малых качественных сталей

Марка стали	Содержание углерода, %	Механические свойства после нормализации				
		σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	KCU, МДж/м ²
0,8кп	0,05...0,11	330	200	23	60	-
15	0,12...0,19	380	230	27	55	-
30	0,27...0,35	500	300	21	50	0,80
50	0,47...0,55	640	380	14	40	0,4
60Г	0,57...0,65	710	420	11	35	

Для режущего инструмента (фрезы, зенкера, сверла, шаберы, ножовки, напильники, бритвы, острый хирургический инструмент) обычно применяют стали У10, У11 и У12. Из сталей У7, У8 изготавливают инструменты, подвергающиеся ударам (зубила, молотки, кернеры, отвертки, топоры и др.).

Высококачественные стали относятся к наиболее чистым в отношении неметаллических примесей и газов. Допустимое количество фосфора и серы не превышают 0,025% каждого. Маркируют их так же, как качественные, только в конце марки ставят букву А, например: сталь У8А. Высококачественными сталями могут быть только инструментальные и легированные стали.

1.4. По микроструктуре (рисунок 9) стали классифицируют на *доэвтектоидные* с содержанием углерода до 0,8%;

эвтектоидные с содержанием углерода 0,8%;

заэвтектоидные с содержанием углерода от 0,8 до 2,14%.

Основными структурными составляющими углеродистых сталей являются феррит, перлит и цементит.

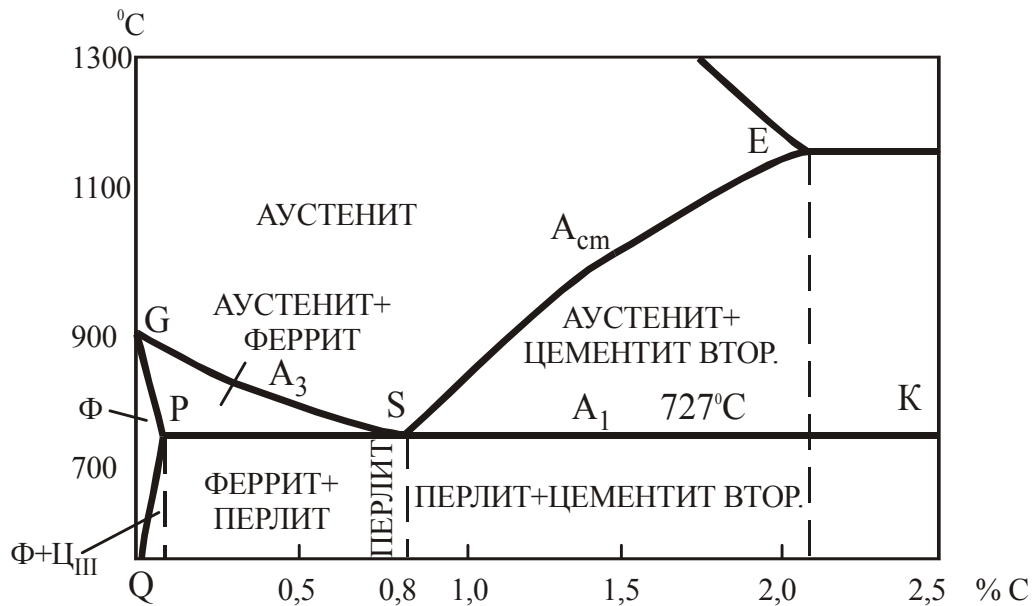


Рисунок 9 – Диаграмма состояния «железо-углерод» (стальной участок)

Дозвтектоидные стали образуют два типа структур. Первый тип – *феррит и третичный цементит* – наблюдается в малоуглеродистых сталях, содержащих до 0,02% С (точка Р). Такие стали называют техническим железом. Третичный цементит располагается в виде тонких светлых прожилок по границам светлых зерен феррита. Второй тип – *феррит и перлит* – наблюдается в сталях, содержащих от 0,02 до 0,8% (точка S). Чем больше углерода в стали, тем больше в ней перлита. Перлит под микроскопом имеет вид темных зерен.

По микроструктуре дозвтектоидной стали можно примерно определить содержание углерода в ней. Для этого визуальнo определяют средний процент площади, занятой на микрошлифе перлитом (d %) и, принимая, что весь углерод находится в перлите, подсчитывают его содержание по формуле

$$C = \frac{0,8 \cdot d}{100}, \text{ \%}.$$

Микроструктура эвтектоидной стали состоит из одного перлита: *пластинчатого или зернистого*. Под микроскопом при больших увеличениях в структуре пластинчатого перлита видны темные изогнутые пластинки цементита с расположенными между ними светлыми полосками феррита. У перлита зернистого феррит и цементит имеют зернистую форму. Механические свойства пластинчатого перлита: $\sigma_B = 850$ МПа, НВ 190-230, зернистого перлита: $\sigma_B = 800$ МПа, НВ 160-190.

Микроструктура заэвтектоидной стали состоит из *перлита и вторичного цементита*. Вторичный цементит располагается в виде светлой сетки по границам темных зерен перлита, иногда в виде игл, пронизывающих перлит.

С увеличением содержания углерода выше 0,8% количество цементита растет, и цементитная сетка получается более массивной. У такой стали пластичность резко падает, появляется склонность к хрупкости, увеличивается твердость. Применяя специальную термическую обработку, можно получить вторичный цементит в зернистой форме. В этом случае заэвтектоидная сталь по структуре очень похожа на эвтектоидную.

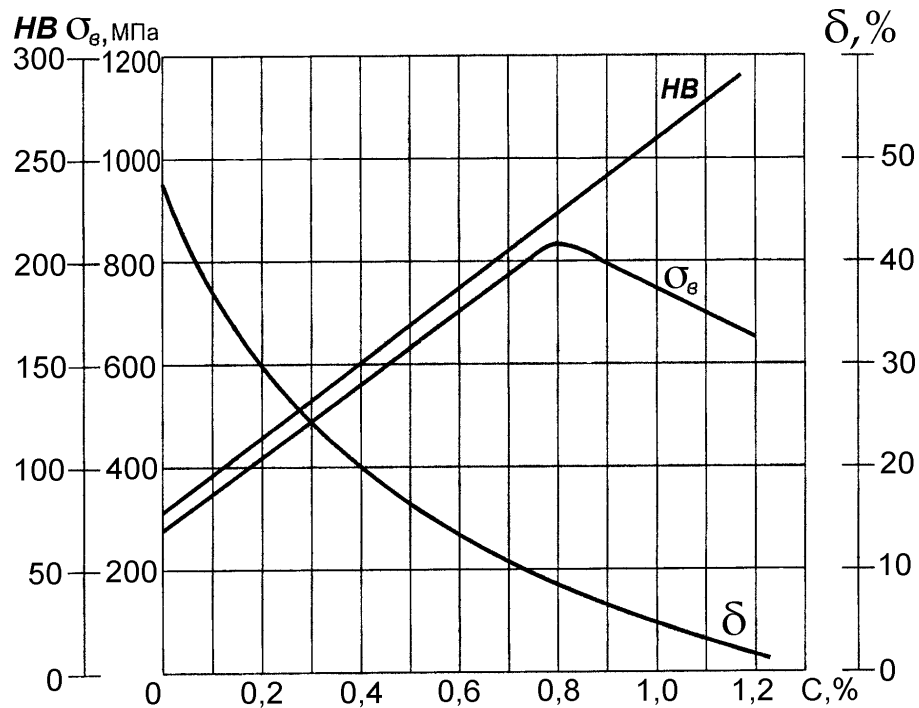


Рисунок 10 – Влияние углерода на механические свойства стали

В зависимости от характера и количественного соотношения структурных составляющих в широких пределах изменяются и механические свойства сталей.

Феррит имеет низкую прочность, но высокую пластичность, цементит характеризуется высокой твердостью, перлит имеет максимальную прочность. Наибольшей прочностью обладают эвтектоидные стали (рисунок 10), в доэвтектоидных сталях прочность ниже из-за присутствия мягкого феррита; в заэвтектоидных сталях прочность ниже из-за хрупкого вторичного цементита.

С повышением содержания углерода твердость стали возрастает, а пластичность уменьшается из-за увеличения в структуре цементита и уменьшения феррита.

2 СЕРЫЕ ЧУГУНЫ

2.1. Сплавы железа с углеродом, содержащие углерода более 2,14 %, называются *чугунами*. По сравнению со сталями чугуны содержат большее количество примесей (до 2,5% Si, 1% Mn, 0,3% P и 0,15 % S).

Углерод в чугуне может находиться в виде цементита или графита. В белых чугунах весь углерод находится в связанном состоянии в виде цементита, поэтому

эти чугуны обладают высокой твердостью, хрупки и практически не поддаются обработке резанием.

В серых чугунах углерод полностью или частично находится в свободном состоянии в виде графита, отчего излом чугуна имеет серый цвет.

Твердость и прочность графита ничтожно малы. Поэтому в качестве грубой модели можно рассматривать серый чугун как сталь (металлическая основа), испещренную большим количеством пустот, раковин и трещин, в которые заключен графит. Твердость чугуна и прочность на сжатие зависят в основном от структуры металлической основы, а не от характера и количества графитовых включений, поэтому их значения у чугуна и стали мало отличаются друг от друга. Прочность чугуна на растяжение и изгиб, а также пластичность (удлинение, сужение) зависят главным образом от количества, формы, размеров и расположения графитовых включений и сильно отличаются от соответствующих характеристик стали.

По форме графитовые включения бывают пластинчатыми, хлопьевидными, вермикулярными и шаровидными. Чугуны с пластинчатыми включениями графита называются *серыми*; с волокнистой (червеобразной) формой графита – *чугунами с вермикулярным графитом*; с хлопьевидными формами графита – *ковкими*; с шаровидными – *высокопрочными*. Чем грубее включения графита, тем ниже прочностные характеристики чугунов. Наиболее благоприятной из всех форм является шаровидная форма графита, которая в меньшей степени ослабляет металлическую основу. Ковкий чугун занимает по механическим свойствам среднее положение между высокопрочным и серым.

Металлическая основа в зависимости от степени графитизации может быть ферритной, феррито-перлитной и перлитной. По структуре металлической основы серый чугун воспроизводит структуры от чистого железа до эвтектоидной стали.

При одинаковом характере графитовых включений чугуны с перлитной структурой металлической основы (перлитный чугун) имеют более высокие прочностные и более низкие пластические свойства, чем чугун с ферритной структурой металлической основы.

2.2. *Серые чугуны с пластинчатой формой графита* получают в обычных условиях литья при медленном охлаждении и наличии некоторых примесей, главным образом кремния, способствующего графитообразованию.

По структуре эти чугуны делятся на:

- серый ферритный чугун со структурой графит пластинчатый + феррит;
- серый ферритно-перлитный чугун со структурой графит пластинчатый + феррит + перлит;
- серый перлитный чугун со структурой графит пластинчатый + перлит.

Условное обозначение марки чугуна включает буквы СЧ – серый чугун – и цифровое обозначение величины минимального временного сопротивления при растяжении (σ_B) в МПа·10⁻¹. Например, СЧ15 – серый чугун, имеющий $\sigma_B = 150$ МПа.

В зависимости от прочности серые чугуны подразделяются на шесть марок (ГОСТ 1412-85).

Таблица 6 – Механические свойства серых чугунов с пластинчатой формой графита

Марка чугуна	σ_B , МПа	δ , %	НВ	Структура металлической основы
СЧ10	98	До 0,5	143-229	Феррит
СЧ15	147	«	163-229	Феррит
СЧ20	196	«	170-241	Феррит + перлит
СЧ25	245	«	180-250	Феррит + перлит
СЧ30	294	«	181-255	Перлит
СЧ35	343	«	197-285	Перлит

Серый чугун имеет сравнительно невысокие значения предела прочности и очень низкую пластичность. Однако именно благодаря пластинчатому графиту в сером чугуне уникально сочетаются хорошие антифрикционные свойства, высокая износостойкость, малая чувствительность к концентраторам напряжений. Серый чугун имеет высокую демпфирующую способность и хорошо гасит вибрацию.

Серый чугун – технологичный материал. Он обладает хорошей жидкотекучестью, малой усадкой, малой склонностью к образованию трещин. Из него изготавливают отливки сложной конфигурации с толщиной стенок от 2 до 500 мм.

Ферритные чугуны (СЧ10, СЧ15) применяют для слабо- и средненагруженных деталей: корпусные детали, плиты, колонны, кожухи, изложницы, трубы и др. Феррито-перлитные чугуны СЧ20 и СЧ25 применяют для деталей, работающих при повышенных статических и динамических нагрузках: блоки цилиндров, картеры двигателя, поршни цилиндров, барабаны сцепления, станины станков, зубчатые колеса и др. отливки. Перлитные серые *модифицированные* чугуны СЧ30 и СЧ35 обладают более высокими механическими свойствами из-за мелких графитных включений. Измельчение графитных включений в них достигается модифицированием жидкого чугуна ферросилицием или силикокальцием (0,3-0,5% от массы шихты). Модифицированные чугуны используют для деталей, работающих при высоких нагрузках или в тяжелых условиях износа: зубчатых колес, гильз блоков цилиндров, шпинделей, распределительных валов и др. Чугуны этих марок обладают большой герметичностью. По этой причине их широко применяют для корпусов насосов, компрессоров, арматуры тормозной пневматики и гидроприводов. Серый чугун также широко применяют в электромашиностроении и для изготовления товаров народного употребления.

2.3. Чугуны с вермикулярным графитом получают при добавлении в расплав лигатур сложного состава, содержащих магний, кальций, титан, церий и т.д. Условное обозначение марки включает: букву Ч – чугун; буквы ВГ – форма графита (вермикулярный графит) и цифровое обозначение минимального временного сопротивления разрыву при растяжении в МПа·10⁻¹.

Таблица 7 – Механические свойства чугуна с вермикулярным графитом

Марка чугуна	σ_B , МПа, не менее	δ , %, не менее	НВ	Структура метал-лической основы
ЧВГ 30	300	3,0	130-180	Феррит
ЧВГ 35	350	2,0	140-190	Феррит
ЧВГ 40	400	1,5	170-220	Феррит + перлит
ЧВГ 45	450	0,8	190-250	Перлит

Отливки из чугуна с вермикулярным графитом применяют для изготовления ответственных деталей: базовых деталей станков, кузнечно-прессового оборудования, поршней, цилиндров, компрессорного, арматурного и турбинного литья, блоков двигателей и др.

2.4. *Ковкие чугуны* получают путем графитизирующего отжига (томления) белых доэвтектических чугунов, содержащих от 2,4 до 2,9% С. В результате такой термической обработки происходит распад цементита с образованием графита хлопьевидной формы.

По структуре металлической основы эти чугуны делятся на:

1) ковкие перлитные чугуны со структурой графит хлопьевидный + перлит (светлосердечный ковкий чугун);

2) ковкие ферритные чугуны со структурой графит хлопьевидный + феррит (темносердечный ковкий чугун).

Условное обозначение марки включает буквы КЧ (ковкий чугун) и цифровые обозначения величин минимального временного сопротивления при растяжении (σ_B) в МПа·10⁻¹ и относительного удлинения (δ) в %.

Согласно ГОСТ 1215-79, промышленность выпускает одиннадцать марок ковкого чугуна (таблица 8).

По механическим и технологическим свойствам ковкий чугун занимает промежуточное место между сталью и серым чугуном. Недостатком ковкого чугуна по сравнению с высокопрочным чугуном является ограничение толщины стенок для отливок и необходимость отжига.

Таблица 8 – Механические свойства ковкого чугуна

Марка чугуна	σ_B , МПа, не менее	δ , %	НВ	Структура металлической основы
КЧ 30-6	294	6	100-163	Феррит
КЧ 33-8	323	8	100-163	«
КЧ 35-10	333	10	100-163	«
КЧ 37-12	362	12	100-163	«
КЧ 45-7	441	7	150-207	«
КЧ 50-5	490	5	170-230	Перлит
КЧ 55-4	539	4	192-243	«
КЧ 60-3	588	3	200-269	«
КЧ 65-3	637	3	212-269	«
КЧ 70-2	686	2	241-285	«
КЧ 80-1,5	784	1,5	270-320	«

Ферритные ковкие чугуны имеют высокую пластичность. Перлитные ковкие чугуны обладают повышенной прочностью, твердостью, умеренной пластичностью и хорошими антифрикционными свойствами. Ферритные ковкие чугуны используют для изготовления деталей, эксплуатируемых при высоких динамических и статических нагрузках (картеры редукторов, ступицы, крюки, скобы), а также для менее ответственных деталей (головки, хомуты, гайки, глушители, фланцы, муфты и т.д.). Перлитные ковкие чугуны идут на изготовление вилок карданных валов, звеньев и роликов цепей конвейера, втулок, тормозных колодок.

2.5. *Высокопрочные чугуны* получают присадкой в жидкий чугун магния (или церия) в количестве 0,03-0,07%. Магний способствует получению графита в форме шаров (глобулей); кроме того, он повышает прочность металлической основы.

По структуре металлической основы эти чугуны делятся на:

- 1) высокопрочные ферритные чугуны со структурой графит шаровидный + феррит;
- 2) высокопрочные перлитно-ферритные чугуны со структурой графит шаровидный + перлит + феррит;
- 3) высокопрочные перлитные чугуны со структурой графит шаровидный + перлит.

Условное обозначение марки включает в себя буквы ВЧ – высокопрочный чугун и цифровое обозначение величины минимального временного сопротивления при растяжении (σ_B) в МПа·10⁻¹.

Различают восемь марок высокопрочных чугунов (ГОСТ 7293-85). Чугун с шаровидным графитом имеет широкий диапазон механических свойств (таблица 9).

Ферритные высокопрочные чугуны, характеризующиеся наивысшей среди чугунов пластичностью и вязкостью, обеспечивают литым деталям хладо- и

ударостойкость, хорошую свариваемость и обрабатываемость резанием. Перлитные высокопрочные чугуны обладают высокой сопротивляемостью к статическим и циклическим нагрузкам, износо- и задиростойкостью.

Высокопрочный чугун находит применение и как заменитель углеродистой стали. Из высокопрочного чугуна изготавливают как мелкие тонкостенные отливки (поршневые кольца), так и отливки массой до 15 т (шаботы ковочных молотов, станины и рамы прессов и прокатных станов). Из этих чугунов изготавливают отливки коленчатых валов (массой от нескольких килограммов до 2 – 3 т взамен кованых валов из стали), трубы, валки прокатных станов, детали турбин, суппорты, резцедержатели, планшайбы и другие детали станков.

Таблица 9 – Механические свойства высокопрочных чугунов

Марка чугуна	σ_B , МПа	δ , %	НВ	Структура металлической основы
ВЧ 35	350	22	140-170	Феррит
ВЧ 40	400	15	140-202	Феррит
ВЧ 45	450	10	140-225	Феррит +перлит
ВЧ 50	500	7	153-245	Феррит +перлит
ВЧ 60	600	3	192-277	Феррит +перлит
ВЧ 70	700	2	228-302	Перлит
ВЧ 80	800	2	248-351	Перлит
ВЧ 100	1000	2	270-360	Бейнит

3. ЗАДАНИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

3.1. В лабораторном журнале дайте классификацию углеродистых сталей по качеству, назначению и структуре.

3.2. Изучите, схематично зарисуйте и опишите микроструктуру образцов доэвтектоидных, эвтектоидных и заэвтектоидных сталей и укажите их свойства после отжига.

3.3. Определите по микроструктуре примерное содержание углерода для образцов доэвтектоидной стали.

3.4. Кратко опишите классификацию серых чугунов и способы их получения.

3.5. Ознакомьтесь, схематично зарисуйте и опишите микроструктуру серого, высокопрочного и ковкого чугунов, чугуна с вермикулярным графитом. Укажите их марки, состав, механические свойства и применение. Микроструктура каждого чугуна зарисовывается дважды: в нетравленном и травленном виде.

4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 4.1. Что такое феррит, перлит и цементит?
- 4.2. Как классифицируют стали по назначению, качеству и структуре?
- 4.3. Как определить содержание углерода в стали по микроструктуре?
- 4.4. Как классифицируют чугуны по форме графитовых включений и структуре металлической основы?
- 4.5. Как маркируются стали и чугуны?
- 4.6. Как получают чугуны с различной формой графита, и где они применяются?

Лабораторная работа №4. ЗАКАЛКА И ОТПУСК УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ

Цель работы: научиться по заданному химическому составу и требуемым свойствам определять режимы закалки и отпуска углеродистой стали; овладеть методикой проведения термической обработки.

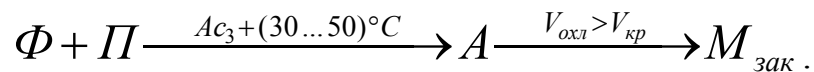
1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ

1.1. Наиболее распространенным видом упрочняющей термической обработки углеродистых сталей является закалка с последующим отпуском.

Закалка заключается в нагреве стали до температуры выше критической, выдержке при данной температуре и последующем охлаждении со скоростью не меньше критической скорости закалки $V_{кр}$, которая обеспечивает бездиффузионное превращение переохлажденного аустенита в мартенсит. Мартенсит – это пересыщенный твердый раствор углерода в α -Fe.

Цель закалки – повышение твердости, прочности и износостойкости стали.

1.2. Выбор температуры закалки. Доэвтектоидные стали подвергают полной закалке, их нагревают до температуры на $30-50^\circ\text{C}$ выше точки A_{c3} (рисунок 11). В этом случае сталь с исходной структурой перлит + феррит при нагреве претерпевает полную перекристаллизацию и приобретает аустенитную структуру, которая при последующем охлаждении со скоростью выше критической превращается в мартенсит:

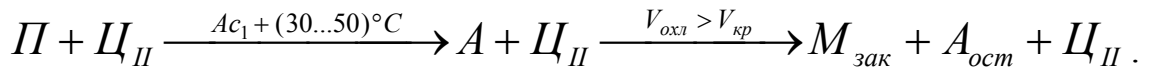
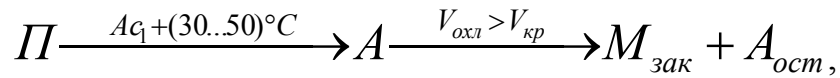


При нагреве выше A_{c3} на $30-50^\circ\text{C}$ зерно аустенита сохраняется мелким. Перегрев стали, т.е. нагрев до температур, значительно превышающих точку A_{c3} (на $150-200^\circ\text{C}$), способствует росту аустенитного зерна и получению структуры крупноигльчатого мартенсита, обладающего пониженной ударной вязкостью.

Закалку доэвтектоидных сталей от температур, соответствующих межкритическому интервалу ($A_{c1} \dots A_{c3}$), обычно не применяют, так как после закалки наряду с мартенситом в этом случае сохраняется часть феррита, который снижает твердость в закаленном состоянии и ухудшает механические свойства после отпуска.

Для эвтектоидных и заэвтектоидных сталей оптимальная температура закалки на $30 \dots 50^\circ\text{C}$ выше A_{c1} (неполная закалка). При таком нагреве в эвтектоидных сталях образуется аустенит, в заэвтектоидных – аустенит + цементит вторичный (частичная перекристаллизация). При охлаждении со скоростью выше критической аустенит превращается в мартенсит, а цементит сохраняется непревращенным. Цементит более твердый, чем мартенсит (НВ 800 у цементита и НВ 600 у мартенсита), поэтому твердость закаленной заэвтектоидной стали в данном случае получается максимальной. Кроме того, в структуре этих сталей после закалки имеется некоторое количество остаточного

аустенита $A_{ост}$ (5...10%), так как мартенситное превращение заканчивается в них при температурах ниже нуля и при обычной закалке идет не до конца.



Повышение температуры закалки выше A_{cm} вызывает растворение вторичного цементита и способствует росту зерна. Такая сталь в закаленном состоянии имеет крупные кристаллы мартенсита и большое количество остаточного аустенита (20...30 %). Наличие остаточного аустенита в закаленной стали ведет к снижению твердости, а наличие крупного зерна – к снижению ударной вязкости и к увеличению внутренних напряжений, которые могут вызвать появление трещин. Поэтому для заэвтектоидных сталей применяется только неполная закалка.

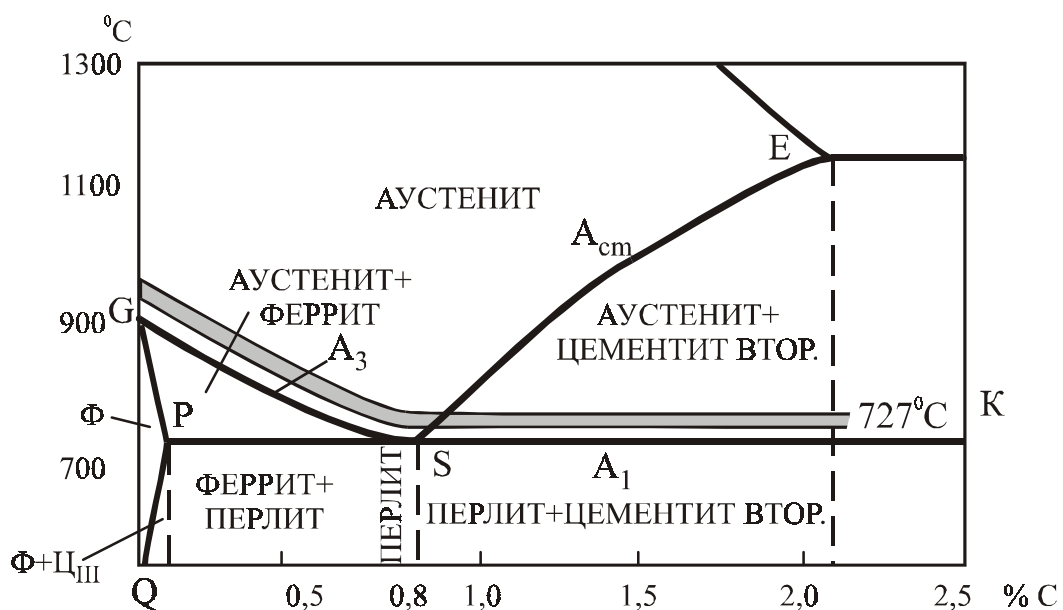


Рисунок 11 – Оптимальный интервал закалочных температур углеродистых сталей (темная полоса)

1.3. *Выдержка при нагреве* должна обеспечить полный прогрев и получение необходимой структуры по всему сечению изделия, но не должна быть слишком большой, чтобы не вызвать рост зерна и обезуглероживание поверхностных слоев стали.

Для определения продолжительности нагрева пользуются опытными данными (таблица 10).

Таблица 10 – Нормы нагрева стали в минутах при термической обработке

Температура нагрева, °C	Норма нагревания образцов, мин на 1 мм		
	круг на 1 мм диаметра	квадрат на 1 мм толщины	пластина на 1 мм толщины
600	2,0	3,0	4,0
700	1,5	2,2	3,0
800	1,0	1,5	2,0
900	0,8	1,2	1,6
1000	0,4	0,6	0,8

1.4. Охлаждающими средами при закалке углеродистых сталей чаще всего является вода (иногда с добавлением солей, щелочей или кислот для увеличения охлаждающей способности), реже минеральные масла.

Для углеродистых сталей скорость охлаждения в воде (V_4 , рисунок 12) является выше критической скорости закалки ($V_{кр}$ – минимальная скорость охлаждения, при которой весь аустенит переохлаждается до точки M_n и превращается в мартенсит); превращение происходит при температуре ниже M_n и аустенит превращается в мартенсит.

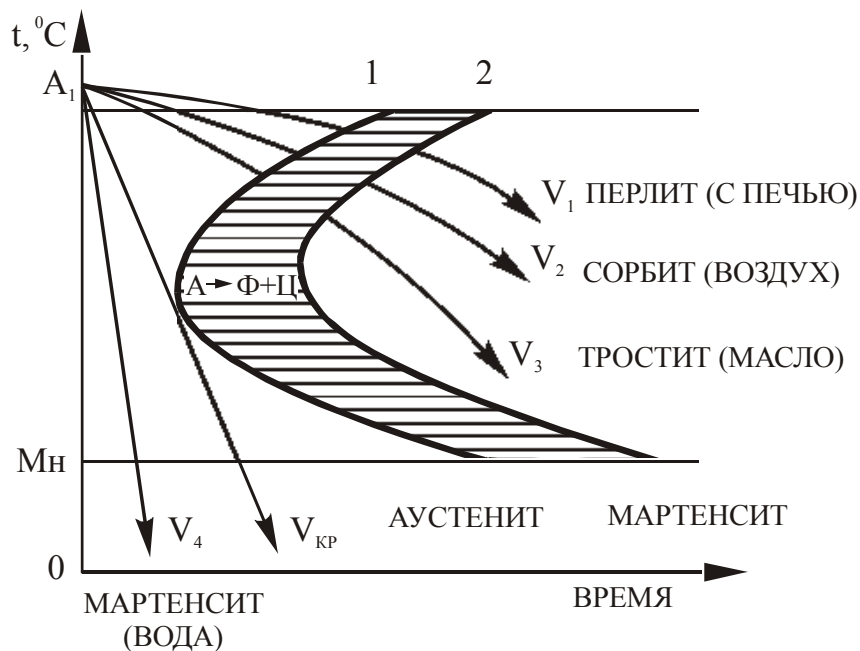


Рисунок 12 – Диаграмма изотермического распада аустенита

1- температура начала диффузионного распада переохлажденного аустенита; 2- температура конца диффузионного распада переохлажденного аустенита; M_n - температура начала мартенситного превращения

Температура мартенситного превращения зависит только от химического состава стали. Мартенситное превращение в стали одного состава начинается всегда при одной и той же температуре.

Если охлаждать сталь со скоростью меньше критической, то образуются феррито-цементитные смеси различной степени дисперсности. Чем больше переохлаждение, тем тоньше получается феррито-цементитная структура, т.е. меньше межпластиночное расстояние Δ_0 , равное усредненной сумме толщин двух пластинок феррита и цементита, и выше твердость. Кривая V_1 (рисунок 12) характеризует медленное охлаждение с печью – отжиг, при этом образуется структура перлит ($\Delta_0 = 0,6 - 1,0$ мкм); кривая V_2 соответствует скорости охлаждения на воздухе – нормализации – с образованием структуры сорбита ($\Delta_0 = 0,25 - 0,3$ мкм); кривая V_3 относится к скорости охлаждения в масле с получением структуры тростита ($\Delta_0 = 0,1$ мкм). Перлит, сорбит и тростит, образующиеся при диффузионном распаде переохлажденного аустенита, являются механической смесью феррито-цементитных частиц, различающихся лишь степенью их дисперсности. С увеличением степени дисперсности феррито-цементитной структуры твердость, пределы прочности, текучести и выносливости возрастают, а относительное удлинение и относительное сужение уменьшаются. Закалка стали сопровождается существенным увеличением объема, что в условиях высокой скорости и неоднородности превращения по всему объему закаливаемого изделия вызывает появление значительных внутренних напряжений, которые могут привести к короблению изделий и образованию трещин в процессе закалки.

Сталь, закаленная на мартенсит, обладает высокой твердостью и хрупкостью; это делает ее не пригодной для практического использования. Для получения требуемых свойств и снижения внутренних напряжений после закалки применяется отпуск.

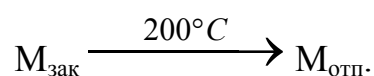
1.5. Отпуском стали называется нагрев закаленной стали до температур, лежащих ниже критической точки A_{c1} , выдержка при данной температуре и последующее охлаждение. Скорость охлаждения после отпуска практически не влияет на структуру стали. Чтобы избежать термических напряжений, охлаждение обычно ведут на воздухе.

Отпуск является окончательной операцией термической обработки, в результате чего сталь получает требуемые механические свойства.

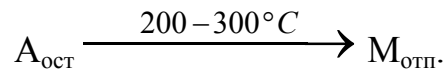
Превращения при отпуске связаны с процессом распада мартенсита и остаточного аустенита и образованием мелкодисперсных структур – сорбита и тростита.

Различают четыре вида превращений при отпуске.

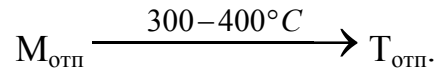
Первое превращение при отпуске (до 200°C) заключается в превращении мартенсита закалки (тетрагонального) в мартенсит (кубический). Это превращение связано с уменьшением степени тетрагональности мартенсита за счет выделения углерода из мартенсита в виде мельчайших пластинок ϵ -карбида (Fe_2C):



Второе превращение при отпуске ($200-300^\circ\text{C}$) заключается в превращении остаточного аустенита в мартенсит отпуска:



Третье превращение при отпуске протекает в интервале температур 300-400°C и заключается в полном распаде мартенсита отпуска на феррито-цементитную смесь пластинчатого строения – тростит отпуска:



Четвертое превращение при отпуске (500-600°C) связано с укрупнением и коагуляцией цементитных частиц. Структура феррито-цементитной смеси с зернистым строем, полученная в результате такого высокого отпуска, называется сорбитом отпуска.

В зависимости от структуры и свойств (рисунок 13) различают три вида отпуска: низкий, средний и высокий.

Низкий отпуск (150-250 °С, выдержка 1 – 2,5 ч) обеспечивает получение структуры мартенсита отпуска. Низкий отпуск назначается обычно для снятия внутренних напряжений, некоторого повышения вязкости и пластичности без заметного снижения твердости (HRC 60) и прочности. Такому отпуску подвергают режущий и мерительный инструмент, а также детали, прошедшие цементацию, цианирование или поверхностную закалку.

Средний отпуск (350-450 °С, выдержка 1 – 2 ч) обеспечивает получение тростита отпуска. Наблюдается повышение упругих свойств стали при сохранении высокой твердости (HRC 40-45) и прочности. Этому виду отпуска подвергаются детали, которым требуются высокие упругие свойства (рессоры и пружины).

Высокий отпуск (500-650°C, выдержка 0,5 – 1 ч) создает структуру сорбит отпуска, который дает наилучшее сочетание прочности, пластичности и ударной вязкости.

Термообработка, состоящая из закалки и высокого отпуска, называется термическим улучшением стали. Улучшению подвергают ответственные детали машин, испытывающие статические, ударные и знакопеременные нагрузки.

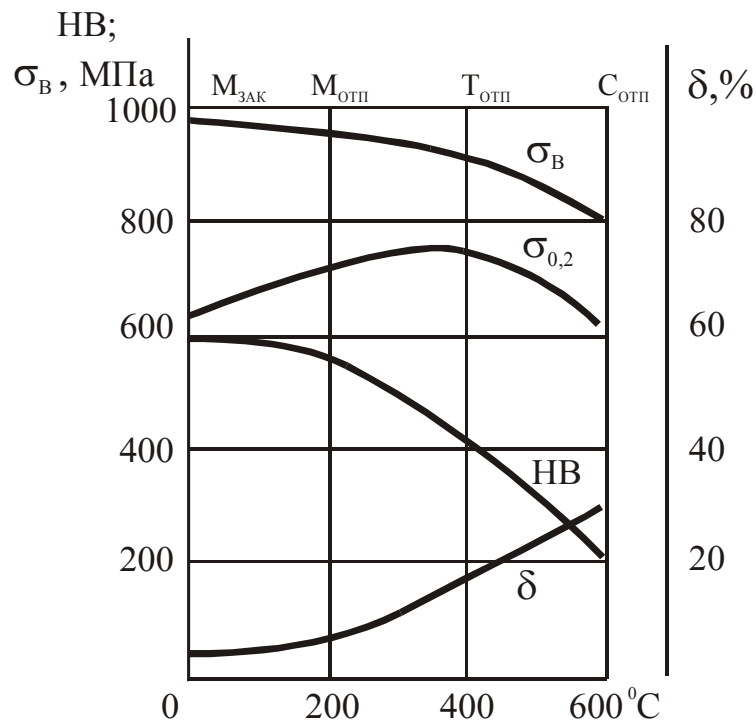


Рисунок 13 – Изменение механических свойств стали в зависимости от температуры отпуска

2. ЗАДАНИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

2.1. Получите у преподавателя (лаборанта) образцы углеродистых сталей. Каждый студент получает образец стали.

2.2. По диаграмме Fe-C определите критические точки для данной стали и установите температуру закали.

2.3. Измерьте твердость образца в исходном (отожженном) состоянии по Роквеллу (по шкале В). Переведите полученные значения твердости HRC в HB по таблицам.

2.4. Поместите образцы в печь, нагретую до выбранной температуры закали. Время выдержки определите по табл. 10.

2.5. Проведите охлаждение образцов в воде, масле и на воздухе (по указанию преподавателя). Закалку в воде и масле производить следующим образом: образец достать клещами из печи и быстро перенести в бак с водой или маслом. В охладителе образец необходимо энергично перемешивать для того, чтобы снять паровую рубашку на поверхности образца.

2.6. Зачистите поверхность образца на абразивном круге (для снятия окалины и обезуглероженного слоя).

2.7. Измерьте твердость образца после закали по Роквеллу (шкала С). Переведите числа твердости HRC в HB.

2.8. Проведите отпуск закаленных образцов. Для каждой марки стали проводятся все три вида отпуска (200°C, 1 ч; 400°C, 45 мин; 600°C, 30 мин). Каждый студент выполняет один вид отпуска.

2.9. Поместите в печи, нагретые до температур отпуска, образцы, выдержите их необходимое время и охладите на воздухе.

2.10. Зачистите образцы после отпуска и измерьте твердость по Роквеллу (шкала С).

2.11. Заполните таблицу в лабораторном журнале.

2.12. Постройте графики зависимости твердости от охлаждающей среды при закалке и от температуры отпуска.

2.13. Зарисуйте схемы структур в исходном состоянии, после закалки и отпуска; укажите структурные составляющие и твердость.

2.14. Напишите выводы о влиянии охлаждающей среды на структуру и свойства при закалке, об изменении твердости в зависимости от температуры отпуска.

2.15. По результатам испытаний определите оптимальные режимы термической обработки исследуемых сталей.

3. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

3.1. Какие превращения происходят в сплавах при температурах A_1 , A_3 , A_4 , A_{cm} ?

3.2. В чем сущность перлитного и мартенситного превращений?

3.3. Что такое критическая скорость закалки, и каковы факторы, влияющие на нее?

3.4. От чего зависит количество остаточного аустенита при закалке? Сущность обработки холодом.

3.5. Что такое закалка? Какова ее цель?

3.6. Как выбирается температура закалки для сталей с различной исходной структурой?

3.7. Какие существуют виды закалки? Их назначения.

3.8. В чем заключаются превращения стали при отпуске?

3.9. Какова структура и свойства стали после окончательной термической обработки?

3.10. Как выбрать оптимальный режим термической обработки (закалки и отпуска) для деталей конкретного назначения?

Лабораторная работа №5. ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СТАЛИ

Цель работы: ознакомиться с основными процессами химико-термической обработки стали; изучить и охарактеризовать микроструктуру стали после химико-термической обработки.

1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ

Химико-термическая обработка – это процесс изменения химического состава и свойств поверхностной зоны металла за счет диффузии в нее различных элементов (углерода, азота, хрома и др.) из внешней среды при повышенных температурах.

Химико-термическая обработка включает три последовательные стадии:

- 1) образование (диссоциация) активных атомов в насыщающей среде вблизи поверхности;
- 2) адсорбция атомов диффундирующего элемента поверхностью металла;
- 3) диффузию насыщающего элемента вглубь металла. Процесс диффузии возможен только при наличии растворимости диффундирующего элемента в обрабатываемом металле или при образовании с ним химического соединения.

В результате химико-термической обработки образуется поверхностный слой, который отличается от исходного материала химическим составом, структурой и свойствами. Материал детали под диффузионным слоем, не затронутый воздействием окружающей среды, называют сердцевидной.

Качественной и количественной характеристикой химико-термической обработки являются толщина диффузионного слоя, распределение концентрации насыщающего элемента по толщине слоя, структура и свойства слоя (твердость, износостойкость, коррозионная стойкость и т. д.).

Наиболее распространенными видами химико-термической обработки являются цементация, азотирование и цианирование.

1.1. Цементация – диффузионное насыщение поверхностного слоя углеродом в углеродосодержащей среде (карбюризаторе) при температуре выше $A_{с3}$ ($\sim 950^{\circ}\text{C}$), когда устойчив аустенит, растворяющий углерод в больших количествах (до 1,3%).

Цель цементации – получение изделия с твердой и износостойкой поверхностью при сохранении вязкой, хорошо выдерживающей динамические нагрузки сердцевины (зубчатые колеса, шестерни, коробки передач).

Для цементации обычно используют низкоуглеродистые (до 0,25% C), чаще легированные стали: сталь 10, 15, 15X, 18ХГТ, 20ХФ, 18Х2Н4ВА.

На цементацию детали поступают после механической обработки с припуском на шлифование 0,05...0,1 мм. Во многих случаях цементации подвергается только часть детали; тогда участки, не подлежащие упрочнению, защищают тонким слоем меди (20...40 мкм).

Цементацию осуществляют в следующих средах:

- в твердой (древесный уголь + углекислая соль) – цементация в твердом карбюризаторе;
- в газовой среде – газовая цементация.

При цементации в твердом карбюризаторе атомарный углерод образуется в результате диссоциации окиси углерода



При газовой цементации наиболее качественный слой получается в случае использования природного газа (CH_4). Атомарный углерод образуется в результате диссоциации



Образующийся атомарный углерод диффундирует в аустенит и насыщает его.

Скорость цементации составляет примерно 0,1 мм/час.

Процесс цементации в твердом карбюризаторе длителен, трудоемок, труднорегулируем (применяется только в мелкосерийном и индивидуальном производстве) и поэтому вытесняется более прогрессивным процессом газовой цементации.

Цементацию проводят так, чтобы содержание углерода в поверхностном слое не превышало 0,8...1,0%. Более высокая концентрация углерода ведет к образованию значительного количества вторичного цементита, придающего слою повышенную хрупкость.

Цементованный слой имеет переменную концентрацию углерода по глубине, убывающую от поверхности к сердцевине (рисунок 15а). После медленного охлаждения от температуры цементации в структуре слоя можно различить три зоны (рисунок 14): заэвтектоидную, состоящую из перлита и цементита вторичного; эвтектоидную, состоящую из перлита и доэвтектоидную – из перлита и феррита. Количество феррита в слое непрерывно возрастает по мере приближения к сердцевине. В случае цементации сталей, легированных карбидообразующими элементами (Cr, Mn, Ti и др.), в слое возможно образование карбидов глобулярной формы, способствующих повышению твердости. Карбидообразующие элементы увеличивают концентрацию углерода в поверхностном слое до 1,8...2,0%, повышают глубину цементованного слоя.

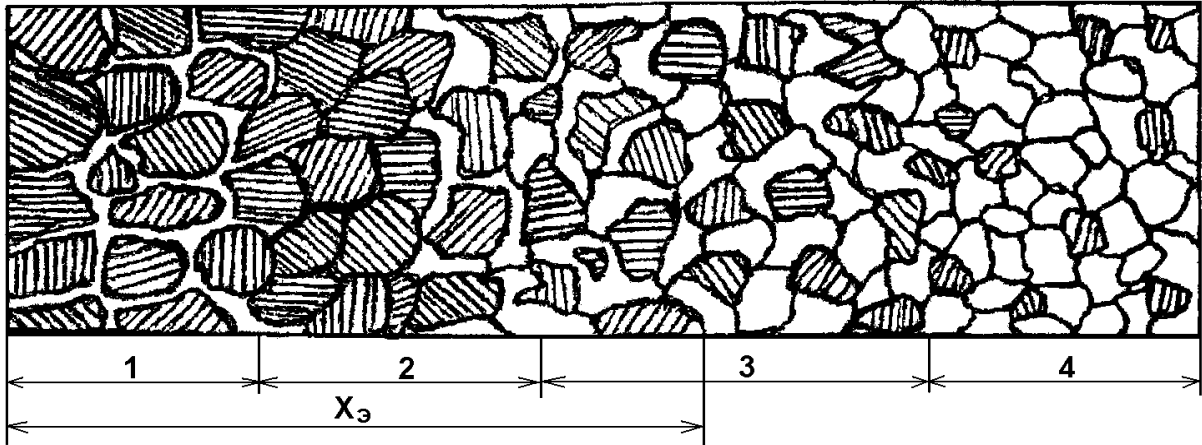


Рисунок 14 – Микроструктура цементованного слоя после медленного охлаждения

1 – заэвтектоидная зона (перлит + цементит вторичный в виде тонкой светлой сетки); 2 – эвтектоидная зона (перлит); 3 – переходная доэвтектоидная зона (перлит – темные зерна, феррит – светлые зерна); 4 – сердцевина; $X_э$ – эффективная толщина цементованного слоя.

За эффективную толщину цементованного слоя принимают:

- 1) сумму заэвтектоидной, эвтектоидной и половины переходной (доэвтектоидной) зон (рисунок 14);
- 2) толщину слоя с содержанием углерода до 0,45% (рисунок 15а);
- 3) толщину слоя с твердостью до HRC 50 после термической обработки (рисунок 15б). Глубина цементованного слоя составляет обычно 0,5...2,0 мм (редко до 4 мм).

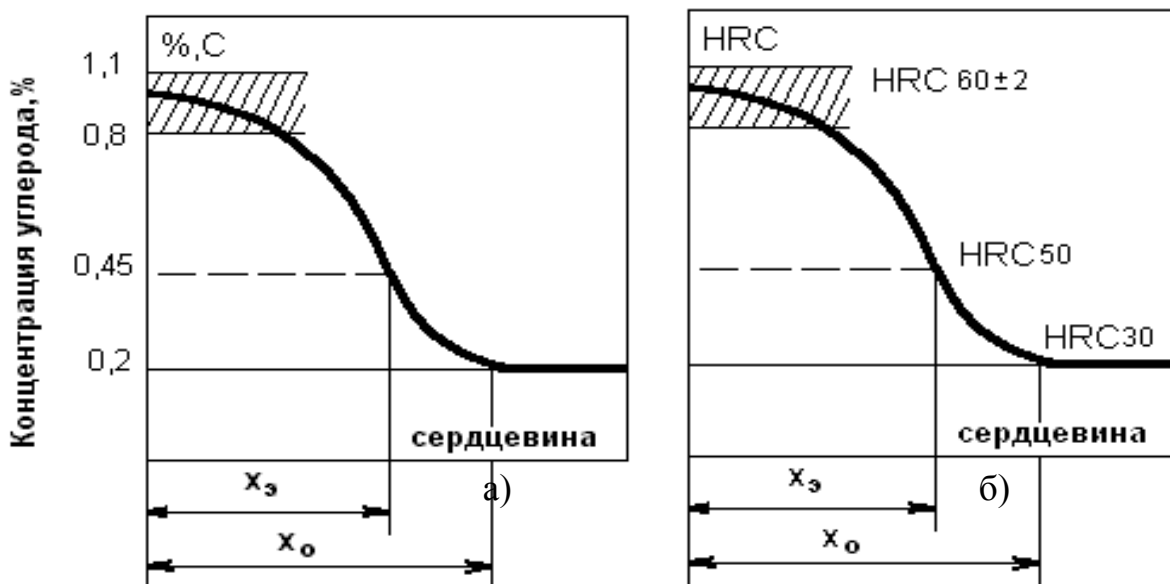


Рисунок 15 – Схема распределения углерода (а) и твердости после закалки и низкого отпуска (б) по толщине цементованного слоя: $X_э$ – эффективная толщина слоя; X_0 – общая толщина слоя

Окончательные свойства цементованных изделий достигаются в результате термической обработки, выполняемой после цементации.

Термическая обработка часто преследует цель не только получить высокую твердость поверхности, но и измельчить зерно сердцевины и цементованного слоя, неизбежно увеличивающееся во время длительной выдержки при высокой температуре цементации.

В зависимости от назначения детали применяют различные варианты термической обработки. Менее ответственные детали подвергают закалке непосредственно с цементационного нагрева и последующим низким отпуском (рисунок 16а). Крупное зерно аустенита, выросшее в результате длительной цементации, дает грубокристаллический мартенсит в поверхностном слое и крупнозернистую ферристо-перлитную структуру в сердцевине детали. Эти недостатки устраняют при использовании наследственно мелкозернистых сталей. Использование подстуживания при закалке до 750...800°C снижает внутренние напряжения, а обработка холодом уменьшает количество остаточного аустенита в цементованном слое.

При более высоких требованиях к структуре детали после цементации подвергают охлаждению на воздухе, однократной закалке с температуры 880...900°C и низкому отпуску (рисунок 16б). При этом в сердцевине и на поверхности детали происходит перекристаллизация и измельчение зерна, однако в поверхностном слое происходит перегрев, так как оптимальный закалочный нагрев заэвтектоидной стали 750...800°C.

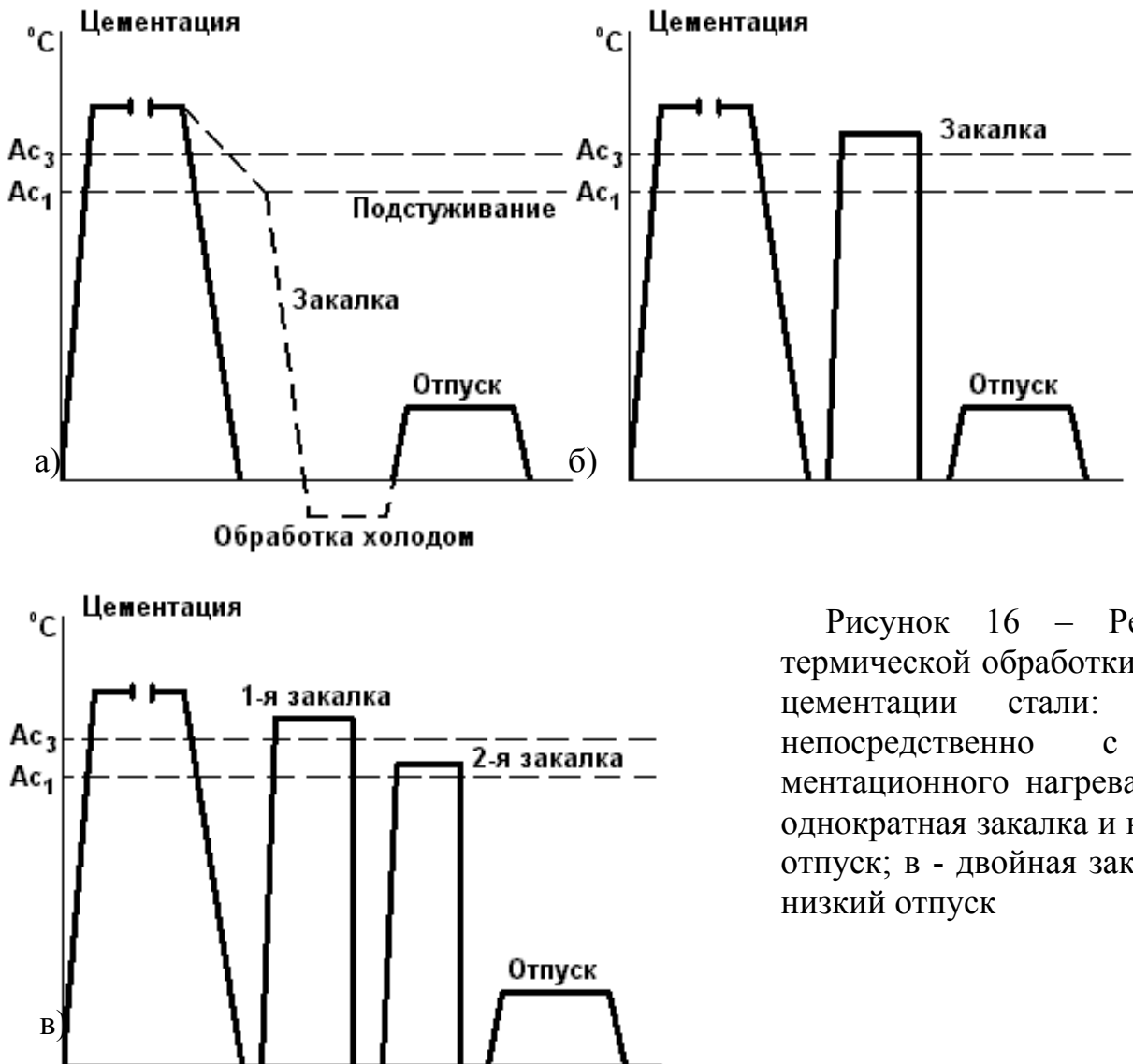


Рисунок 16 – Режимы термической обработки после цементации стали: а – непосредственно с цементационного нагрева; б – однократная закалка и низкий отпуск; в - двойная закалка и низкий отпуск

Особо ответственные детали после цементации подвергают двойной закалке с низким отпуском (рисунок 16в). Первая закалка с высокой температуры (880...900°C) измельчает зерно сердцевины и устраняет цементитную сетку в поверхностном слое; вторая закалка от более низких температур (760...780°C) устраняет перегрев поверхностного слоя, обеспечивает мелкое зерно в науглероженном слое и придает ему максимальную твердость. Низкий отпуск при 160...180°C служит для частичного снятия внутренних напряжений.

Микроструктура цементованного слоя стали после термической обработки: в поверхностном слое – отпущенный мартенсит с карбидами, сердцевина углеродистых сталей – феррит и перлит (HRC 20), а легированных – феррит и низкоуглеродистый мартенсит или один низкоуглеродистый мартенсит (в виду низкого содержания углерода он не обладает хрупкостью и имеет HRC 25-35).

Твердость цементованного слоя после термической обработки составляет примерно HRC 60. Теплостойкость слоя – 250°C.

Более прогрессивным видом по сравнению с цементацией является *нитроцементация* – процесс диффузионного насыщения поверхностного слоя стали одновременно углеродом и азотом в газовой среде, состоящей из

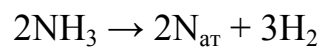
науглераживающего газа и аммиака. Нитроцементацию проводят при 860°C, продолжительность процесса 4...10 час., толщина слоя обычно 0,2...0,8 мм. После нитроцементации закалка производится непосредственно из печи с подстуживанием, далее проводят низкий отпуск при 160...180°C. Микроструктура поверхностного слоя состоит из мелкоигольчатого мартенсита и небольшого количества мелких равномерно распределенных карбонитридов. Твердость слоя после закалки и низкого отпуска HRC 60. Нитроцементации обычно подвергают детали сложной конфигурации, склонные к короблению.

1.2. Азотирование – процесс диффузионного насыщения поверхностного слоя стали азотом при нагреве ее до 500...750°C в аммиаке.

Цель азотирования – повышение твердости, износостойкости, коррозионной стойкости поверхностного слоя деталей.

Азотированию подвергают среднеуглеродистые легированные стали, содержащие Al, Cr, Mo, V и др. элементы, которые образуют с азотом стойкие и твердые нитриды: 38ХМЮА, 38ХВФЮА и др. Однако повышенное количество алюминия в этих сталях часто дает хрупкий поверхностный слой. Поэтому используются менее дефицитные стали 30ХГТ, 36ХНТМФА, 30ХТ2 и др. Твердость азотированного слоя в этих сталях ниже (HV 600...800), но он менее хрупок.

Процесс азотирования проводится чаще всего в герметических камерах в среде газообразного аммиака, диссоциирующего по реакции



Образующийся атомарный азот адсорбируется поверхностью стальных деталей и диффундирует в металл, образуя нитриды Cr, Mo, Al, V.

В зависимости от температуры и назначения применяются две разновидности азотирования: 1) *твердостное* азотирование (для повышения твердости и износостойкости) при температуре 500...620°C в течение 30...90 часов; скорость азотирования составляет примерно 0,01 мм/час, оптимальная толщина слоя 0,3...0,6 мм, твердость поверхностного слоя HV 1100...1200, теплостойкость слоя 500...550°C; 2) *антикоррозионное* азотирование при 650...750°C в течение нескольких часов; толщина слоя 0,01...0,03 мм, твердость до 600 HV. Такому процессу подвергают изделия как из легированных, так и из простых углеродистых сталей. Коррозионная стойкость достигается за счет образования сплошного слоя ϵ – фазы на поверхности изделия; ϵ – фаза имеет высокую стойкость против коррозии на воздухе, в воде, в водяном паре.

При азотировании в поверхностном слое создаются остаточные напряжения сжатия, что резко повышает усталостную прочность изделий. Поэтому для повышения усталостной прочности используют азотирование деталей из различных по составу легированных конструкционных сталей (рисунок 17). Твердость их поверхностного слоя относительно низка (HV 600...800).

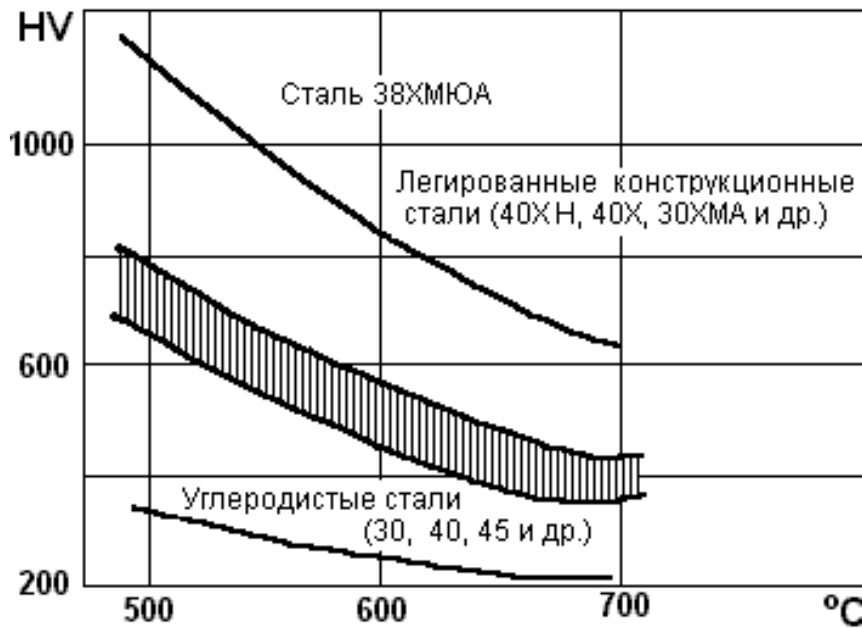


Рисунок 17 – Поверхностная твердость азотированного слоя в сталях различных марок (продолжительность азотирования – 48 часов)

Значительное сокращение времени азотирования (до 1,5...3 часов) достигается при ионном азотировании, когда между катодом (деталью) и анодом (контейнером установки) возбуждается тлеющий разряд. Происходит ионизация газа и ионы азота, бомбардируя поверхность катода, нагревают его до температуры насыщения.

Азотирование является окончательной обработкой. Поэтому детали проходят термическую обработку до азотирования для придания необходимых механических свойств сердцевине деталей, а также для подготовки структуры с целью получения наилучших свойств азотированного слоя. Обычно такая термическая обработка сводится к закалке с высоким отпуском (улучшению). После такой термической обработки металл приобретает структуру сорбита, имеющего высокую прочность и вязкость. Эта структура сохраняется в сердцевине детали и после азотирования (рисунок 18).

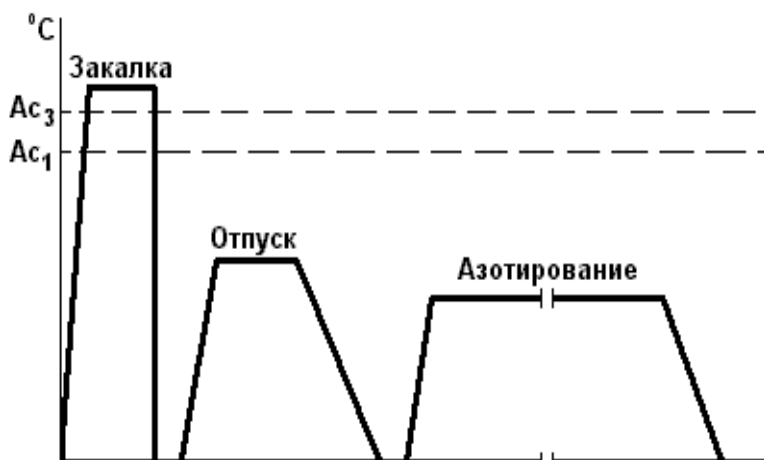


Рисунок 18 – Режим предварительной термической обработки и азотирования стали

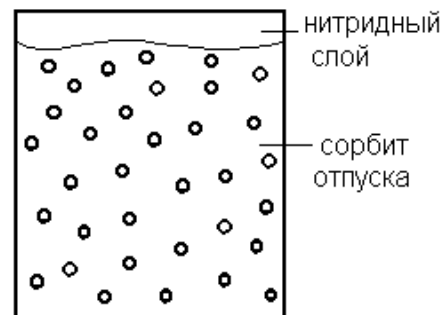


Рисунок 19 – Схема микроструктуры азотирования легированной стали.

Азотированию для достижения износостойкости подвергают цилиндры двигателей насосов, шестерни, копиры станков, втулки, клапаны двигателей внутреннего сгорания, матрицы и пуансоны штампов и всевозможные детали для повышения коррозионной стойкости (болты, гайки, петли и т.д.).

Недостатком азотирования является хрупкость азотированного слоя.

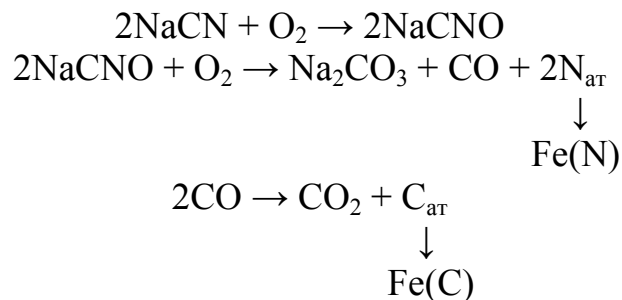
После азотирования проводят окончательное шлифование или доводку. Иногда совмещают процессы азотирования и отпуска.

Микроструктура азотированного слоя состоит из белого нетравящегося слоя нитридов на поверхности и сорбитообразной структуры в сердцевине (рисунок 19).

1.3. Цианирование – диффузионное насыщение поверхностного слоя стали одновременно углеродом и азотом.

Цель цианирования – повышение твердости, износостойкости, усталостной прочности деталей машин, а также твердости, износостойкости и теплостойкости инструмента. Цианирование проводят, в основном, в расплавленных цианистых солях (NaCN, KCN).

Цианистый натрий (цианистый калий) окисляется кислородом воздуха и происходят следующие реакции:



Выделяющийся атомарный углерод и азот диффундируют в сталь, образуя цианированный (карбонитридный) поверхностный слой.

Технологически процессы разделяются на высоко-температурное и низкотемпературное цианирование.

Высокотемпературное цианирование проводят при температуре 930...950°C и применяют для деталей из конструкционных мало- и среднеуглеродистых и легированных сталей. Диффузионный слой толщиной 0,2...0,5 мм получается за 1,5...6 часов, при этом поверхностный слой в большей степени насыщается углеродом (до 0,8...1,2%) и в меньшей степени азотом (0,2...0,3%). После высокотемпературного цианирования детали охлаждают на воздухе, а затем проводят закалку и низкотемпературный отпуск.

Микроструктура цианированного слоя после высоко-температурного цианирования аналогична структуре цементованного слоя. После закалки на поверхности образуется мартенсит с равномерно распределенными карбонитридами. Твердость цианированного слоя после термообработки HRC 65, теплостойкость слоя 250°C.

Процесс цианирования по сравнению с цементацией требует меньшего времени для получения слоя заданной величины, характеризуется значительно меньшими деформациями и короблением деталей сложной формы и более высоким сопротивлением износу и коррозии.

Недостатком цианирования является высокая стоимость, ядовитость цианистых солей и необходимость в связи с этим принятия специальных мер по охране труда.

После цианирования детали приобретают матовую красивую поверхность, поэтому цианистые ванны часто используют для придания «товарного» вида продукции. Для этого детали достаточно нагреть под закалку в цианистых ваннах без выдержки.

Низкотемпературное цианирование проводят при 540...560°C и применяют для улучшения режущих свойств и повышения теплостойкости окончательно термически обработанного инструмента из быстрорежущей стали и ее заменителей. При низкотемпературном цианировании инструмента из стали Р18, Р6М5 и др. в течение 0,5...3 часов получается слой 0,03...0,05 мм. Микроструктура цианированного слоя представляет собой смесь мартенсита и карбонитридных фаз (рисунок 20). Твердость этого слоя HRC 65, теплостойкость 630°C; износостойкость слоя выше в 1,5 – 2 раза по сравнению с износостойкостью деталей, прошедших обычный режим термической обработки.



Рисунок 20 – Схема микроструктуры стали Р18 после низкотемпературного цианирования

2. ЗАДАНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

2.1. Проведите микроанализ шлифов коллекции образцов стали, подвергнутых химико-термической обработке.

2.2. Определите, охарактеризуйте и схематически зарисуйте микроструктуры стали после цементации (медленно охлажденного образца и термически обработанного), азотирования и цианирования.

2.3. Определите глубину поверхностного слоя после различных видов химико-термической обработки с помощью окуляр-микрометра на микроскопе.

2.4. Составьте отчет о работе, в котором коротко опишите сущность процессов химико-термической обработки стали и объясните их назначение; приведите схему структур стали после цементации, азотирования и цианирования. Под каждым рисунком укажите марку стали, вид и режим химико-термической

обработки, структуру, глубину диффузионного поверхностного слоя, его твердость и теплостойкость.

3. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 3.1. В чем сущность процесса цементации, ее назначение?
- 3.2. Какие стали подвергают цементации?
- 3.3. Как выбирается температура проведения цементации?
- 3.4. Какова зависимость между глубиной слоя и продолжительностью цементации?
- 3.5. Как определить глубину цементованного слоя? Что такое эффективная глубина цементованного слоя?
- 3.6. Какие виды термической обработки проводятся после цементации и каковы их цели?
- 3.7. Укажите основные структуры и свойства цементованного слоя.
- 3.8. В чем сущность процесса и цель азотирования?
- 3.9. Какие существуют виды азотирования?
- 3.10. Какова структура и свойства азотированного слоя?
- 3.11. Какие стали подвергают азотированию?
- 3.12. Для каких целей применяется низкотемпературное цианирование, и в чем его сущность?
- 3.13. Что такое высокотемпературное цианирование?
- 3.14. Укажите области применения различных видов ХТО.

4. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

4.1. При проведении лабораторных работ обязательно выполнять установленные правила обращения с оборудованием, эксплуатационные инструкции и требования производственной санитарии.

4.2. Каждый студент должен помнить, что, проводя опыты, он пользуется опасным для жизни напряжением. Опасным считается напряжение свыше 42 В при токе 0,01 А.

4.3. Запрещается пользоваться неисправными штекерами, соединительными проводами с поврежденной изоляцией, незаземленными паяльниками.

Запрещается выполнение работ на неисправном оборудовании, а также при открытых токоведущих частях.

4.4. При возникновении аварийных ситуаций (замыкания и пробой в электроустановках, загорания) и неисправности аппаратуры необходимо выключить электропитание, принять меры для ликвидации аварии и доложить об этом руководителю работ.

4.5. При возникновении пожара необходимо выключить общий рубильник, предпринять попытки тушения своими силами, если это невозможно, необходимо покинуть помещение и сообщить о пожаре по телефону 01.

4.6. После окончания работы следует выключить все токоприемники и обесточить силовую проводку общим рубильником, привести рабочие места в соответствии с требованиями производственной санитарии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лахтин, Ю.М. Материаловедение: Учебник для высш. техн. учеб. заведений/Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. – М.: Машиностроение, 1990.
2. Мозберг, Р.К. Материаловедение: Учеб. пособие/ Р. К. Мозберг. – М.: Высш. шк., 1991.

Учебное издание

Кочеткова Лидия Павловна
Кабешова Людмила Яковлевна

**ПРАКТИКУМ
ПО МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЮ**

Часть I

Учебное пособие

Л.П. Кочеткова
Л.Я. Кабешова

**ПРАКТИКУМ
ПО МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЮ**

Часть I

Учебное пособие