

Томский К.О.  
Шабаганова С.Н.  
Иванова М.С.

# ПРАКТИКУМ: МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ.

Учебное издание.

Для студентов направления  
21.03.01. "НЕФТЕГАЗОВОЕ ДЕЛО"  
и 21.05.04. "ГОРНОЕ ДЕЛО"

УДК 621.7(075.8)

ББК 30.6

T56

**Авторы:**

*К.О. Томский*, кандидат технических наук, (МПТИ (ф) СВФУ);  
*С.Н. Шабаганова*, кандидат технических наук, (МПТИ (ф) СВФУ);  
*М.С. Иванова*, кандидат химических наук, (МПТИ (ф) СВФУ).

**Рецензент**

*О.Ю. Елагина*, доктор технических наук,  
профессор (РГУ (НИУ) нефти и газа им. И. М. Губкина).

T56 **Практикум: материаловедение** : учебное пособие / К.О. Томский,  
С.Н. Шабаганова, М.С. Иванова. – Москва : Знание-М, 2020. – 144 с.

ISBN 978-5-6044363-8-7

Настоящий практикум по материаловедению составлен для студентов направления 21.03.01 «Нефтегазовое дело» и 21.05.04 «Горное дело» и других технических направлений и специальностей, изучающих в рамках учебного плана данную дисциплину.

Жизнь современного человека невозможно представить без металлов, сталей и сплавов. Поэтому ознакомление с оборудованием нефтегазовой и горной отрасли необходимо начинать с изучения материалов, из которых оно изготовлено. Курс «Материаловедение» является дисциплиной, имеющей большое значение для создания базовой основы изучения специальных технических дисциплин. В курсе представлена информация о строении и свойствах металлов, основах теории сплавов, теории термической обработки.

Приведены лабораторные и практические работы. Представленные задания способствуют закреплению материала, изучаемого на занятиях, развивают техническое мышление студентов.

**УДК 621.7(075.8)**  
**ББК 30.6**

ISBN 978-5-6044363-8-7

© Томский К.О., Шабаганова С.Н., Иванова М.С.,  
2020

© Издательство «Знание-М», 2020

## Оглавление

Раздел 1. ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ.....	5
«Экспериментальное определение диаграммы деформирования малоуглеродистой стали при растяжении».....	5
«Определение модуля упругости и коэффициента Пуассона для стали» ....	12
«Экспериментальное определение диаграммы деформирования материала при сжатии».....	18
«Определение твердости материалов» .....	24
«Термическая обработка углеродистых сталей: отжиг, нормализация, закалка».....	36
«Изучение принципа работы и устройства металлографического микроскопа БИОМЕД ММР-1» .....	43
«Приготовление шлифов для металлографического анализа».....	51
«Изучение микроструктуры углеродистой стали в равновесном состоянии» ...	62
«Изучение микроструктуры легированной стали».....	68
«Изучение микроструктуры цветных сплавов».....	78
Раздел 2. ПРАКТИЧЕСКИЕ РАБОТЫ.....	94
«Кристаллическое строение металлов».....	94
«Маркировка и свойства углеродистых сталей и машиностроительных чугунов по ГОСТам» .....	96
«Влияние углерода на механические свойства стали».....	103
Термическая обработка стали.....	106
Варианты заданий.....	125

Раздел 3. ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ .....	129
Тест. Вариант № 1 .....	129
Тест. Вариант № 2 .....	130
Тест. Вариант № 3 .....	131
Тест. Вариант № 4 .....	132
Тест. Вариант № 5 .....	134
Тест. Вариант № 6 .....	135
Тест. Вариант № 7 .....	136
Тест. Вариант № 8 .....	137
Тест. Вариант № 9 .....	138
Тест. Вариант № 10 .....	140
ЛИТЕРАТУРА .....	142

## Раздел 1. ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

### Лабораторная работа

#### «Экспериментальное определение диаграммы деформирования малоуглеродистой стали при растяжении»

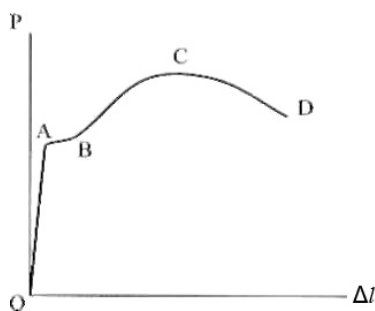
**Цель работы:** изучение способа испытаний материалов на растяжение, изучение диаграммы деформирования малоуглеродистой стали при растяжении, определение механических характеристик материалов при растяжении.

#### Теоретические основы

Для испытания на растяжение используются специально изготавливаемые образцы, которые большей частью вытачиваются из прутковых заготовок или вырезаются из листа. Основной особенностью таких образцов является наличие усиленных мест захвата и плавного перехода к сравнительно узкой ослабленной рабочей части.

Длина рабочей части  $l_{РАБ}$  выбирается обычно в 15 раз большей диаметра  $d$ . При замерах деформаций используется только часть этой длины, не превышающая десяти диаметров. Существуют, однако, и более короткие образцы, у которых отношение  $l_{РАБ} / d$  равно 5. Основной задачей испытания на растяжение является построение диаграммы растяжения, т. е. зависимости между силой, действующей на образец, и его удлинением.

На рисунке 1 показана типичная для углеродистой стали диаграмма испытания образца в координатах  $P-\Delta l$ . Полученная кривая условно может быть разделена на следующие четыре зоны.



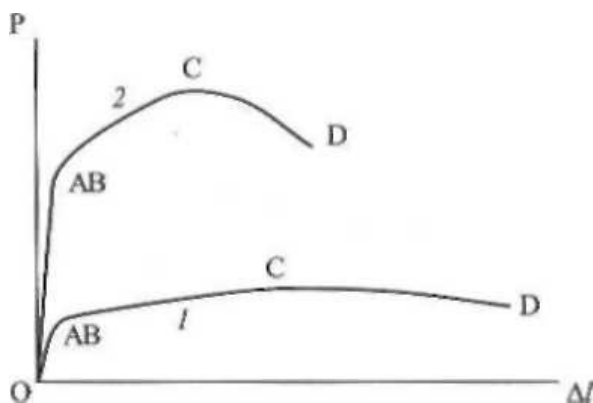
**Рисунок 1.** Диаграмма растяжения малоуглеродистой стали

Зона ОА носит название зоны упругости. Здесь материал подчиняется закону Гука

$$\Delta l = \frac{Pl}{EF}$$

На рисунке 1 этот участок для большей наглядности показан с отступлением от масштаба. Удлинения  $\Delta l$  на участке ОА очень малы, и прямая ОА, будучи вычерченной в масштабе, совпадала бы в пределах ширины линии с осью ординат. Величина силы, для которой остается справедливым закон Гука, зависит от размеров образца и физических свойств материала. Для высококачественных сталей эта величина имеет большее значение. Для таких металлов, как медь, алюминий, свинец, она оказывается в несколько раз меньшей.

Зона АВ называется зоной общей текучести, а участок АВ диаграммы – площадкой текучести. Здесь происходит существенное изменение длины образца без заметного увеличения нагрузки. Наличие площадки текучести АВ для металлов не является характерным. В большинстве случаев при испытании на растяжение и сжатие площадка АВ не обнаруживается, и диаграмма растяжения образца имеет вид кривых, изображенных на рисунке 2. Кривая 1 типична для алюминия и отожженной меди, кривая 2 – для высококачественных легированных сталей.



*Рисунок 2. Диаграммы деформирования меди (1) и легированной стали (2)*

Зона ВС называется зоной упрочнения. Здесь удлинение образца сопровождается возрастанием нагрузки, но неизмеримо более медленным (в сотни раз), чем на упругом участке. В стадии упрочнения на образце намечается место будущего разрыва и начинает образовываться так называемая шейка – местное сужение образца. По мере растяжения образца утонение шейки прогрессирует. Когда относи-

тельное уменьшение площади сечения сравнивается с относительным возрастанием напряжения, сила  $P$  достигнет максимума (точка  $C$ ). В дальнейшем удлинение образца происходит с уменьшением силы, хотя среднее напряжение в поперечном сечении шейки и возрастает. Удлинение образца носит в этом случае местный характер, и поэтому участок кривой  $CD$  называется зоной местной текучести. Точка  $D$  соответствует разрушению образца. У многих материалов разрушение происходит без заметного образования шейки.

Для количественной оценки свойств материала диаграмму растяжения  $P = f(\Delta l)$  перестраивают в координатах  $\sigma$  и  $\varepsilon$ . Для этого необходимо уменьшить в  $F$  раз ординаты и в  $l$  раз абсциссы, где  $F$  и  $l$  – соответственно площадь поперечного сечения и рабочая длина образца до нагружения. Так как эти величины постоянны, то диаграмма  $\sigma = f(\varepsilon)$  (рисунок 3) имеет тот же вид, что и диаграмма растяжения, но будет характеризовать уже не свойства образца, а свойства материала.

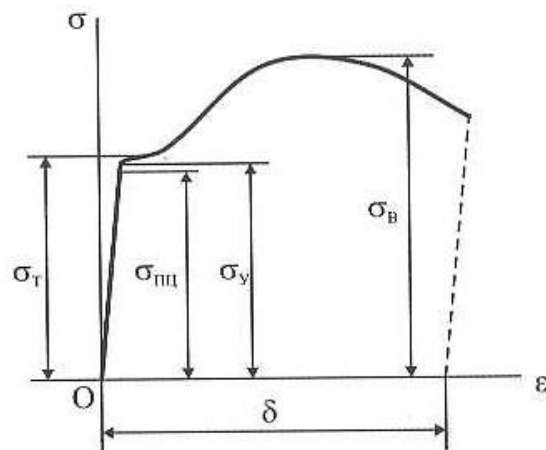


Рисунок 3. Диаграмма деформирования (напряжение – деформация)

Наибольшее напряжение, до которого материал следует закону Гука, называется пределом пропорциональности  $\sigma_{пц}$ .

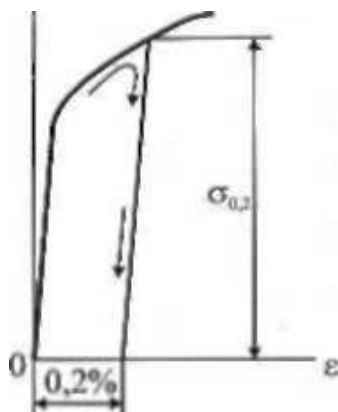
Величина предела пропорциональности зависит от той степени точности, с которой начальный участок диаграммы можно рассматривать как прямую. Степень отклонения кривой  $\sigma = f(\varepsilon)$  от прямой  $\sigma = E\varepsilon$  определяют по величине угла, который составляет касательная к диаграмме с осью  $\sigma$ . В пределах закона Гука тангенс этого угла определяется величиной  $1/E$ . Обычно считают, что если величина  $d\varepsilon / d\sigma$  оказалась на 50 % больше, чем  $1/E$ , то предел пропорциональности достигнут.

Упругие свойства материала сохраняются до напряжения, называемого пределом упругости. Под пределом упругости  $\sigma_u$  понимается такое наибольшее напряжение, до которого материал не получает остаточных деформаций.

Для того чтобы найти предел упругости, необходимо после каждой дополнительной нагрузки образец разгружать и следить, не образовалась ли остаточная деформация. Так как пластические деформации в отдельных кристаллах появляются уже в самой ранней стадии нагружения, ясно, что величина предела упругости, как и предела пропорциональности, зависит от требований точности, которые накладываются на производимые замеры. Обычно остаточную деформацию, соответствующую пределу упругости, принимают в пределах  $\varepsilon_{\text{ост}} = (1 \div 5) \cdot 10^{-5}$ , т. е.  $0,001 \pm 0,005$  %. Соответственно этому допуску предел упругости обозначается через  $\sigma_{0,001}$  или  $\sigma_{0,005}$ .

Предел упругости и предел пропорциональности трудно поддаются определению и резко меняют свою величину в зависимости от условно принятой нормы на угол наклона касательной и на остаточную деформацию. Поэтому величины  $\sigma_{пц}$  и  $\sigma_u$  в справочные данные по свойствам материалов обычно не включаются.

Под пределом текучести понимается то напряжение, при котором происходит рост деформации без заметного увеличения нагрузки. В тех случаях, когда на диаграмме отсутствует явно выраженная площадка текучести, за предел текучести условно принимается величина напряжения, при котором остаточная деформация  $\varepsilon_{\text{ост}} = 0,002$  или  $0,2$  % (рисунок 2.1.4). В некоторых случаях устанавливается предел  $\varepsilon_{\text{ост}} = 0,5$  %.



**Рисунок 4.** Определение условного предела текучести

Условный предел текучести обозначается через  $\sigma_{0,2}$  или  $\sigma_{0,5}$  в зависимости от принятой величины допуска на остаточную деформацию. Предел текучести



легко поддается определению и является одной из основных механических характеристик материала.

Отношение максимальной силы, которую способен выдержать образец, к его начальной площади поперечного сечения носит название предела прочности, или временного сопротивления, и обозначается  $\sigma_{вр}$ .

Временное сопротивление  $\sigma_{вр}$  не есть напряжение, при котором разрушается образец. Если относить растягивающую силу не к начальной площади сечения образца, а к наименьшему сечению в данный момент, можно обнаружить, что среднее напряжение в наиболее узком сечении образца перед разрывом существенно больше, чем  $\sigma_{вр}$ . Таким образом, предел прочности также является условной величиной.

Удлинение при разрыве  $\delta$  % представляет собой величину средней остаточной деформации, которая образуется к моменту разрыва на определенной стандартной длине образца. Определение  $\delta$  % производится следующим образом.

Перед испытанием на поверхность образца наносят две риски на расстоянии  $l_0 = 10d$  или  $l_0 = 5d$ . После того как образец испытан и разорван, обе его части составляются по месту разрыва. Далее, по имеющимся на поверхности рискам измеряют величину среднего удлинения  $\Delta l_0$  на стандартной длине. Удлинение при разрыве будет следующим:

$$\delta\% = \frac{\Delta l_0}{l_0} \cdot 100.$$

Диаграмма растяжения с учетом уменьшения площади  $F$  и местного увеличения деформации, называется истинной диаграммой растяжения (кривая  $OCD'$  на рисунке 5).

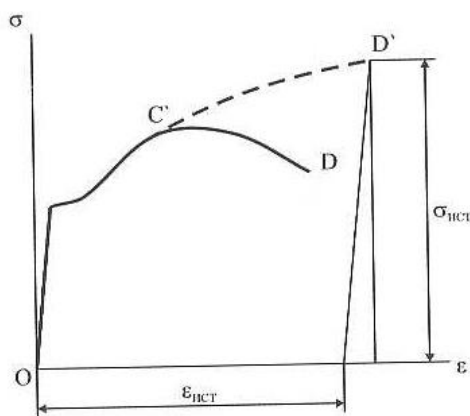


Рисунок 5. Истинная диаграмма растяжения

### Порядок выполнения работы

1. Измерьте диаметр  $d$  образца и его рабочую длину  $l$  (длину топкой цилиндрической части), вычислите площадь поперечного сечения  $F_0$  занесите данные в таблицу 1.
2. Тонким маркером (например, для CD дисков) нанесите на тонкую цилиндрическую часть две метки на расстоянии  $l_0 = 5d$  (можно нанести метки разметочным штангенциркулем).
3. Введите в программу геометрические характеристики образца: площадь поперечного сечения  $F_0$  и длину рабочей части  $l$ .
4. Измерения и результаты вычислений следует занести в таблицу 1.
5. Измерьте диаметр  $d_K$  частей образца в самом тонком месте (шейке), вычислите площадь поперечного сечения  $F_K$ .
6. Сложите части образца вдоль его оси с минимально возможным зазором, измерьте расстояние  $l_K$  между нанесенными метками.
7. Вычислите относительное удлинение после разрыва

$$\delta = (l_K - l_0)/l_0$$

И относительное сужение после разрыва

$$\psi = (F_0 - F_K)/F_0.$$

8. По диаграмме сила – перемещение определите усилие, действующее на образец в момент разрыва РК. Рассчитайте истинное сопротивление разрыву:

$$\sigma_{ист} = P_K / F_K.$$

9. По диаграмме напряжение – деформация определить временное сопротивление  $\sigma_B$  и предел текучести – физический  $\sigma_T$  или условный  $\sigma_{0,2}$ .

**Таблица 1. Протокол испытаний**

$l, \text{ мм}$				
$l_0, \text{ мм}$	$\delta = (l_K - l_0)/l_0$			
$l_K, \text{ мм}$				
$d, \text{ мм}$	$F_0$	$\psi = (F_0 - F_K)/F_0$		
$d_K, \text{ мм}$	$F_K$			
$P_K, \text{ Н}$	$\sigma_{ист} = P_K / F_K$			
$\sigma_B, \text{ МПа}$				
$\sigma_T, \text{ МПа}$				

### Контрольные вопросы

1. Что такое предел упругости?
2. Что такое предел текучести?
3. Что такое предел прочности?
4. Как определяется относительное удлинение / сужение?
5. Объясните смысл истинной диаграммы растяжения.



*Рисунок 6. Общий вид экспериментальной установки*

Лабораторная работа  
«Определение модуля упругости  
и коэффициента Пуассона для стали»

**Цель работы:** изучение способа измерения модуля упругости и коэффициента Пуассона, определение упругих констант стали.

**Необходимые приборы и оборудование:**

1. Стальной образец прямоугольного поперечного сечения.
2. Разрывная машина с силоизмерительным устройством.
3. Микрометр – для измерения упругих удлинений.
4. Штангенциркуль.

**Теоретические основы работы**

Упругие постоянные материалов используются при решении большого числа задач прочности и всех задач жёсткости и устойчивости. Они характеризуют способность материала сопротивляться различным видам деформаций при воздействии на них внешних нагрузок. Значения упругих характеристик, равно как и всех известных физических постоянных, не могут быть постулированы или найдены на основе логических и математических рассуждений, а могут быть получены только экспериментальным путём при испытании образцов на растяжение (сжатие), изгиб и кручение.

Модуль Юнга или модуль упругости первого рода  $E$  характеризует сопротивляемость материала деформированию в направлении воздействия растягивающих или сжимающих нагрузок. Чем больше модуль Юнга, тем меньше удлинение или укорочение стержня при прочих равных условиях (длине, площади, нагрузке). Модуль Юнга является коэффициентом пропорциональности между нормальным напряжением  $\sigma$  и относительной линейной деформацией  $\varepsilon$  в законе Гука, записанном в дифференциальной форме. На основе закона Гука находят опытным путём значение модуля упругости:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}, \quad (1)$$

где  $\sigma = \frac{F}{A}$  – формула для напряжения при растяжении;

$F$  – сила, растягивающая образец и определяемая силоизмерительным устройством;

$A$  – площадь поперечного сечения, определяемая путём измерения размеров;

$\varepsilon$  – относительная продольная деформация.

На основании закона Гука (1) абсолютная продольная деформация бруса  $\Delta l$  прямопропорциональна внутренней продольной силе  $N$ , вызвавшей эту деформацию:

$$\Delta l = \frac{Nl}{EA} \quad (2)$$

Измерив опытным путем величину осевой нагрузки  $F$  и вызванную ею продольную деформацию  $\Delta l$  и зная размеры испытуемого бруса, вычисляют модуль продольной упругости по формуле, полученной из (2):

$$E = \frac{Fl}{\Delta l A}$$

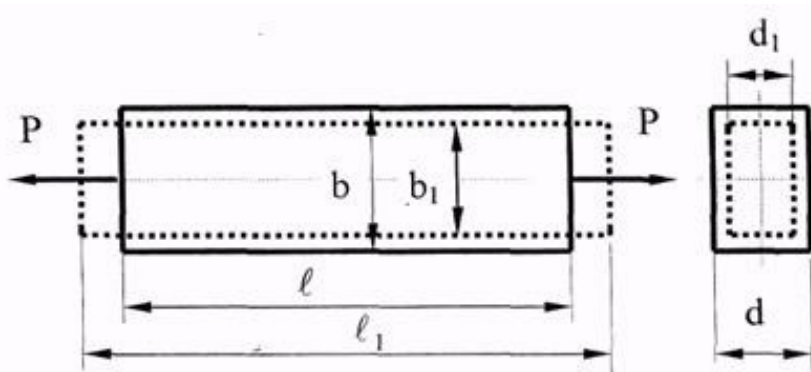
Геометрические параметры образца  $\Delta l$  и  $A$  находятся до нагружения, а нагрузка и соответствующее ей удлинение берутся из опыта.

Коэффициент Пуассона  $\mu$  характеризует способность материала сопротивляться поперечному деформированию, т. е. изменению размеров в направлении, перпендикулярном воздействию силы. Это сопротивление французский академик Пуассон предложил характеризовать в безразмерной форме как модуль отношения поперечной  $\varepsilon'$  и продольной  $\varepsilon$  относительных деформаций, определяемых опытным путём:

$$\mu = \left| \frac{\varepsilon'}{\varepsilon} \right|,$$

где  $\varepsilon' = \frac{\Delta b}{b}$ ,  $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$ ,  $b$  и  $l$  – начальные поперечные и продольные размеры бруса, соответственно.

Для нахождения  $\varepsilon'$  и  $\varepsilon$  достаточно при одной и той же нагрузке измерить абсолютное сужение  $\Delta b = b - b_1$  и абсолютное удлинение  $\Delta l = l - l_1$ , а также знать необходимые первоначальные размеры образца. Изменение формы образца при испытаниях на растяжение показано на рисунке 1.



*Рисунок 1. Изменение формы образца при испытаниях на растяжение*

Модуль сдвига или модуль упругости второго рода  $G$  характеризует сопротивляемость материала угловым деформациям при воздействии пары сил. Он является коэффициентом пропорциональности между касательным напряжением  $\tau$  и углом сдвига  $\gamma$  в законе Гука при сдвиге, записанном в дифференциальной форме:  $\tau = G\gamma$ . На основе этой формулы можно экспериментально определить модуль сдвига, например, при кручении образца круглого сечения. В данной работе модуль сдвига определяют косвенным путём, исходя из теоретической зависимости между тремя упругими постоянными:

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)}$$

Упругие постоянные материала имеют более стабильные значения по сравнению с механическими характеристиками. Например, для различных марок сталей временное сопротивление может отличаться в несколько раз (от 400 до 4000 МПа и выше), в то время как среднестатистические значения упругих постоянных для всех марок сталей изменяются в узких пределах:

$$E = (1,9 \div 2,1) \cdot 10^5 \text{ МПа,}$$

$$\mu = 0,25 \div 0,30,$$

$$G = (0,75 \div 0,85) \cdot 10^5 \text{ МПа.}$$

В лабораторной работе необходимо произвести сравнение полученных значений постоянных со средними справочными данными для стали:

$$\bar{E} = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа, } \bar{\mu} = 0,284, \bar{G} = 0,8 \cdot 10^5 \text{ МПа.}$$

**Порядок выполнения работы**

1. Измерьте ширину  $b$  и толщину  $t$  образца, вычислите площадь поперечного сечения  $F_0$ , занесите данные в таблицу 1.

**Таблица 1. Геометрические параметры образца**

$t$ , мм	$b$ , мм	$l$ , мм	$F$ , мм <sup>2</sup>

2. На образец для определения модуля упругости установите микрометры с цифровой индикацией. Расстояние между опорами для установки микрометра, измеряющего продольные перемещения, должно быть равно примерно 40 мм, а сами опоры должны быть параллельны. Установка опор осуществляется путем затяжки стопорного винта в середине пружинной части опоры.
3. После установки микрометра необходимо измерить рабочую длину  $l$  (расстояние между стопорными винтами двух опор).
4. Установите регулятор скорости хода подвижного захвата на значение от 1,5 до 2.
5. Установите регулятор нагрузки на минимальное значение, полностью вывернув ручку против хода часовой стрелки.
6. С помощью ручного управления сдвиньте подвижный захват вниз. Движение продолжайте до тех пор, пока захват сам не остановится, выбрав зазоры.
7. В программе выберите пункт меню «Диаграммы деформирования», в появившемся окне установите флажок «Испытание на растяжение».
8. Нажмите кнопку «Начать испытание», после этого начнется движение подвижного захвата и нагружение образца с одновременным сбором данных по усилию и перемещению. Наибольшая продолжительность испытаний составляет 30 минут, по истечении этого времени сбор данных прекращается и нагружающий гидроцилиндр отключается распределителем от насосной станции.
9. Обнулите показания микрометров, нажав кнопку «zero».

10. Увеличьте усилие, действующее на образец, на 5 кН. Для этого плавно вращая ручку регулятора нагрузки по ходу часовой стрелки, начните увеличивать усилие, прикладываемое к образцу. Увеличивать нагрузку следует небольшими ступенями, примерно соответствующими  $10^\circ$  поворота ручки регулятора нагрузки. После каждого поворота ручки регулятора нагрузки на  $10^\circ$  нужно дожидаться, пока усилие, прикладываемое к образцу, не перестанет расти. Текущее значение усилия следует наблюдать по программе «МиМ».
11. Запишите значение усилия и показания микрометров (продольного  $\Delta_z$  и поперечного  $\Delta_x$ ) в таблицу 2.

**Таблица 2. Протокол испытаний**

$P, \text{ Н}$	$\Delta_z, \text{ мкм}$	$\Delta_x, \text{ мкм}$	$\sigma, \text{ МПа}$	$\varepsilon_z \cdot 10^3$	$\varepsilon_x \cdot 10^3$
...	...	...	...	...	...

12. Выполните действия по п.п. 15–18 до значения усилия в 50 кН.
13. Уменьшите усилие, действующее на образец, на 5 кН. Для этого плавно вращая ручку регулятора нагрузки против хода часовой стрелки, начните уменьшать усилие, прикладываемое к образцу. Уменьшать нагрузку следует небольшими ступенями, примерно соответствующими  $10^\circ$  поворота ручки регулятора нагрузки. После каждого поворота ручки регулятора нагрузки на  $10^\circ$  нужно дожидаться, пока усилие, прикладываемое к образцу, не перестанет уменьшаться. Текущее значение усилия следует наблюдать по программе «МиМ».
14. Запишите значение усилия и показания микрометров (продольного  $\Delta_z$  и поперечного  $\Delta_x$ ) в таблицу 2.6.2.
15. Выполните действия по п.п. 20–21 до значения усилия в 5 кН.
16. В программе «МиМ» нажмите кнопку «Завершить испытания».
17. Постройте график зависимости  $\sigma(\varepsilon_z)$  методом наименьших квадратов, проведите через полученные точки прямую линию и определите ее угловой коэффициент. Данный угловой коэффициент равен модулю упругости  $E$ .



18. Постройте график зависимости  $\varepsilon_x$  ( $\varepsilon_z$ ), методом наименьших квадратов проведите через полученные точки прямую линию и определите ее угловой коэффициент. Данный угловой коэффициент, взятый с обратным знаком, равен коэффициенту Пуассона  $\mu$  (построение графиков и проведение прямой рекомендуется выполнять средствами Microsoft Excel).

### Контрольные вопросы

1. Что представляют собой относительная продольная и поперечная деформации?
2. Что такое коэффициент Пуассона?
3. Какие свойства материала характеризует коэффициент Пуассона?
4. Напишите закон Гука при растяжении (сжатии). Связь, каких величин отражает закон Гука?
5. Какие свойства материала характеризует модуль Юнга?
6. Как находят модуль Юнга?
7. Как вычисляют напряжение при растяжении?
8. Какие свойства материала характеризует модуль сдвига?

Лабораторная работа  
«Экспериментальное определение диаграммы  
деформирования материала при сжатии»

**Цель работы:** изучение способа испытаний материалов на сжатие, изучение диаграммы деформирования пластичного и хрупкого материала, определение механических характеристик материалов при сжатии.

**Теоретические основы**

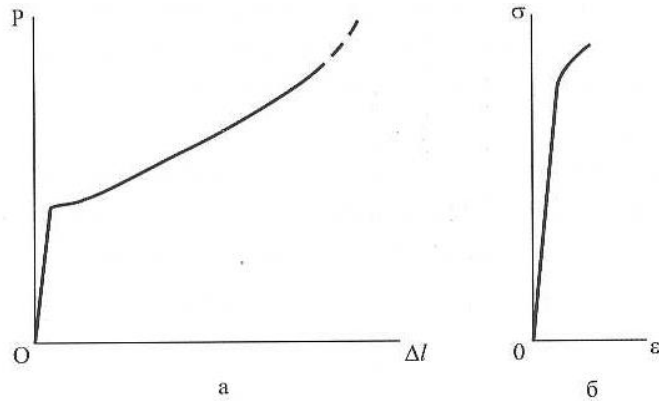
При испытаниях на сжатие используются короткие цилиндрические образцы, высота которых превышает размеры поперечного сечения не более чем в два раза. При большей высоте сжатие образца сопровождается, как правило, его искривлением, искажающим результаты испытаний.

Основной задачей испытания на сжатие является построение диаграммы сжатия, т.е. зависимости между силой, действующей на образец, и его удлинением.

Способность материала получать большие остаточные деформации, не разрушаясь, называется пластичностью. Свойство пластичности имеет решающее значение для таких технологических операций, как штамповка, вытяжка, волочение, гибка и др. Мерой пластичности является удлинение  $\delta$  при разрыве. Чем больше  $\delta$ , тем более пластичным считается материал. К числу весьма пластичных материалов относятся отожженная медь, алюминий, латунь, малоуглеродистая сталь и др. Менее пластичными являются дюраль и бронза. К числу слабопластичных материалов относятся многие легированные стали.

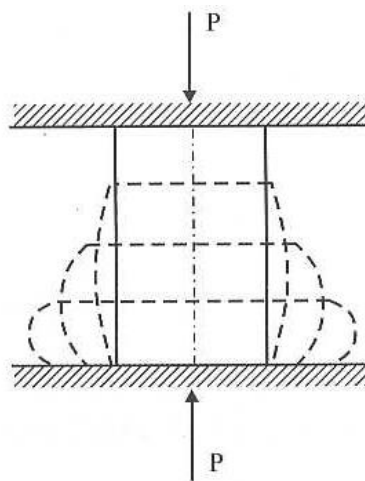
Противоположным свойству пластичности является свойство хрупкости, т.е. способность материала разрушаться без образования заметных пластичных деформаций. Материалы, обладающие этим свойством, называются хрупкими. Для таких материалов величина удлинения при разрыве не превышает 2–5 %, а в ряде случаев измеряется долями процента. К хрупким материалам относятся чугун, высокоуглеродистая инструментальная сталь, кирпич, стекло, камни и др. Диаграмма растяжения хрупких материалов не имеет площадки текучести и зоны упрочнения.

При испытании на сжатие хрупкие и пластичные материалы ведут себя по-разному. Для малоуглеродистой стали диаграмма сжатия образца имеет вид кривой, показанной на рисунке 1.



**Рисунок 1.** Диаграммы деформирования при сжатии (а – пластичного материала, б – хрупкого материала)

Здесь обнаруживается площадка текучести с последующим переходом к зоне упрочнения. В дальнейшем нагрузка не падает, как при растяжении, а резко возрастает. Происходит это в результате того, что площадь поперечного сечения сжатого образца увеличивается, сам образец вследствие трения на торцах принимает бочкообразную форму (рисунок 2).



**Рисунок 2.** Изменение формы образца при сжатии

Довести образец из пластичного материала до разрушения практически не удастся. Испытуемый цилиндр сжимается в тонкий диск, и дальнейшее испытание ограничивается возможностями машины. Поэтому предел прочности при сжатии  $\sigma_{BC}$  для такого рода материалов найден быть не может.

Иначе ведут себя при испытании на сжатие хрупкие материалы. Диаграмма сжатия этих материалов сохраняет качественные особенности диаграммы растяжения (рисунок 1.б). Предел прочности хрупкого материала при сжатии  $\sigma_{BC}$  определяется так же, как и при растяжении. Разрушение образца происходит с образованием трещин по наклонным или продольным плоскостям.

Сопоставление предела прочности хрупких материалов при растяжении  $\sigma_{BP}$  с пределом прочности при сжатии  $\sigma_{BC}$  показывает, что эти материалы обладают, как правило, более высокими прочностными показателями при сжатии, нежели при растяжении. Величина отношения:

$$k = \frac{\sigma_{BP}}{\sigma_{BC}},$$

для чугуна колеблется в пределах  $0,2 \div 0,4$ . Для керамических материалов –  $k = 0,1 \div 0,2$ .

Для пластичных материалов сопоставление прочностных характеристик на растяжение и сжатие ведется по пределу текучести ( $\sigma_{TP}$  и  $\sigma_{TC}$ ). Принято считать, что  $\sigma_{TP} \approx \sigma_{TC}$ .

### **Порядок проведения работы**

1. Запустите на ПЭВМ (ноутбуке) программу обработки информации «МиМ».
2. Включите насосный агрегат.
3. Включите тумблер «Питание системы управления» (для выхода электронной измерительной части на стационарный температурный режим рекомендуется выполнять действия по п.п. 1 и 2 минимум за 20 минут до начала проведения измерений).
4. Поверните ручку регулировки скорости на максимальную скорость (по ходу часовой стрелки до упора).

5. Убедитесь, что на нижней и подвижной траверсе нет посторонних предметов, а рядом с машиной посторонних лиц.
6. Установите в верхнюю и нижнюю опорные вилки плиты для испытаний на сжатие, зафиксировав их с помощью пальцев и опорных гаек. Для испытания хрупкого материала (кубиков из цементного раствора) на нижнюю плиту необходимо установить сферическую опору, компенсирующую не параллельность граней образца.
7. Измерьте диаметр  $d$  образца и его длину  $l$ , вычислите площадь поперечного сечения  $F_0$ , занесите данные в таблицу 1. Для случая образца в форме прямоугольного параллелепипеда сторону его основания  $a$  и его длину  $l$ , занести данные в таблицу 2.
8. С помощью ручного управления переместите подвижную траверсу в позицию, обеспечивающую возможность установки образца между опорными плитами и установите образец. Образец необходимо устанавливать по центру опорных плит. **ЗАПРЕЩАЕТСЯ проводить испытания, если радиальное расстояние от оси образца до оси опорных плит более 5 мм.**
9. Установите регулятор скорости хода подвижного захвата на значение от 1,5 до 2.
10. Установите регулятор нагрузки на минимальное значение, полностью вывернув ручку против хода часовой стрелки.
11. С помощью ручного управления сдвиньте подвижный захват вверх. Движение продолжайте до тех пор, пока захват сам не остановится, выбрав зазоры.
12. Установите регулятор скорости хода подвижного захвата на значение от 1,2 до 1,4.
13. Установите регулятор нагрузки на максимальное значение, полностью завернув ручку по ходу часовой стрелки.
14. В программе выберите пункт меню «Диаграммы деформирования», в появившемся окне установите флажок «Испытание на сжатие».
15. Введите в программу геометрические характеристики образца: площадь поперечного сечения  $F_0$  и длину рабочей части  $l$ .

16. Нажмите кнопку «Начать испытание», после этого начнется движение подвижного захвата и нагружение образца с одновременным сбором данных по усилию и перемещению. Наибольшая продолжительность испытаний составляет 30 минут, по истечении этого времени сбор данных прекращается и нагружающий гидроцилиндр отключается распределителем от насосной станции.
17. После разрушения образца, в случае, если не произойдет автоматической остановки движения захвата, необходимо нажать кнопку «Завершить испытание». Для испытания пластичного материала остановка испытания произойдет автоматически при достижении нагрузкой значения 55 кН.
18. Поверните ручку регулировки скорости на максимальную скорость (по ходу часовой стрелки до упора).
19. Выключите насосный агрегат.
20. Сохраните диаграммы и данные в файлы для написания отчета.
21. Извлеките деформированный образец.
22. Все дальнейшие измерения и результаты вычислений занесите в таблицы 1 и 2.
23. Для образца из пластичного материала измерьте диаметр  $d_{\text{кк}}$  образца на его концах и диаметр  $d_{\text{кс}}$  в середине образца.
24. По диаграмме напряжение – деформация определите временное сопротивление сжатию  $\sigma_{\text{вс}}$  и предел текучести при сжатии – физический  $\sigma_{\text{т}}$  или условный  $\sigma_{0,2}$  (для пластичного материала).
25. Сделайте выводы о характере работы пластичных материалов и хрупких материалов при сжатии, равномерности распределения деформации по длине образца при сжатии пластичного материала, особенностях разрушения хрупких материалов при сжатии.

**Таблица 1. Протокол испытаний**

<b>Образец из пластичного материала</b>			
$d$ , мм		$F_0$	
$d_{\text{кк}}$ , мм		$F_{\text{кк}}$	

<b>Образец из пластичного материала</b>			
$d_{kc}$		$F_{kc}$	
$l$ , мм			
$l_k$ , мм			
$\sigma_T$ МПа			

**Таблица 2. Протокол испытаний**

<b>Образец из хрупкого материала</b>			
$a$ , мм		$F_0$	
$l$ , мм			
$P_k$ , Н			
$\sigma_{BC}$ , МПа			

**Контрольные вопросы**

1. Для каких материалов испытания на сжатие являются основными?
2. Какую форму и размеры имеют образцы при испытании на сжатие?
3. Как ведут себя при сжатии пластичные материалы?
4. Какую роль играют при сжатии силы трения?
5. В чем особенности диаграммы сжатия пластичных материалов?
6. Как разрушаются при сжатии хрупкие материалы?
7. Как выглядит диаграмма сжатия хрупких материалов?
8. Как определить условный предел прочности материала при сжатии?
9. Как определить относительную деформацию при сжатии?

## Лабораторная работа «Определение твердости материалов»

**Цель работы:** ознакомление с методиками определения твердости материалов, измерение твердости образцов различными способами.

### **Необходимые приборы и оборудование:**

1. Твердомер Роквелла.
2. Образцы в виде пластин или дисков из различных металлов.
3. Таблицы показателей механических свойств металлов и сплавов.

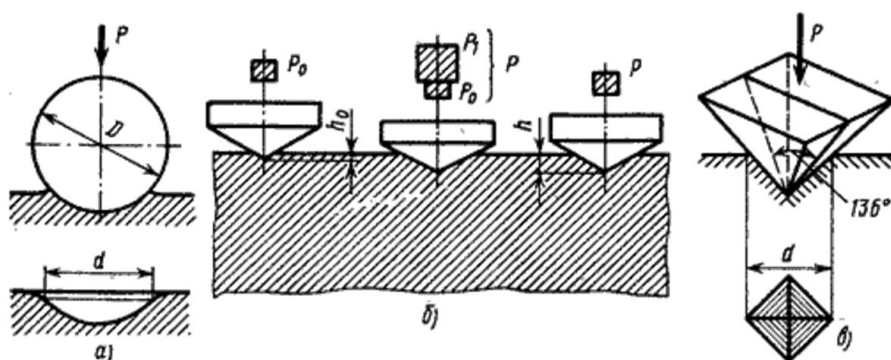
### **Теоретические основы**

Твердометрия – это неразрушающий метод контроля качества термической обработки изделия.

Твердость – это сопротивление материала проникновению в его поверхность стандартного тела (индентора), не деформирующегося при испытании. О твердости судят либо по глубине проникновения индентора (метод Роквелла), либо по величине отпечатка от вдавливания (методы Бринелля, Виккерса, микротвердости). Во всех случаях происходит пластическая деформация материала: чем больше сопротивление материала пластической деформации, тем выше твердость. Схемы испытаний представлены на рисунке 1.

В результате вдавливания с достаточно большой нагрузкой поверхностные слои материала, находящиеся под наконечником и вблизи него, пластически деформируются. После снятия нагрузки остается отпечаток. Особенность происходящей при этом деформации заключается в том, что она протекает только в небольшом объеме, окруженном недеформированным материалом. В таких условиях возникают главным образом касательные напряжения, а доля растягивающих напряжений незначительна по сравнению с получаемыми при других видах механических испытаний (на растяжение, изгиб, кручение, сжатие).





**Рисунок 1.** Схемы определения твердости:  
 а – по Бринеллю; б – по Роквеллу; в – по Виккерсу

Таким образом, твердость характеризует сопротивление пластической деформации и представляет собой механическое свойство материала, отличающееся от других его механических свойств, способом измерения.

Преимущества измерения твердости следующие:

1. Между твердостью пластичных металлов, определяемой способом вдавливания, и другими механическими свойствами (главным образом пределом прочности), существует количественная зависимость. Так, сосредоточенная пластическая деформация металлов (при образовании шейки) аналогична деформации, создаваемой в поверхностных слоях металла при измерении твердости вдавливанием наконечника.

Подобная количественная зависимость не наблюдается для хрупких материалов, которые при испытаниях на растяжение (или сжатие, изгиб, кручение) разрушаются без заметной пластической деформации, а при измерении твердости получают пластическую деформацию.

2. Измерение твердости по технике выполнения значительно проще, чем определение прочности, пластичности и вязкости. Испытания твердости не требуют изготовления специальных образцов и выполняются непосредственно на проверяемых деталях после зачистки на поверхности ровной горизонтальной площадки, а иногда даже и без такой подготовки.

Измерения твердости выполняются быстро.

3. Измерение твердости обычно не влечет за собой разрушения проверяемой детали, и после измерения её можно использовать по своему назначению,

в то время как для определения прочности, пластичности и вязкости необходимо изготовление специальных образцов.

4. Твердость можно измерять на деталях небольшой толщины, а также в очень тонких слоях, не превышающих (для некоторых способов измерения твердости) десятых долей миллиметра, или в микрообъемах металла; в последнем случае измерения проводят способом микротвердости. Поэтому многие способы измерения твердости пригодны для оценки различных по структуре и свойствам слоев металла, например поверхностного слоя цементованной, азотированной или закаленной стали, имеющей разную твердость по сечению детали. Методом определения микротвердости можно также измерять твердость отдельных составляющих в сплавах.

#### **Метод измерения твёрдости вдавливанием шарика (твердость по Бринеллю)**

Этот способ универсальный и используется для определения твердости практически всех материалов. В материал вдавливается стальной шарик, и значения твердости определяют по величине поверхности отпечатка, оставляемого шариком. Шарик вдавливают с помощью пресса. В образце остается отпечаток со сферической поверхностью (лунка). Диаметр отпечатка измеряют лупой, на окуляре которой нанесена шкала с делениями, соответствующими десятым долям миллиметра. Диаметр отпечатка замеряют с точностью до 0,05 мм (при вдавливании шарика диаметром 10 мм и 5 мм) в двухвзаимно перпендикулярных направлениях, для определения твердости следует принимать среднее значение полученных величин.

Число твердости по Бринеллю  $HВ$  вычисляют по формуле:

$$HВ = \frac{P}{\frac{\pi D}{2} (D - \sqrt{D^2 - d^2})},$$

где  $P$  – нагрузка на шарик, кг·с;

$D$  – диаметр вдавливаемого шарика, мм;

$d$  – диаметр отпечатка, мм.

Получаемое число твердости при прочих равных условиях тем выше, чем меньше диаметр отпечатка.

Испытания вдавливанием шарика ограничивают измерением металлов небольшой и средней твердости (для стали с твердостью не более  $HB = 450$ ).

При измерении твердости шариком определенного диаметра и с установленными нагрузками на практике пользуются заранее составленными таблицами, указывающими число  $HB$  в зависимости от диаметра отпечатка и соотношения между нагрузкой  $P$  и поверхностью отпечатка  $F$ . При указании твердости  $HB$  иногда отмечают принятые нагрузку и диаметр шарика.

Между пределом прочности и числом твердости  $HB$  различных металлов существует следующая зависимость, например, для стали с твердостью  $HB$ :

$$120-175 \dots \sigma_b \approx 0,34 HB$$

$$175-450 \dots \sigma_b \approx 0,35 HB$$

Измерение твердости вдавливанием стального шарика не является универсальным способом. Этот способ не позволяет:

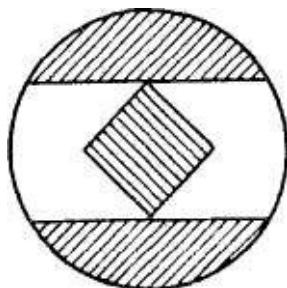
- а) испытывать материалы с твердостью более  $HB 450$ ;
- б) измерять твердость тонкого поверхностного слоя (толщиной менее 1–2 мм), так как стальной шарик продавливает этот слой и проникает на большую глубину. Толщина измеряемого слоя (или образца) должна быть не менее 10-кратной глубины отпечатка.

### **Метод измерения твердости вдавливанием алмазной пирамиды (твердость по Виккерсу)**

По этому способу в металл вдавливаются четырехгранная алмазная пирамида с углом в вершине  $136^\circ$  и твердость характеризует площадь получаемого отпечатка. При вдавливании пирамиды соотношение между диагоналями получающегося отпечатка при изменении нагрузки остается постоянным, что позволяет в широких пределах в зависимости от целей исследования увеличивать или уменьшать нагрузку.

В качестве индентора используется алмазная четырехгранная пирамида с углом при вершине  $136^\circ$ .

Поверхность образцов для определения твердости пирамидой должна быть тщательно отшлифована бумагой с мелким зерном или даже отполирована. Толщина испытываемого образца должна быть не меньше, чем 1,5 диагонали отпечатка.



**Рисунок 2.** Схема измерения отпечатка, полученного вдавливанием алмазной пирамиды (измерение по Виккерсу)

Твердость по Виккерсу  $HV$ , так же как и по Бринеллю, определяется как усилие, приходящееся на единицу поверхности отпечатка:

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

где  $P$  – нагрузка на пирамиду, кгс;

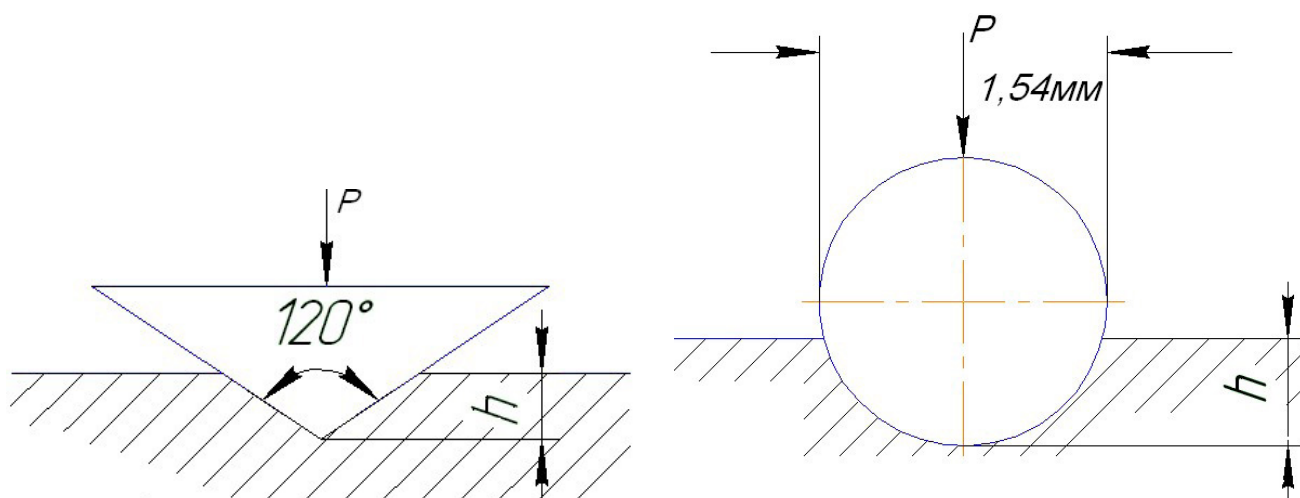
$\alpha$  – угол между противоположными гранями пирамиды ( $136^\circ$ );

$d$  – среднее арифметическое длин обеих диагоналей отпечатка после снятия нагрузки, мм.

Числа твердости по Виккерсу и по Бринеллю имеют одинаковую размерность и для материалов твердостью до  $HV$  450 практически совпадают. Вместе с тем измерения пирамидой дают более точные значения для металлов с высокой твердостью, чем измерения шариком или конусом. Алмазная пирамида имеет большой угол в вершине ( $136^\circ$ ) и диагональ её отпечатка примерно в семь раз больше глубины отпечатка, что повышает точность измерения отпечатка даже при проникновении пирамиды на небольшую глубину и делает этот способ особенно пригодным для определения твердости тонких или твердых сплавов.

### **Метод измерения твёрдости вдавливанием конуса или шарика (твердость по Роквеллу)**

Принципиальное отличие данного способа от рассмотренного выше измерения по Бринеллю состоит в том, что твердость определяют по глубине отпе-



*Рисунок 3. Метод Роквелла*

чатка, получаемого при вдавливании алмазного конуса или стального шарика, а не по площади отпечатка.

Сущность метода определения твердости по Роквеллу состоит в том, что в качестве вдавливаемого тела (индентора) применяется алмазный конус с углом при вершине  $120^\circ$  или стальной закаленный шарик диаметром 1,54 мм.

Нагружение осуществляется в два этапа. Сначала прикладывается предварительная нагрузка ( $10 \text{ кг} \cdot \text{с}$ ) для плотного соприкосновения наконечника с образцом. Затем прикладывается основная нагрузка  $P_1$ . В течение некоторого времени действует общая рабочая нагрузка  $P$ . После снятия основной нагрузки определяют значение твердости по глубине остаточного вдавливания наконечника  $h$  под нагрузкой.

Прибор измеряет глубину отпечатка алмазного конуса (стального шарика) или, точнее, разность между глубиной отпечатков, полученных от вдавливания наконечника под действием основной нагрузки и от вдавливания под предварительной нагрузкой. Числа твердости по Роквеллу возрастают с увеличением твердости материала, что позволяет сравнить числа Роквелла с числами Бринелля. Однако числа твердости по Роквеллу можно пересчитать на числа твердости по Бринеллю с помощью специальных диаграмм и таблицы, построенных на основании многочисленных экспериментальных работ. Зависимость между этими числами не имеет линейного характера.

**Таблица 1. Наиболее широко используемые шкалы твёрдости по Роквеллу**

Шкала	Индентор	Нагрузка, кгс
А	Алмазный конус с углом 120° при вершине	60 кгс
В	Шарик диаметра 1/16 дюйма из карбида вольфрама (или закалённой стали)	100 кгс
С	Алмазный конус с углом 120° при вершине	150 кгс

### Формулы для определения твердости

Чем твёрже материал, тем меньше будет глубина проникновения наконечника в него. Для определения твердости вводят условную шкалу глубин, принимая за одно её деление глубину, равную 0,002 мм. При испытании алмазным конусом предельная глубина внедрения составляет 0,2 мм, или  $0,2 / 0,002 = 100$  делений, при испытании шариком – 0,26 мм, или  $0,26 / 0,002 = 130$  делений. Таким образом, формулы для вычисления значения твёрдости будут выглядеть следующим образом:

а) при измерении по шкале А (HRA) и С (HRC):

$$HR = 100 - \frac{H - h}{0,002},$$

Разность  $H - h$  представляет разность глубин погружения индентора (в миллиметрах) после снятия основной нагрузки и до её приложения (при предварительном нагружении).

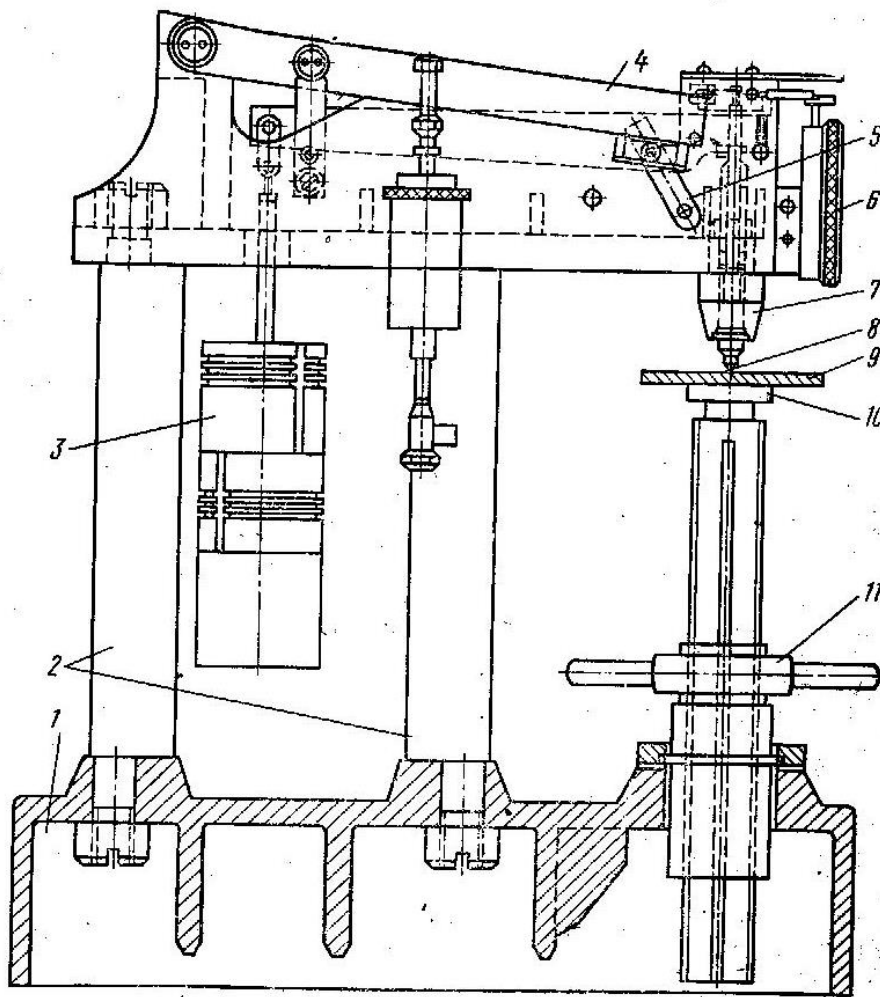
б) при измерении по шкале В (HRB):

$$HR = 130 - \frac{H - h}{0,002},$$

Твердость очень тонких слоев металла (толщиной менее 0,3 мм) измерять нельзя, так как алмазный конус проникает на глубину, превышающую толщину этих слоев, и указывает, следовательно, твердость нижележащих областей. Вместе с тем, с увеличением твердости измеряемого материала глубина отпечатка уменьшается, вследствие чего понижается точность измерения (особенно для металлов с твердостью более HRC 60).

Твердость определяют на рычажном твердомере Роквелла (рисунок 3).

Сменные наконечники 7 прибора оканчиваются стальным шариком диаметром 1,588 мм или индентором 8, представляющим собой алмазный конус. На ци-



**Рисунок 4.** Твердомер Роквелла:

1 – станина , 2 – колонны, 3 – груз, 4 – рычажное устройство, 5 – рукоять включения, 6 – индикатор, 7 – сменный наконечник,  
8 – стальной шарик или индентор (алмазный конус), 9 – испытуемый образец,  
10 – рабочий стол, 11 – маховик

феррлите индикатора 6, по которому определяют число твердости, нанесены две шкалы. Большая стрелка на циферблате показывает истинное значение твердости: – для шкал HRC и HRA считывание значений твердости производится по внешней шкале. Шкала А служит для отсчетов при испытаниях алмазным конусом под общей нагрузкой 60 кгс. Число твердости в этом случае обозначается индексом HRA; пределы измерений HRA 70–90 единиц твердости. По шкале С твердость измеряют при том же наконечнике, но при общей нагрузке 150 кгс. Пределы измерений HRC 20–67.

- для HRB, считывание производится по внутренней шкале. Шкала В предназначена для отсчетов при испытаниях шариком с общей нагрузкой 100 кгс. Пределы измерений по этой шкале HRB 25–100. Наименьшая цена деления индикатора на всех шкалах равна 0,5 единиц твердости, что соответствует проникновению на 0,001 мм.

### Подготовительные работы

1. Заранее подготавливают образцы различных металлов и сплавов, твердость которых будут определять. Образцы изготавливают в виде пластин или дисков с параллельными плоскостями. Толщина пластин или дисков зависит от предполагаемой твердости металла. Так, минимальная толщина образца зависит от твердости материала и используемой шкалы и должна быть в 10 раз больше глубины внедрения индентора. После проведения испытания на обратной стороне образца не должно быть заметно никаких следов деформации.

2. Поверхность образцов очищают от окалины и других посторонних веществ. На ней не должно быть вмятин, следов от ударов, раковин.

3. При измерении твердости должна быть обеспечена перпендикулярность приложения действующего усилия к поверхности образца или детали.

4. При измерении твердости цилиндрических образцов необходимо использовать V-образный столик и учесть поправку. При измерении выпуклого образца поправка занижается, а при измерении вогнутого образца поправка должна быть прибавлена в соответствии с таблицами 2 и 3.

**Таблица 2. Поправка для образцов цилиндрической формы шкал «А» и «С»**

Твердость образца (HRA, HRC)	Диаметр цилиндрического образца (мм)								
	6,4	10	13	16	19	22	25	32	38
	Поправка								
20	6,0	4,5	3,5	2,5	2,0	1,5	1,5	1,0	
25	5,5	4,0	3,0	2,5	2,0	1,5	1,0	1,0	1,0
30	5,0	3,5	2,5	2,0	1,5	1,5	1,0	1,0	0,5
35	4,0	3,0	2,0	1,5	1,5	1,0	1,0	0,5	0,5



Твердость образца (HRA, HRC)	Диаметр цилиндрического образца (мм)								
	6,4	10	13	16	19	22	25	32	38
	Поправка								
40	3,5	2,5	2,0	1,5	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5
45	3,0	2,0	1,5	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5
50	2,5	2,0	1,5	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5
55	2,0	1,5	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0
60	1,5	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0	0
65	1,5	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0	0
70	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0	0
75	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0	0	0
80	0,5	0,5	0,5	0,5	0	0	0	0	0
85	0,5	0,5	0,5	0	0	0	0	0	0
90	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0

**Таблица 3. Поправка для образцов цилиндрической формы  
шкала «В»**

Твердость образца (HRB)	Диаметр цилиндрического образца (мм)						
	6,4	10	13	16	19	22	25
0	12,5	8,5	6,5	5,5	4,5	3,5	3,0
10	12,0	8,0	6,0	5,0	4,0	3,5	3,0
20	11,0	7,5	5,5	4,5	4,0	3,5	3,0
30	10,0	6,5	5,0	4,5	3,5	3,0	2,5
40	9,0	6,0	4,5	4,0	3,0	2,5	2,5
50	8,0	5,5	4,0	3,5	3,0	2,5	2,0
60	7,0	5,0	3,5	3,0	2,5	2,0	2,0
70	6,0	4,0	3,0	2,5	2,0	2,0	1,5
80	5,0	3,5	2,5	2,0	1,5	1,5	1,5
90	4,0	3,0	2,0	1,5	1,5	1,5	1,0
100	3,0	2,5	1,5	1,5	0	1,0	0,5

### Порядок выполнения работы

1. Выберите необходимую шкалу согласно таблице 4 на основе материала образца.

**Таблица 4. Используемые шкалы твердости**

Шкала	Индентор	Преднагрузка	Основная нагрузка	Применение
A	Конический алмазный индентор (угол 120°)	98,07	588,4	
D			980,7	
C			1471,0	
F				
B				
G				

2. На рисунке 4 показан твердомер Роквелла, с помощью которого выполняется лабораторная работа. Поверните переключатель (10) по часовой стрелке, чтобы установить общую нагрузку.

3. Поместите образец для испытания на стол, удостоверьтесь, что образец лежит ровно, и вращайте маховик (9) по часовой стрелке, чтобы поднять стол.

4. После контакта образца с индентором, продолжайте вращать маховик до тех пор, пока малая стрелка не сравняется с красной точкой (три оборота большой стрелки), а большая стрелка с точками «С» или «В». Смещение должно быть меньше, чем  $\pm 5$  делений.

5. Покрутите диск индикатора влево или вправо так, чтобы большая стрелка сравнялась с буквой «С» (или с буквой «В» в случае определения HRB).

6. Затем медленно оттолкните ручку нагрузки/разгрузки от себя. Произойдет нагружение до основной нагрузки, и большая стрелка начнет вращение.

7. После того, как большая стрелка прекратит вращаться и остановится, выдержите примерно 5 секунд и потяните ручку нагрузки/разгрузки на себя (2–3 секунды), чтобы удалить основную нагрузку.

8. Большая стрелка на циферблате покажет истинное значение твердости. Для шкал HRC и HRA считывание значений твердости производится по внешней шкале. Для HRB, считывание производится по внутренней шкале.

9. Поверните маховик против часовой стрелки, чтобы опустить образец. Повторите измерения в разных местах образца.

10. Каждый образец должен быть измерен в не менее трех точках (первое измерение не учитывается). При измерении партии образцов количество измерений может быть уменьшено.

### **Контрольные вопросы**

1. Что называется твердостью материала?
2. Дать определение твердости по Бринелю, по Роквеллу и по Виккерсу.
3. Какова связь твердости материала с пределом прочности?
4. В каких случаях следует применять метод измерения твердости по Бринелю, а в каких по методу Роквелла и Виккерса?
5. Как определяют величину твердости по Роквеллу?
6. Какие шкалы твердости по Роквеллу вы знаете?

Лабораторная работа  
«Термическая обработка углеродистых сталей:  
отжиг, нормализация, закалка»

**Цель работы:** проведение термической обработки углеродистых сталей для изучения влияния температуры нагрева и скорости охлаждения на структуру и твердость углеродистых сталей.

**Необходимые приборы и оборудование**

Оборудование для проведения различных видов термической обработки стали включает: электрическую камерную печь с электромеханической системой регулирования температуры, закалочные баки с водой, клещи, рукавицы, защитные очки.

Для очистки от окалины и выравнивания торцевых поверхностей образцов перед измерением твердости применяется наждачный камень (круг), шлифовальная шкурка.

Измерение твердости производится по методу Роквелла. Для испытания используют образцы цилиндрической формы, высота которых 12–15 мм, диаметр 15–20 мм. Торцевые поверхности образцов должны быть плоско-параллельными, не иметь раковин, трещин и других видимых дефектов.

**Теоретические основы**

Термическая обработка стали представляет собой совокупность операций нагрева, выдержки и охлаждения, проводимых с целью изменения структуры стали для улучшения технологических свойств заготовок (прокат, поковки, отливки) и обеспечения необходимых эксплуатационных свойств материала в готовых изделиях.

Формирование структуры стали в основном связано с распадом аустенита при его охлаждении с различными скоростями.

В равновесном состоянии при температуре 727 °С аустенит, содержащий 0,8 % углерода, распадается с образованием перлита – эвтектидной механиче-

ской смеси феррита и цементита. Устойчивое состояние аустенита в сталях имеет место при температурах выше  $A_3$  (линия  $GSE$  на диаграмме железо-углерод).

В интервале температур  $A_3 - A_1$  (линии  $GSE - PSK$ ) при охлаждении выделяются избыточные фазы: феррит – в доэвтектоидных сталях и вторичный цементит – в заэвтектоидных сталях. В результате этого при температуре  $727\text{ }^\circ\text{C}$  в оставшемся аустените содержание растворенного углерода достигает  $0,8\%$ .

При непрерывном медленном охлаждении со скоростью  $V_1$ , (рисунок 3.1) перлитное превращение может начаться и закончиться при температурах ниже  $727\text{ }^\circ\text{C}$ . С возрастанием скорости охлаждения ( $V_3 > V_2 > V_1$ ) снижается температура распада аустенита, что приводит к измельчению пластинок феррито-цементитной смеси.

В результате образуются структуры перлита, сорбита и троостита, отличающиеся размерами ферритных и цементитных образований (степенью дисперсности) и, следовательно, разными механическими свойствами.

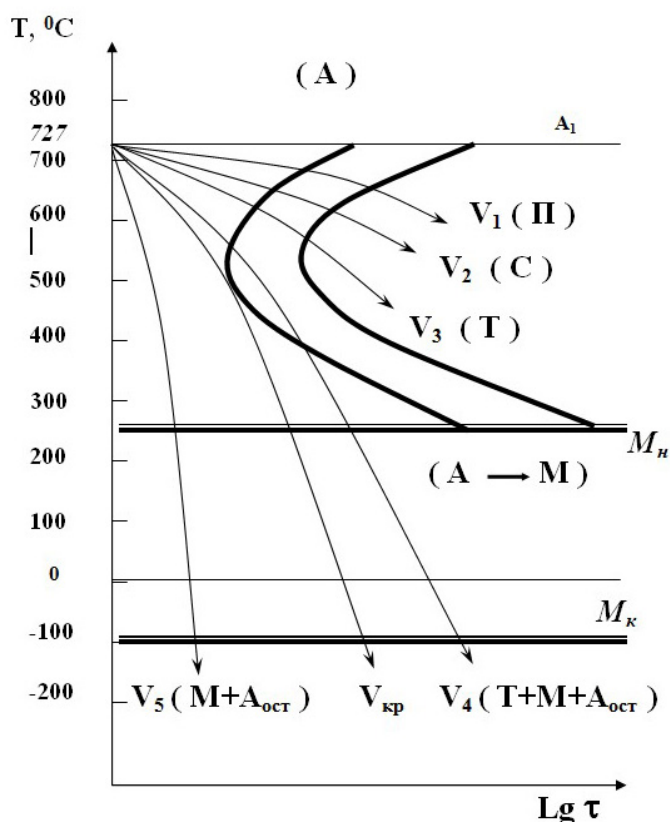


Рисунок 1. Диаграмма изотермического распада аустенита с векторами различных скоростей охлаждения

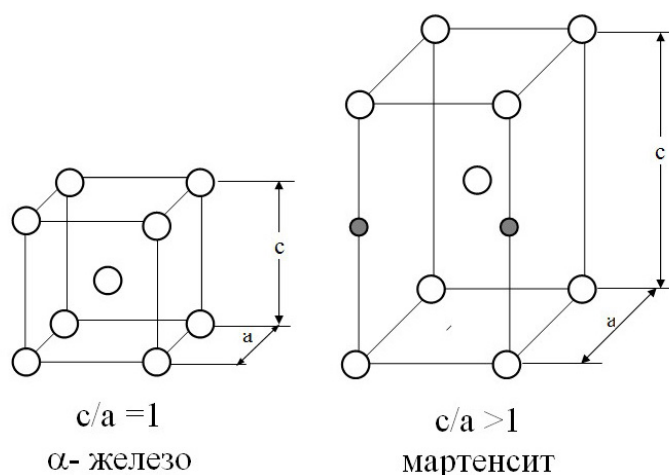
Крупнопластинчатая ферритно-цементитная смесь у перлита обеспечивает наиболее высокие значения ударной вязкости, относительного удлинения и относительного сужения по сравнению с сорбитом и трооститом, а твердость, предел прочности и предел текучести – самые низкие.

Дисперсная мелкозернистая структура троостита обеспечивает более высокие показатели твердости и прочностных свойств; сорбит по показателям тех же механических свойств занимает промежуточное положение между перлитом и трооститом.

При дальнейшем росте скорости охлаждения ( $V_4$ ) только часть аустенита может перейти в феррито-цементитную смесь (троостит), а оставшийся аустенит претерпевает бездиффузионное превращение в пересыщенный твердый раствор углерода в  $Fe_\alpha$ , который называется мартенситом.

При мартенситном бездиффузионном превращении происходит перестройка кубической гранецентрированной решетки аустенита в кубическую объемноцентрированную решетку  $\alpha$  – железа при сохранении концентрации углерода исходной структуры.

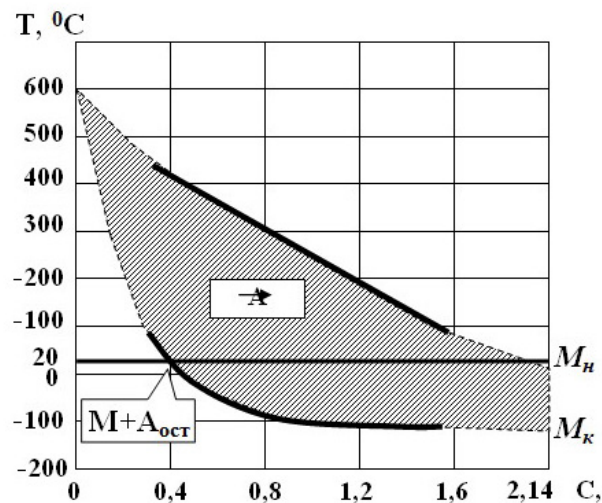
Решетка  $\alpha$ -железа способна разместить ограниченное количество углерода – не более 0,02 %. Поэтому избыточное количество углерода исходного аустенита (max – 2,14 %) искажает кубическую объемноцентрированную решетку  $\alpha$ -железа до тетрагональной объемноцентрированной решетки. Величина отношения периодов  $c/a$  – тетрагональность решетки мартенсита – возрастает с увеличением содержания углерода (рис. 2).



**Рисунок 2.** Модели кристаллических ячеек  $\alpha$  – железа и мартенсита (прозрачные шарики – железо; черные шарики – углерод)

При непрерывном охлаждении с еще большей скоростью ( $V_5 > V_4$ ) диффузионное перераспределение углерода полностью исключается и происходит только мартенситное превращение. При этом часть аустенита может остаться непревращенным.

$M_H$  (температура начала мартенситного превращения) и  $M_K$  (температура окончания мартенситного превращения) определяются содержанием углерода в стали; чем больше углерода в аустените, тем ниже температура  $M_H$  и  $M_K$  (рисунок 3). Количество остаточного аустенита зависит от содержания углерода в стали. В высокоуглеродистых сталях количество остаточного аустенита повышенное.



*Рисунок 3. Влияние содержания углерода на положение мартенситных точек  $M_H$  и  $M_K$*

Вектор скорости  $V_K$ , касательный к выступу  $C$  – образной изотермической кривой (рисунок 1) и характеризующий минимальную скорость непрерывного охлаждения, при которой полностью подавляется диффузионный распад, называется критической скоростью охлаждения (критической скоростью закалки).

Из всех возможных структур, получаемых при непрерывном охлаждении аустенита, мартенсит обладает максимальными значениями твердости, предела прочности.

Однако, значение ударной вязкости, относительного удлинения и относительного сужения мартенсита – самые минимальные по сравнению с другими структурами.

Высокая твердость мартенсита определяется количеством растворенного углерода: с увеличением концентрации углерода в решетке  $\alpha$ -железа значение твердости возрастает.

В практике машиностроения для получения в стали различных структур и комплекса механических свойств применяют следующие виды термообработки: отжиг, нормализация, закалка и отпуск.

Отжигом называется вид термообработки, заключающийся в нагреве стали выше температуры  $A_{C3}$  или  $A_{C1}$ , в выдержке при этих температурах и последующем медленном охлаждении с печью.

Медленное охлаждение стали при отжиге способствует протеканию равновесных фазовых превращений и образованию перлита в эвтектоидной стали, перлита с избыточным ферритом или цементитом в доэвтектоидной и заэвтектоидной стали соответственно.

После отжига стали характеризуются высокой пластичностью, но пониженной прочностью и твердостью.

Нормализацией называется вид термической обработки, заключающийся в нагреве стали на 30–50 °С выше  $A_{C3}$ , выдержке при этой температуре и последующем охлаждении на воздухе.

Фазовая перекристаллизация при нагреве и последующее охлаждение на воздухе приводит к распаду аустенита при более низких температурах, что повышает дисперсность феррито-цементитной смеси и приводит к образованию сорбита.

В доэвтектоидной и заэвтектоидной сталях наряду с сорбитом в структуре будут находиться соответственно избыточный феррит и цементит.

При образовании в стали сорбита возрастает прочность и твердость стали по сравнению с отожженной. Поэтому нормализация широко применяется для улучшения свойств сталей после литья, проката иковки.

Для низкоуглеродистых сталей нормализация, имеющая более высокие технико-экономические показатели, заменяет отжиг.

Для среднеуглеродистых сталей нормализация может заменять улучшение (совмещенную операцию закалки с последующим высоким отпуском).



Для высокоуглеродистых сталей нормализация предотвращает выпадение сетки цементита по границам зерен перлита, наблюдаемые при отжиге в интервале температур  $A_{C3} - A_{C1}$ .

Закалкой называется вид термической обработки, заключающийся в нагреве стали на 30–50 °С выше температуры  $A_{C3}$  и  $A_{C1}$ , для доэвтектоидной и заэвтектоидной (эвтектоидной) сталей соответственно, выдержке при этих температурах и последующем охлаждении со скоростью, равной или превышающей критическую скорость охлаждения (критическую скорость закалки). В качестве среды, обеспечивающей подобные скорости охлаждения, используют воду, масло, растворы солей и щелочей.

В результате закалки доэвтектоидная и эвтектоидная стали будут иметь структуру мартенсита, а заэвтектоидная сталь – мартенсит и избыточный цементит.

Закаленные стали помимо указанных структур могут иметь определенное количество остаточного аустенита, что обусловлено относительной способностью большинства охлаждающих сред ограничивать окончание процесса аустенитно-мартенситного превращения комнатными температурами.

Сталь после закалки с оптимальной температуры имеет максимально возможную твердость, высокую прочность и низкие показатели пластичности, вязкости.

### **Порядок выполнения работы**

Исследования проводятся на углеродистой стали. Образцы подвергают отжигу, нормализации и закалке.

1. Выберите температуру нагрева образцов в зависимости от вида термической обработки и содержания углерода в стали. Время выдержки при заданной температуре устанавливается в пределах 5–10 мин.

2. Проведите охлаждение образцов: при отжиге вместе с печью, при нормализации – на воздухе, при закалке – в масле или в воде.

3. Охлажденные образцы зачистите с обоих торцов на наждачном камне (круге) для снятия окалины и получения плоскопараллельных поверхностей.

4. Твердость термообработанных сталей определите методом Роквелла.

5. Твердость стали на образце измерьте не менее чем в трех точках: расстояние между двумя отпечатками должно быть не менее 1,5 мм при вдавливании алмазного конуса и 4 мм при вдавливании шарика.

6. Показатели твердости стали по Роквеллу пересчитайте на показатели твердости по Бринеллю с помощью стандартных таблиц. За результат испытаний принимаем среднее арифметическое трех измерений.

7. Заполните таблицу 3.1.

**Таблица 1. Результаты измерений**

Марка стали	Способ охлаждения	Твердость	
		HRC	HB
	Вода		
	Воздух		
	Печь		

### **Контрольные вопросы**

1. Опишите основные виды термической обработки (отжиг, нормализация, закалка).
2. Перечислите критические точки при термической обработке.
3. Дайте определение основным структурным составляющим: перлит, сорбит, троостит.
4. Что такое мартенсит?
5. Опишите характер зависимости твердости от скорости охлаждения сталей.
6. Приведите краткие выводы по анализу влияния видов термообработки на структуру и механические свойства углеродистых сталей.

Лабораторная работа  
«Изучение принципа работы и устройства  
металлографического микроскопа БИОМЕД ММР-1»

**Цель работы:** изучить конструкцию, принцип действия и правила эксплуатации инвертированного микроскопа для металлографических исследований БИОМЕД ММР-1.

**Приборы и материалы**

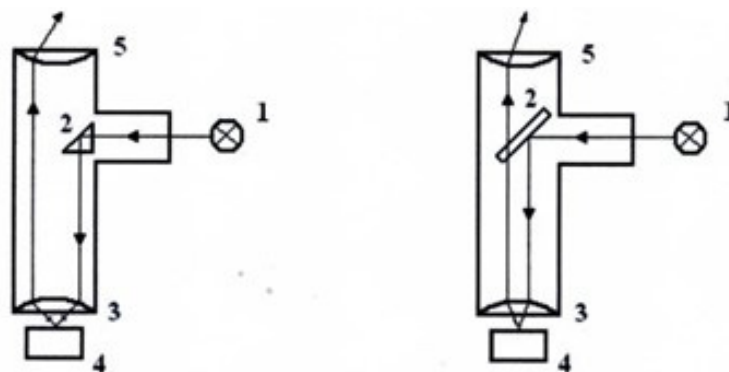
Металлографический микроскоп БИОМЕД ММР-1, комплект микрошлифов.

**Краткие теоретические сведения**

Изучение микроструктуры металлов и сплавов осуществляют с помощью световых металлографических микроскопов. Впервые микроскоп для исследования строения металлов был применен в 1831 г. русским инженером П. П. Аносовым, изучавшим булатную сталь.

Металлографический инструментальный микроскоп позволяет рассматривать при увеличении непрозрачные тела в отраженном свете. В этом основное отличие металлографического микроскопа от биологического, в котором рассматривают прозрачные тела в проходящем свете.

В металлографических микроскопах освещение объекта осуществляется через объектив. На рис.1 показаны две принципиальные схемы освещения шлифа в микроскопе. Лучи света от источника света 1 попадают на призму полно-



*Рисунок 1. Схема освещения микрошлифа в металлографическом микроскопе*

го внутреннего отражения 2 (рис.1, а) или полупрозрачную плоскопараллельную пластинку 2 (рис. 1, б). Их назначение направить поток света в объектив 3 и через него – на шлиф 4. Отраженные от шлифа лучи попадают в объектив 3, далее в окуляр 5 и от него в глаз человека.

Если шлиф металла не травлен, то практически весь световой поток отражается от шлифа и попадает в окуляр микроскопа. На травленном шлифе образуется микрорельеф из-за различной способности к растворению и окислению границ зерен, основы зерна и различных фаз. В результате различные участки шлифа по-разному отражают лучи света, что и позволяет наблюдать в микроскоп структуру металлов и сплавов.

Одной из главных характеристик микроскопа является его увеличение, т. е. обеспечиваемое им изменение размеров изображения, формируемого в глазу наблюдателя, по отношению к размерам изображения, рассматриваемого невооруженным глазом.

Оптическое увеличение микроскопа, состоящего из объектива и окуляра, определяется как произведение даваемых ими увеличений:

$$N = N_{об} \cdot N_{ок}$$

Где  $N_{об}$  – увеличение, создаваемое объективом;

$N_{ок}$  – увеличение, создаваемое окуляром.

В современных микроскопах можно получить увеличение до 2000 раз.

Другими важными характеристиками микроскопа являются глубина резкости и предельное разрешение. Предельное разрешение (предел разрешения двух отдельных точек) определяется как  $\lambda/2A_{об}$ , где  $\lambda$  – длина волны используемого света. Для видимого света эта величина равна примерно 0,2 мкм. Использование ультрафиолетового излучения позволяет получить предел разрешения в 0,1 мкм. Увеличить разрешающую способность микроскопа можно, если между объективом и окуляром поместить специальную среду – иммерсионную жидкость – с большим показателем преломления, например, кедровое масло.

Полностью использовать разрешающую способность можно, лишь обладая микроскопом с соответствующим увеличением. Для видимой части спектра эта ве-

личина – полезное увеличение микроскопа – составляет 500–1000  $A$ . Меньшие увеличения не позволяют различить все возможные для объектива с численной апертурой  $A$  детали предмета. Превышающие область полезных увеличений не дают возможности выявить какие-либо дополнительные детали предмета. Кроме того, уменьшается выходной зрачок микроскопа и, следовательно, яркость изображения.

Изображение, создаваемое оптической системой, будет правильным, если будут соблюдены следующие условия:

- каждая точка плоскости предмета изображается точкой;
- все точки изображения этой плоскости лежат в плоскости, перпендикулярной оси системы;
- масштаб изображения один и тот же по всему полю изображения;
- отсутствует окрашивание отдельных участков изображения.

Эти требования могут быть обеспечены для идеальной оптической системы при использовании узких пучков монохроматического света, направленных вдоль оптической оси.

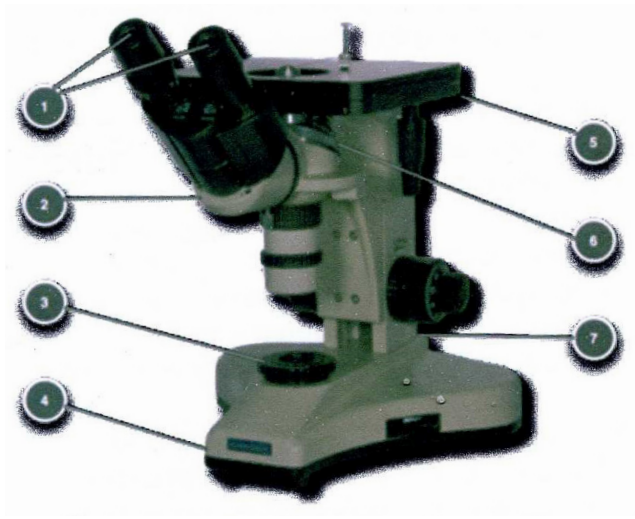
На практике пучки лучей в оптической системе микроскопа не являются строго гомоцентричными, что является причиной снижения качества изображения за счет возникновения в его плоскости различных не резкостей, или аберраций.

Аберрациями называют недостатки оптической системы, приводящие к искажению изображения. Наиболее серьезные аберрации – это сферическая и хроматическая.

Сферическая аберрация состоит в том, что лучи света, преломляемые краями линзы и ее центральной частью, пересекаются не в одной точке и изображение размывается.

Хроматическая аберрация приводит к несовпадению изображений, созданных лучами с различной длиной волны (составляющими белого света) из-за их различного преломления при прохождении через линзу. В результате изображение не имеет четких контуров и окружено окрашенной каймой. Для того чтобы устранить аберрации, в объективы вводят различное количество корректирующих линз. Объективы, у которых устранена сферическая и хроматическая аберрации, называются апохроматами. А объективы, у которых хроматическая аберрация устранена не полностью, ахроматами.

## Описание и работа микроскопа

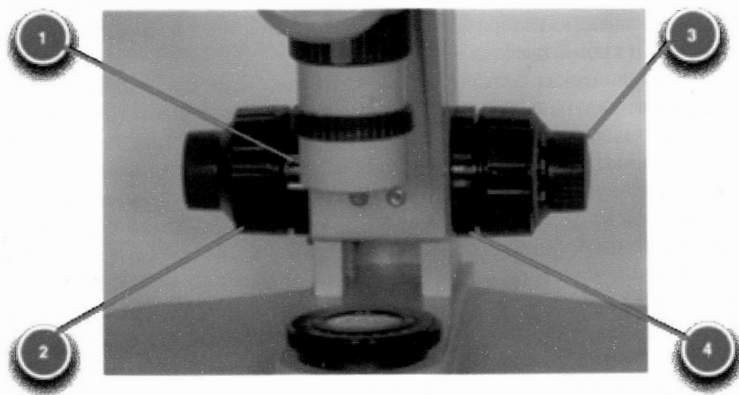


**Рисунок 2.** Устройство и внешний вид микроскопа Биомед ММР-1:

1 – комплект окуляров; 2 – бинокулярная насадка; 3 – осветитель; 4 – основание;  
5 – предметный столик; 6 – револьверное устройство; 7 – штатив

### 1. Штатив

Штатив (поз. 7 на рис.2) является основной корпусной деталью микроскопа. Внутри штатива микроскопа расположен фокусирующий механизм (рис.3). На штативе крепятся: предметный столик, бинокулярная насадка, револьверное устройство. Штатив установлен на основании. Внутри основания расположены электрические системы осветителя и осветитель с плавной регулировкой яркости.



**Рисунок 3.** Фокусирующий механизм Биомед-ММР1:

1 – рычаг стопорного механизма; 2 – рукоятка грубой настройки;  
3 – рукоятка тонкой настройки; 4 – стопорный механизм

Фокусирование на объект осуществляется вертикальным перемещением револьверной головки относительно неподвижного предметного столика с помощью фокусирующего механизма, расположенного внутри штатива микроскопа.

Грубое вертикальное перемещение предметного столика осуществляется вращением рукояток грубой фокусировки, точное перемещение вращением рукояток меньшего диаметра – рукояток тонкой фокусировки. Рукоятки расположены коаксиально на одной оси и выведены с обеих сторон штатива.

Рычаг стопорного механизма расположен на левой рукоятке механизма грубой фокусировки. При повороте рукоятки в направлении «к наблюдателю» до упора при выбранном предварительно минимальном зазоре между объективом и объектом вращение рукоятки грубой фокусировки и перемещение предметного столика микроскопа вверх прекращается, что предохраняет объективы и объекты от случайного соприкосновения и повреждения. **При этом дальнейшая фокусировка микроскопа на объект возможна только с помощью механизма тонкой фокусировки!!!**

## 2. Предметный столик

Предметный координатный столик (поз. 5 на рис.2) обеспечивает перемещение препарата, установленного на предметный столик, в горизонтальной плоскости в двух взаимно перпендикулярных направлениях по координатам «Х» И «У» с помощью рукояток, расположенных на одной оси. При необходимости препарат закрепляется клипсой.

## 3. Револьверное устройство

Револьверное устройство (поз. 6 на рис.2) обеспечивает установку в рабочее положение четырех объективов, смена которых производится вращением рифленого диска до фиксированного положения.

Револьверное устройство устанавливается на головку штатива. Объективы вворачиваются в револьверное устройство в порядке возрастания увеличения по часовой стрелке.

## 4. Бинокулярная насадка

Бинокулярная насадка устанавливается в гнездо штатива микроскопа (поз. 2 на рис.2). Увеличение насадки 1,0.

5. Диоптрийным механизмом компенсации близорукости

Левый окулярный тубус насадки снабжен диоптрийным механизмом компенсации близорукости или дальнозоркости наблюдателя.

Вращения кольца позволяет компенсировать ошибку глаза наблюдателя в диапазоне от 5 до минус 5 диоптрий.

Настройте фокус в правом окуляре. Вращая кольцо компенсатора, настройте фокус в левом окуляре.

6. Компенсатор глазной базы

В соответствии с глазной базой наблюдателя окулярные тубусы сдвигаются или раздвигаются на расстояние от 55 до 75 мм поворотом окулярных тубусов относительно оси шарнира.

7. Окуляры

В комплект микроскопа входят окуляры, характеристики которых указаны в табл.1.

**Таблица 1. Характеристики окуляров**

Маркировка	Тип	Линейное поле
WF10×/18mm	Широкопольный	Ø18
WF10×/18mm	Измерительный (0,1мм)	Ø18
WF12,5×/14mm	Широкопольный	Ø14

Расчетные значения увеличения микроскопа и диаметра наблюдаемого поля на объекте приведены в табл. 2.

**Таблица 2. Увеличение микроскопа**

Увеличение объектива	Увеличение окуляра	
	WF 10x	WF 12,5x
10x	100	125
40x	400	500
100x	1000	1250



## 8. Осветитель

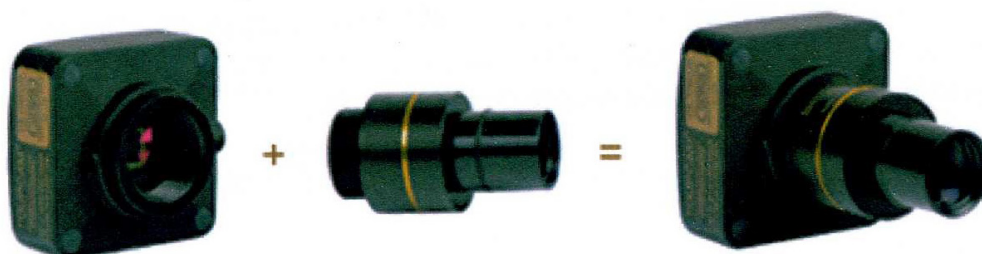
Осветитель микроскопа состоит из коллектора с ирисовой, полевой диафрагмой и встроенного в основание фонаря с галогенной лампой.

Яркость накала лампы – регулируемая.

Ирисовая полевая диафрагма коллектора осветителя позволяет регулировать ширину светового потока. Осветитель микроскопа состоит из коллектора с ирисовой, полевой диафрагмой и встроенного в основание фонаря с галогенной лампой.

## 9. Цифровая видеокамера

Изображение объекта, исследуемое на микроскопе, может быть сфотографировано с помощью цифровой камеры (рис.3), устанавливаемой в бинокулярную насадку вместо одного из окуляров. Изображение объекта, наблюдаемое в микроскопе, с помощью цифровой камеры и предустановленного программного обеспечения Tour View может быть передано на персональный компьютер для последующего анализа.



*Рисунок 4. Цифровая камера*

### **Порядок выполнения работы**

1. Изучить конструкцию и правила работы с микроскопом.
2. Провести настройку осветительной системы микроскопа для работы в светлом поле.
3. Визуально изучить микроструктуру шлифа, перемещая предметный столик, при увеличениях указанных преподавателем.
4. Установить цифровую камеру в окуляр и запустить программное обеспечение Tour View на компьютере.

5. Выбрать с помощью предметного столика характерный участок микро-структуры шлифа, сфотографировать его и сохранить в виде файла.

### **Содержание отчета**

1. Название работы.
2. Цель работы.
3. Краткие теоретические сведения.
4. Перечислить составляющие микроскопа.
5. Приведите таблицу увеличений микроскопа.
6. Привести фотографии микроструктуры шлифов при разных увеличениях.
7. Сделать вывод.

### **Контрольные вопросы**

1. Приведите основные правила работы на микроскопе.
2. Чем определяется увеличение микроскопа?
3. Что понимают под разрешающей способностью микроскопа?
4. Как можно повысить разрешающую способность микроскопа?
5. Что такое абберации?
6. В чем сущность сферической и хроматической абберации? Как они устраняются?
7. Перечислите основные узлы микроскопа.

Лабораторная работа  
«Приготовление шлифов для металлографического анализа»

**Цель работы:** освоение методики изготовления и травления металлографических шлифов для последующего их исследования.

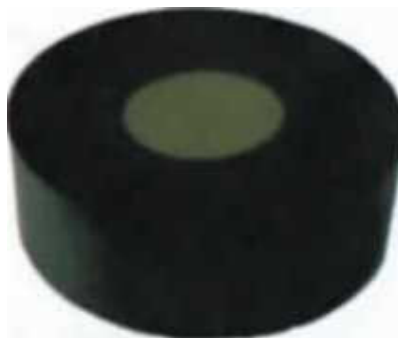
**Приборы и материалы:**

1. Отрезной станок.
2. Шлифовально-полировальный станок.
3. Пресс для горячей запрессовки образцов.
4. Микроскоп металлографический.
5. Образцы для микроанализа.
6. Шлифовальная бумага различной зернистости.
7. Алмазная паста или суспензия.
8. Реактивы для травления.
9. Фильтровальная бумага.

**Теоретические основы работы**

Микроструктурный анализ является составной частью любого металлургического исследования и служит для контроля качества многих видов продукции в машиностроении и металлургии.

Для проведения микроструктурного исследования металла из него необходимо вырезать образец и определенным образом подготовить поверхность этого



*Рисунок 1. Микрошлиф*

образца к исследованию. Подготовленная для исследования под микроскопом поверхность образца называется микрошлифом (рисунок 1).

Микроанализ – это изучение строения металлов и сплавов с помощью металлографического микроскопа при увеличении в 50–2000 крат. При помощи микроскопа определяют:

- форму и размер кристаллических зерен;
- микропороки металла;
- изменение внутреннего строения сплава, происходящее под влиянием различных режимов термической и химико-термической обработок, а также после внешнего механического воздействия на сплав;
- неметаллические включения;
- присутствие различных фаз.

Процесс приготовления микрошлифов состоит из следующих этапов:

- получение плоской поверхности образца;
- шлифование поверхности образца;
- полирование поверхности образца;
- травление поверхности образца.

Рассмотрим эти операции более подробно.

### **Получение плоской поверхности образца**

В зависимости от цели исследования и формы исследуемой детали выбирают место вырезки образца. При вырезке образцов нельзя допускать их нагрев выше 100 °С, т. к. это может сопровождаться структурными изменениями. В настоящее время на рынке оборудования для пробоподготовки имеется большое количество отрезных станков как прецизионных, так и абразивных. Отрезной станок Q-2 является экономичным и практичным инструментом для подготовки образцов снабженным системой охлаждения образца в зоне реза (рисунок 2).

Наиболее удобны простые формы образцов следующих размеров: цилиндр или параллелепипед с диаметром или стороной основания 10–15 мм и высотой 7–10 мм.



*Рисунок 2. Отрезной станок Q-2*

### **Порядок работы на отрезном станке:**

1. Откройте защитную крышку станка.
2. Вращая рукоять подачи диска по часовой стрелке, жестко закрепите заготовку, которую планируете резать.
3. Закройте защитную крышку на замок.
4. Включите станок в сеть.
5. Включите подачу жидкости и отрегулируйте ее поток на место резки образца.
6. Нажмите кнопку включения «ON» станка.
7. С помощью рукояти управляйте силой подачи образца на отрезной диск.
8. По окончании резки отведите диск и нажмите кнопку «OFF».
9. Поднимите крышку на необходимую высоту, чтобы поддерживающий болт автоматически установился.
10. Снимите образец.

На вырезанном образце подготавливают горизонтальную поверхность, предназначенную для микроанализа. Получение плоской поверхности достигается обработкой на наждачной бумаге зернистости P80–100 (если материал мягкий) или заточкой на абразивном круге (если материал твердый).

### **Горячая запрессовка**

Для сложно-фиксируемых, неустойчивых образцов, образцов малых размеров (лента, проволока), а также для удобства шлифования, полирования и исследова-



*Рисунок 3. Пресс для горячей запрессовки образцов ХQ-2В*

дования любых образцов целесообразно применять их запрессовку в фенольную смолу (бакелит). В отличие от холодной процесс горячей запрессовки занимает незначительное количество времени (15–20 мин). Фенольная смола обладает достаточной твердостью, малой объемной усадкой при отверждении и хорошо соединяется с большинством металлических образцов. Порядок работы на прессе (рисунок 3):

1. Поверните рукоятку таймера в положение «ON».
2. Нажав кнопку «SET» на панели управления, установите температуру запрессовки (130 °С) с помощью кнопки «Δ».
3. Снимите со станка крышку, ослабив вентиль.
4. Опустите цилиндрическое основание, вращая рукоятку перемещения против часовой стрелки.
5. Вставьте образец шлифованной поверхностью вниз.
6. Засыпьте в полость стального канала фенольную смолу (бакелит) в объеме 20 мл.
7. В стальной канал поверх бакелита установите стальной цилиндр.
8. Наденьте крышку и вращайте рукоятку перемещения цилиндрического основания, пока не загорится лампочка индикации давления.

9. После того как пресс нагрелся до требуемой температуры на таймере установите время запрессовки образца (10 мин).

10. Если во время прессования лампочка давления погасла, то с помощью рукоятки перемещения цилиндрического основания увеличьте давление.

11. После срабатывания таймера, опустите вниз цилиндрическое основание, ослабьте вентиль, откройте крышку и поверните рукоятку по часовой стрелке, чтобы достать запрессованный образец.

### **Шлифование поверхности образца**

Полученную плоскость поверхности образца шлифуют на шлифовальной бумаге с зернами различных размеров. Шлифование начинают на водостойкой шлифовальной бумаге с более крупными абразивными зернами. Затем переходят на бумагу с более мелким абразивным зерном.

Шлифовку проводят вручную или на механических станках. При ручной шлифовке наждачную бумагу кладут на гладкое толстое стекло. Шлиф прижимают заторцованной стороной к бумаге и водят по ней в одном направлении (от себя и к себе) до исчезновения рисок, оставшихся от предыдущей обработки. После это-



*Рисунок 4. Шлифовально-полировальный станок МР-2*

го поверхность образца протирают ватой (или промывают), поворачивают на 90° и шлифуют на шкурке с более мелким абразивным зерном до полного исчезновения рисок, полученных из предыдущего шлифования. Этому правилу необходимо придерживаться, так как если шлифование производится все время в одном направле-

нии, то нет никакой гарантии, что при замене шкурки одного размера зернистости другим риски, оставшиеся после предыдущего шлифования, будут все выведены.

При механическом шлифовании абразивные бумаги укрепляют (приклеивают) на вращающихся дисках шлифовально-полировального станка (рисунок 4).

Образец держат в руке, прижимая его к диску. Во избежание нагрева поверхности и ее наклепа нельзя сильно прижимать образец. Лучшие результаты дает мокрое шлифование. Вода слабой струей подается в центр вращающегося диска и охлаждает поверхность шлифа, а также уносит частички срезанного металла. Это лучше и с экологической точки зрения – в воздух не попадает металлическая и абразивная пыль.

Существуют также химико-механические способы шлифования. Для этой цели служат специальные пасты, в состав которых, кроме абразивных материалов (окись хрома и окись алюминия), входят химически активные вещества, ускоряющие процессы снятия и возобновления окисной пленки. Однако эти пасты следует применять после грубого механического шлифования образца на абразивной бумаге.

Чтобы получить отличное качество подготавливаемой поверхности образца, шлифование с самого начала надо вести правильно и аккуратно. Нельзя переходить с крупнозернистой шлифовальной бумаги сразу на мелкозернистую. В этом случае грубые риски полностью не устраняются, промежутки между ними заполняются металлом, опилками, наждачным песком и поверхность образца только с виду кажется хорошо подготовленной.

При шлифовании также не следует сильно нажимать на образец, что иногда практикуется, так как это может вызвать заметный нагрев шлифуемой поверхности, а также внедрение абразивных зерен в металл, в результате чего на микрошлифе будут черные точки.

### **Полирование поверхности образца**

Перед полировкой нужно вымыть руки и образец для удаления грязи и абразивных частиц. Полировку осуществляют на быстро вращающемся диске полировального станка, обтянутом мягкой тканью: сукном, фетром, велюром и др. Чем



мягче полируемый металл, тем тоньше должно быть строение ткани. Образцы с легко выкрашивающимися включениями необходимо полировать без ворса.

Применяют механический, химико-механический и электрохимический способы.

При полировке ткань равномерно смачивается полировочной жидкостью – взвесью тонкодисперсного абразива в воде (суспензией). Большинство сталей и сплавов хорошо полируется при использовании в качестве абразива микропорошков окиси алюминия или окиси хрома с размером абразивных частиц 3 и 1 мкм.

Механическое полирование производят на специальном полировальном станке с кругом диаметром 200–250 мм, обтянутым сукном, фетром или велюром. Частота вращения круга от электродвигателя равна 650–800 об/мин. Сукно смачивают полировальной жидкостью, которую подают непрерывно или периодически. К вращающемуся кругу с сукном прижимают отшлифованной поверхностью образец и в процессе полирования поворачивают. Полируют до полного исчезновения рисок и получения зеркальной поверхности, что занимает при хорошо отшлифованной поверхности 5–10 мин.

Химико-механическое полирование производят полировальным кругом, на который наносят вместе с абразивом химические вещества способствующие более быстрой обработке.

Для полирования черных металлов применяют также тонкие сорта шлифовальных паст, а для полирования цветных и некоторых редких металлов – травящие химически активные реактивы (например, раствор желтой кровяной соли), которые ускоряют процесс полирования, а в некоторых случаях выявляют также микроструктуру без специального последующего травления.

После полирования, независимо от способа выполнения, образец промывают водой; полированную поверхность протирают ватой, смоченной спиртом, а затем просушивают прикладыванием фильтровальной бумаги или легким протирающим сухой ватой.

Чтобы предохранить полировальную поверхность от окисления, образцы хранят в эксикаторе с хлористым кальцием.

### **Травление поверхности образца**

Полированный шлиф в нетравленном виде исследуется под микро-скопом только для выявления неметаллических включений (графита, оксидов, сульфидов, фосфидов и пр.), имеющих собственную окраску или дефектов типа трещин.

Для выявления микроструктуры сплава применяют химическое, электролитическое, тепловое травление и другие методы. Травление позволяет выявить границы между фазами, границы зерен, окрашивать различные составляющие вследствие их различной травимости.

Под действием химических реагентов в чистых металлах и однофазных сплавах прежде всего выявляются границы зерен вследствие их повышенной травимости, обусловленной искажениями решетки и наличием включений в них. Часто наблюдается различная окрашиваемость зерен одной фазы, что связано с кристаллографической анизотропией (зерна попадают в плоскость шлифа различными кристаллографическими плоскостями, а поэтому травятся по-разному).

Основной задачей травления является выявление границ между различными фазами и избирательное выявление зерен одной и той же фазы.

При травлении образец погружают в раствор полированной поверхностью либо смачивают поверхность шлифа из пипетки. Можно стирать реактив ватным тампоном. Перемещение образца в ванночке с травителем обеспечивает поступление свежего реактива и предупреждает образование пузырьков воздуха и оседание продуктов травления, препятствующих процессу травления. Продолжительность травления зависит от химического состояния сплава, его структурного состояния, состава травителя, от применяемого увеличения и обычно составляет от нескольких секунд до нескольких минут. Признаком протравленности многих сплавов является слабое потускнение полированной поверхности (шлифы из нержавеющей стали и некоторых других сплавов могут сохранять блестящую поверхность и после травления).

После травления шлифы промывают водой (спиртом) и сушат фильтровальной бумагой или струей воздуха, не допуская их окисления. Качество травления проверяют под микроскопом. Если микроструктура выявлена недостаточно, то шлиф травят повторно. Если шлиф перетравлен, то его заново переполіровывают и повторяют травление.

Для травления микрошлифов применяют различные реактивы. Их состав и назначение можно найти в справочниках по металлографическому травлению. В таблицах 1 и 2 приведены реактивы для травления углеродистых, низколегированных, высоколегированных сталей, а также чугунов.

**Таблица 1. Реактивы для травления углеродистых, низколегированных сталей и чугунов**

<b>Наименование реактива</b>	<b>Состав реактива</b>	<b>Назначение и особенности применения</b>
Спиртовой раствор азотной кислоты (реактив Рженотарского)	Азотная кислота (уд. вес 1,42), мл ..... 1-5 Этиловый или метиловый спирт, мл ..... 100	Реактивы окрашивают перлит в темный цвет, выявляют границы зерен феррита, структуру мартенсита и продуктов отпуска. Применяются также для выявления структуры азотованной и цементованной стали. С увеличением количества азотной кислоты возрастает скорость травления. Продолжительность травления от нескольких секунд до минуты.
Спиртовой раствор пикриновой кислоты (реактив Ижевского)	Пикриновая кислота (кристаллическая), г ...4 Этиловый или метиловый спирт, мл ..... 100	Для выявления величины зерна закаленной стали. Травление в реактиве, выдержанном 24–48 ч., время травления – 1–2 с.
Раствор азотной и соляной кислот	Азотная кислота (уд. вес 1,48), мл .....25 Соляная кислота (уд. вес 1,19). мл .....50 Двуххромовокислый калий, г .....12 Вода, мл .....25	Для выявления границ зерен закаленной стали. После травления осветление поверхности шлифа пленкой ацетата целлюлозы.
Раствор соляной и пикриновой кислот	Соляная кислота (уд. вес 1,19), мл .....3 Пикриновая кислота, г .....4 Вода, мл ..... 100	Для выявления границ зерен закаленной стали. После травления осветление поверхности шлифа пленкой ацетата целлюлозы.

**Таблица 2. Реактивы для травления высоколегированных сталей**

Наименование реактива	Состав реактива	Назначение и особенности применения
Раствор азотной и соляной кислот в глицерине	Азотная кислота (уд. вес 1,42), мл ..... 10 Соляная кислота (уд. вес 1,19), мл ...20–30 Глицерин, мл ..... 30	Для выявления структуры высокохромистой, быстрорежущей и аустенитной марганцовистой стали в закаленном состоянии, производится поочередное травление и полирование.
Царская водка	Соляная кислота (уд. вес 1,19), мл ..... 30 Азотная кислота (уд. вес 1,48), мл ..... 10	Для выявления структур нержавеющей сталей и сплавов. Перед употреблением реактив надо выдержать 20–30 часов.
Раствор щавелевой кислоты	Щавелевая кислота, г . 10 Вода, мл ..... 100	Для выявления карбидов основной структуры аустенитов

### Хранение микрошлифов

Если металлографическое исследование проводится не сразу после приготовления шлифа или шлиф надо сохранить для повторного анализа, то после промывки и сушки шлифы хранят в эксикаторах (рис.5). Эксикатор – это герметично закрытый сосуд, в нижней части которого помещается слой гигроскопического вещества, поглощающего влагу (хлористый кальций, силикогель и др.).

*Рисунок 5. Эксикатор*

### **Порядок выполнения работы**

1. Изучить методику изготовления и травления шлифов.
2. Изготовить шлиф (без травления) в соответствии с описанной методикой.
3. Провести металлографическое исследование нетравленного шлифа при увеличениях 100 и 500 и зарисовать неметаллические включения.
4. Протравить шлиф, зарисовать его структуру при тех же увеличениях, сделать ее описание.

### **Контрольные вопросы**

1. Какова последовательность операций при изготовлении микрошлифа?
2. Как проводится вырезка образцов для изготовления микрошлифа?
3. Что такое микрошлиф и для чего он нужен?
4. Как проводят операцию по шлифовке образца?
5. Как проводят операцию по полировке образца?
6. Как проводят операцию по травлению образца?
7. Какова цель травления образца?
8. Перечислите способы выявления микроструктуры.
9. Где необходимо хранить металлографические шлифы?

Лабораторная работа  
«Изучение микроструктуры углеродистой стали  
в равновесном состоянии»

**Цель работы:** изучение превращения в сплавах системы железо – цементит и структуры сталей различного состава в равновесном состоянии. Определение содержания углерода в исследуемых сталях и их марки.

**Приборы и материалы:**

1. Микроскоп металлографический.
2. Комплект микрошлифов сталей.
3. Альбом с фотографиями микроструктур.

**Теоретические основы работы**

Углеродистая сталь находит самое широкое применение в различных отраслях промышленности. Из нее изготавливают различные строительные конструкции, детали машин, инструмент. Такое разнообразное применение углеродистой стали обусловлено широким диапазоном ее свойств, которые в первую очередь определяются содержанием углерода, изменяющим ее микроструктуру.

В настоящей работе микроструктуру сталей изучают в равновесном состоянии, когда процессы фазовых превращений полностью закончились, что достигается только при очень медленном охлаждении. Структурные составляющие железоуглеродистых сплавов в равновесном состоянии определяют по диаграмме состояния железо – цементит (рисунок 1). В зависимости от температуры и концентрации углерода железоуглеродистые сплавы имеют следующие структурные составляющие.

**Феррит (Ф)** – твердый раствор внедрения углерода в  $\alpha$ - железе. Растворимость углерода в  $\alpha$  – железе при комнатной температуре до 0,006 %; максимальная растворимость – 0,02 % при 727 °С. Растворимость углерода в феррите изменяется с изменением температуры, что отражает на диаграмме состояния (рис. 1) ли-

ния GPQ. Он является продуктом диффузионного превращения аустенита при его охлаждении ниже температур линии GPSK.

Феррит является пластичной фазой. Его относительное удлинение  $\delta = 50 \%$ , твердость зависит от концентрации углерода и других растворенных примесей и изменяется в пределах HB 450–800. Феррит обладает ферромагнитными свойствами, в парамагнитное состояние переходит при температуре 768 °С.

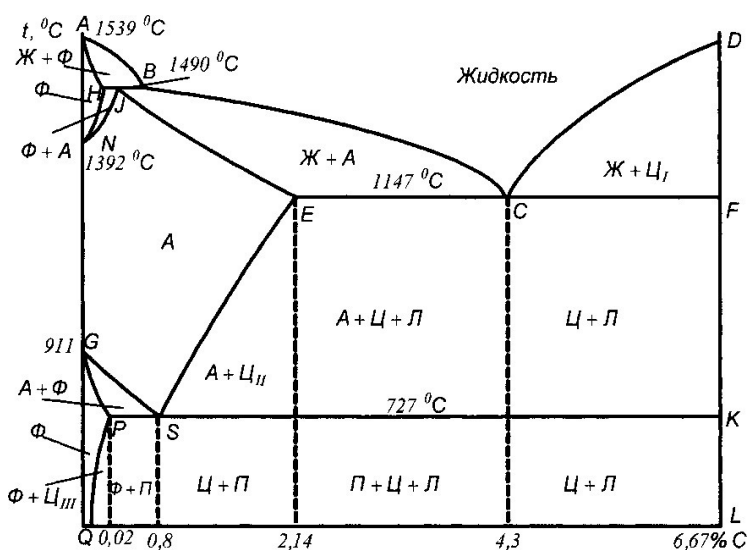
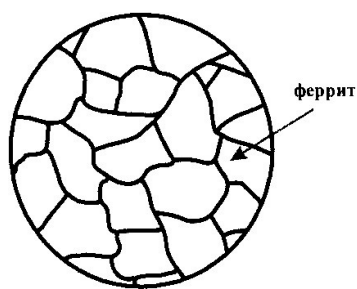


Рисунок 1. Диаграмма состояния железо – цементит



х 240

Рисунок 2. Схема зарисовки структуры феррит

**Цементит (Ц)** – химическое соединение железа с углеродом (карбид железа  $Fe_3C$ ). В цементите содержится 6,67 % углерода. Температура плавления цементита около 1260 °С. Кристаллическая решетка цементита очень сложная ромбическая. Цементит обладает металлическим блеском, тепло- и электропроводностью, малыми магнитными свойствами до температуры 210 °С. Он очень тверд, хрупок

и практически не обладает пластичностью. Цементит неустойчив и в определенных условиях распадается, выделяя свободный углерод в виде графита по реакции  $Fe_3C \rightarrow 3Fe + C$ . В зависимости от условий охлаждения аустенита, цементит может иметь зернистую или пластинчатую форму. Цементитная сетка из пластинок, охватывающих зерна перлита в структуре заэвтектоидной стали, снижает ее пластичность и прочность и увеличивает твердость. Цементит – самая твердая составляющая,  $HV = 8000$ . Его пластичность практически равна нулю. Поэтому с возрастанием количества цементита в стали, при увеличении концентрации в ней углерода твердость стали возрастает, а пластичность падает. Первичный цементит – это цементит, выделяющийся из жидкого расплава. Вторичным называют цементит, выделяющийся из твердого раствора аустенита. Третичным называется цементит, выделяющийся из феррита.

Перлит (П) – механическая смесь (эвтектоид, т.е. подобный эвтектике, но образующийся из твердой фазы) феррита и цементита, содержащая 0,8 % углерода. Перлит может быть пластинчатым и зернистым (глобулярным), что зависит от формы цементита (пластинки или зерна) и определяет механические свойства перлита.

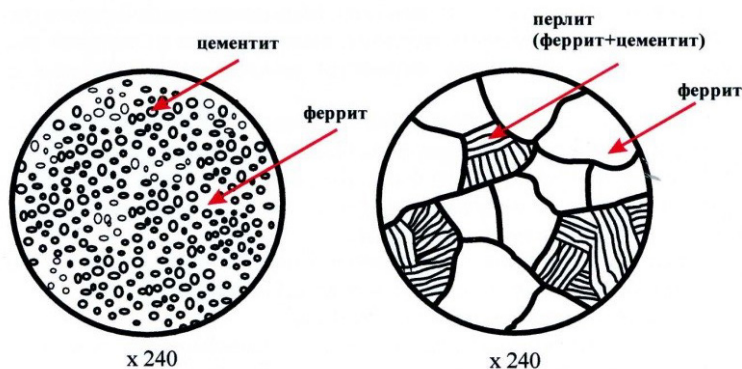
Форма и размер цементитных частиц в перлите существенно влияют на свойства стали. Так, например, зернистый перлит более пластичен и имеет меньшую твердость, чем пластинчатый. Зернистый перлит получается при очень медленном охлаждении и выдержке в субкритическом интервале температур. Для получения зернистого перлита необходимо нагреть сталь чуть выше  $A_1$  (760–780 °С), дать выдержку при этой температуре, а затем медленно охладить со скоростью 30–40 °С/ч до температуры 600 °С. При нагреве чуть выше  $A_{C1}$  получается неомогенный аустенит, в котором остается большое число нерастворенных частиц цементита – центров кристаллизации.

При последующем медленном охлаждении такого аустенита образуется перлит с зернистой формой цементита. Зернистый перлит можно также получить путем длительной выдержки пластинчатого перлита при субкритических температурах за счет сфероидизации пластинок цементита.



С уменьшением размера цементитных частиц твердость и прочность перлита возрастают. Обыкновенный пластинчатый перлит имеет предел прочности  $\sigma_B = 820$  МПа и относительное удлинение  $\delta = 15$  %, а крупнопластинчатый –  $\sigma_B = 550$  МПа и  $\delta = 5$  %. Зернистый перлит имеет  $\sigma_B = 630$  МПа и  $\delta = 20$  %.

Твердость пластинчатого перлита НВ 2000–2500, а зернистого – НВ 1600–2200. На микрошлифе в обычном оптическом микроскопе при малом увеличении (до 200 крат) перлит наблюдается в виде темных зерен, в которых не видно ни пластин, ни зерен цементита, так как размер цементитных частиц очень мал.



**Рисунок 3.** Схема зарисовки структуры перлит: а – зернистый; б – пластинчатый

При изготовлении шлифа пластинки цементита, более твердого, чем феррит, сошлифовываются меньше и поэтому выступают из остальной массы перлита. Феррит как мягкая составляющая сошлифовывается больше, что усиливается при травлении. Поэтому при косом освещении перлит под микроскопом просматривается в виде темных и светлых полосок.

Структура стали в равновесном состоянии зависит от содержания в ней углерода.

Техническое железо содержит не более 0,02 % углерода и является как двухфазным, так и однофазным сплавом. Технически чистое железо называют армко-железом. Его получают в больших количествах промышленным способом с суммарным содержанием примесей около 0,15 %.

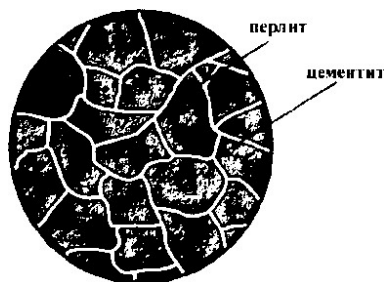
Сплавы с содержанием углерода до 0,006 % состоят из феррита, а в интервале концентрации 0,006–0,02 % – из феррита и цементита третичного, который

выделяется по границам ферритных зерен вследствие изменения растворимости углерода в феррите при изменении температуры.

Дозэвтектоидные стали содержат от 0,02 до 0,8 % углерода. Стали состоят из феррита (Ф) (светлые зерна) и перлита (П) (темные зерна) (см. рис. 3б). Количество перлита увеличивается, а феррита – уменьшается пропорционально увеличению содержания углерода. По соотношению площадей, занимаемых в исследуемой структуре перлитом и ферритом, что с предельной степенью точности соответствует соотношению их объемов, можно определить содержание углерода в стали. Для того чтобы подсчитать содержание углерода в доэвтектоидной стали, необходимо определить площадь  $f_{\text{п}}$ , занимаемую перлитом на микрошлифе относительно всего поля зрения, и умножить на содержание углерода в перлите (0,8 % – см. рис. 1).

Пример: площадь, занятая перлитом  $f_{\text{п}} = 0,6$  (относительно 1). Тогда содержание углерода в данном образце будет:  $0,8 \cdot 0,6 = 0,48$  %. Зная процентное содержание углерода, можно определить марку стали.

Эвтектоидная сталь содержит 0,8 % углерода, в ее структуру входит только перлит.



*Рисунок 4. Схема зарисовки цементитной сетки в заэвтектоидной стали*

Заэвтектоидные стали содержат углерода более 0,8 %. Они состоят из перлита и цементита вторичного, который расположен обычно в виде светлой сетки или светлых вытянутых зерен (цепочки) по границам зерен перлита (рисунок 4).

Содержание цементита вторичного в структуре заэвтектоидной стали возрастает с увеличением концентрации углерода от 3,4 % (при 1 % углерода) до 20,4 (при 2 % углерода) от всей массы сплава. Если известно относительное содержание вторичного цементита на микрошлифе, можно определить содержа-

ние углерода в данном образце. Для этого к углероду, содержащемуся в перлите, нужно добавить углерод, содержащийся во вторичном цементите. Например, площадь, занятая вторичным цементитом  $f_{ц} = 0,04$  (относительно 1), тогда площадь, занятая перлитом,  $f_{п} = 0,96$  относительно площади микрошлифа. Содержание углерода определяют следующим образом:  $0,04 \cdot 6,67 \% + 0,96 \cdot 0,8 \% = 1,1 \%$ .

### Порядок выполнения работы

Каждый студент получает коллекцию микрошлифов углеродистых сталей в равновесном отожженном состоянии, протравленных 4 %-м раствором азотной кислоты в спирте. В работе нужно:

1. изучить и зарисовать микроструктуру каждого микрошлифа;
2. определить структурные составляющие стали и их объемную долю;
3. рассчитать по объемной доле структурных составляющих процентное содержание углерода в заданной стали. Количество углерода определяют по формулам:
  - для доэвтектоидной стали, %,  $C = f_{п} \cdot 0,8 \%$ ;
  - для заэвтектоидной стали, %,  $C = f_{п} \cdot 0,8 \% + f_{ц} \cdot 6,67 \%$ ,
  - где  $f_{п}$  – площадь, занятая перлитом,  $f_{ц}$  – площадь, занятая цементитом.

### Контрольные вопросы

1. Дайте классификацию углеродистой стали по микроструктуре.
2. Как изменяются структура, механические и технологические свойства стали при увеличении количества углерода? Привести конкретные примеры.
3. Перечислить все структурные составляющие, встречающиеся в сталях, и дать характеристику их свойств.
4. Какие стали называются доэвтектоидными, эвтектоидными, заэвтектоидными? Какова их структура и свойства?
5. Дайте характеристику пластинчатому и зернистому перлиту, объясните при каких условиях они получают.
6. Определите относительное количество перлита в сплаве с 0,12 % С.
7. Перечислите основные линии и точки на диаграмме железо – цементит.
8. В чем различие первичного, вторичного и третичного цементита?

## Лабораторная работа «Изучение микроструктуры легированной стали»

**Цель работы:** познакомиться с основными группами легированных сталей и областью их применения.

### Приборы и материалы

Микроскоп металлографический, комплект микрошлифов сталей, альбом с фотографиями микроструктур.

### Краткие теоретические сведения

По химическому составу стали подразделяют на углеродистые и легированные. Сталь, свойства которой в основном зависят от содержания углерода, называют *углеродистой*. Углеродистые стали по содержанию в них углерода подразделяют на низкоуглеродистые (до 0,25 % С), среднеуглеродистые (0,25–0,6 % С) и высокоуглеродистые (более 0,6 % С).

*Легированной* называется сталь, в которой, кроме обычных примесей, содержатся специально вводимые в определенных сочетаниях легирующие элементы (Cr, Ni, Mo, W, V, Al, B, Ti и др.), а также Mn и Si в количествах, превышающих их обычное содержание как технологических примесей (1 % и выше).

Легирование сталей и сплавов используется для улучшения их технологических и эксплуатационных свойств. Легированием можно повысить предел текучести, ударную вязкость, относительное сужение и прокаливаемость, а также существенно снизить скорость закалки, порог хладноломкости, деформируемость изделий и возможность образования трещин. Применимость для легирования различных элементов определяется не столько физическими, сколько, в основном, экономическими соображениями.

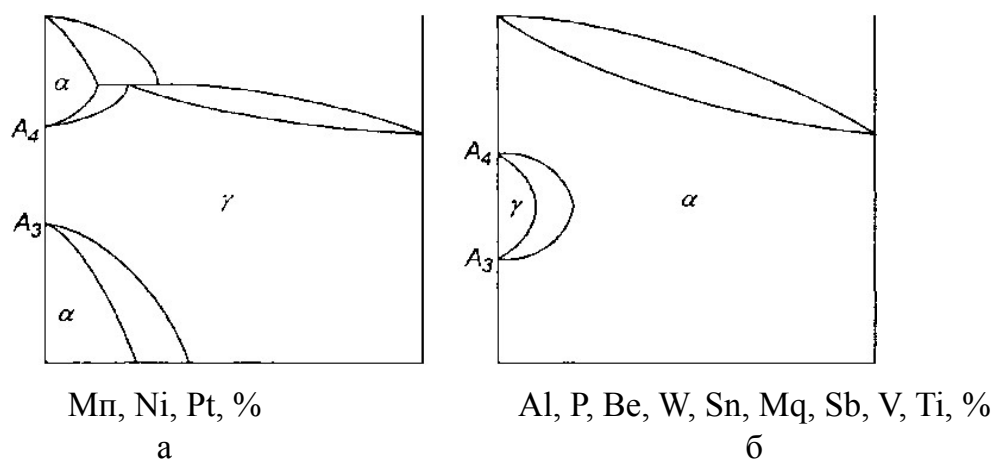
Все элементы, которые растворяются в железе, влияют на температурный интервал существования его аллотропических модификаций ( $A_3=911\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $A_4=1392\text{ }^\circ\text{C}$ ).

В зависимости от расположения элементов в периодической системе и строения кристаллической решетки легирующего элемента возможны варианты взаимодействия легирующего элемента с железом. Им соответствуют и типы диаграмм состояния сплавов системы железо – легирующий элемент.

Большинство элементов или повышают  $A_4$  и снижают  $A_3$ , расширяя существовавшие  $\gamma$  – модификации (рис. 1, а), или снижают  $A_4$  и повышают  $A_3$ , сужая область существования  $\gamma$  – модификации (рис. 1, б).

Свыше определенного содержания марганца, никеля и других элементов, имеющих гранцентрированную кубическую решетку,  $\gamma$  – состояние существует как стабильное от комнатной температуры до температуры плавления, такие сплавы на основе железа называются аустенитными.

При содержании ванадия, молибдена, кремния и других элементов, имеющих объемно-центрированную кубическую решетку. Выше определенного предела устойчивым при всех температурах является  $\alpha$  – состояние. Такие сплавы на основе железа называются ферритными.



**Рисунок 1.** Схематические диаграммы состояния Fe – легирующий элемент:  
а – для элементов, расширяющих область существования  $\gamma$  – модификации;  
б – для элементов, сужающих область существования  $\gamma$  – модификации

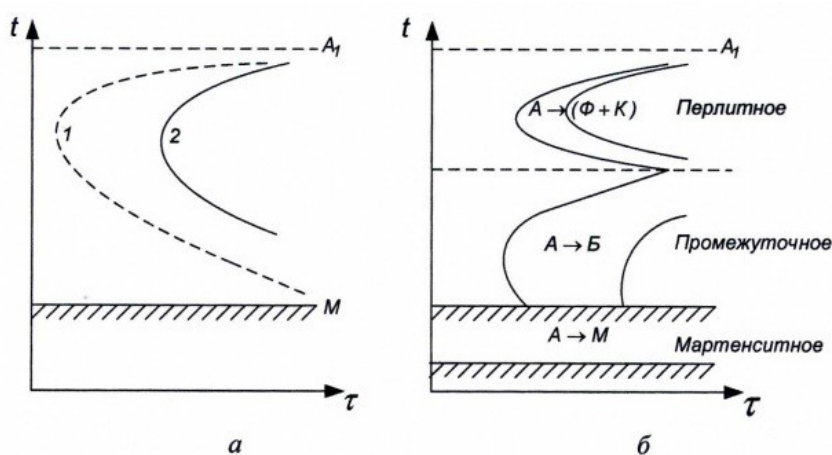
Аустенитные и ферритные сплавы не имеют превращений при нагреве и охлаждении.

Легирующие элементы в большинстве случаев растворяются в аустените, образуя твердые растворы замещения. Легированные стали требуют более высоких

температур нагрева и более длительной выдержки для получения однородного аустенита, в котором растворяются карбиды легирующих элементов.

Малая склонность к росту аустенитного зерна – технологическое преимущество большинства легированных сталей. Все легирующие элементы снижают склонность аустенитного зерна к росту, кроме марганца и бора. Элементы, не образующие карбидов (кремний, кобальт, медь, никель), слабо влияют на рост зерна. Карбидообразующие элементы (хром, молибден, вольфрам, ванадий, титан) сильно измельчают зерно.

По влиянию на устойчивость аустенита и на форму С-образных кривых легирующие элементы разделяются на две группы.



**Рисунок 2.** Влияние легирующих элементов на превращение переохлажденного аустенита: а – некарбидообразующие элементы; б – карбидообразующие элементы

Элементы, которые растворяются в феррите и цементите (кобальт, кремний, алюминий, медь, никель), оказывают только количественное влияние на процессы превращения. Замедляют превращение (большинство элементов), или ускоряют его (кобальт) (рис. 2, а).

Карбидообразующие элементы (хром, молибден, вольфрам, ванадий, титан) вносят и качественные изменения в кинетику изотермического превращения. При разных температурах они по разному влияют на скорость распада аустенита: при температуре 700...500 °С – замедляют превращение в перлитной области,

при температуре 500...400 °С (образование троостита) – очень сильно замедляют превращение, при температуре 400...300 °С (промежуточное превращение) – замедляет превращение аустенита в бейнит, но меньше, чем образование троостита. Это отражается на форме С-образных кривых: наблюдаются два максимума скорости изотермического распада, разделенных областью высокой устойчивости переохлажденного аустенита (рис. 2, б).

Температура максимальной устойчивости аустенита зависит от карбидообразующего элемента: хром – 400...500 °С, вольфрам – 500...550 °С, молибден – 550...575 °С, ванадий – 575...600 °С. Время максимальной устойчивости при заданной температуре возрастает с увеличением степени легированности (очень велико для высоколегированных сталей).

Важным является замедление скорости распада. Это способствует более глубокой прокаливаемости и переохлаждению аустенита до интервала мартенситного превращения при более медленном охлаждении (масло, воздух). Увеличивают прокаливаемость хром, никель, молибден, марганец, особенно при совместном легировании.

Легированные стали классифицируются по нескольким признакам.

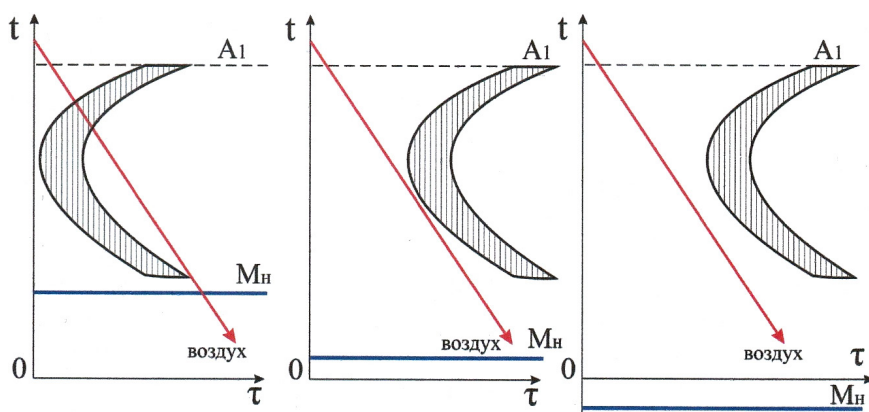
**1. По структуре** после охлаждения на воздухе выделяются три основных класса сталей:

- перлитный;
- мартенситный;
- аустенитный.

Стали перлитного класса характеризуются малым содержанием легирующих элементов; мартенситного – более значительным содержанием; аустенитного – высоким содержанием легирующих элементов.

Классификация связана с кинетикой распада аустенита. Диаграммы изотермического распада аустенита для сталей различных классов представлены на рис. 3.

По мере увеличения содержания легирующих элементов устойчивость аустенита в перлитной области возрастает, а температурная область мартенситного превращения снижается.



**Рисунок 3.** Диаграммы изотермического распада аустенита для сталей перлитного (а), мартенситного (б) и аустенитного (в) классов

Для сталей перлитного класса кривая скорости охлаждения на воздухе пересекает область перлитного распада (рис. 3, а), поэтому образуются структуры перлита, сорбита или троостита.

Для сталей мартенситного класса область перлитного распада сдвинута вправо (рис. 3, б). Охлаждение на воздухе не приводит к превращению в перлитной области. Аустенит переохлаждается до температуры мартенситного превращения и происходит образование мартенсита.

Для сталей аустенитного класса увеличение содержания углерода и легирующих элементов сдвигает вправо область перлитного распада, а также снижает мартенситную точку, переводя ее в область отрицательных температур (рис. 3, в). Сталь охлаждается на воздухе до комнатной температуры, сохраняя аустенитное состояние.

**2. По степени легирования** (по содержанию легирующих элементов):

- низколегированные – 2,5... 5 %;
- среднелегированные – до 10 %;
- высоколегированные – более 10 %.

**3. По числу легирующих элементов:**

- трехкомпонентные (железо, углерод, легирующий элемент);
- четырехкомпонентные (железо, углерод, два легирующих элемента) и так далее.

**4. По составу:** никелевые, хромистые, хромоникелевые, хромоникельмолибденовые и так далее (признак – наличие тех или иных легирующих элементов).

**5. По назначению:**

- конструкционные;



- инструментальные (режущие, мерительные, штамповые);
- стали и сплавы с особыми свойствами (резко выраженные свойства – нержавеющие, жаропрочные и термоустойчивые, износоустойчивые, с особыми магнитными и электрическими свойствами).

При маркировке легированной стали используют буквенные обозначения легирующих элементов: Н – никель; Х – хром; К – кобальт; М – молибден; Г – марганец; Д – медь; Р – бор; Б – ниобий; Ц – цирконий; С – кремний; П – фосфор; Ч – редкоземельные элементы; В – вольфрам; Т – титан; А – азот; Ф – ванадий; Ю – алюминий.

Первые цифры в обозначении показывают среднее содержание углерода в сотых долях процента (у высокоуглеродистых инструментальных сталях в десятых долях процента). Цифры, идущие после буквы, указывают на примерное содержание данного легирующего элемента (при содержании элемента менее 1 % цифра отсутствует; при содержании 1 % цифра 1 и 2 % – цифра 2 и т. д.). Например, 12Г2 – 0,10–0,15 % С и 1,3–1,7 % Мн; 30ХГС – 0,28–0,35 % С; 0,8–1,1 % Сг; 0,9–1,2 % Мн; 0,8–1,2 % Si.

В ряде случаев для сокращения числа знаков в обозначении несколько отступают от точного соблюдения системы ГОСТов (особенно это относится к сложнолегированным сталям). Например, в инструментальных сталях, имеющих углерода больше 1 %, цифры, обозначающие его содержание, полностью опускают Х12М – 1,45–1,70 % С; 11,0–12,5 % Сг и 0,5–0,8 % Мо.

Рассмотрим основные группы легированных сталей.

**Улучшаемые стали.** Среднеуглеродистые (0,3–0,5 % С) низколегированные стали приобретают высокие механические свойства после термического улучшения – закалки при температуре 820–880 °С и высокого отпуска при температуре 550–650 °С. Структура стали после улучшения – сорбит. Улучшаемые стали имеют высокий предел текучести, малую чувствительность к концентраторам напряжений, высокий предел выносливости и достаточный запас вязкости. Детали машин из этих сталей работают при ударных и циклических нагрузках (валы, штоки, шатуны и т. д.) иногда при пониженных температурах. Выбор марки стали (степени легирования) определяется размером термически обрабатываемой за-

готовки и условиями ее работы. Марки стали этой группы: 40Х, 45Х, 35ХГСА, 40ХН, 45ХН. Повышение количества легирующих элементов позволяет повысить прокаливаемость, а значит увеличить поперечное сечение изделий из этих сталей.

**Рессорно-пружинные стали.** Для обеспечения работоспособности силовых упругих элементов применяют стали с повышенным содержанием углерода (0,5–0,7 %). Недорогие и достаточно технологичные рессорно-пружинные стали широко используют в авто– и тракторостроении, железнодорожном транспорте и станкостроении. Эти стали должны иметь высокий предел упругости (текучести), что обеспечивает трооститная структура. Полученная закалкой при 800–850 °С в масле или воде с последующим средним отпуском при 350–520 °С. Примерные марки стали для рессор сечением до 20 мм – 65Г, 55С2, 70С3А, а для пружин и рессор сечением 50–80 мм – 60С2ХА, 60С2Н2А.

**Шарикоподшипниковые стали.** Подвергаются воздействию высоких нагрузок переменного характера. Основными требованиями являются высокая прочность и износостойкость, высокий предел выносливости, отсутствие концентраторов напряжений, неметаллических включений, полостей, ликваций. Шарикоподшипниковые стали характеризуются высоким содержанием углерода (около 1 %) и наличием хрома (ШХ9, ШХ15). Высокое содержание углерода и хрома после закалки обеспечивает структуру мартенсит плюс карбиды, высокой твердости, износостойкости, необходимой прокаливаемости. Дальнейшее увеличение прокаливаемости достигается дополнительным легированием марганцем, кремнием (ШХ15СГ). Из стали ШХ9 изготавливают шарики и ролики небольших размеров, из стали ШХ15 – более крупные.

Детали подшипников качения, испытывающие большие динамические нагрузки (подшипники прокатных станов), изготавливают из сталей 20Х2Н4А и 18ХГТ с последующей глубокой цементацией на глубину 5...10 мм.

**Инструментальные стали.** Инструментальная сталь должна обладать высокой твердостью, износостойкостью, достаточной прочностью и вязкостью (для инструментов ударного действия). Режущие кромки могут нагреваться до температуры 500...900 °С, поэтому важным свойством является теплостойкость, т.е. способность сохранять высокую твердость и режущую способность при продол-

жительном нагреве (красностойкость). Содержат 0,9... 1,4 % углерода. В качестве легирующих элементов содержат хром, вольфрам, ванадий, марганец, кремний и другие. Общее содержание легирующих элементов до 5 %. Легирование используется для повышения закаливаемости и прокаливаемости, сохранения мелкого зерна, повышения прочности и вязкости. Термическая обработка включает закалку и отпуск. Для деревообрабатывающего инструмента из сталей 6ХС и 9ХФ рекомендуется изотермическая закалка, значительно улучшающая вязкость.

**Быстрорежущие стали** являются одним из основных инструментальных материалов. Они могут работать с достаточно высокими скоростями резания. Основными видами режущих инструментов из быстрорежущей стали являются резцы, сверла, долбяки, протяжки, метчики машинные, ножи для резки бумаги. Часто из быстрорежущей стали изготавливают только рабочую часть инструмента. Существует достаточно много марок быстрорежущих сталей P18, P12, P9, P6M5, P6M3, P6M5K5, P9M4K8, P9K5, P10K5Ф5. Твердость до 64 HRC они сохраняют до  $T = 640$  °С.

**Коррозионно-стойкие стали.** Важнейшими коррозионно-стойкими техническими сплавами являются нержавеющие стали с повышенным содержанием хрома: хромистые и хромоникелевые. В хромистых сталях содержание хрома должно быть не менее 13 % (13...18 %). Коррозионная стойкость объясняется образованием на поверхности защитной пленки оксида  $Cr_2O_3$ . Углерод в нержавеющих сталях является нежелательным. Чем ниже содержание углерода, тем выше коррозионная стойкость нержавеющих сталей. Из ферритных сталей 08X13, 12X17, 08X25Т, 15X28 изготавливают оборудование азотно-кислотных заводов (емкости, трубы).

Для повышения механических свойств ферритных хромистых сталей в них добавляют 2...3 % никеля. Стали 10X13НЗ, 12X17Н2 используются для изготовления тяжело нагруженных деталей, работающих в агрессивных средах. При повышении содержания никеля до 8–10 % хромистые нержавеющие стали становятся аустенитными. Нержавеющие стали аустенитного класса 04X18Н10, 12X18Н9Т имеют более высокую коррозионную стойкость, лучшие технологические свойства по сравнению с хромистыми нержавеющими сталями, лучше свариваются. Они устойчивы против коррозии в морской воде, лаках, органических и азотной

кислотах, слабых щелочах. Они используются для деталей, работающих в указанных средах, бытовых изделий и т. п.

**Жаростойкие стали.** *Жаростойкость (окалиностойкость)* – это способность металлов и сплавов сопротивляться газовой коррозии при высоких температурах в течение длительного времени. Чем выше содержание хрома, тем более окалиностойки стали (например, сталь 15X25T является окалиностойкой до температуры 1100... 1150 °С).

Высокой жаростойкостью обладают сильхромы, сплавы на основе никеля – нихромы, стали 08X17T, 36X18H25C2, 15X6CЮ.

**Жаропрочные стали.** Жаропрочность – это способность металла сопротивляться пластической деформации и разрушению при высоких температурах. Жаропрочные материалы используются для изготовления деталей, работающих при высоких температурах, когда имеет место явление ползучести. В качестве современных жаропрочных материалов можно отметить *перлитные, мартенситные* и *аустенитные* жаропрочные стали, *никелевые* и *кобальтовые* жаропрочные сплавы, *тугоплавкие* металлы.

Для работы в интервале температур 350...500 °С применяют легированные стали перлитного, ферритного и мартенситного классов.

**Перлитные жаропрочные стали.** К этой группе относятся котельные стали и сильхромы. Эти стали применяются для изготовления деталей котельных агрегатов, паровых турбин, двигателей внутреннего сгорания. Стали содержат относительно мало углерода. Легирование сталей хромом, молибденом и ванадием производится для повышения температуры рекристаллизации (марки 12X1МФ, 20X3МФ). Перлитные стали обладают удовлетворительной свариваемостью, поэтому используются для сварных конструкций (например, трубы пароперегревателей).

Для деталей газовых турбин применяют сложнелегированные *стали мартенситного класса* 12X2МФСР, 12X2МФБ, 15X12ВНМФ. Увеличение содержания хрома повышает жаростойкость сталей. Для изготовления жаропрочных деталей, не требующих сварки (клапаны двигателей внутреннего сгорания), применяются хромокремнистые стали – сильхромы: 40X10C2М, 40X9C2, X6C.

При рабочих температурах 500...700 °С применяются стали *аустенитного класса*. Из этих сталей изготавливают клапаны двигателей, лопатки газовых турбин, сопловые аппараты реактивных двигателей и т.д. Основными жаропрочными аустенитными сталями являются хромоникелевые стали, дополнительно легированные вольфрамом, молибденом, ванадием и другими элементами. Стали содержат 15...20 % хрома и 10...20 % никеля. Обладают жаропрочностью и жаростойкостью, пластичны, хорошо свариваются, но затруднена обработка резанием и давлением, охрупчиваются в интервале температур около 600 °С, из-за выделения по границам различных фаз.

### **Порядок выполнения работы**

Каждый студент получает коллекцию микрошлифов легированных сталей. В работе нужно изучить и схематично зарисовать микроструктуру каждого микрошлифа. Указать структурные составляющие.

### **Содержание отчета**

1. Название работы.
2. Цель работы.
3. Схемы микроструктур легированных сталей с указанием марки стали и ее химического состава.
4. Вывод.

### **Контрольные вопросы и задания**

1. Какую сталь называют легированной?
2. Приведите классификацию легированных сталей.
3. Какие стали относятся к коррозионностойким?
4. Какие стали применяют для изготовления пружин и рессор?
5. Назовите основные группы легированных сталей.
6. Как маркируют легированные стали?
7. С какой целью осуществляют легирование стали?
8. В каком случае марганец и кремний является постоянной примесью, а в каком легирующим элементом?

## Лабораторная работа «Изучение микроструктуры цветных сплавов»

**Цель работы:** изучить структуру, свойства, применение и классификацию алюминиевых, медных, титановых и других цветных сплавов.

### **Приборы и материалы**

Микроскоп металлографический, комплект микрошлифов цветных сплавов, альбом с фотографиями микроструктур.

### **Краткие теоретические сведения**

Ценные свойства цветных металлов обусловили их широкое применение в различных отраслях современного производства. Медь, алюминий, цинк, магний, титан и другие металлы и их сплавы являются незаменимыми материалами для приборостроительной и электротехнической промышленности, самолетостроения и радиоэлектроники, ядерной и космической отраслей техники.

### **Алюминий и его сплавы**

Среди металлов алюминий по распространенности в природе занимает первое место, по практическому использованию – второе (после железа).

Алюминий – легкий металл с плотностью  $2,7 \text{ г/см}^3$  и температурой плавления  $660 \text{ }^\circ\text{C}$ . Имеет гранецентрированную кубическую решетку. Обладает высокой тепло- и электропроводностью. Химически активен, но образующаяся плотная пленка оксида алюминия  $Al_2O_3$ , предохраняет его от коррозии.

Механические свойства: предел прочности  $150 \text{ МПа}$ , относительное удлинение  $50 \%$ , модуль упругости  $7000 \text{ МПа}$ .

Алюминий высокой чистоты маркируется А99 (99,999 % Al), А8, А7, А6, А5, А0 (содержание алюминия от 99,85 % до 99 %).

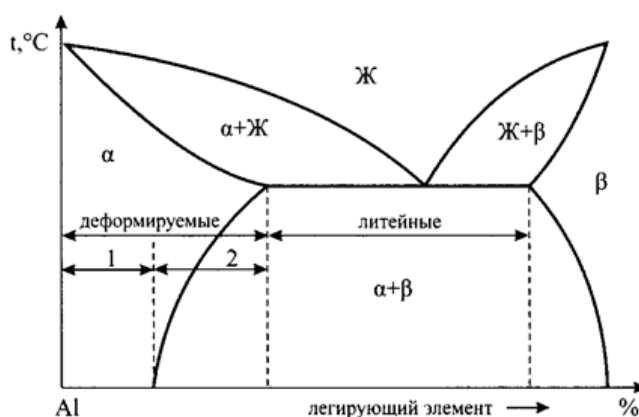
Технический алюминий хорошо сваривается, имеет высокую пластичность. Из него изготавливают строительные конструкции, малонагруженные детали машин, используют в качестве электротехнического материала для кабелей, проводов.

**Принцип маркировки алюминиевых сплавов.** В начале указывается тип сплава: Д – сплавы типа дюралюминов; А – технический алюминий; АК – ковкие алюминиевые сплавы; В – высокопрочные сплавы; АЛ – литейные сплавы.

Далее указывается условный номер сплава. За условным номером следует обозначение, характеризующее состояние сплава: М – мягкий (отожженный); Т – термически обработанный (закалка плюс старение); Н – нагартованный; П – полунангартованный.

По технологическим свойствам сплавы подразделяются на три группы (рис. 1):

- деформируемые сплавы, не упрочняемые термической обработкой;
- деформируемые сплавы, упрочняемые термической обработкой;
- литейные сплавы.



**Рисунок 1.** Диаграмма состояний «алюминий – легирующий элемент»:  
 1 – деформируемые, термически неупрочняемые сплавы;  
 2 – деформируемые, термически упрочняемые сплавы.

Методами порошковой металлургии изготавливают спеченные алюминиевые сплавы (САС) и спеченные алюминиевые порошковые сплавы (САП).

*Деформируемые сплавы, не упрочняемые термической обработкой*

Прочность алюминия можно повысить легированием. В сплавы, не упрочняемые термической обработкой, вводят марганец или магний. Атомы этих элементов существенно повышают его прочность, снижая пластичность. Обозначаются сплавы: с марганцем – АМц, с магнием – АМг; после обозначения элемента указывается его содержание (АМгЗ).

Магний действует только как упрочнитель, марганец упрочняет и повышает коррозионную стойкость.

Прочность сплавов повышается только в результате деформации в холодном состоянии. Чем больше степень деформации, тем значительно растет прочность и снижается пластичность. В зависимости от степени упрочнения различают сплавы нагартованные и полунагартованные (АМгЗП).

Эти сплавы применяют для изготовления различных сварных емкостей для горючего, азотной и других кислот, мало- и средненагруженных конструкций.

#### *Деформируемые сплавы, упрочняемые термической обработкой*

К таким сплавам относятся дюралюмины (сложные сплавы систем алюминий – медь – магний или алюминий – медь – магний – цинк). Они имеют пониженную коррозионную стойкость, для повышения которой вводится марганец.

*Дюралюмины* обычно подвергаются закалке с температуры 500 °С и естественному старению, которому предшествует двух-, трехчасовой инкубационный период. Максимальная прочность достигается через 4...5 суток.

Широкое применение дюралюмины находят в авиастроении, автомобилестроении, строительстве.

*Высокопрочными стареющими сплавами* являются сплавы, которые кроме меди и магния содержат цинк. Сплавы В95, В96 имеют предел прочности около 650 МПа. Основным потребителем – авиастроение (обшивка, стрингеры, лонжероны).

*Ковочные алюминиевые сплавы* АК6, АК8 применяются для изготовления поковок. Поковки изготавливаются при температуре 380...450 °С, подвергаются закалке от температуры 500...560 °С и старению при 150...165 °С в течение 6...15 часов.

В состав алюминиевых сплавов дополнительно вводят никель, железо, титан, которые повышают температуру рекристаллизации и жаропрочность до 300 °С.

Изготавливают поршни, лопадки и диски осевых компрессоров, турбореактивных двигателей.

Химический состав некоторых деформируемых алюминиевых сплавов приведен в табл. 1.

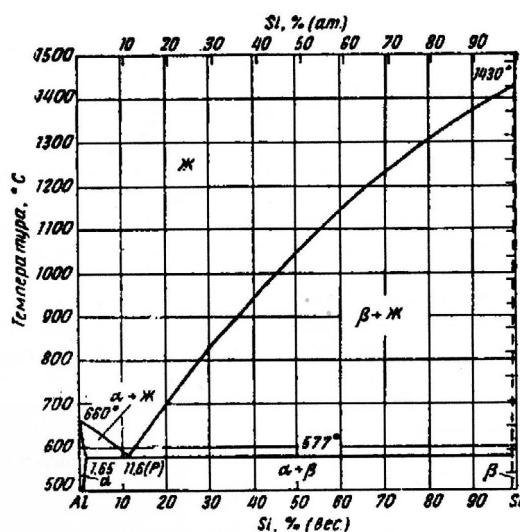


**Таблица 1. Химический состав некоторых деформируемых алюминиевых сплавов**

Марка сплава	Содержание элементов, %			
	Cu	Mg	Si	Другие
Система Al-Cu-Mg: Д1 Д16	3,8...4,8	0,4...0,8	–	–
	3,8...4,9	1,2...1,8	–	–
Система Al-Mg-Si-Cu: АК6 АК8	1,8...2,6	0,4...0,8	0,7...1,2	–
	3,9...4,8	0,4...0,8	0,7...1,2	–
Система Al-Zn-Mg-Cu: В95	1,4...2,0	1,8...2,8	–	Zn 5,0...7,0 Cr 0,1...0,25

*Литейные алюминиевые сплавы*

К литейным сплавам относятся сплавы системы алюминий – кремний (силумины), содержащие 10... 13 % кремния.



**Рисунок 2. Диаграмма состояния системы алюминий – кремний**

Присадка к силуминам магния, меди содействует эффекту упрочнения литейных сплавов при старении. Титан и цирконий измельчают зерно. Марганец повышает антикоррозионные свойства. Никель и железо повышают жаропрочность. Литейные сплавы маркируются от АЛ12 до АЛ120. Химический состав некоторых литейных алюминиевых сплавов приведен в табл. 2.

**Таблица 2. Химический состав некоторых литейных алюминиевых сплавов**

Марка сплава	Содержание элементов, %			
	Si	Mg	Cu	Другие
Система Al-Si (силумины):	10...13	–	–	–
АЛ2	8...11	0,2...0,4	–	Mn 0,2...0,5
АЛ4	6...8	0,2...0,4	–	–
АЛ9	4,5...5,5	0,4...0,6	1,0...1,5	–
АЛ5				
Система Al-Cu: ВАЛ10	–	–	4,5...5,1	Mn 0,3... 0,8 Ti 0,15...0,35 Cd 0,07...0,25
Система Al-Mg: АЛ23	–	6,0...7,0	–	Ti 0,05...0,15 Zr 0,05... 0,20 Be 0,02...0,10
АЛ27	–	9,0... 10, 0	–	Ti 0,05...0,15 Zr 0,05... 0,20 Be 0,05...0,15

Силумины широко применяют для изготовления литых деталей приборов и других средне- и малонагруженных деталей, в том числе тонкостенных отливок сложной формы.

### Медь и ее сплавы

Медь имеет гранцентрированную кубическую решетку. Плотность меди 8,94 г/см<sup>3</sup>, температура плавления 1083 °С.

Характерным свойством меди является ее высокая электропроводность, поэтому она находит широкое применение в электротехнике. Технически чистая медь маркируется: М00 (99,99 % Cu), М0 (99,95 % Cu), М2, М3 и М4 (99 % Cu).

Механические свойства меди относительно низкие: предел прочности составляет 150...200 МПа, относительное удлинение – 15...25 %. Поэтому в качестве конструкционного материала медь применяется редко. Повышение механических свойств достигается созданием различных сплавов на основе меди.

Различают две группы медных сплавов: **латуни** – сплавы меди с цинком, **бронзы** – сплавы меди с другими (кроме цинка) элементами.

### Латуни

Латуни могут иметь в своем составе до 45 % цинка. Повышение содержания цинка до 45 % приводит к увеличению предела прочности до 450 МПа. Максимальная пластичность имеет место при содержании цинка около 37 %.

При сплавлении меди с цинком образуется ряд твердых растворов  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\epsilon$  (рис. 3).

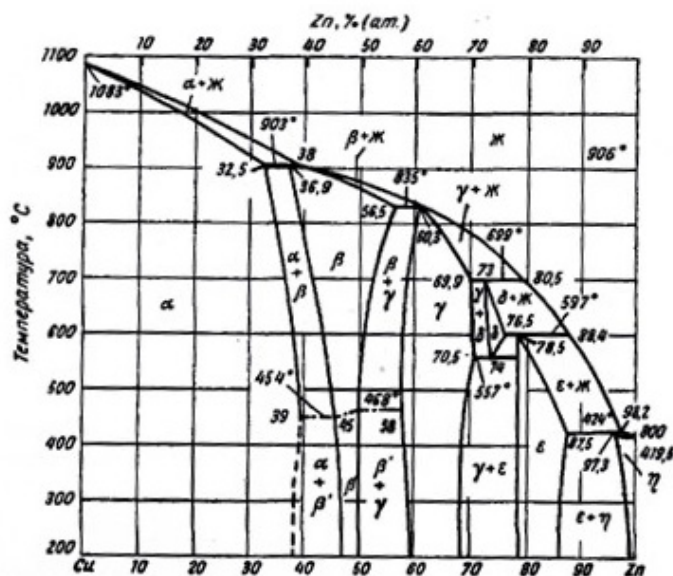


Рисунок 3. Диаграмма состояния медь – цинк

Из диаграммы состояния медь – цинк видно, что в зависимости от состава имеются однофазные латуни, состоящие из  $\alpha$  – твердого раствора, и двухфазные  $\alpha + \beta$  – латуни.

По способу изготовления изделий различают латуни деформируемые и литейные.

Деформируемые латуни маркируются буквой Л, за которой следует число, показывающее содержание меди в процентах, например в латуни Л 62 содержится 62 % меди и 38 % цинка. Если кроме меди и цинка, имеются другие элементы, то ставятся их начальные буквы (О – олово, С – свинец, Ж – железо, Ф – фосфор, Мц – марганец, А – алюминий, Ц – цинк). Количество этих элементов обозначается соответствующими цифрами после числа, показывающего содержание меди, например, сплав ЛАЖ60-1-1 содержит 60 % меди, 1 % алюминия, 1 % железа и 38 % цинка.

Однофазные  $\alpha$  – латуни используются для изготовления деталей деформированием в холодном состоянии. Изготавливают ленты, гильзы патронов, радиаторные трубки, проволоку.

Для изготовления деталей деформированием при температуре выше  $500^{\circ}\text{C}$  используют  $\alpha+\beta$  – латуни. Из двухфазных латуней изготавливают листы, прутки и другие заготовки, из которых последующей механической обработкой изготавливают детали. Обрабатываемость резанием улучшается присадкой в состав латуни свинца, например, латунь марки ЛС59-1, которую называют «автоматной латунью».

Латуни имеют хорошую коррозионную стойкость, которую можно повысить дополнительно присадкой олова. Латунь Л070-1 стойка против коррозии в морской воде и называется «морской латунью».

Добавка никеля и железа повышает механическую прочность до 550 МПа.

Литейные латуни также маркируются буквой Л, После буквенного обозначения основного легирующего элемента (цинк) и каждого последующего ставится цифра, указывающая его усредненное содержание в сплаве. Например, латунь ЛЦ23А6Ж3Мц2 содержит 23 % цинка, 6 % алюминия, 3 % железа, 2 % марганца. Наилучшей жидкотекучестью обладает латунь марки ЛЦ16К4. К литейным латуням относятся латуни типа ЛС, ЛК, ЛА, ЛАЖ, ЛАЖМц. Литейные латуни не склонны к ликвации, имеют сосредоточенную усадку, отливки получаются с высокой плотностью.

Латуни являются хорошим материалом для конструкций, работающих при отрицательных температурах.

### *Бронзы*

Сплавы меди с другими элементами кроме цинка называются *бронзами*. Бронзы подразделяются на деформируемые и литейные.

При маркировке деформируемых бронз на первом месте ставятся буквы Бр, затем буквы, указывающие, какие элементы, кроме меди, входят в состав сплава. После букв идут цифры, показывающие содержание компонентов в сплаве. Например, марка БрОФЮ-1 означает, что в бронзу входит 10 % олова, 1 % фосфора, остальное – медь.

Маркировка литейных бронз также начинается с букв Бр, затем указываются буквенные обозначения легирующих элементов и ставится цифра, указывающая его усредненное содержание в сплаве. Например, бронза БрОЗЦ12С5 содержит 3 % олова, 12 % цинка, 5 % свинца, остальное – медь.

*Оловянные бронзы.* При сплавлении меди с оловом образуются твердые растворы. Эти сплавы очень склонны к ликвации из-за большого температурного интервала кристаллизации. Благодаря ликвации сплавы с содержанием олова выше 5 % имеют в структуре эвтектоидную составляющую Э ( $\alpha+\delta$ ), состоящую из мягкой и твердой фаз. Такое строение является благоприятным для деталей типа подшипников скольжения: мягкая фаза обеспечивает хорошую прирабатываемость, твердые частицы создают износостойкость. Поэтому оловянные бронзы являются хорошими антифрикционными материалами.

Оловянные бронзы имеют низкую объемную усадку (около 0,8 %), поэтому используются в художественном литье.

Наличие фосфора обеспечивает хорошую жидкотекучесть.

Оловянные бронзы подразделяются на деформируемые и литейные.

В *деформируемых бронзах* содержание олова не должно превышать 6 %, для обеспечения необходимой пластичности, Бр0ф6,5-0,15.

В зависимости от состава деформируемые бронзы отличаются высокими механическими, антикоррозионными, антифрикционными и упругими свойствами, и используются в различных отраслях промышленности. Из этих сплавов изготавливают прутки, трубы, ленту, проволоку.

*Литейные оловянные бронзы*, БрОЗЦ7С5Н1, Бр04Ц4С17, применяются для изготовления пароводяной арматуры и для отливок антифрикционных деталей типа втулок, венцов червячных колес, вкладышей подшипников.

*Алюминиевые бронзы*, БрАЖ9-4, БрАЖ9-4Л, БрАЖН10-4-4.

Бронзы с содержанием алюминия до 9,4 % имеют однофазное строение  $\alpha$  – твердого раствора. При содержании алюминия 9,4... 15,6 % сплавы системы медь – алюминий двухфазные и состоят из  $\alpha$  – и  $\gamma$  – фаз.

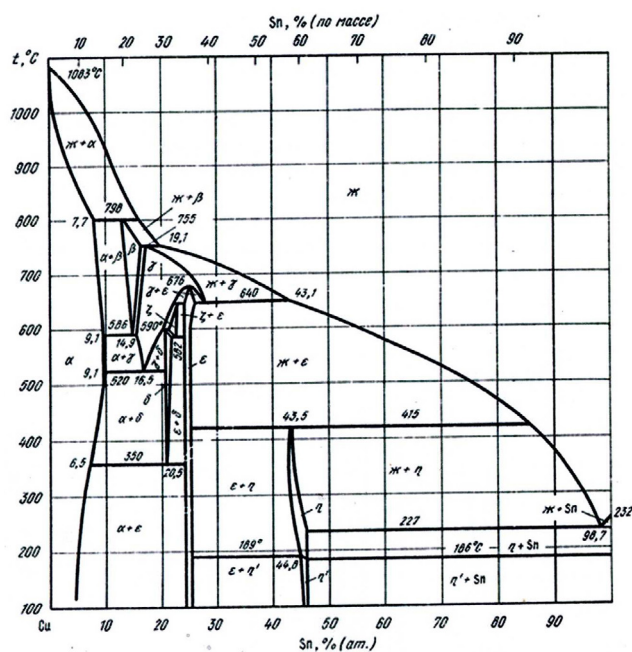


Рисунок 4. Диаграмма состояния медь – олово

Оптимальными свойствами обладают алюминиевые бронзы, содержащие 5...8 % алюминия. Увеличение содержания алюминия до 10... 11 % вследствие появления  $\lambda$  – фазы ведет к резкому повышению прочности и сильному снижению пластичности. Дополнительное повышение прочности для сплавов с содержанием алюминия 8...9,5 % можно достичь закалкой.

Положительные особенности алюминиевых бронз по сравнению с оловянными:

- меньшая склонность к внутрикристаллической ликвации;
- большая плотность отливок;
- более высокая прочность и жаропрочность;
- меньшая склонность к хладоломкости.

Основные недостатки алюминиевых бронз:

- значительная усадка;
- склонность к образованию столбчатых кристаллов при кристаллизации и росту зерна при нагреве, что охрупчивает сплав;
- сильное газопоглощение жидкого расплава;
- самоотпуск при медленном охлаждении;
- недостаточная коррозионная стойкость в перегретом паре.

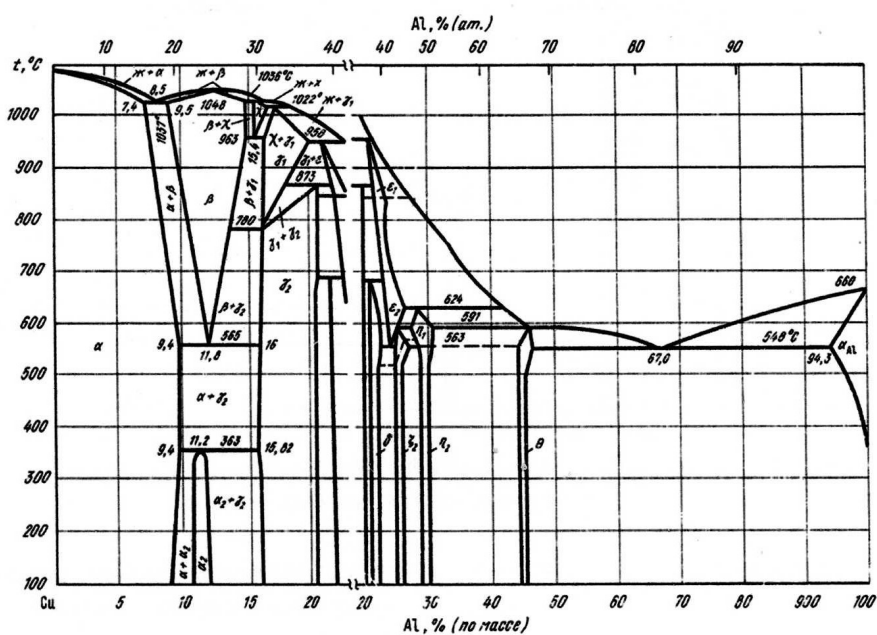


Рисунок 5. Диаграмма состояния медь – алюминий

Для устранения этих недостатков сплавы дополнительно легируют марганцем, железом, никелем, свинцом.

Из алюминиевых бронз изготавливают относительно мелкие, но высокоответственные детали типа шестерен, втулок, фланцев литьем и обработкой давлением. Из бронзы БрА5 штамповкой изготавливают медали и мелкую разменную монету.

Из алюминиевых бронз изготавливают относительно мелкие, но высокоответственные детали типа шестерен, втулок, фланцев литьем и обработкой давлением. Из бронзы БрА5 штамповкой изготавливают медали и мелкую разменную монету.

*Кремнистые бронзы*, БрКМц3-1, БрК4, применяют как заменители оловянных бронз. Они немагнитны и морозостойки, превосходят оловянные бронзы по коррозионной стойкости и механическим свойствам, имеют высокие упругие свойства. Сплавы хорошо свариваются и подвергаются пайке. Благодаря высокой устойчивости к щелочным средам и сухим газам, их используют для производства сточных труб, газо- и дымопроводов.

*Свинцовые бронзы*, БрС30, используют как высококачественный антифрикционный материал. По сравнению с оловянными бронзами имеют более низкие механические и технологические свойства.

*Бериллиевые бронзы*, БрБ2, являются высококачественным пружинным материалом. Растворимость бериллия в меди с понижением температуры значительно уменьшается. Это явление используют для получения высоких упругих и прочностных свойств изделий методом дисперсионного твердения. Готовые изделия из бериллиевых бронз подвергают закалке от 800°С, благодаря чему фиксируется при комнатной температуре пересыщенные твердый раствор бериллия в меди. Затем проводят искусственное старение при температуре 300...350 °С. При этом происходит выделение дисперсных частиц, возрастают прочность и упругость. После старения предел прочности достигает 1100... 1200 МПа.

*Медноникелевые сплавы* – это сплавы на основе меди, в которых основным легирующим элементом является никель. По назначению их подразделяют на конструкционные и электротехнические сплавы.

*Куниали* (медь – никель – алюминий) содержат 6–13 % никеля, 1,5–3 % алюминия, остальное медь. Куниали служат для изготовления деталей повышенной прочности, пружин и ржа электротехнических изделий.

*Нейзильберы* (медь – никель – цинк) содержат 15 % никеля, 20 % цинка, остальное медь. Нейзильберы имеют белый приятный цвет, близкий к цвету серебра. Они хорошо сопротивляются атмосферной коррозии; применяют в приборостроении и производстве часов.

*Мельхиоры* (медь – никель и небольшие добавки железа и марганца до 1 %) обладают высокой коррозионной стойкостью, в частности в морской воде. Их применяют для изготовления теплообменных аппаратов, штампованных и чеканных изделий.

*Копель* (медь – никель 43 % – марганец 0,5 %) – специальный термоэлектродный сплав для изготовления термопар.

*Манганин* (медь – никель 3 % – марганец 12 %) – специальный сплав с высоким удельным электросопротивлением, используемый в электротехнике для изготовления электронагревательных элементов.

*Константан* (медь – никель 40 % – марганец 1,5 %) имеет такое же назначение, как и манганин.



### Титан и его сплавы

Титан серебристо-белый легкий металл с плотностью 4,5 г/см<sup>3</sup>. Температура плавления титана зависит от степени чистоты и находится в пределах 1660...1680 °С.

Чистый иодидный титан, в котором сумма примесей составляют 0,05...0,1 %, имеет модуль упругости 112 000 МПа, предел прочности около 300 МПа, относительное удлинение 65 %. Наличие примесей сильно влияет на свойства. Для технического титана ВТ1, с суммарным содержанием примесей 0,8 %, предел прочности составляет 650 МПа, а относительное удлинение – 20 %.

При температуре 882 °С титан претерпевает полиморфное превращение,  $\alpha$  – титан с гексагональной решеткой переходит в  $\beta$  – титан с объемно-центрированной кубической решеткой. Наличие полиморфизма у титана создает предпосылки для улучшения свойств титановых сплавов с помощью термической обработки.

Титан имеет низкую теплопроводность. При нормальной температуре обладает высокой коррозионной стойкостью в атмосфере, в воде, в органических и неорганических кислотах (нестоек в плавиковой, крепких серной и азотной кислотах), благодаря тому, что на воздухе быстро покрывается защитной пленкой плотных оксидов. При нагреве выше 500°С становится очень активным элементом. Он либо растворяет почти все соприкасающиеся и ним вещества, либо образует с ними химические соединения.

Титановые сплавы имеют ряд преимуществ по сравнению с другими:

- сочетание высокой прочности ( $\sigma_{\text{в}}=800...1000$  МПа) с хорошей пластичностью ( $\delta=12...25$  %);
- малая плотность, обеспечивающая высокую удельную прочность;
- хорошая жаропрочность, до 600...700 °С;
- высокая коррозионная стойкость в агрессивных средах.

Однородные титановые сплавы, не подверженные старению, используют в криогенных установках до гелиевых температур.

В результате легирования титановых сплавов можно получить нужный комплекс свойств. Легирующие элементы, входящие в состав промышленных титановых сплавов, образуют с титаном твердые растворы замещения и изменяют температуру аллотропического превращения. Элементы, повышающие температуру

превращения, способствуют стабилизации  $\alpha$  – твердого раствора и называются  $\alpha$  – стабилизаторами, это – алюминий, кислород, азот, углерод.

Элементы, понижающие температуру превращения, способствуют стабилизации  $\beta$  – твердого раствора и называются  $\beta$  – стабилизаторами, это – молибден, ванадий, хром, железо.

Кроме  $\alpha$ - и  $\beta$ -стабилизаторов различают нейтральные упрочнители: олово, цирконий, гафний.

В соответствии с влиянием легирующих элементов титановые сплавы при нормальной температуре могут иметь структуру  $\alpha$  или  $\alpha+\beta$ .

Сплавы на основе титана можно подвергать всем видам термической обработки, химико-термической и термомеханической обработке. Упрочнение титановых сплавов достигается легированием, наклепом, термической обработкой.

Часто титановые сплавы легируют алюминием, он увеличивает прочность и жаропрочность, уменьшает вредное влияние водорода, увеличивает термическую стабильность. Для повышения износостойкости титановых сплавов их подвергают цементации или азотированию.

Основным недостатком титановых сплавов является плохая обрабатываемость режущим инструментом.

По способу производства деталей различаются деформируемые (BT9, BT 18) и литейные (BT21Л, BT31Л) сплавы.

Химический состав некоторых титановых сплавов приведен в табл. 3.

Области применения титановых сплавов:

- авиация и ракетостроение (корпуса двигателей, баллоны для газов, сопла, диски, детали крепежа);
- химическая промышленность (компрессоры, клапаны, вентили для агрессивных жидкостей);
- оборудование для обработки ядерного топлива;
- морское и речное судостроение (гребные винты, обшивка морских судов, подводных лодок);
- криогенная техника (высокая ударная вязкость сохраняется до  $-253$  °С).

**Таблица 3. Химический состав некоторых титановых сплавов**

Марка сплава	Содержание элементов, %			
	Al	V	Mo	другие
$\alpha$ -сплавы: BT5 BT5-1	4,3... 6,2 4,9...6,0	– –	– –	– Sn 2,0...3,0
Псевдо $\alpha$ -сплавы: OT4-1 BT20	1,0...2,5 5,5... 7,0	– 0,8...2,3	0,5...1,8	Мп 0,7...2,0 Zr 1,4...2,5
$\alpha+\beta$ -сплавы: BT6 BT22	5,3...6,8 4,5...5,9	3,5...5,3 4,0...5,5	– 4,0... 5,5	– Cr 0,5...2,0 Fe 0,5...1,5

### Магний и его сплавы

Магний – очень легкий металл, его плотность – 1,74 г/см<sup>3</sup>. Температура плавления –650 °С. Магний имеет гексагональную плотноупакованную кристаллическую решетку. Очень активен химически, вплоть до самовозгорания на воздухе. Механические свойства технически чистого магния (Mg1): предел прочности – 190 МПа, относительное удлинение – 18 %, модуль упругости – 4500 МПа.

Основными магниевыми сплавами являются сплавы магния с алюминием, цинком, марганцем, цирконием. Сплавы делятся на деформируемые и литейные.

Сплавы упрочняются после закалки и искусственного старения. Закалку проводят от температуры 380...420 °С, старение при температуре 260...300°С в течение 10...24 часов. Особенностью является длительная выдержка под закалку – 4...24 часа.

#### *Деформируемые магниевые сплавы*

Магний плохо деформируется при нормальной температуре. Пластичность сплавов значительно увеличивается при горячей обработке давлением (360...520 °С). Деформируемые сплавы маркируют МА1, МА8, МА9, ВМ 5-1.

Из деформируемых магниевых сплавов изготавливают детали автомашин, самолетов, прядильных и ткацких станков. В большинстве случаев эти сплавы обладают удовлетворительной свариваемостью.

### *Литейные магниевые сплавы*

Литейные сплавы маркируются МЛЗ, МЛ5, ВМЛ-1. Последний сплав является жаропрочным, может работать при температурах до 300°C.

Отливки изготавливают литьем в землю, в кокиль, под давлением. Необходимы меры, предотвращающие загорание сплава при плавке, в процессе литья.

Из литейных сплавов изготавливают детали двигателей, приборов, телевизоров, швейных машин.

Магниевые сплавы, благодаря высокой удельной прочности широко используются в самолето- и ракетостроении.

### **Олово, свинец, цинк и их сплавы**

*Олово* – блестящий металл, обладающий низкой температурой плавления (231 °С) и высокой пластичностью. Применяется в составе припоев, медных сплавов (бронза) и антифрикционных сплавов (баббит). Припой – это металлы или сплавы, используемые при пайке в качестве связки (промежуточного металла) между соединяемыми деталями. Припои имеют более низкую температуру плавления, чем соединяемые металлы. Незначительный нагрев соединяемых металлов, а вследствие этого отсутствие изменения структуры металла, являются основным преимуществом пайки в сравнении со сваркой.

*Баббит* – антифрикционный материал на основе олова или свинца. Их применяют для заливки вкладышей подшипников скольжения, работающих при больших окружных скоростях и при переменных и ударных нагрузках. По химическому составу баббиты классифицируют на три группы: оловянные (Б83, Б88), оловянно-свинцовые (БС6, БС16) и свинцовые (БК2, БКА).

*Свинец* – металл голубовато-серого цвета, обладает низкой температурой плавления (327 °С) и высокой пластичностью. Входит в состав медных сплавов (латунь, бронза), антифрикционных сплавов (баббит) и припоев.

*Цинк* – серовато-белый металл с высокими литейными и антикоррозионными свойствами, температура плавления 419 °С. Входит в состав медных сплавов (латунь) и твердых припоев.

### **Порядок выполнения работы**

Каждый студент получает коллекцию микрошлифов цветных сплавов. В работе нужно:

- 1) изучить и зарисовать микроструктуру каждого микрошлифа;
- 2) определить и подписать структурные составляющие сплавов;
- 3) найти связь между изучаемой микроструктурой сплава и его диаграммой.

### **Содержание отчета**

1. Название работы.
2. Цель работы.
3. Краткие сведения о цветных сплавах.
4. Схемы микроструктур изучаемых цветных сплавов с указанием структурных составляющих, марки сплава и его химического состава.
5. Вывод.

### **Контрольные вопросы и задания**

1. Как классифицируют алюминиевые сплавы?
2. Какие компоненты обычно используют для легирования алюминиевых сплавов?
3. Приведите примеры деформируемых, термически неупрочняемых сплавов.
4. Какие сплавы называют силуминами?
5. Какими компонентами легируют силумины?
6. Какие латуни называются однофазными?
7. Как маркируют деформируемые латуни?
8. Как маркируют литейные латуни?
9. Какие латуни называют «морскими»?
10. Что такое бронза, латунь, баббит?
11. Назовите марки и области применения титановых сплавов?
12. Где используются магниевые сплавы и почему?

## Раздел 2. ПРАКТИЧЕСКИЕ РАБОТЫ

### Практическая работа «Кристаллическое строение металлов»

**Цель работы:** иметь представление об особенностях кристаллического строения и свойствах металлов.

#### Задание

Охарактеризовать параметры (период, координационное число, базис) кристаллической решетки металлов в соответствии с заданным вариантом (таблица 1).

Согласно индексам Миллера указать (штриховкой) соответствующую плоскость на схемах кубической кристаллической решетки.

Охарактеризовать физические свойства заданных металлов.

#### Порядок выполнения работы

Пользуясь рекомендуемой литературой уяснить основные особенности кристаллического строения, металлической связи и свойств металлов.

Согласно таблице 2, указать основные типы кристаллических решеток металлов (с примерами металлов).

Изобразить схемы кристаллических решеток заданных металлов, обозначив на них период.

Определить координационное число и базис для каждого из заданных металлов.

На схеме кубической ячейки указать (штриховкой) плоскость, соответствующую заданным индексам Миллера.

Определить плотность одного из металлов, пользуясь зависимостью:

$$\rho = 1,662 AZ / V_0, \text{ г/см}^3,$$

где  $A$  – атомный вес,  $Z$  – базис,  $V_0$  – объем ячейки (параметры ячейки выражать в ангстремах  $1\text{Å} = 10^{-8}$ ).

Атомный вес и периоды ячеек некоторых металлов приведены в таблице 3.

Сравнить рассчитанное значение плотности со справочными данными и охарактеризовать физические свойства заданных металлов.

Таблица 1

№	Металл	Индексы Миллера	№	Металл	Индексы Миллера
1.	Ti, V	(100)	11.	Zn, Ni, Cr	(111)
2.	Be, Na, Pt	(010)	12.	Pb, Cd, Ta	(010)
3.	Li, Re, Ir	(110)	13.	Pt, Hf	(100)
4.	Al, Ta, Zn	(001)	14.	Ag, V, Re	(213)
5.	Zr, Au	(111)	15.	Cu, Zn, Mo	(312)
6.	Fe, Ru	(213)	16.	Na, Co	(212)
7.	W, Cd	(312)	17.	Li, Ti	(223)
8.	Nb, Pd, Sc	(212)	18.	Cr, V, Ni	(322)
9.	Co, Cr	(223)	19.	Ta, Re, Pb	(333)
10.	K, Ag, Os	(322)	20.	Ni, Zr	(001)

Таблица 2

Номер периода	Номер подгруппы																		
	IA	IIA	IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	VIIIA	VIIIA	IB	IIB	IIIB	IVB	VB	VI B	VIB	VII B	VIII B	
1	1 H 1s <sup>1</sup> Г																		2 He 1s <sup>2</sup>
2	3 Li 2s <sup>1</sup> 0	4 Be 2s <sup>2</sup> Г										5 B 2s <sup>2</sup> 2p <sup>1</sup> Г, g	6 C 2s <sup>2</sup> 2p <sup>2</sup> Г, g	7 N 2s <sup>2</sup> 2p <sup>3</sup> 0	8 O 2s <sup>2</sup> 2p <sup>4</sup> p, 0	9 F 2s <sup>2</sup> 2p <sup>5</sup> К	10 Ne 2s <sup>2</sup> 2p <sup>6</sup> К		
3	11 Na 3s <sup>1</sup> 0	12 Mg 3s <sup>2</sup> Г										13 Al 3s <sup>2</sup> 3p <sup>1</sup> К	14 Si 3s <sup>2</sup> 3p <sup>2</sup> g	15 P 3s <sup>2</sup> 3p <sup>3</sup> 0, p	16 S 3s <sup>2</sup> 3p <sup>4</sup> p	17 Cl 3s <sup>2</sup> 3p <sup>5</sup> Т	18 Ar 3s <sup>2</sup> 3p <sup>6</sup> К		
<p>Условные обозначения</p> <p>□ - элементы-полупроводники</p> <p>Типы кристаллических решеток:</p> <p>К - гранецентрированная кубическая (г.ц.к.)</p> <p>0 - объемноцентрированная кубическая (о.ц.к.)</p> <p>Г - гексагональная</p> <p>Т - тетрагональная</p> <p>Р - ромбоэдрическая</p> <p>g - другие типы решеток</p>																			
<p>Переходные металлы</p>																			
4	19 K 4s <sup>1</sup> 0	20 Ca 4s <sup>2</sup> К, 0, Г	21 Sc 4s <sup>2</sup> 3d <sup>1</sup> Г	22 Ti 4s <sup>2</sup> 3d <sup>2</sup> К, Г	23 V 4s <sup>2</sup> 3d <sup>3</sup> 0	24 Cr 4s <sup>1</sup> 3d <sup>5</sup> 0	25 Mn 4s <sup>2</sup> 3d <sup>5</sup> 0, К	26 Fe 4s <sup>2</sup> 3d <sup>6</sup> 0, К	27 Co 4s <sup>2</sup> 3d <sup>7</sup> К, Г	28 Ni 4s <sup>2</sup> 3d <sup>8</sup> К	29 Cu 4s <sup>1</sup> 3d <sup>10</sup> К	30 Zn 4s <sup>2</sup> 3d <sup>10</sup> Г	31 Ga 4s <sup>2</sup> 4p <sup>1</sup> p, Т	32 Ge 4s <sup>2</sup> 4p <sup>2</sup> 0	33 As 4s <sup>2</sup> 4p <sup>3</sup> p	34 Se 4s <sup>2</sup> 4p <sup>4</sup> Г	35 Br 4s <sup>2</sup> 4p <sup>5</sup> p	36 Kr 4s <sup>2</sup> 4p <sup>6</sup> К	
5	37 Rb 5s <sup>1</sup> 0	38 Sr 5s <sup>2</sup> К, 0, Г	39 Y 5s <sup>2</sup> 4d <sup>1</sup> Г	40 Zr 5s <sup>2</sup> 4d <sup>2</sup> Г, 0	41 Nb 5s <sup>1</sup> 4d <sup>4</sup> 0	42 Mo 5s <sup>1</sup> 4d <sup>5</sup> 0	43 Tc 5s <sup>1</sup> 4d <sup>5</sup> Г	44 Ru 5s <sup>1</sup> 4d <sup>7</sup> Г	45 Rh 5s <sup>1</sup> 4d <sup>8</sup> К	46 Pd 5d <sup>10</sup> К	47 Ag 5s <sup>1</sup> 4d <sup>10</sup> К	48 Cd 5s <sup>2</sup> 4d <sup>10</sup> Г	49 In 5s <sup>2</sup> 5p <sup>1</sup> Т	50 Sn 5s <sup>2</sup> 5p <sup>2</sup> Т, g	51 Sb 5s <sup>2</sup> 5p <sup>3</sup> p	52 Te 5s <sup>2</sup> 5p <sup>4</sup> Г	53 I 5s <sup>2</sup> 5p <sup>5</sup> p	54 X 5s <sup>2</sup> 5p <sup>6</sup> К	
6	55 Cs 6s <sup>1</sup> 0	56 Ba 6s <sup>2</sup> 0	57-71 La* 6s <sup>2</sup> 5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup> 5d <sup>2</sup>	72 Hf 6s <sup>2</sup> 5d <sup>2</sup> Г, 0	73 Ta 6s <sup>2</sup> 5d <sup>3</sup> 0	74 W 6s <sup>2</sup> 5d <sup>4</sup> 0, К	75 Re 6s <sup>2</sup> 5d <sup>5</sup> Г	76 Os 6s <sup>2</sup> 5d <sup>6</sup> Г	77 Ir 6s <sup>2</sup> 5d <sup>7</sup> К	78 Pt 6s <sup>1</sup> 5d <sup>9</sup> К	79 Au 6s <sup>1</sup> 5d <sup>10</sup> К	80 Hg 6s <sup>2</sup> 5d <sup>10</sup> p	81 Tl 6s <sup>2</sup> 6p <sup>1</sup> К, Г	82 Pb 6s <sup>2</sup> 6p <sup>2</sup> К	83 Bi 6s <sup>2</sup> 6p <sup>3</sup> p	84 Po 6s <sup>2</sup> 6p <sup>4</sup> g, p	85 At 6s <sup>2</sup> 6p <sup>5</sup> p	86 Rn 6s <sup>2</sup> 6p <sup>6</sup> К	
7	87 Fr 7s <sup>1</sup>	88 Ra 7s <sup>2</sup>	89-103 Ac** 7s <sup>2</sup> 6d <sup>1</sup>	104 Ku 7s <sup>2</sup> 6d <sup>2</sup>	105 Ku 7s <sup>2</sup> 6d <sup>3</sup>	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	
* Лантаноиды																			
58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tu	70 Yb	71 Lu						
**Актиноиды																			
90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr						

Таблица 3

Химический элемент	Атомный номер	Атомный вес	Параметры решетки при 20 °С	
Ag	47	107,880	4,0856	
Al	13	26,97	4,041	
Au	79	197,2	4,0783	
Cu	29	63,57	3,6153	
Fe	26	55,85	2,86	
K	19	39,102	5,323	
Na	11	22,997	4,286	
Ni	28	58,69	3,499	
Pb	82	207,21	4,953	
Pt	78	195,09	3,924	
Mg	12	24,305	3,103	5,200
Ti	22	47,90	4,135	
W	74	183,85	3,163	
Co	27	58,9332	3,536	
Li	3	6,94	3,509	
Pd	46	106,4	3,890	

### Практическая работа

#### «Маркировка и свойства углеродистых сталей и машиностроительных чугунов по ГОСТам»

**Цель работы:** иметь навыки работы с ГОСТами и справочной литературой, уметь расшифровывать условные обозначения марок углеродистых сталей.

#### Общие сведения

Углеродистые стали по содержанию вредных примесей – серы, фосфора и других загрязняющих элементов – подразделяются на стали обыкновенного качества, качественные и высококачественные.

Стали, из которых изготавливаются детали машин, называются конструкционными. Стали, из которых изготавливаются различные инструменты, называются инструментальными.



### ГОСТ 380-94 Сталь углеродистая обыкновенного качества:

Сталь изготавливают следующих марок:

Ст0, Ст1кп, Ст1пс, Ст1сп,  
 Ст2кп, Ст2пс, Ст2сп,  
 Ст3кп, Ст3пс, Ст3сп, Ст3Гпс, Ст3Гсп,  
 Ст4кп, Ст4пс, Ст4сп,  
 Ст5пс, Ст5сп, Ст5Гпс,  
 Ст6пс, Ст6сп.

Условное обозначение стали – буквенно-цифровое.

Буквы Ст означают «сталь», цифры от 0 до 6 – условный номер марки в зависимости от химического состава стали и механических свойств, например: Ст0, Ст1, Ст2, Ст3.

Для обозначения степени раскисления к обозначению марки стали, после номера марки добавляют индексы: кп – кипящая, пс – полуспокойная, сп – спокойная, например: Ст3кп, Ст3пс, Ст3сп.

Для обозначения категории стали к обозначению марки, добавляют в конце номер, соответствующий категории, например: Ст3пс2, Ст3кп2, Ст4пс2.

Первую категорию в обозначении марки стали не указывают, например: Ст3кп, Ст3пс.

При заказе стали необходимой категории без указания степени раскисления в обозначении марки стали номер марки и категорию отделяют друг от друга тире, например: Ст3-2.

Для обозначения стали с повышенным содержанием марганца, в обозначении стали, после номера марки ставят букву Г, например: Ст3Гпс.

Стали имеют гарантированный химический состав (таблица 1).

**Таблица 1. Химический состав сталей по ГОСТ 380-94**

Марка стали	Массовая доля химических элементов, %		
	углерода	марганца	Кремния
Ст0	Не более 0,23	–	–
Ст1кп	0,06–0,12	0,25–0,50	Не более 0,05
Ст1пс	0,06–0,12	0,25–0,50	0,05–0,15

Марка стали	Массовая доля химических элементов, %		
	углерода	марганца	Кремния
Ст1сп	0,06–0,12	0,25–0,50	0,15–0,30
Ст2кп	0,09–0,15	0,25–0,50	Не более 0,05
Ст2пс	0,09–0,15	0,25–0,50	0,05–0,15
Ст2сп	0,09–0,15	0,25–0,50	0,15–0,30
Ст3кп	0,14–0,22	0,30–0,60	Не более 0,05
Ст3пс	0,14–0,22	0,40–0,65	0,05–0,15
Ст3сп	0,14–0,22	0,40–0,65	0,15–0,30
Ст3Гпс	0,14–0,22	0,80–1,10	Не более 0,15
Ст3Гсп	0,14–0,22	0,80–1,10	0,15–0,30
Ст4кп	0,18–0,27	0,40–0,70	Не более 0,05
Ст4пс	0,18–0,27	0,40–0,70	0,05–0,15
Ст4сп	0,18–0,27	0,40–0,70	0,15–0,30
Ст5пс	0,28–0,37	0,50–0,80	0,05–0,15
Ст5сп	0,28–0,37	0,50–0,80	0,15–0,30
Ст5Гпс	0,22–0,30	0,80–1,20	Не более 0,15
Ст6пс	0,38–0,49	0,50–0,80	0,05–0,15
Ст6сп	0,38–0,49	0,50–0,80	0,15–0,30

*Примечания:*

1. Массовая доля серы в сталях всех марок, кроме Ст0, должна быть не более 0,050 %, фосфора – не более 0,040 %, в стали марки Ст0 серы – не более 0,060 %, фосфора – не более 0,07 %.

2. Массовая доля азота в стали – не более 0,016 %, а при выплавке в электропечах – не более 0,012 %.

**ГОСТ 1050-88 Сталь углеродистая качественная конструкционная**

Сталь изготавливают следующих марок: 05кп, 08кп...10пс, 10кп...15...20, 25, 30, 35, 40, 45...60.

Двузначное число в обозначении стали показывает среднее содержание углерода в сотых долях процента. По степени расчисления сталь обозначают: кипящую – кп, полуспокойную – пс, спокойную – без индекса.

Стали имеют гарантированный химический состав (таблица 2).

**Таблица 2. Химический состав сталей по ГОСТ 1050-88**

Марка стали	Массовая доля химических элементов, %			
	углерода	кремния	марганца	хрома, не более
05кп	Не более 0,06	Не более 0,03	Не более 0,40	0,10
08кп	0,05–0,12	Не более 0,03	0,25–0,50	0,10
08пс	0,05–0,12	0,05–0,17	0,35–0,65	0,10
08	0,05–0,12	0,17–0,37	0,35–0,65	0,10
10кп	0,07–0,14	Не более 0,07	0,25–0,50	0,15
10пс	0,07–0,14	0,05–0,17	0,35–0,65	0,15
10	0,07–0,14	0,17–0,35	0,35–0,65	0,15
11кп	0,05–0,12	Не более 0,06	0,30–0,50	0,15
15кп	0,12–0,19	Не более 0,07	0,25–0,50	0,25
15пс	0,12–0,19	0,05–0,17	0,35–0,65	0,25
15	0,12–0,19	0,17–0,37	0,35–0,65	0,25
18кп	0,12–0,20	Не более 0,06	0,30–0,50	0,15
20кп	0,17–0,24	Не более 0,07	0,25–0,50	0,25
20пс	0,17–0,24	0,05–0,17	0,35–0,65	0,25
20	0,17–0,24	0,17–0,37	0,35–0,65	0,25
25	0,22–0,30	0,17–0,37	0,50–0,80	0,25
30	0,27–0,35	0,17–0,37	0,50–0,80	0,25
35	0,32–0,40	0,17–0,37	0,50–0,80	0,25
40	0,37–0,45	0,17–0,37	0,50–0,80	0,25
45	0,42–0,50	0,17–0,37	0,50–0,80	0,25
50	0,47–0,55	0,17–0,37	0,50–0,80	0,25
55	0,52–0,60	0,17–0,37	0,50–0,80	0,25
58 (55пп)	0,55–0,63	0,10–0,30	Не более 0,20	0,15
60	0,57–0,65	0,17–0,37	0,50–0,80	0,25

*Примечания:*

1. Сталь марки 05кп не допускается к применению во вновь создаваемой и модернизируемой технике.

2. Массовая доля серы в стали должна быть не более 0,040 %, фосфора – не более 0,035 %. Для стали марок 11кп и 18кп, применяемой для плакировки, массовая доля серы должна быть не более 0,035 %, фосфора – не более 0,030 %.

3. Массовая доля азота в кислородно-конвертерной стали не должна превышать 0,006 % для тонколистового проката и ленты и 0,008 % – для остальных видов проката.

### ГОСТ 1435-90 Сталь инструментальная углеродистая

Сталь изготавливается следующих марок:

У7, У8, У8Г, У9, У10, У11, У12, У13, У7А, У8А, У8ГА, У9А, У10А, У11А, У12А, У13А.

Буквы и цифры в обозначении марок означают: У – углеродистая, следующее за ней число – среднее содержание углерода в десятых долях процента, Г – повышенное содержание марганца, А – высококачественная.

Стали имеют гарантированный химический состав (таблица 3).

**Таблица 3. Химический состав сталей по ГОСТ 1435-90**

Марка стали	Массовая доля химических элементов, %				
	углерод	марганец	кремний	Сера	Фосфор
				не более	
У7	0,65–0,74	0,20–0,40	0,15–0,35	0,030	0,035
У8	0,75–0,84	0,20–0,40	0,15–0,35	0,030	0,035
У8Г	0,80–0,90	0,35–0,60	0,15–0,35	0,030	0,035
У9	0,85–0,94	0,15–0,35	0,15–0,35	0,030	0,035
У10	0,95–1,04	0,15–0,35	0,15–0,35	0,030	0,035
У11	1,05–1,14	0,15–0,35	0,15–0,35	0,030	0,035
У12	1,15–1,24	0,15–0,35	0,15–0,35	0,030	0,035
У13	1,25–1,35	0,15–0,35	0,15–0,35	0,030	0,035
У7А	0,65–0,74	0,15–0,30	0,15–0,35	0,020	0,030
У8А	0,75–0,84	0,15–0,30	0,15–0,35	0,020	0,030
У8ГА	0,80–0,90	0,35–0,60	0,15–0,35	0,020	0,030
У9А	0,85–0,94	0,15–0,30	0,15–0,35	0,020	0,030
У10А	0,95–1,04	0,15–0,30	0,15–0,35	0,020	0,030
У11А	1,05–1,14	0,15–0,30	0,15–0,35	0,020	0,030
У12А	1,15–1,24	0,15–0,30	0,15–0,35	0,020	0,030
У13А	1,25–1,35	0,15–0,30	0,15–0,35	0,020	0,030

*Примечания:*

1. К группе качественных сталей относятся марки стали без буквы А, к группе высококачественных сталей, более чистых по содержанию серы и фосфора, а также примесей других элементов – марки стали с буквой А.

2. Содержание серы в стали, полученной методом электрошлакового переплава, не должно превышать 0,015 %.

**ГОСТ 1412-85 Отливки из серого чугуна с пластинчатым графитом**

Установлены следующие марки серых чугунов:

- ферритные СЧ10, СЧ15
- феррито-перлитные СЧ18, СЧ20, СЧ21
- перлитные СЧ24, СЧ25, СЧ30, СЧ35.

В обозначении чугуна С – серый, Ч – чугун, двузначное число указывает значение предела прочности при растяжении,  $\sigma_B$ , кгс/мм<sup>2</sup> (МПа\*10<sup>-1</sup>). Прочность чугуна тем больше, чем мельче графитовые включения и чем больше перлита в структуре металлической основы.

Химический состав чугунов является факультативным и устанавливается предприятием изготовителем согласно рекомендациям ГОСТа.

**ГОСТ 1215-79 Отливки из ковкого чугуна с хлопьевидным графитом**

Установлено 11 марок чугунов: КЧ30-6, КЧ33-8, КЧ35-10, КЧ37-12, КЧ45-7, КЧ50-5, КЧ55-4, КЧ60-3, КЧ65-3, КЧ70-2, КЧ80-1,5.

В обозначении чугуна К – ковкий (условное название, чугуны ковке не подвергаются), Ч – чугун, первое двузначное число указывает значение предела прочности при растяжении,  $\sigma_B$ , кгс/мм<sup>2</sup> (МПа\*10<sup>-1</sup>), второе число – относительное удлинение,  $\delta$ , %.

**ГОСТ 7293-85 Отливки из высокопрочного чугуна  
с шаровидным графитом**

Установлено 8 марок высокопрочных чугунов: ВЧ35, ВЧ40, ВЧ45, ВЧ50, ВЧ60, ВЧ70, ВЧ80, ВЧ100.

В обозначении чугуна В – высокопрочный, Ч – чугун, двузначное число указывает значение предела прочности при растяжении,  $\sigma_B$ , кгс/мм<sup>2</sup> (МПа\*10<sup>-1</sup>).

### Задание

Уяснить классификацию и маркировку углеродистых сталей, и машиностроительных чугунов.

Ознакомиться с химическим составом и свойствами сплавов по ГОСТам в соответствии с заданным вариантом (таблица 5).

### Порядок выполнения работы

Указать номер ГОСТа и его наименование.

Охарактеризовать номенклатуру сплавов по ГОСТу.

Расшифровать условное обозначение сплавов.

Для соответствующей данному ГОСТу марки из варианта задания (таблица 5) указать значения гарантируемых по ГОСТу показателей.

**Таблица 4. Варианты заданий**

№	Марки	№	Марки	№	Марки	№	Марки
1	1. Ст0 2. КЧ30-6 3. ВЧ35 4. 05кп 5. У7	2	1. Ст1кп 2. СЧ10 3. ВЧ40 4. 08 5. У8	3	1. Ст2пс 2. КЧ33-8 3. ВЧ45 4. 08кп 5. У8Г	4	1. Ст1сп 2. СЧ15 3. ВЧ50 4. 10 5. У9
5	1. Ст2кп 2. КЧ35-10 3. ВЧ60 4. 10кп 5. У10	6	1. Ст2пс 2. СЧ20 3. ВЧ80 4. 15 5. У11	7	1. Ст2сп 2. СЧ25 3. ВЧ100 4. 20 5. У12	8	1. Ст3кп 2. СЧ30 3. КЧ37-12 4. 25 5. У13
9	1. Ст3пс 2. СЧ35 3. КЧ45-7 4. 30 5. У7А	10	1. Ст3сп 2. СЧ40 3. КЧ50-5 4. 35 5. У8А	11	1. Ст3Гпс 2. СЧ45 3. КЧ55-4 4. 40 5. У8ГА	12	1. Ст4кп 2. КЧ60-3 3. СЧ10 4. 45 5. У9А

№	Марки	№	Марки	№	Марки	№	Марки
13	1. Ст4пс 2. КЧ65-3 3. СЧ15 4. 50 5. У10А	14	1. Ст4сп 2. КЧ70-2 3. СЧ20 4. 55 5. У11А	15	1. Ст5пс 2. КЧ80-1,5 3. СЧ25 4. 60 5. У12А	16	1. Ст5сп 2. ВЧ100 3. СЧ30 4. 15кп 5. У13А
17	1. Ст5Гпс 2. ВЧ80 3. СЧ35 4. 10кп 5. У7	18	1. Ст6пс 2. ВЧ60 3. СЧ40 4. 15пс 5. У8	19	1. Ст6сп 2. ВЧ50 3. СЧ45 4. 10пс 5. У8Г	20	1. Ст3-2 2. ВЧ40 3. КЧ30-6 4. 11кп 5. У9

### Практическая работа

#### «Влияние углерода на механические свойства стали»

**Цель работы:** уметь оценивать влияние состава материала на его свойства иметь навыки работы с ГОСТами и справочной литературой.

#### Задание

Исследовать влияние углерода на свойства углеродистых сталей, определяемые при механических испытаниях (по варианту таблицы 1).

#### Порядок выполнения работы

По условному марочному обозначению определить наименование сталей и номер ГОСТа, устанавливающего требования к их составу и свойствам.

Пользуясь ГОСТом или справочной литературой, знакомиться с нормируемыми показателями состава и свойств сталей. Данные представить в виде таблицы:

Механические свойства сталей \_\_\_\_\_ ГОСТ \_\_\_\_\_  
указать марки и состояние сталей номер

№	Марка стали	Содержание углерода, %	Механические свойства	
1.				
2.				
...				

По данным таблицы построить графическое изображение зависимости заданных механических свойств сталей от содержания углерода в них.

Сделать обобщающие выводы о характере и причинах зависимости механических свойств от состава сталей.

**Таблица 1. Варианты заданий**

Вариант	Марки сталей	Состояние материала	Механические свойства
1.	08–60	категория ТВ2, нагартованный отожженный	твердость НВ твердость НВ
2.	08–60	категория М1, прокат нормализованный	предел текучести $\sigma_m$ , относительное удлинение $\delta$ .
3.	08–60	категория М1, прокат нормализованный	временное сопротивление $\sigma_b$ , относительно сужение $\psi$ .
4.	25–50	категория М1, прокат нормализованный	временное сопротивление $\sigma_b$ , относительное удлинение $\delta$ , ударная вязкость
5.	10–50	категория М2, прокат калиброванный,	временное сопротивление $\sigma_b$ , относительное удлинение, $\delta$ .
6.	10–50	категория М2, прокат калиброванный, нагартованный	временное сопротивление $\sigma_b$ , относительное сужение $\psi$ .
7.	10–50	категория М2, прокат калиброванный отожженный	временное сопротивление $\sigma_b$ , относительное удлинение $\delta$ .
8.	10–50	категория М2 прокат калиброванный, отожженный	временное сопротивление $\sigma_b$ , относительное сужение $\psi$ .



Вариант	Марки сталей	Состояние материала	Механические свойства
9.	25–60	категория М3, прокат калиброванный улучшенный $d \leq 16$ мм	предел текучести $\sigma_m$ , относительное удлинение $\delta$ .
10.	25–60	категория М3, прокат калиброванный улучшенный $d \leq 16$ мм	временное сопротивление, $\sigma_B$ , работа удара
11.	Ст0-Стбсп	прокат горячекатанный	временное сопротивление $\sigma_B$ , относительное удлинение $\delta$ .
12.	Ст2сп-Стбсп	прокат горячекатанный толщиной 20–40 мм	предел текучести $\sigma_m$ , относительное удлинение $\delta$ .
13.	Ст2-Ст4	прокат горячекатанный, толщиной 20–40 мм кипящие стали; спокойные стали.	временное сопротивление $\sigma_B$ , относительное удлинение $\delta$ .
14.	Ст2-Ст4	прокат горячекатанный толщиной до 20 мм	предел текучести $\sigma_m$ , относительное удлинение $\delta$ .
15.	Ст3	прокат горячекатанной различной толщины кипящая сталь полу- и спокойная сталь с обычным и повышенным содержанием марганца	временное сопротивление $\sigma_B$ , предел текучести $\sigma_m$ , относительное удлинение $\delta$ .
16.	10–35 А11-А35	Прокат категории М1, горячекатанный.	временное сопротивление $\sigma_B$ , относительное удлинение $\delta$ , относительное сужение $\psi$ .
17.	25–60	категория М3, прокат калиброванный улучшенный $d \leq 16$ мм	временное сопротивление, $\sigma_B$ , работа удара
18.	Ст0-Стбсп	прокат горячекатанный	временное сопротивление $\sigma_B$ , относительное удлинение $\delta$ .
19.	08–60	категория М1, прокат нормализованный	временное сопротивление $\sigma_B$ , относительно сужение $\psi$ .
20.	25–50	категория М1, прокат нормализованный	временное сопротивление $\sigma_B$ , относительное удлинение $\delta$ , ударная вязкость

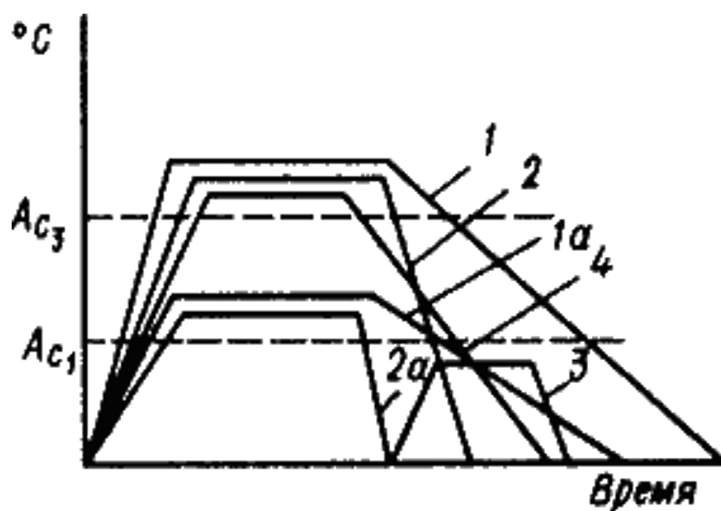
## Практическая работа Термическая обработка стали

### Виды термической обработки металлов.

Свойства сплава зависят от его структуры. Основным способом, позволяющим изменять структуру, а, следовательно, и свойства является термическая обработка.

Основы термической обработки разработал Д. К. Чернов. В дальнейшем они развивались в работах А. А. Бочвара, Г. В. Курдюмова, А. П. Гуляева

Термическая обработка представляет собой совокупность операций нагрева, выдержки и охлаждения, выполняемых в определенной последовательности при определенных режимах, с целью изменения внутреннего строения сплава и получения нужных свойств (представляется в виде графика в осях температура – время, см. рис. 1 ).



*Рисунок 1. Графики различных видов термообработки:  
отжига (1, 1а), закали (2, 2а), отпуска (3), нормализации (4)*

Различают следующие виды термической обработки:

1. *Отжиг I рода* – возможен для любых металлов и сплавов.

Его проведение не обусловлено фазовыми превращениями в твердом состоянии.

Нагрев, при отжиге первого рода, повышая подвижность атомов, частично или полностью устраняет химическую неоднородность, уменьшает внутреннее напряжения.

Основное значение имеет температура нагрева и время выдержки. Характерным является медленное охлаждение

Разновидностями отжига первого рода являются:

- диффузионный;
- рекристаллизационный;
- отжиг для снятия напряжения послековки, сварки, литья.

2. *Отжиг II рода* – отжиг металлов и сплавов, испытывающих фазовые превращения в твердом состоянии при нагреве и охлаждении.

Проводится для сплавов, в которых имеются полиморфные или эвтектоидные превращения, а также переменная растворимость компонентов в твердом состоянии.

Проводят отжиг второго рода с целью получения более равновесной структуры и подготовки ее к дальнейшей обработке. В результате отжига измельчается зерно, повышаются пластичность и вязкость, снижаются прочность и твердость, улучшается обрабатываемость резанием.

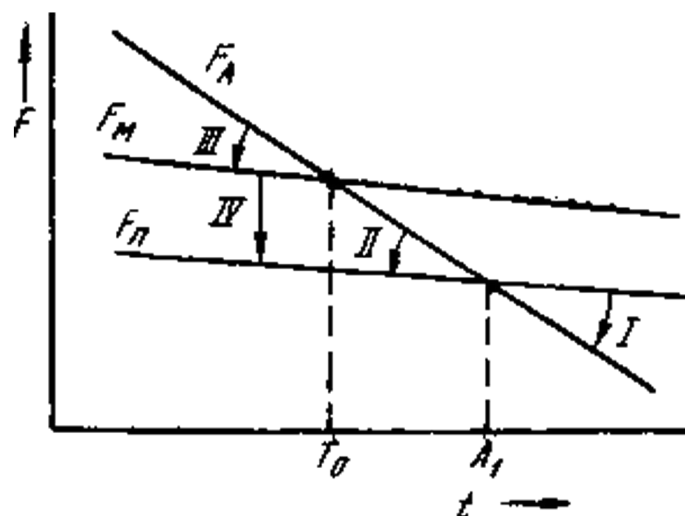
Характеризуется нагревом до температур выше критических и очень медленным охлаждением, как правило, вместе с печью (рис.1 (1, 1а)).

3. *Закалка* – проводится для сплавов, испытывающих фазовые превращения в твердом состоянии при нагреве и охлаждении, с целью повышения твердости и прочности путем образования неравновесных структур (сорбит, троостит, мартенсит).

Характеризуется нагревом до температур выше критических и высокими скоростями охлаждения (рис. 1 (2, 2а)).

4. *Отпуск* – проводится с целью снятия внутренних напряжений, снижения твердости и увеличения пластичности и вязкости закаленных сталей.

Характеризуется нагревом до температуры ниже критической  $A_1$  (рис. 1 (3)). Скорость охлаждения роли не играет. Происходят превращения, уменьшающие степень неравновесности структуры закаленной стали.



**Рисунок 2.** Зависимость свободной энергии структурных составляющих сталей от температуры: аустенита ( $F_A$ ), мартенсита ( $F_M$ ), перлита ( $F_P$ )

Термическую обработку подразделяют на *предварительную* и *окончательную*.

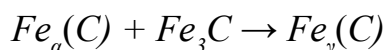
*Предварительная* – применяется для подготовки структуры и свойств материала для последующих технологических операций (для обработки давлением, улучшения обрабатываемости резанием).

*Окончательная* – формирует свойство готового изделия.

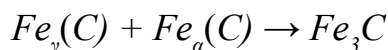
### Превращения, протекающие в структуре стали при нагреве и охлаждении

Любая разновидность термической обработки состоит из комбинации четырех основных превращений, в основе которых лежат стремления системы к минимуму свободной энергии (рис. 2).

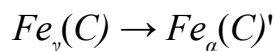
1. Превращение перлита в аустенит ( $P \rightarrow A$ ), происходит при нагреве выше критической температуры  $A_1$ , минимальной свободной энергией обладает аустенит.



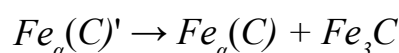
2. Превращение аустенита в перлит ( $A \rightarrow P$ ), происходит при охлаждении ниже  $A_1$ , минимальной свободной энергией обладает перлит:



3. Превращение аустенита в мартенсит ( $A \rightarrow M$ ), происходит при быстром охлаждении ниже температуры неустойчивого равновесия



4. Превращение мартенсита в перлит ( $M \rightarrow П$ ); – происходит при любых температурах, т. к. свободная энергия мартенсита больше, чем свободная энергия перлита.

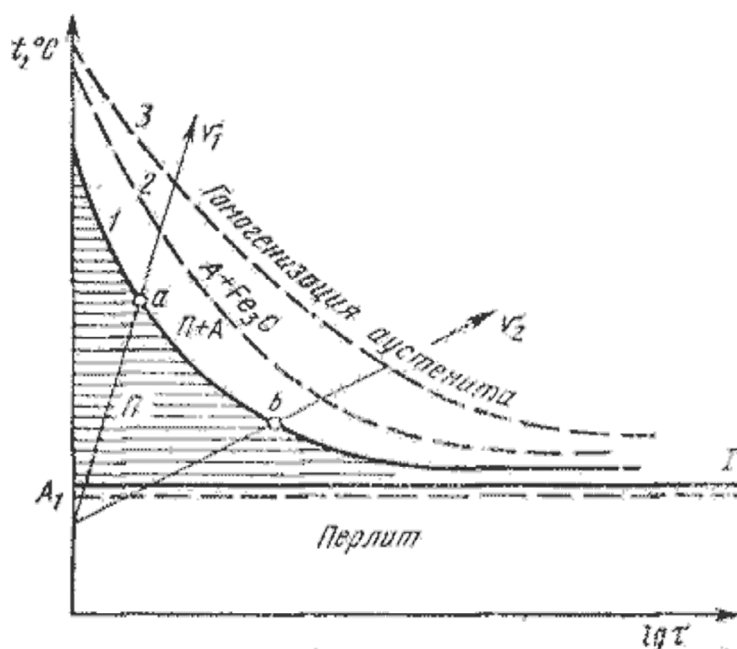


### Механизм основных превращений

#### 1. Превращение перлита в аустенит

Превращение основано на диффузии углерода, сопровождается полиморфным превращением  $Fe_{\alpha} \rightarrow Fe_{\gamma}$ , а так же растворением цементита в аустените.

Для исследования процессов строят диаграммы изотермического образования аустенита (рис.3). Для этого образцы нагревают до температуры выше  $A_1$  и выдерживают, фиксируя начало и конец превращения.

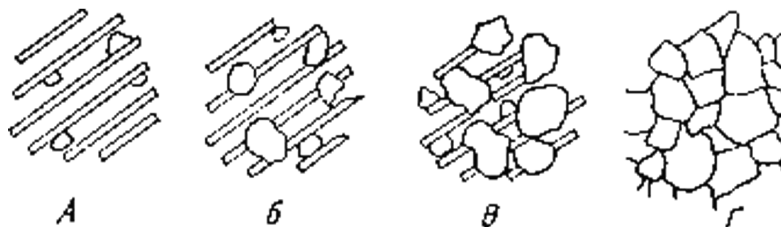


**Рисунок 3.** Диаграмма изотермического образования аустенита:

1 – начало образования аустенита; 2 – конец преобразования перлита в аустенит;  
3 – полное растворение цементита.

С увеличением перегрева и скорости нагрева продолжительность превращения сокращается.

Механизм превращения представлен на рис.4.



*Рисунок 4. Механизм превращения перлита в аустенит.*

Превращение начинается с зарождения центров аустенитных зерен на поверхности раздела феррит – цементит, кристаллическая решетка  $Fe_{\alpha}$  перестраивается в решетку  $Fe_{\gamma}$ .

Время превращения зависит от температуры, так как с увеличением степени перегрева уменьшается размер критического зародыша аустенита, увеличиваются скорость возникновения зародышей и скорость их роста

Образующиеся зерна аустенита имеют вначале такую же концентрацию углерода, как и феррит. Затем в аустените начинает растворяться вторая фаза перлита – цементит, следовательно, концентрация углерода увеличивается. Превращение  $Fe_{\alpha}$  в  $Fe_{\gamma}$  идет быстрее. После того, как весь цементит растворится, аустенит неоднороден по химическому составу: там, где находились пластинки цементита концентрация углерода более высокая. Для завершения процесса перераспределения углерода в аустените требуется дополнительный нагрев или выдержка.

Величина образовавшегося зерна аустенита оказывает влияние на свойства стали.

*Рост зерна аустенита.* Образующиеся зерна аустенита получают мелкими (начальное зерно). При повышении температуры или выдержке происходит рост зерна аустенита. Движущей силой роста является разность свободных энергий мелкозернистой (большая энергия) и крупнозернистой (малая энергия) структуры аустенита.

Стали различают по склонности к росту зерна аустенита. Если зерно аустенита начинает быстро расти даже при незначительном нагреве выше температуры  $A_1$ , то сталь наследственно крупнозернистая. Если зерно растет только при большом перегреве, то сталь наследственно мелкозернистая.

Склонность к росту аустенитного зерна является плавочной характеристикой. Стали одной марки, но разных плавок могут различаться, так как содержат неодинаковое количество неметаллических включений, которые затрудняют рост аустенитного зерна.

Ванадий, титан, молибден, вольфрам, алюминий – уменьшают склонность к росту зерна аустенита, а марганец и фосфор – увеличивают ее.

Заэвтектоидные стали менее склонны к росту зерна.

При последующем охлаждении зерна аустенита не измельчаются. Это следует учитывать при назначении режимов термической обработки, так как от размера зерна зависят механические свойства. Крупное зерно снижает сопротивление отрыву, ударную вязкость, повышает порог хладоломкости.

Различают величину зерна *наследственного* и *действительного*.

Для определения величины наследственного зерна, образцы нагревают до  $930\text{ }^\circ\text{C}$  и затем определяют размер зерна.

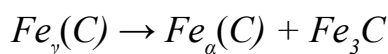
Действительная величина зерна – размер зерна при обычных температурах, полученный после той или иной термической обработки.

Неправильный режим нагрева может привести либо к *перегреву*, либо к *пережогу* стали.

*Перегрев.* Нагрев доэвтектоидной стали значительно выше температуры  $A_3$  приводит к интенсивному росту зерна аустенита. При охлаждении феррит выделяется в виде пластинчатых или игольчатых кристаллов. Такая структура называется видманштеттовой структурой и характеризуется пониженными механическими свойствами. Перегрев можно исправить повторным нагревом до оптимальных температур с последующим медленным охлаждением.

*Пережог* имеет место, когда температура нагрева приближается к температуре плавления. При этом наблюдается окисление границ зерен, что резко снижает прочность стали. Излом такой стали камневидный. Пережог – неисправимый брак.

## 2. Превращение аустенита в перлит при медленном охлаждении.



Превращение связано с диффузией углерода, сопровождается полиморфным превращением  $Fe_{\gamma} \rightarrow Fe_{\alpha}$ , выделением углерода из аустенита в виде цементита, разрастанием образовавшегося цементита.

В зависимости от степени переохлаждения различают три области превращения. Вначале, с увеличением переохлаждения скорость превращения возрастает, а затем убывает. При температуре  $727^{\circ}\text{C}$  и ниже  $200^{\circ}\text{C}$  скорость равна нулю. При температуре  $200^{\circ}\text{C}$  равна нулю скорость диффузии углерода.

### Закономерности превращения.

Образцы нагревают до температуры, при которой структура состоит из однородного аустенита ( $770^{\circ}\text{C}$ ). Затем переносят в термостаты с заданной температурой (интервал  $25\text{--}50^{\circ}\text{C}$ ). Превращение аустенита можно легко обнаружить с помощью наблюдений за изменением магнитных характеристик, так как аустенит парамагнитен, а феррит и цементит обладают магнитными свойствами.

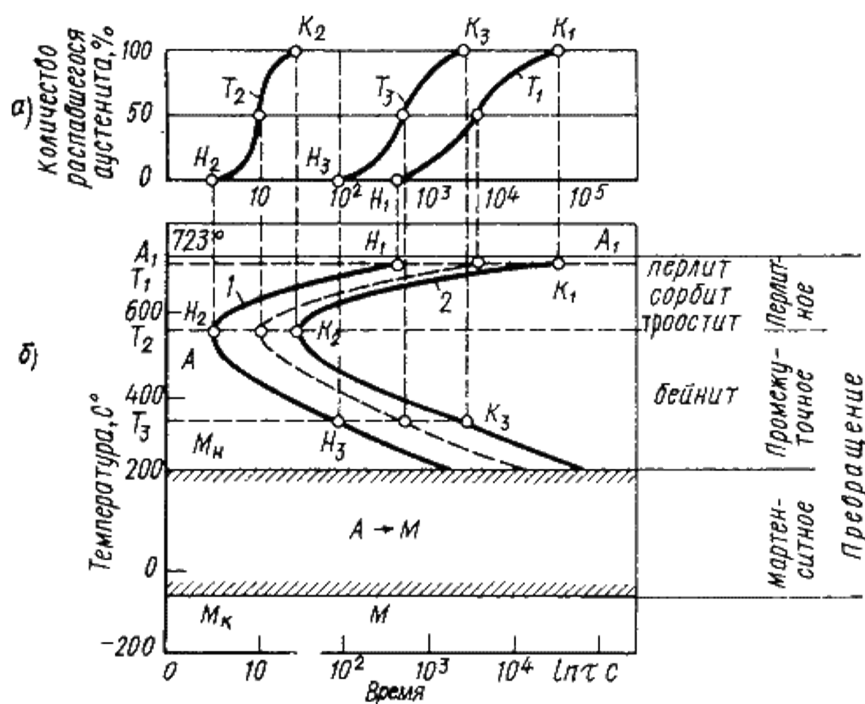


Рисунок 5. Кинетические кривые превращения аустенита при охлаждении (а); диаграмма изотермического превращения аустенита (б)



Получают серию кинетических кривых (рис. 5 а), которые показывают количество образовавшегося перлита в зависимости от времени, прошедшего с начала превращения.

В начале наблюдается инкубационный подготовительный период, время, в течение которого сохраняется переохлажденный аустенит. Превращение протекает с различной скоростью и достигает максимума при образовании 50 % продуктов распада.

Затем скорость начинает уменьшаться и постепенно затухает. С увеличением степени переохлаждения устойчивость аустенита уменьшается, а затем увеличивается.

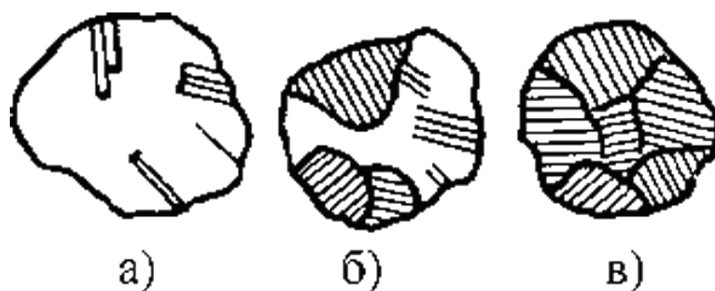
Горизонтальная линия  $M_n$  показывает температуру начала бездиффузного мартенситного превращения. Такие диаграммы называются *диаграммами изотермического превращения аустенита* (рис. 5 б).

При малых степенях переохлаждения, в области температур 727...550 °С, сущность превращения заключается в том, что в результате превращения аустенита образуется механическая смесь феррита и цементита, состав которой отличается от состава исходного аустенита. Аустенит содержит 0,8 % углерода, а образующиеся фазы: феррит – 0,02 %, цементит – 6,67 % углерода.

Время устойчивости аустенита и скорость его превращения зависят от степени переохлаждения.

Максимальная скорость превращения соответствует переохлаждению ниже температуры  $A_1$  на 150...200 °С, то есть соответствует минимальной устойчивости аустенита.

Механизм превращения представлен на рис. 6.



**Рисунок 6.** Механизм превращения аустенита в перлит

При образовании перлита из аустенита ведущей фазой является цементит. Зарождение центров кристаллизации цементита облегчено на границе аустенитных зерен. Образовавшаяся пластинка цементита растет, удлиняется и обедняет соседние области углеродом. Рядом с ней образуются пластинки феррита. Эти пластинки растут как по толщине, так и по длине. Рост образовавшихся колоний перлита продолжается до столкновения с кристаллами перлита, растущими из других центров.

Свойства и строение продуктов превращения аустенита зависят от температуры, при которой происходит процесс его распада.

Толщина соседних пластинок феррита и цементита определяет дисперсность структуры и обозначается  $\Delta_0$ . Она зависит от температуры превращения. В зависимости от дисперсности продукты распада имеют различное название.

$$\Delta_0 \approx (0,5...0,7)10^{-3} \text{ мм} - \text{перлит.}$$

Образуется при переохлаждении до температуры  $T = 650...700^\circ\text{C}$ , или при скорости охлаждения  $V_{\text{охл}} = 30...60^\circ\text{C/ч}$ . Твердость составляет  $180...250$  НВ.

$$\Delta_0 = 0,25 \cdot 10^{-3} \text{ мм} - \text{сорбит}$$

Образуется при переохлаждении до температуры  $T = 600...650^\circ\text{C}$ , или при скорости охлаждения  $V_{\text{охл}} = 60^\circ\text{C/с}$ . Твердость составляет  $250...350$  НВ. Структура характеризуется высоким пределом упругости, достаточной вязкостью и прочностью.

$$\Delta_0 = 0,1 \cdot 10^{-3} \text{ мм} - \text{троостит}$$

Образуется при переохлаждении до температуры  $T = 550...600^\circ\text{C}$ , или при скорости охлаждения  $V_{\text{охл}} = 150^\circ\text{C/с}$ . Твердость составляет  $350...450$  НВ. Структура характеризуется высоким пределом упругости, малой вязкостью и пластичностью.

Твердость ферритно-цементитной смеси прямопропорциональна площади поверхности раздела между ферритом и цементитом.

Если температура нагрева незначительно превышала температуру  $A_1$  и полученный аустенит неоднороден по составу, то при малой степени переохлаждения образуется зернистый леплит.

### **Промежуточное превращение**

При температуре ниже  $550^\circ\text{C}$  самодиффузия атомов железа практически не происходит, а атомы углерода обладают достаточной подвижностью.

Механизм превращения состоит в том, что внутри аустенита происходит перераспределение атомов углерода и участки аустенита, обогащенные углеродом превращаются в цементит.

Превращение обедненного углеродом аустенита в феррит происходит по сдвиговому механизму, путем возникновения и роста зародышей феррита. Образующиеся при этом кристаллы имеют игольчатую форму.

Такая структура, состоящая из цементита и феррита, называется *бейнитом*. Особенностью является повышенное содержание углерода в феррите (0,1...0,2 %).

Дисперсность кристаллов феррита и цементита зависят от температуры превращения.

При температуре  $550\text{ }^{\circ}\text{C} - \Delta_0 = 0,12 \cdot 10^{-3}\text{ мм}$  – *верхний бейнит*. Структура характеризуется недостаточной прочностью, при низких относительном удлинении ( $\delta$ ) и ударной вязкости ( $\alpha_{\chi}$ ).

При температуре  $300\text{ }^{\circ}\text{C} - 300\text{ }^{\circ}\text{C} - \Delta_0 = 0,08 \cdot 10^{-3}$  – *нижний бейнит*. Структура характеризуется высокой прочностью в сочетании с пластичностью и вязкостью.

### **Превращение аустенита в мартенсит при высоких скоростях охлаждения**

Данное превращение имеет место при высоких скоростях охлаждения, когда диффузионные процессы подавляются. Сопровождается полиморфным превращением  $Fe_{\gamma}$  в  $Fe_{\alpha}$ .

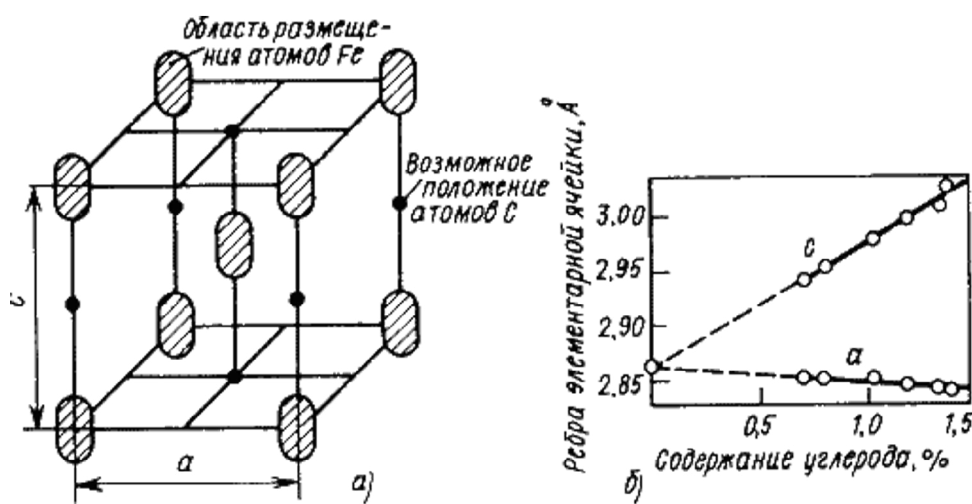
При охлаждении стали со скоростью, большей критической ( $V > V_K$ ), превращение начинается при температуре начала мартенситного превращения ( $M_H$ ) и заканчивается при температуре окончания мартенситного превращения ( $M^K$ ). В результате такого превращения аустенита образуется продукт закалки – *мартенсит*.

Минимальная скорость охлаждения  $V_{K^*}$  при которой весь аустенит переохлаждается до температуры  $M_H$  и превращается, называется *критической скоростью закалки*.

Так как процесс диффузии не происходит, то весь углерод аустенита остается в решетке  $Fe_{\alpha}$  и располагается либо в центрах тетраэдров, либо в середине длинных ребер (рис. 7).

*Мартенсит* – пересыщенный твердый раствор внедрения углерода в  $Fe_\alpha$ .

При образовании мартенсита кубическая решетка  $Fe_\alpha$  сильно искажается, превращаясь в тетрагональную (рис. 7 а). Искажение решетки характеризуется *степенью тетрагональности*:  $c/a > 1$ . Степень тетрагональности прямопропорциональна содержанию углерода в стали (рис. 7 б).



**Рисунок 7.** Кристаллическая решетка мартенсита (а); влияние содержания углерода на параметры  $a$  и  $c$  решетки мартенсита (б)

Механизм мартенситного превращения имеет ряд особенностей.

1. Бездиффузионный характер.

Превращение осуществляется по сдвиговому механизму. В начале превращения имеется непрерывный переход от решетки аустенита к решетке мартенсита (когерентная связь). При превращении гранецентрированной кубической решетки в объемно-центрированную кубическую атомы смещаются на расстояния меньше межатомных, т.е. нет необходимости в самодиффузии атомов железа.

2. Ориентированность кристаллов мартенсита.

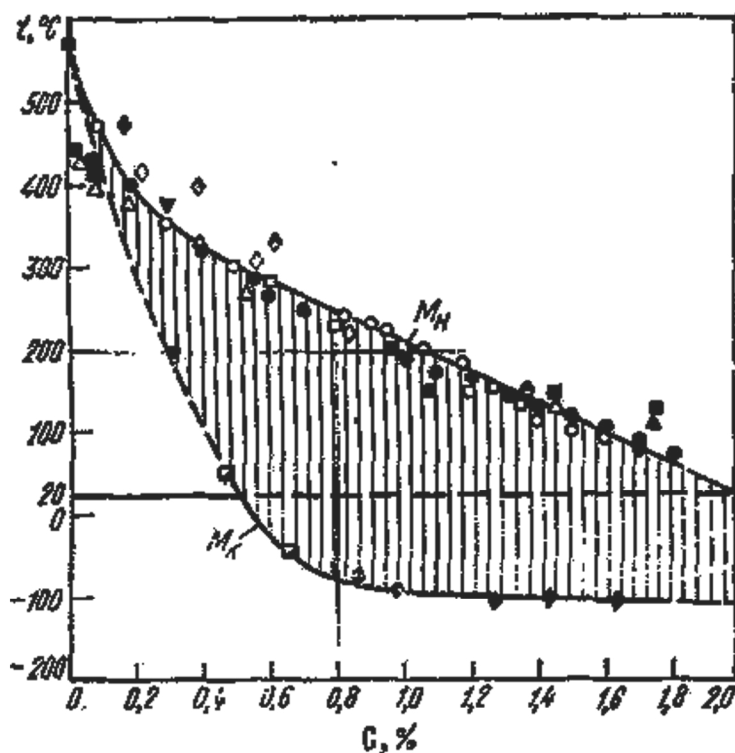
Кристаллы имеют форму пластин, сужающихся к концу, под микроскопом такая структура выглядит как игольчатая. Образуюсь мгновенно пластины растут либо до границы зерна аустенита, либо до дефекта. Следующие пластины расположены к первым под углами  $60^\circ$  или  $120^\circ$ , их размеры ограничены участками между первыми пластинами (рис. 8).



*Рисунок 8. Ориентированность кристаллов мартенсита*

Ориентированный (когерентный) рост кристаллов мартенсита обеспечивает минимальную поверхностную энергию. При когерентном росте, из-за различия объемов аустенита и мартенсита, возникают большие напряжения. При достижении определенной величины кристаллов мартенсита, эти напряжения становятся равными пределу текучести аустенита. В результате этого нарушается когерентность и происходит отрыв решетки мартенсита от решетки аустенита. Рост кристаллов прекращается.

3. Очень высокая скорость роста кристалла, до  $1000$  м/с.



*Рисунок 9. Зависимость температур начала ( $M_n$ ) и конца ( $M_k$ ) мартенситного превращения от содержания углерода в стали*

4. Мартенситное превращение происходит только при непрерывном охлаждении. Для каждой стали начинается и заканчивается при определенной температуре, независимо от скорости охлаждения. Температуру начала мартенситного превращения называют мартенситной точкой  $M_{Hr}$ , а температуру окончания превращения –  $M_K$ . Температуры  $M_H$  и  $M_K$  зависят от содержания углерода и не зависят от скорости охлаждения. Для сталей с содержанием углерода выше 0,6 %  $M_K$  уходит в область отрицательных температур (рис. 9)

Мартенситное превращение чувствительно к напряжениям, и деформация аустенита может вызвать превращение даже при температурах выше  $M_H$ .

В сталях с  $M_K$  ниже 20 °С присутствует аустенит остаточный, его количество тем больше, чем ниже  $M_H$  и  $M_K$  (при содержании углерода 0,6...1,0 % количество аустенита остаточного – 10 %, при содержании углерода 1,5 % – до 50 %). В микроструктуре наблюдается в виде светлых полей между иглами мартенсита.

5. Превращение необратимое. Получить аустенит из мартенсита невозможно.

Свойства мартенсита обусловлены особенностями его образования. Он характеризуется высокой твердостью и низкой пластичностью, что обуславливает хрупкость.

Твердость составляет до 65 HRC. Высокая твердость вызвана влиянием внедренных атомов углерода в решетку  $\alpha$ -фазы, что вызывает ее искажение и возникновение напряжений. С повышением содержания углерода в стали возрастает склонность к хрупкому разрушению.

#### **4. Превращение мартенсита в перлит**

Имеет место при нагреве закаленных сталей. Превращение связано с диффузией углерода.

Мартенсит закалки неравновесная структура, сохраняющаяся при низких температурах. Для получения равновесной структуры изделия подвергают отпуску.

При нагреве закаленной стали происходят следующие процессы.

При нагреве до 200 °С происходит перераспределение углерода в мартенсите. Образуются пластинки  $\epsilon$ -карбидов толщиной несколько атомных диаметров.

На образование карбидов углерод расходуется только из участков мартенсита, окружающих кристаллы выделившихся карбидов. Концентрация углерода на этих участках резко падает, тогда как удаленные участки сохраняют концентрацию углерода. В стали присутствуют карбиды и два  $\alpha$ -твердых раствора мартенсита (с высокой и низкой концентрацией углерода. Такой тип распада мартенсита называется прерывистым. Скорость диффузии мала, карбиды не увеличиваются, распад мартенсита сопровождается зарождением новых карбидных частиц. Таким образом имеем структуру с неравномерным распределением углерода – *это мартенсит отпуска*. При этом несколько снижается тетрагональность решетки.

При нагреве до  $300^\circ\text{C}$  идет рост образовавшихся карбидов. Карбиды выделяются из мартенсита и он обедняется углеродом. Диффузия углерода увеличивается и карбиды растут в результате притока углерода из областей твердого раствора с высокой его концентрацией. Кристаллическая решетка карбидов когерентно связана с решеткой мартенсита.

В высокоуглеродистых сталях аустенит остаточный превращается в мартенсит отпуска. Наблюдается снижение тетрагональности решетки и внутренних напряжений. Структура – *мартенсит отпуска*:

При нагреве до  $400^\circ\text{C}$  весь избыточный углерод выделяется из  $Fe_\alpha$ . Карбидные частицы полностью обособляются, приобретают строение цементита, и начинают расти. Форма карбидных частиц приближается к сферической.

Высокодисперсная смесь феррита и цементита называется *троостит отпуска*.

При нагреве выше  $400^\circ\text{C}$  изменение фазового состава не происходит, изменяется только микроструктура. Имеет место рост и сфероидизация цементита. Наблюдается растворение мелких и рост крупных карбидных частиц.

При температуре  $550...600^\circ\text{C}$  имеем *сорбит отпуска*. Карбиды имеют зернистое строение. Улучшаются свойства стали.

При температуре  $650...700^\circ\text{C}$  получают более грубую ферритно-цементитную смесь – *перлит отпуска (зернистый перлит)*.

### Технологические возможности и особенности отжига, нормализации, закали и отпуска

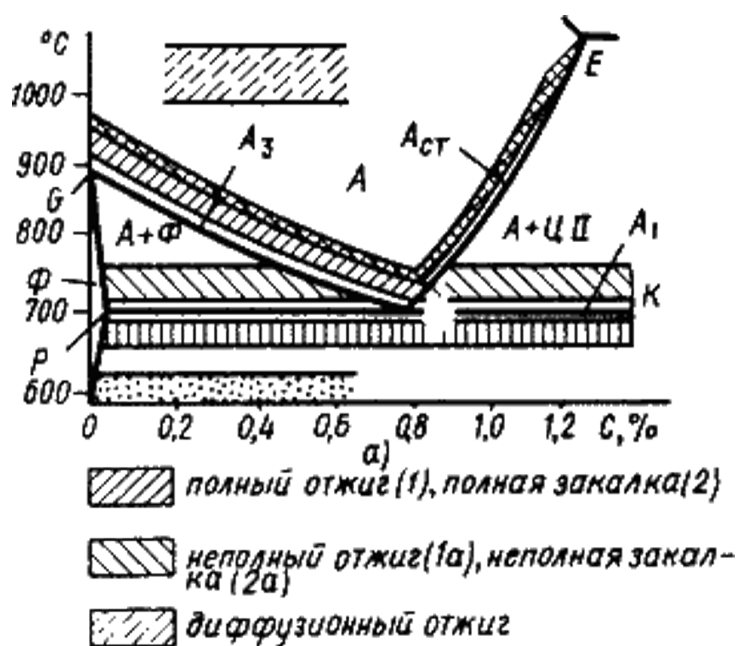
При разработке технологии необходимо установить:

- режим нагрева деталей (температуру и время нагрева);
- характер среды, где осуществляется нагрев и ее влияние на материал стали;
- условия охлаждения.

Режимы термической обработки назначают в соответствии с диаграммами состояния и диаграммой изотермического распада аустенита.

*Нагрев* может осуществляться в нагревательных печах, топливных или электрических, в соляных ваннах или в ваннах с расплавленным металлом, пропусканием через изделие электрического тока или в результате индукционного нагрева.

С точки зрения производительности, нагрев с максимальной скоростью уменьшает окалинообразование, обезуглероживание и рост аустенитного зерна. Однако необходимо учитывать перепад температур по сечению, что ведет к возникновению термических напряжений. Если растягивающие напряжения превысят предел прочности или предел текучести, то возможно коробление или образование трещин.



**Рисунок 10.** Левый угол диаграммы состояния железо–цементит и температурные области нагрева при термической обработке сталей



На рисунке 10 показаны температурные области нагрева при термической обработке сталей. Скорость нагрева тем выше, чем менее легирована сталь, однороднее ее структура, проще конфигурация.

Скорость нагрева тем выше, чем менее легирована сталь, однороднее ее структура, проще конфигурация.

Скорость нагрева принимается  $0,8 \dots 1$  мин на  $1$  мм сечения. Время выдержки принимается около  $20$  % от времени нагрева.

*Среда нагрева* при нагреве в печи с газовой средой.

Составляющие могут оказывать на сталь различное действие:

- окисляющее ( $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$ );
- восстанавливающее ( $CO$ ,  $CH_4$ );
- обезуглероживающее ( $O_2$ ,  $H_2$ );
- науглероживающее ( $CO$ ,  $CH_4$ );
- нейтральное ( $N_2$ , инертные газы).

Окисление с образованием окалины  $Fe_2O_3$ , препятствует получению высокой и равномерной твердости при закалке, приводит к изменению размеров, требует увеличения припусков на механическую обработку.

Обезуглероживание (выгорание углерода в поверхностном слое металла) способствует появлению мягких пятен при закалке и возникновению растягивающих напряжений в поверхностном слое, снижающих усталостную прочность.

### **Отжиг и нормализация. Назначение и режимы**

*Отжиг*, снижая твердость и повышая пластичность и вязкость за счет получения равновесной мелкозернистой структуры, позволяет:

- улучшить обрабатываемость заготовок давлением и резанием;
- исправить структуру сварных швов, перегретой при обработке давлением и литые стали;
- подготовить структуру к последующей термической обработке.

Характерно медленное охлаждение со скоростью  $30 \dots 100$  °C/ч.

Отжиг первого рода.

1. *Диффузионный (гомогенизирующий) отжиг*. Применяется для устранения ликвации, выравнивания химического состава сплава.

В его основе – диффузия. В результате нагрева выравнивается состав, растворяются избыточные карбиды. Применяется, в основном, для легированных сталей.

Температура нагрева зависит от температуры плавления,  $T_H = 0,8 T_{пл}$ .

Продолжительность выдержки:  $\tau = 8...20$  часов.

2. *Рекристаллизационный отжиг* проводится для снятия напряжений после холодной пластической деформации.

Температура нагрева связана с температурой плавления:  $T_H = 0,4 T_{пл}$ .

Продолжительность зависит от габаритов изделия.

3. Отжиг для снятия напряжений после горячей обработки (литья, сварки, обработки резанием, когда требуется высокая точность размеров).

Температура нагрева выбирается в зависимости от назначения, находится в широком диапазоне:  $T_H = 160...700^\circ\text{C}$ .

Продолжительность зависит от габаритов изделия.

Детали прецизионных станков (ходовые винты, высоконагруженные зубчатые колеса, червяки) отжигают после основной механической обработки при температуре  $570...600^\circ\text{C}$  в течение  $2...3$  часов, а после окончательной механической обработки, для снятия шлифовочных напряжений – при температуре  $160...180^\circ\text{C}$  в течение  $2...2,5$  часов.

*Отжиг второго рода* предназначен для изменения фазового состава.

Температура нагрева и время выдержки обеспечивают нужные структурные превращения. Скорость охлаждения должна быть такой, чтобы успели произойти обратные диффузионные фазовые превращения.

Является подготовительной операцией, которой подвергают отливки, поковки, прокат. Отжиг снижает твердость и прочность, улучшает обрабатываемость резанием средне- и высокоуглеродистых сталей. Измельчая зерно, снижая внутренние напряжения и уменьшая структурную неоднородность способствует повышению пластичности и вязкости.

В зависимости от температуры нагрева различают отжиг:

1. *полный*, с температурой нагрева на  $30...50\text{ }^{\circ}\text{C}$  выше критической температуры  $A_3$

$$T_x = A_3 + (30...50)\text{ }^{\circ}\text{C}$$

Проводится для доэвтектоидных сталей для исправления структуры.

При такой температуре нагрева аустенит получается мелкозернистый, и после охлаждения сталь имеет также мелкозернистую структуру.

2. *неполный*, с температурой нагрева на  $30...50\text{ }^{\circ}\text{C}$  выше критической температуры  $A_1$

$$T_x = A_1 + (30...50)\text{ }^{\circ}\text{C}$$

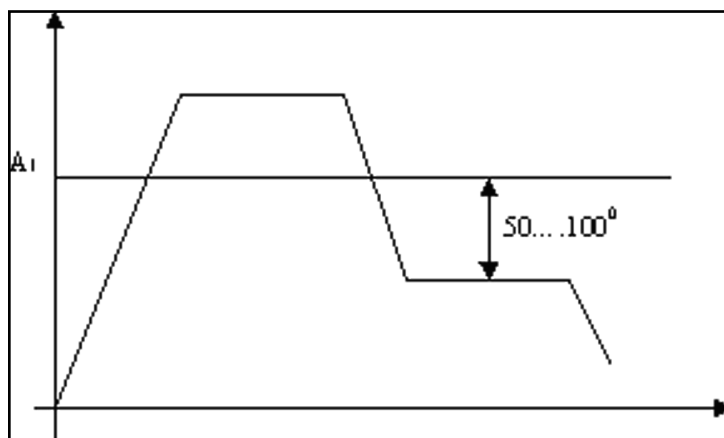
Применяется для заэвтектоидных сталей. При таком нагреве в структуре сохраняется цементит вторичный, в результате отжига цементит приобретает сферическую форму (сфероидизация). Получению зернистого цементита способствует предшествующая отжигу горячая пластическая деформация, при которой дробится цементитная сетка. Структура с зернистым цементитом лучше обрабатывается и имеют лучшую структуру после закалки. Неполный отжиг является обязательным для инструментальных сталей.

Иногда неполный отжиг применяют для доэвтектоидных сталей, если не требуется исправление структуры (сталь мелкозернистая), а необходимо только понизить твердость для улучшения обрабатываемости резанием.

3. *циклический или маятниковый отжиг* применяют, если после проведения неполного отжига цементит остается пластинчатым. В этом случае после нагрева выше температуры  $A_1$  следует охлаждение до  $680\text{ }^{\circ}\text{C}$ , затем снова нагрев до температуры  $750...760\text{ }^{\circ}\text{C}$  и охлаждение. В результате получают зернистый цементит.

4. *изотермический отжиг* – после нагрева до требуемой температуры, изделие быстро охлаждают до температуры на  $50...100\text{ }^{\circ}\text{C}$  ниже критической температуры  $A_1$  и выдерживают до полного превращения аустенита в перлит, затем охлаждают на спокойном воздухе (рис. 11). Температура изотермической выдержки близка к температуре минимальной устойчивости аустенита.

В результате получают более однородную структуру, так как превращение происходит при одинаковой степени переохлаждения. Значительно сокращается длительность процесса. Применяют для легированных сталей.



*Рисунок 11. Режимы изотермического отжига*

5. *Нормализация.* – разновидность отжига.

Термическая обработка, при которой изделие нагревают до аустенитного состояния, на  $30...50\text{ }^{\circ}\text{C}$  выше  $A_3$  или  $A_{cm}$  с последующим охлаждением на воздухе.

$$T_{\chi} = A_3 + (30...50)\text{ }^{\circ}\text{C}$$

или

$$T_{\chi} = A_{cm} + (30...50)\text{ }^{\circ}\text{C}$$

В результате нормализации получают более тонкое строение эвтектоида (тонкий перлит или сорбит), уменьшаются внутренние напряжения, устраняются поры, полученные в процессе предшествующей обработки. Твердость и прочность несколько выше чем после отжига.

В заэвтектоидных сталях нормализация устраняет грубую сетку вторичного цемента.

Нормализацию чаще применяют как промежуточную операцию, улучшающую структуру. Иногда проводят как окончательную обработку, например, при изготовлении сортового проката.

Для низкоуглеродистых сталей нормализацию применяют вместо отжига.

Для среднеуглеродистых сталей нормализацию или нормализацию с высоким отпуском применяют вместо закалки с высоким отпуском. В этом случае механические свойства несколько ниже, но изделие подвергается меньшей деформации, исключаются трещины.

## Варианты заданий

### Вариант 1

1. Вычертите диаграмму изотермического превращения аустенита для стали У8, нанесите на нее кривую режима изотермической обработки, обеспечивающей получение твердости 45...50 HRC. Укажите, как этот режим называется, опишите сущность превращений и какая структура получается в данном случае.

2. Как изменятся структура и свойства стали 40 и У12 в результате закалки от температуры 750 к 850 °С. Объясните с применением диаграммы состояния железо–цементит. Выберите оптимальный режим нагрева. под закалку каждой стали.

### Вариант 2

1. Используя диаграмму состояния железо-цементит и кривую изменения твердости в зависимости от температуры отпуска, назначьте для углеродистой стали 40 температуру закалки и температуру отпуска, необходимые для обеспечения твердости 400 НВ. Опишите превращения на всех этапах термической обработки и получаемую структуру.

2. Вычертите диаграмму изотермического превращения аустенита для стали У8. Нанесите на неё кривую режима термической обработки обеспечивающей получение твердости 60...63 HRC. Как этот режим называется и какая структура при этом получается. Опишите сущность происходящих превращений.

### Вариант 3

1. Вычертите диаграмму изотермического превращения аустенита для стали У8, нанесите на нее кривую режима изотермической обработки, обеспечивающей получение твердости 20...25 HRC. Укажите, как этот режим называется, опишите сущность превращений и какая структура получается в данном случае.

2. Плашки из стали У11 закалены: первая от температуры 760 °С, вторая – от температуры 850 °С. Используя диаграмму состояния железо-цементит, укажите температуры закалки, объясните, какая из этих плашек закалена правильно, имеет более высокие режущие свойства и почему.

#### **Вариант 4**

1. Вычертите диаграмму изотермического превращения аустенита для стали У8, нанесите на нее кривую режима изотермической обработки, обеспечивающей получение твердости 50 HRC. Укажите, как этот режим называется, опишите сущность превращения и какая структура получается в данном случае.

2. С помощью диаграммы состояния железо-цементит опишите структурные превращения, происходящие при нагреве стали У12. Укажите критические точки и выберите оптимальный режим нагрева этой стали под закалку. Охарактеризуйте процесс закалки, опишите получаемую структуру и свойства стали.

#### **Вариант 5**

1. Используя диаграмму состояния железо-цементит и график зависимости твердости от температуры отпуска, назначьте режим термической обработки (температуру нагрева при закалке; а также температуру отпуска) различных приспособлений из стали 45, которые должны иметь твердость 28...30 HRC. Опишите превращения, происходящие на всех этапах термической обработки, получаемую структуру.

2. Вычертите диаграмму изотермического превращения аустенита для стали У8, нанесите на нее кривые режимов обычной закалки, ступенчатой и изотермической. Каковы превращения и недостатки каждого из этих видов закалки?

#### **Вариант 6**

1. Вычертите диаграмму изотермического превращения аустенита эвтектидной стали и нанесите на нее кривую режима изотермического отжига. Опишите превращения и получаемую после такой обработки структуру, ее свойства.

2. Сталь 40 подвергалась закалке от температур 760 и 840 °С. Используя диаграмму состояния железо-цементит, укажите выбранные температуры нагрева и опишите превращения, которые происходили при двух режимах закалки. Какому режиму следует отдать предпочтение и почему?

### **Вариант 7**

1. С помощью диаграммы состояния железо-цементит определите температуру нормализации, отжига и закалки для стали У10. Охарактеризуйте эти виды термической обработки и опишите структуру и свойства стали после каждого режима обработки.

2. Углеродистые стали 45 и У8 после закалки и отпуска имеют структуру мартенсит отпуска и твердость: первая – 50 HRC, вторая – 60 HRC. Используя диаграмму состояния железо-карбид железа и учитывая превращения, происходящие в этих сталях при отпуске, укажите температуру отпуска для каждой стали. Опишите превращения, происходящие в этих сталях в процессе закалки и отпуска и объясните, почему сталь У8 имеет большую твердость, чем сталь 45.

### **Вариант 8**

1. Углеродистые стали 35 и У8 после закалки и отпуска имеют структуру мартенсит отпуска и твердость: первая – 45 HRC, вторая – 60 HRC. Используя диаграмму состояния железо-карбид железа и учитывая превращения, происходящие при отпуске, укажите температуру закалки и температуру отпуска для каждой стали. Опишите превращения, происходящие в этих сталях в процессе закалки и отпуска, и объясните, почему сталь У8 имеет большую твердость, чем сталь 35.

2. Сталь 40 подвергалась закалке от температур 760 и 840 °С. С помощью диаграммы состояния железо-цементит укажите, какие структуры образуются в каждом случае. Объясните причины образования разных структур и порекомендуйте оптимальный режим нагрева под закалку данной стали.

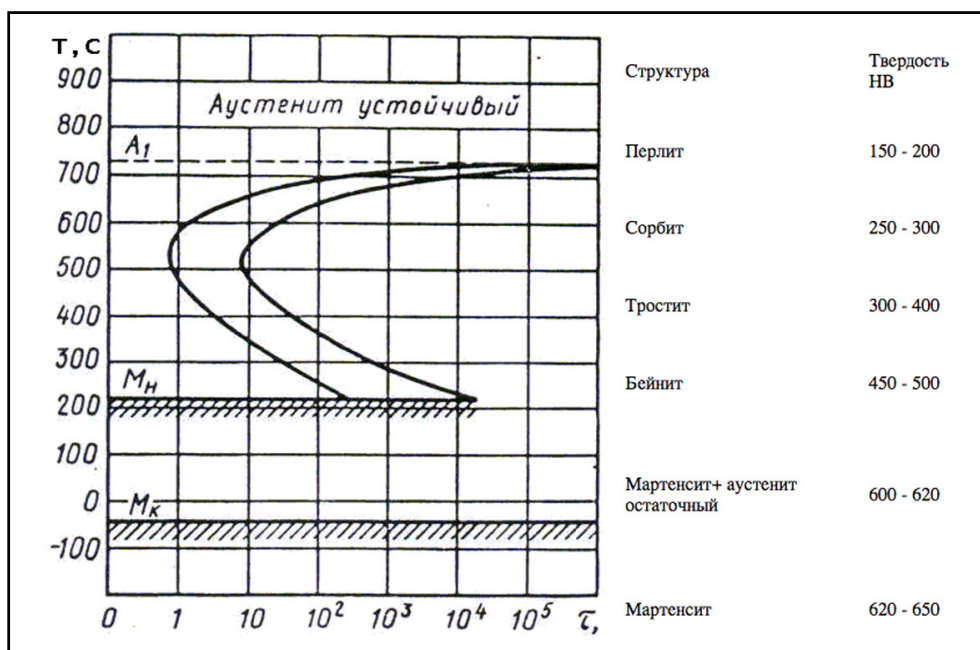


Рисунок 1. Диаграмма изотермического распада аустенита и твердость образующихся структур для стали У8.

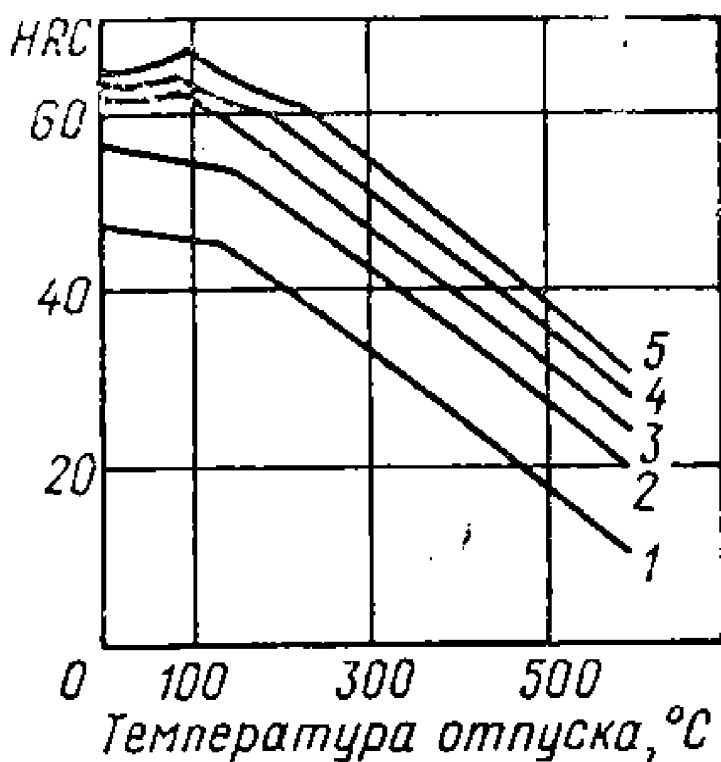


Рисунок 2. Зависимость твердости некоторых углеродистых сталей от температуры отпуска. Содержание углерода, % :  
1-0,2; 2-0,4; 3-0,6; 4-0,8; 5-1,0; 6-1,2



## Раздел 3. ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ

### Тест. Вариант № 1

1. Свойства металлов и сплавов, применяемых в машиностроении.

2. Атомный номер вида – это число:

а) нейтронов	б) протонов
в) валентных электронов	г) нуклонов

3. Пластичность – это:

а) температура, при которой металл полностью переходит из твердого состояния в жидкое.	б) способность металла, не разрушаясь, изменять форму под действием нагрузки и сохранять измененную форму после того, как нагрузка будет снята.
в) свойство металла, характеризующее способность его подвергаться обработке резанием.	г) способность металла или сплава в расплавленном состоянии заполнять литейную форму.

4. Маркой литейной оловянной бронзы является

а) Бр ОЦ4-3	б) ЛАН 59-3-2
в) Л68	г) ЛЦ23А6Ж3Мц2

5. Впишите пропущенные слова:

**По химическому составу стали, и сплавы подразделяются на две группы:** \_\_\_\_\_

6. Установите соответствие между определениями и их характеристиками.

Определения	Характеристики
1. Металлы.	А) Твердые и жидкие вещества – получают сплавлением или спеканием двух или более металлов или металлов с неметаллами. Б) Элементы, образующие сплав.
2. Сплавы.	
3. Компоненты.	

Определения	Характеристики
4. Материалы.	В) Непрозрачные вещества, обладающие специфическим металлическим блеском, пластичностью, высокой теплопроводностью и электропроводностью. Г) Вещества, полученные из сырья и служащие для производства полуфабрикатов, производственных и строительных деталей и готовых изделий.
<b>Ответ: 1 – ... 2 – ... 3 – ... 4 – ...</b>	

7. Дополните предложение, вписав пропущенные слова:

**Кристаллизация** – это \_\_\_\_\_

### Тест. Вариант № 2

1. Типы кристаллических решеток металлов. Понятие полиморфизма и анизотропии.

2. Протоны притягивают электроны. Тогда почему электроны не падают на ядро?

а) нейтроны отталкивают электроны	б) электроны в основном состоянии не могут излучать энергию
в) на очень малых расстояниях протоны отталкивают электроны	г) внутренние электроны отталкивают электроны на внешних орбиталях

3. Координационное число кристаллического твердого тела:

а) количество частиц в элементарной ячейке	б) количество ближайших соседей частицы
в) число октаэдрических пустот в элементарной ячейке	г) количество тетраэдрических пустот в элементарной ячейке

4. Маркой, обозначающей латунь, является

а) Бр ОЦ4-3	б) ЛАН 59-3-2
в) Д16	г) Бр03Ц12С5

5. Дополните предложение, вписав пропущенные слова:

**Раскисление** – это \_\_\_\_\_

6. Установите соответствие между определениями и их характеристиками:

Определения	Характеристики
1. Деформация	А) Группа свойств, характеризующих способность конструкционных материалов выдерживать различные нагрузки.
2. Пластичность	Б) Изменение формы и размеров деталей под действием нагрузок.
3. Механические свойства	В) Способность конструкционных материалов изменять свою форму и размеры под действием нагрузки и сохранять остаточную деформацию после снятия нагрузки
<b>Ответ: 1 – ... 2 – ... 3 – ...</b>	

7. Дополните предложение, вписав пропущенное слово:

**Сплав меди с оловом и другими химическими элементами называют** \_\_\_\_\_

### Тест. Вариант № 3

1. Точечные, линейные, поверхностные дефекты.

2. Количество атомных орбиталей в n-й оболочке:

а) $n^2$	б) $2n - 2$
в) $2n + 1$	г) $n - 1$

3. Наименьшая часть кристалла, которая при повторении в разных направлениях генерирует весь кристалл, называется:

а) точками решетки	б) кристаллической решеткой
в) элементарной ячейкой	г) ни один из упомянутых

4. Количество углерода в Стали 20 равно

а) 0,20 %	б) 2 %
в) 20 %	г) 0,02 %

5. Дополните предложение, вписав пропущенные слова:

**Легированная сталь – сталь, которая,** \_\_\_\_\_

6. Установите соответствие между определениями и их характеристиками.

Определения	Характеристики
Упругость Твердость Прочность Пластичность	А) Способность материала сопротивляться действию внешних сил без разрушения. Б) Способность материала изменять свою форму и размеры под действием внешних сил. В) Способность материала восстанавливать первоначальную форму и размер после прекращения действия внешних сил. Г) Способность материала оказывать сопротивление проникновению в него другого более твердого тела.
<b>Ответ: 1 – ...2 – ...3 – ...4 – ...</b>	

7. Дополните определение, вписав пропущенное слово.

**Сплав меди с цинком – это** \_\_\_\_\_

### Тест. Вариант № 4

1. Общая характеристика процессов плавления и кристаллизации.

2. Что из перечисленного не является чистой формой материи?

а) элемент	б) соединение
в) раствор	г) как соединение, так и раствор

3. Упругость – это:

а) способность материала выдерживать нагрузки, не разрушаясь	б) способность материала изменять свою форму при приложении внешних нагрузок, не разрушаясь
в) способность материала изменять свою форму под действием внешней нагрузки и восстанавливать ее после снятия	г) сопротивляться проникновению более твердого материала

4. Чугунами называют:

а) сплавы железа с углеродом, содержащие до 0,02 % углерода	б) сплавы железа с углеродом, содержащие от 0,02 % до 2,14 % углерода
в) сплавы железа с углеродом, содержащие от 2,14 до 6,67 % углерода	г) сплавы железа с углеродом, содержащие 0,8 % углерода

5. Дополните предложение, вписав пропущенное слово:

**Антифрикционный сплав на основе меди ЛАЖМц52-5-2-1 называется**

---



---



---

6. Установите соответствие между определениями и их характеристиками.

Определения	Характеристика
1. Физические свойства 2. Химические свойства 3. Механические свойства	А) Группа свойств, характеризующих способность конструкционных материалов выдерживать различные нагрузки. Б) Свойства конструкционных материалов, которые определяют состояние вещества при определенных условиях. В) Характер взаимодействия атомов металлов с другими металлами или неметаллами в процессе кристаллизации
<b>Ответ: 1 – ...2 – ...3 – ...</b>	

7. Дополните предложение, вписав пропущенное слово:

Химическое соединение  $Fe_3C$  называется \_\_\_\_\_

Тест. Вариант № 5

1. Твердость. Способы определения. Сущность, сравнительная характеристика и применение способов определения твердости по Бринеллю и Роквеллу.

2. Координационное число для идеального металлического кристалла ОЦК:

а) 8	б) 6
в) 12	г) Варьируется для разных металлов

3. До какого момента тело восстановит свою первоначальную форму?

а) предел текучести	б) предел упругости
в) предел прочности на разрыв	г) предел прочности при растяжении

4. Химическое соединение  $Fe_3C$  называется:

а) цементитом	б) ферритом
в) аустенитом	г) ледебуритом

5. Дополните определение, вписав пропущенные цифры:

Сталь 12ХН3А – легированная высококачественная, содержит углерода (в среднем) \_\_\_\_\_

6. Установить соответствие между определениями и их характеристиками.

Определения	Характеристики
Углеродистые стали обыкновенного качества	А) 25ХГСД
Качественные стали	Б) У7А
Инструментальные углеродистые стали	В) БСт3сп
Легированные стали	Г) 25Г
<b>Ответ: 1 – ...2 – ...3 – ...4 – ...</b>	

7. Дополните предложение, вписав пропущенные слова:

**Легированная сталь – сталь, которая** \_\_\_\_\_

Тест. Вариант № 6

1. Взаимодействие компонентов в сплавах. Общая характеристика, основы строения, условия образования и отличительные особенности химических соединений, твердых растворов и механических смесей.

2. Какие из следующих орбиталей не существуют?

a) 3p	b) 4s
c) 2s	d) 3f

3. Расположите в порядке возрастания твердости следующее: тальк, гипс, топаз алмаз.

a) тальк, гипс, топаз, алмаз	б) гипс, топаз, тальк, алмаз
в) алмаз, топаз, тальк, гипс	г) топаз, гипс, тальк, алмаз

4. Маркой углеродистой качественной конструкционной стали является:

a) У12	б) 45А
в) БСтЗсп	г) ст.45

5. Дополните определение, вписав пропущенное слово

**Сплав меди с цинком – это** \_\_\_\_\_

6. Установите соответствие между определениями и их характеристиками.

Определения	Характеристики
Вредные примеси чугуна Полезные примеси чугуна	А) Сера Б) Фосфор В) Марганец Г) Кремний Д) Углерод
<b>Ответ: 1 – ... 2 – ...</b>	

7. Дополните предложение, вписав пропущенное слово:

**Способность металлов сопротивляться вдавливанию в них какого-либо тела называется \_\_\_\_\_**

### Тест. Вариант № 7

1. Классификация углеродистых сталей.

2. Когда мы движемся вниз по группе, электроотрицательность элементов обычно:

а) увеличивается	б) уменьшается
в) увеличивается, а затем уменьшается	г) уменьшается, а затем увеличивается

3. Твердость – это:

а) способность металла образовывать сварной шов, без трещин	б) способность материала сопротивляться внедрению в него, более твердого тела
в) свойство тел проводить с той или иной скоростью тепло при нагревании	г) уменьшение объема или линейных размеров расплавленного металла или сплава при его охлаждении до комнатной температуры

4. Маркой высококачественной стали является:

а) У12	б) 45Х
в) БСтЗсп	г) 45



5. Дополните предложение, вписав пропущенное слово:

**Химическое соединение  $Fe_3C$  называется** \_\_\_\_\_

6. Установите соответствие между определениями и их характеристиками:

Определения	Характеристики
1. Чугун выплавляют в... 2. Сталь выплавляют в ...	А) Доменных печех Б) Мартеновских печех В) Электropечех Г) Конверторных печех
<b>Ответ: 1 – ...2 – ...</b>	

7. Дополните предложение, вписав пропущенные слова:

**Раскисление – это** \_\_\_\_\_

### Тест. Вариант № 8

1. Классификация сталей и сплавов. Их маркировка.

2. В периодической таблице семнадцать неметаллов. В отличие от металлов того же периода, они имеют более высокое:

а) атомное число	б) атомный размер
в) электроположительность	г) все из упомянутых

3. Способность тел проводить тепло при нагревании – это

а) температура плавления	б) теплопроводность
в) теплоемкость	г) плотность

4. Сталь – это:

а) сплавы железа с углеродом, содержащие до 0,02 % углерода	б) сплавы железа с углеродом, содержащие от 0,02 % до 2.14 % углерода
в) сплавы железа с углеродом, содержащие от 2,14 до 6,67 %	г) сплавы железа с углеродом, содержащие 0,8 % С

5. Дополните предложение, вписав пропущенные слова:

**Процесс термической обработки состоит из операций нагрева, \_\_\_\_\_ при данной температуре и \_\_\_\_\_ с определенной скоростью.**

6. Установите соответствие между определениями и их характеристиками.

Определения	Характеристики
1. Вредные примеси чугуна 2. Полезные примеси чугуна	А) Сера Б) Фосфор В) Марганец Г) Кремний Д) Углерод
<b>Ответ: 1 – ...2 – ...</b>	

7. Дополните предложение, вписав пропущенное слово:

Сплав меди с оловом и другими химическими элементами называют \_\_\_\_\_

### Тест. Вариант № 9

1. Отжиг стали. Назначение, общая характеристика и режимы проведения основных разновидностей отжига (полного, неполного, нормализационного).

2. Аллотропы различаются по одному из следующих свойств:

а) атомный номер	б) атомная масса
в) кристаллическая структура	г) электроотрицательность

3. Испытаниями на стойкость против коррозии определяют свойства металлов:

а) технологические	б) химические
в) физические	г) механические

4. Маркой полуспокойной стали является:

а) 45	б) Ст 1 кп
в) Б Ст 6 сп	г) В Ст 4 пс

5. Впишите пропущенные числовое значение:

**Чугун – это сплав железа с углеродом, в котором массовая доля углерода составляет \_\_\_\_\_**

6. Установите соответствие между определениями и их характеристиками.

Определения	Характеристика
1. Физические свойства	А) Группа свойств, характеризующих способность конструкционных материалов выдерживать различные нагрузки.
2. Химические свойства	Б) Свойства конструкционных материалов, которые определяют состояние вещества при определенных условиях.
3. Механические свойства	В) Характер взаимодействия атомов металлов с другими металлами или неметаллами в процессе кристаллизации
<b>Ответ: 1 – ... 2 – ... 3 – ...</b>	

7. Дополните предложение, вписав пропущенное слово:

Антифрикционный сплав на основе меди ЛАЖМц52-5-2-1 называется \_\_\_\_\_

Тест. Вариант № 10

1. Закаливаемость и прокаливаемость стали. Обработка холодом.

2. Перемещение вниз по группе, какое из следующих свойств обычно уменьшается?

а) электроотрицательность	б) металлический характер
в) атомный радиус	г) молярная масса

3. Прочность – это способность материала:

а) сопротивляться действию внешних сил без разрушения	б) восстанавливать первоначальную форму после снятия нагрузки
в) сопротивляться проникновению	г) более твердого материала способность материала изменять свою форму под действием внешней нагрузки и восстанавливать ее после снятия

4. СЧ15 – одна из марок серого чугуна с пластинчатым графитом. Цифра 15 означает:

а) содержание углерода в процента	б) относительное удлинение
в) предел прочности при растяжении	г) твердость по Бринеллю

5. Дополните определение, вписав пропущенное числовое значение:

**Сталь – это сплав железа с углеродом, в котором массовая доля углерода составляет \_\_\_\_\_**

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

6. Установите соответствие между определениями и их характеристиками.

Определения	Характеристики
1. Металлы. 2. Сплавы. 3. Компоненты. 4. Материалы.	А) Твердые и жидкие вещества получают сплавлением или спеканием двух или более металлов или металлов с неметаллами. Б) Элементы, образующие сплав. В) Непрозрачные вещества, обладающие специфическим металлическим блеском, пластичностью, высокой теплопроводностью и электропроводностью. Г) Вещества, полученные из сырья и служащие для производства полуфабрикатов, производственных и строительных деталей и готовых изделий.
<b>Ответ: 1 – ...2 – ... 3 – ... 4 – ...</b>	

7. Дополните определение, вписав пропущенные слова:

**Закалкой называют нагрев стали до температуры выше критических, выдержка при этой температуре и последующее \_\_\_\_\_**

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

## ЛИТЕРАТУРА

1. Баранова, Л. А., Металлографическое травление металлов и сплавов : справочник / Л. А. Баранова, Э. Л. Демина. – М. : Metallurgia, 1986. – 255 с.
2. Беккерт М., Клемм Х. Способы металлографического травления : Справочник. М.: Metallurgia, 1988. – 400с.
3. Грачев, С. В. Физическое металловедение : учеб. для вузов / С. В. Грачев, В. Р. Бараз, А. А. Богатов и др. ; Екатеринбург : Изд-во УГТУ – УПИ, 2001. – 534 с.
4. Гуляев, А. П. Металловедение / А. П. Гуляев – М. : Metallurgia, 1986. – 544 с.
5. Малинина, Р. И. Практическая металлография / Р. И. Малинина и др. – М. : Интермет Инжиниринг, 2002. – 240 с.
6. Материаловедение / под ред. Ю. М. Соломонцева. – М. : Высш.шк., 2005. – 456 с.
7. Новиков, И. И. Теория термической обработки металлов / И. И. Новиков. – М. : Metallurgia, 1986. – 480 с.
8. Радионова, Л. В. Материаловедение. Технология конструкционных материалов : учебное пособие / Л. В. Радионова, Е. В. Шекунов– Магнитогорск : ГОУ ВПО «МГТУ», 2010. – 217 с.
9. Смирнов, М. А. Основы термической обработки стали : учебное пособие / М. А. Смирнов, В. М. Счастливец, Л. Г. Журавлев. – Институт физики металлов УрО РАН, 1999. – 494 с.
10. Сорокин, В. Г. Марочник сталей и сплавов / В. Г. Сорокин, А. В. Волосникова, С. А. Вяткин и др. ; под общ. ред. В. Г. Сорокина. – М. : Машиностроение, 1989. – 640 с.
11. Феодосьев, В. И. Соппротивление материалов / В. И. Феодосьев. – М. : Наука, 1970.
12. Фетисов, Г. П. Материаловедение и технология металлов : учеб. для вузов / Г. П. Фетисов, М. Г. Карпман, В. М. Матюнин и др. ; под ред. Г. П. Фетисова. – М. : Высш. шк., 2001. – 638 с.



Учебное издание

Томский К. О.  
Шабаганова С. Н.  
Иванова М. С.

# ПРАКТИКУМ: МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Учебное пособие

для студентов направления  
21.03.01 – «Нефтегазовое дело» и 21.05.04 – «Горное дело»

Печатается в авторской редакции и коррекции

Ответственный за выпуск Мария Соседко  
Технический редактор Лина Мовсесян  
Дизайнер обложки Евгения Добрынина  
Компьютерная верстка Анна Севрюгина

Издательская группа «Логос»  
Web-site: <http://центр-логос.рф>  
E-mail: [logos.centri@mail.ru](mailto:logos.centri@mail.ru)

Издательство «Знание-М»  
E-mail: [id\\_piar@mail.ru](mailto:id_piar@mail.ru)

Подписано к использованию: 20.04.2020