

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования**  
**«Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева»**

**Кафедра металлорежущих станков и инструментов**

**Составитель**  
**К. П. Петренко**

## **КОНСТРУКЦИОННОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

### **Методические указания к лабораторным работам**

Рекомендованы учебно-методической комиссией направления подготовки  
11.03.04 Электроника и наноэлектроника в качестве электронного издания  
для использования в образовательном процессе

**Кемерово 2018**

Рецензенты:

Коротков А. Н. – доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой металлорежущих станков и инструментов

Семыкина И. Ю. –председатель учебно-методической комиссии направления 11.03.04 Электроника и наноэлектроника

**Петренко Константин Петрович**

**Конструкционное материаловедение:** методические указания к лабораторным работам [Электронный ресурс]: для обучающихся направления подготовки 11.03.04 Электроника и наноэлектроника, профиль Промышленная электроника, очной формы обучения / сост.: В. Г. Каширских; КузГТУ. – Кемерово, 2018. – Систем. требования : Pentium IV; ОЗУ 8 Мб; Windows XP; мышь. – Загл. с экрана.

Методические указания к лабораторным работам составлены в соответствии с рабочей программой по дисциплине «Конструкционное материаловедение», содержит полный перечень лабораторных по указанной дисциплине, а также список литературных источников к каждому занятию для самостоятельного изучения.

© КузГТУ, 2018

© К. П. Петренко,  
составление, 2018

# Лабораторная работа №1 «МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ»

Составитель: Драчев В. В.

## 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение основных методов определения механических свойств металлов и сплавов.

## 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Под механическими свойствами понимают характеристики, определяющие поведение металла (сплава) под действием внешних сил. К механическим свойствам относят сопротивление металла деформации (прочность, твердость) и сопротивление разрушению (пластичность, вязкость). В результате механических испытаний получают количественные значения механических свойств, т.е. значения напряжений или деформаций, при которых происходят изменения механического состояния материала.

Механические свойства металлов определяют при статических, динамических и усталостных испытаниях.

### 2.1. Механические свойства, определяемые при статических испытаниях

Статическими называют испытания, при которых прилагаемая к образцу нагрузка возрастает медленно и плавно. К статическим испытаниям металлов относятся испытания на растяжение, сжатие, изгиб, кручение, сдвиг и на твердость. Чаще всего применяют испытания на растяжение и на твердость.

#### 2.1.1. Испытания на растяжение

Для испытания на растяжение (ГОСТ 1497–84) применяют стандартные образцы круглого или прямоугольного сечения (рис. 1). Машины для испытания снабжены прибором, записывающим диаграмму растяжения, которая показывает зависимость деформации образца от растягивающей нагрузки. На рис. 2 приведена диаграмма растяжения для низкоуглеродистой стали.

Используя диаграмму растяжения, определяют характеристики прочности.

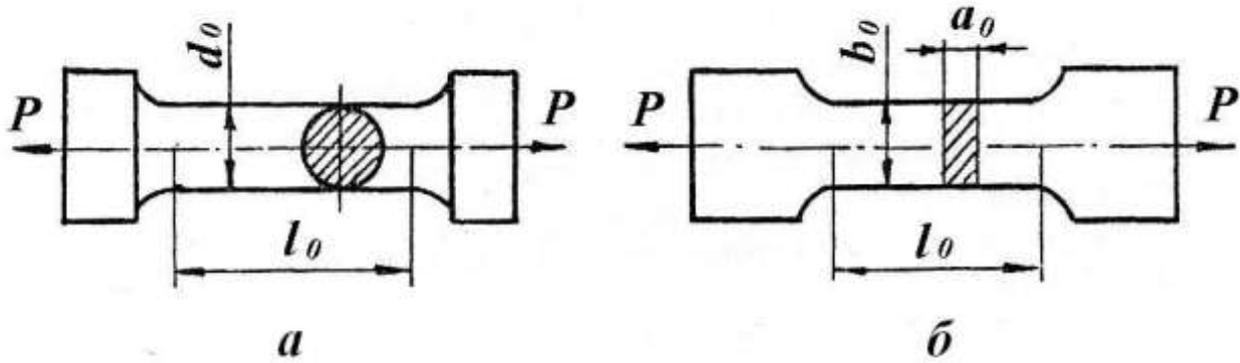


Рис. 1. Образцы для испытания на растяжение:  
 $a$  – круглый;  $b$  – плоский

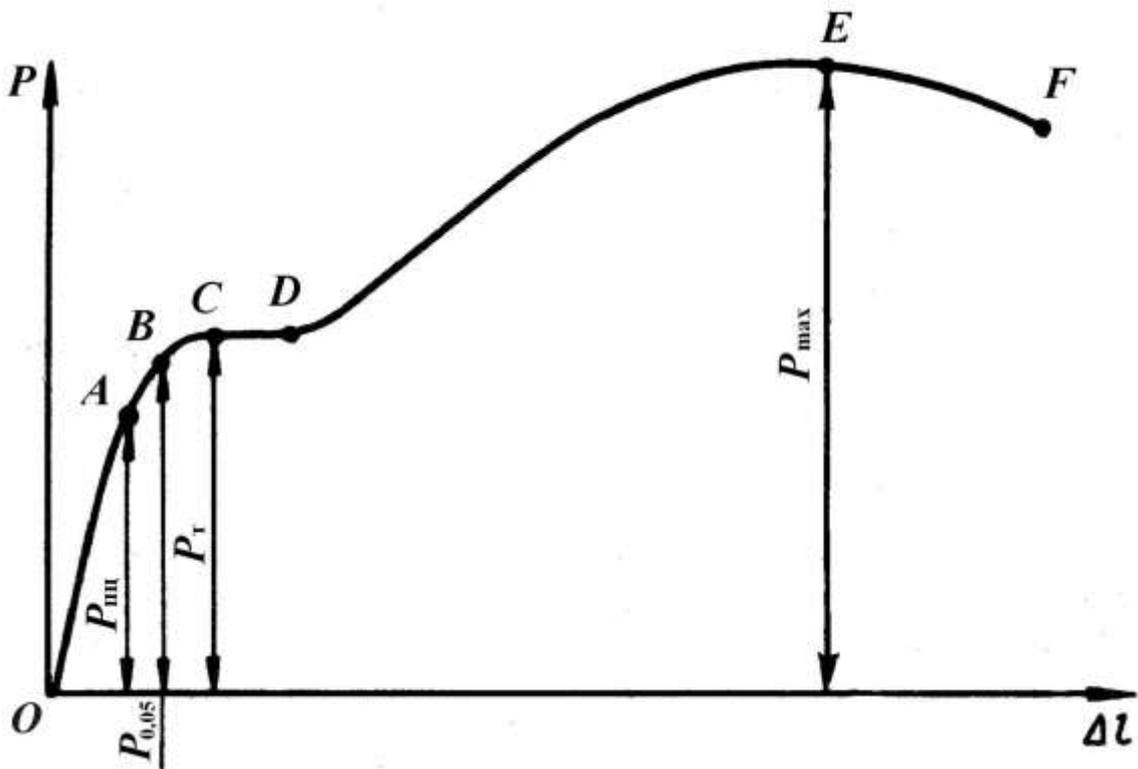


Рис. 2. Диаграмма растяжения

От начала деформации – точки  $O$  до точки  $A$  образец деформируется пропорционально приложенной нагрузке. Если нагрузку снять, то полученная образцом деформация исчезнет, и он примет первоначальные размеры. Точка  $A$  соответствует пределу пропорциональности ( $\sigma_{\text{пц}}$ , Па):

$$\sigma_{\text{пц}} = \frac{D_{\text{пц}}}{F_0}, \quad (1)$$

где  $P_{\text{пц}}$  – предельная нагрузка, до которой сохраняется пропорциональность между нагрузкой и деформацией, Н;

$F_0$  – начальная площадь поперечного сечения образца,  $\text{м}^2$ .

Выше точки  $A$  располагается точка  $B$ , которая соответствует нагрузке, вызывающей определенное остаточное удлинение образца: если снять нагрузку, длина образца будет больше начальной. Напряжение, при котором остаточное удлинение достигает 0,05 % от начальной расчетной длины образца, называют пределом упругости ( $\sigma_{0,05}$ , Па):

$$\sigma_{0,05} = \frac{D_{0,05}}{F_0}, \quad (2)$$

где  $P_{0,05}$  – нагрузка, вызывающая остаточное удлинение 0,05 %, Н.

Иногда значение остаточного удлинения принимают равным 0,005 % или 0,02 %. Тогда предел упругости обозначают  $\sigma_{0,005}$  или  $\sigma_{0,02}$  соответственно.

При дальнейшем увеличении нагрузки на диаграмме получается горизонтальный участок  $CD$  (площадка текучести), на котором даже незначительное увеличение нагрузки вызывает деформацию, «текучесть» образца. Напряжение, при котором образец деформируется без заметного увеличения нагрузки, называют физическим пределом текучести ( $\sigma_{\text{т}}$ , Па):

$$\sigma_{\text{т}} = \frac{D_{\text{т}}}{F_0}, \quad (3)$$

где  $P_{\text{т}}$  – нагрузка, соответствующая площадке текучести, Н.

Многие металлы и сплавы не имеют площадки текучести на диаграмме растяжения. Для них определяют условный предел текучести ( $\sigma_{0,2}$ , Па):

$$\sigma_{0,2} = \frac{P_{0,2}}{F_0}, \quad (4)$$

где  $P_{0,2}$  – нагрузка, вызывающая остаточное удлинение 0,2 %, Н.

Напряжение, соответствующее наибольшей нагрузке, предшествующей разрушению образца (точка  $E$ ), называется временным сопротивлением ( $\sigma_B$ , Па) и вычисляется по формуле

$$\sigma_B = \frac{P_{\max}}{F_0}, \quad (5)$$

где  $P_{\max}$  – наибольшая нагрузка, предшествующая разрушению образца, Н.

В точке  $F$  происходит разрушение образца.

Кроме прочностных характеристик при испытании на растяжение определяют характеристики пластичности. К ним относят относительное удлинение ( $\delta$ , %) и относительное сужение ( $\psi$ , %):

$$\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} \cdot 100, \quad (6)$$

где  $l_0$  – первоначальная длина образца, м;

$l_k$  – длина образца после разрыва, м;

$$\psi = \frac{F_0 - F_k}{F_0} \cdot 100, \quad (7)$$

где  $F_0$  – первоначальная площадь поперечного сечения образца, м<sup>2</sup>;

$F_k$  – площадь поперечного сечения образца после разрыва, м<sup>2</sup>.

### 2.1.2. Испытания на твердость

Твердостью называют свойство материала оказывать сопротивление пластической деформации при внедрении в его поверхность более твердого тела. Для испытаний на твердость не требуются специальные образцы. Измерение твердости проводится быстро и просто и может осуществляться непосредственно на готовой детали без ее разрушения.

Наиболее широко применяют испытания на твердость по Бринеллю (ГОСТ 9012–59), по Роквеллу (ГОСТ 9013–59) и по Виккерсу (ГОСТ 2999–75).

**Измерение твердости по Бринеллю.** При измерении твердости этим методом шарик из закаленной стали или твердого сплава вдавливается в испытуемый образец (изделие) под действием нагрузки, приложенной в течение определенного времени (от 10 до 15 с для черных металлов и от 10 до 180 с для цветных). Диаметры применяемых шариков 1,0; 2,0; 2,5; 5 и 10 мм. Нагрузка выбирается в пределах от 9,8 Н (1 кгс) до 29420 Н (3000 кгс) в зависимости от вида металла или сплава.

Число твердости по Бринеллю (НВ) определяется путем деления нагрузки, при которой происходило вдавливание, на площадь поверхности отпечатка, оставшегося после снятия нагрузки, по формуле

$$HB = \frac{P}{F} = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}, \quad (8)$$

где  $P$  – нагрузка, кгс;

$F$  – площадь поверхности отпечатка, мм<sup>2</sup>;

$D$  – диаметр шарика, мм;

$d$  – диаметр отпечатка, мм.

При измерении твердости шариком диаметром 10 мм под нагрузкой 29430 Н (3000 кгс) с выдержкой 10–15 с число твердости по Бринеллю обозначается цифрами, характеризующими величину твердости, и буквами НВ при применении стального шарика или НВW при применении шарика из твердого сплава.

Например: 400 НВ.

При других условиях измерения обозначение НВ (НВW) дополняется индексом, указывающим условия измерения в следующем порядке: диаметр шарика, нагрузка и продолжительность выдержки.

Например: 200 НВ5/250/30 – число твердости по Бринеллю 200, испытание проводилось шариком диаметром 5 мм при нагрузке 2453 Н (250 кгс), приложенной в течение 30 с.

Метод Бринелля используется для испытания материалов низкой и средней твердости – цветных металлов и их сплавов, незакаленных сталей. Метод применим для определения твердости неоднородных по структуре сплавов (чугуны, антифрикционные сплавы). Так как к поверхности испытуемых изделий не предъявляется высоких требований, метод Бринелля широко используется в цеховых условиях.

**Измерение твердости по Роквеллу.** При измерении твердости методом Роквелла в испытуемый образец или изделие вдавливаются алмазный конус с углом при вершине  $120^\circ$  или стальной закаленный шарик диаметром 1,5875 мм под действием двух последовательно прилагаемых нагрузок: предварительной  $P_0$  и основной  $P_1$ . Общая нагрузка  $P = P_0 + P_1$ .

Твердость определяют по глубине внедрения наконечника в испытуемый образец, измеренной после снятия основной нагрузки при сохранении предварительной. За единицу твердости по Роквеллу принята условная величина, соответствующая осевому перемещению наконечника на 0,002 мм. Результаты испытания читаются прямо по шкале прибора, без дополнительных измерений.

В зависимости от материала испытуемого образца твердость измеряют по трем шкалам А, В и С (см. табл.).

Метод Роквелла, благодаря своей скорости и простоте, нашел самое широкое применение в промышленности для контроля твердости готовых штучных деталей.

**Измерение твердости по Виккерсу.** Измерение твердости методом Виккерса основано на вдавливании алмазной четырехгранной пирамиды с углом при вершине  $136^\circ$  в образец (изделие) под действием нагрузки, приложенной в течение определенного времени (обычно 10–15 с). Нагрузка выбирается в пределах

Таблица

Параметры испытания при измерении твердости по Роквеллу

Обозначение		Наконечник	Нагрузка, Н (кгс)			Пределы измерения в единицах твердости по Роквеллу	Область применения
шкалы	твердости		$P_0$	$P_1$	$P$		
В	HRB	Стальной шарик	98 (10)	883 (90)	981 (100)	25–100	Цветные сплавы, нетермообработанные стали
С	HRC	Алмазный конус	98 (10)	1373 (140)	1471 (150)	22–68	Твердые термообработанные стали
А	HRA	Алмазный конус	98 (10)	490(50)	588 (60)	70–85	Сверхтвердые сплавы, тонкие поверхностные слои, тонколистовой материал

от 9,8 Н (1 кгс) до 980,7 (100 кгс) в зависимости от толщины образца и его примерной твердости.

Твердость по Виккерсу (HV) вычисляют путем деления нагрузки на площадь поверхности отпечатка, оставшегося на образце, по формуле

$$HV = \frac{P}{F} = \frac{2P \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2} = 1,854 \frac{P}{d^2}, \quad (9)$$

где  $P$  – нагрузка, кгс;

$F$  – площадь поверхности отпечатка, мм<sup>2</sup>;

$\alpha$  – угол между противоположными гранями пирамиды при вершине, равный 136°;

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

Метод используют для определения твердости деталей малой толщины и тонких поверхностных слоев, имеющих высокую твердость.

## **2.2. Механические свойства, определяемые при динамических испытаниях**

Механические свойства металлов (сплавов), определенные при статических испытаниях, часто не соответствуют действительным условиям нагружения деталей при их эксплуатации, когда нагрузки возрастают очень быстро. В таких случаях металлы подвергают динамическим испытаниям, при которых нагрузка прикладывается мгновенно, резко. По виду деформации эти испытания делятся на ударный разрыв, ударное сжатие и ударный изгиб.

Наиболее распространенным видом динамических испытаний является испытание на ударный изгиб с определением ударной вязкости (ГОСТ 9454–78). Испытание заключается в разрушении образца с надрезом (концентратором) ударом маятникового копра (рис. 3).

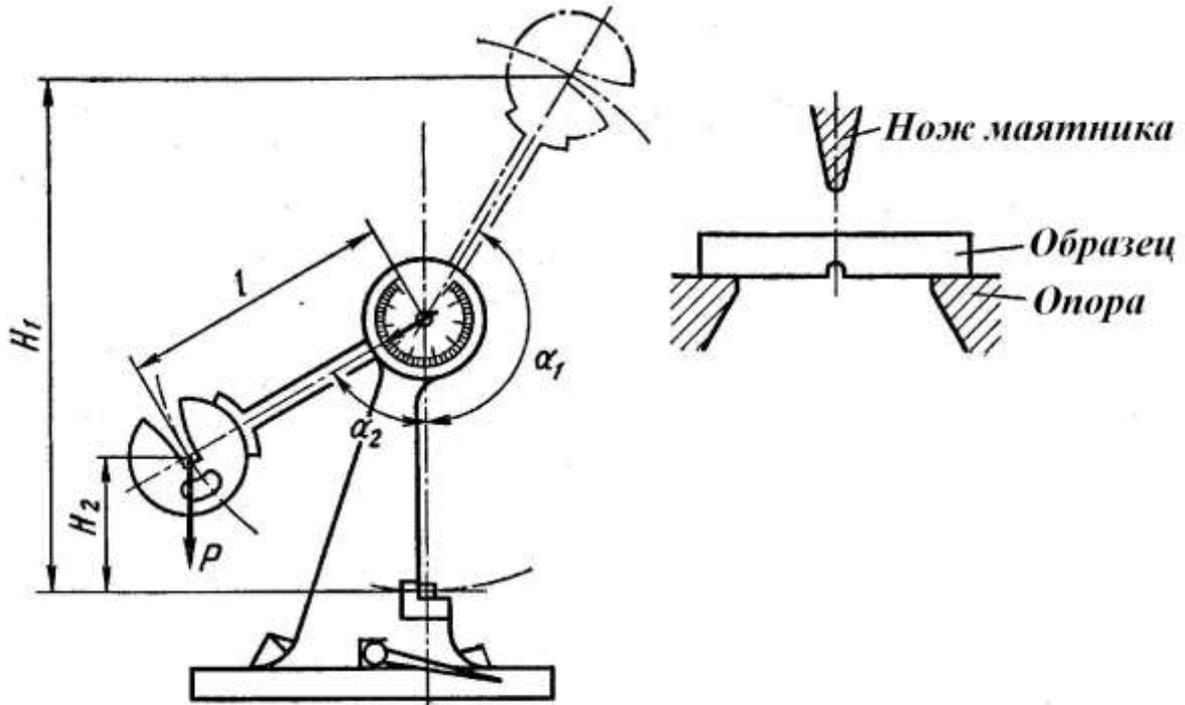


Рис. 3. Схема испытания на ударный изгиб

Ударная вязкость ( $KС$ , Дж/м<sup>2</sup>) определяется по формуле

$$\hat{E}\tilde{N} = \frac{\hat{E}}{S_0}, \quad (10)$$

где  $K$  – работа, затраченная на разрушение образца, Дж;  
 $S_0$  – начальная площадь поперечного сечения образца в месте надреза, м<sup>2</sup>.

Работа, затраченная на разрушение образца:

$$K = MgH_1 - MgH_2 = Mg(H_1 - H_2) = MgL(\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2), \quad (11)$$

где  $M$  – масса маятника, кг;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$H_1$  – высота подъема маятника до удара, м;

$H_2$  – высота подъема маятника после удара, м;

$L$  – длина маятника, м;

$\alpha_1$  – угол подъема маятника до удара, град;

$\alpha_2$  – угол подъема маятника после удара, град.

В зависимости от вида концентратора напряжений различают образцы трёх типов (рис. 4): с радиусом надреза  $R=1$  мм (тип U), с  $R = 0,25$  мм и углом  $45^\circ$  (тип V), с инициированной трещиной (тип T). Соответственно ударная вязкость обозначается KCU, KCV, KCT.

Выбор типа концентратора осуществляется в зависимости от требований к изделию: U – при обычных испытаниях металлов; V – для конструкций повышенной степени надежности; T – для особо ответственных конструкций.

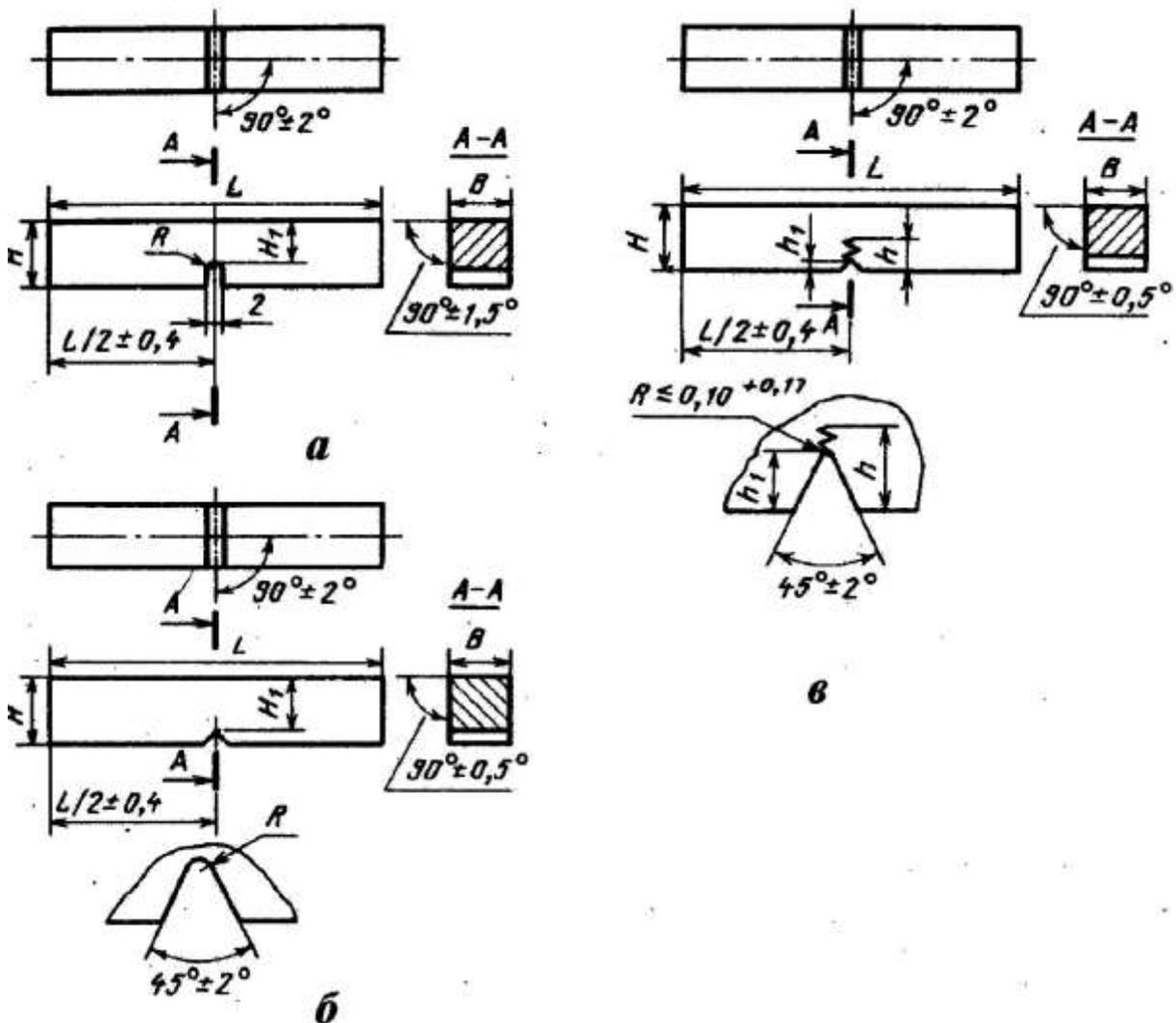


Рис. 4. Образцы для испытаний на ударную вязкость: тип U (а), тип V (б), тип T (в)

### 2.3. Механические свойства, определяемые при усталостных испытаниях

Длительное воздействие на металл повторно-переменных нагрузок может вызвать разрушение при напряжениях меньших  $\sigma_B$  и даже  $\sigma_{0,2}$ . Постепенное накопление повреждений в металле под действием циклических нагрузок, приводящих к образованию трещин и разрушению, называют усталостью, а свойство металлов сопротивляться усталости – выносливостью. Испытания на усталость регламентированы ГОСТ 25.502–79: при растяжении – сжатии, изгибе, кручении; с использованием симметричных или асимметричных циклов напряжений. Чаще всего их проводят на вращающемся образце (гладком или с надрезом) с приложением изгибающей нагрузки по симметричному циклу (рис. 5). Коэффициент асимметрии  $R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max} = -1$ .

При этом определяют предел выносливости – наибольшее напряжение, которое не вызывает разрушения образца при произвольно большом числе циклов нагружения. Предел выносливости обозначают  $\sigma_R$ , а при симметричном цикле  $\sigma_{-1}$ . Для испытания используют не менее 15 образцов, каждый из которых испытывают на определенном уровне напряжений до разрушения. По результатам испытания строят кривую усталости в координатах максимальное напряжение  $\sigma_{\max}$  – число циклов до разрушения  $N$  (рис. 6, а) или в логарифмических координатах  $\lg \sigma_{\max} - \lg N$  (рис. 6, б).

Горизонтальный участок на кривой усталости, т.е. максимальное напряжение, не вызывающее разрушения при бесконечно большом числе циклов нагружения, соответствует пределу выносливости (рис. 6, кривая 1).

Некоторые металлы и сплавы не имеют горизонтального участка на кривой усталости (рис. 6, кривая 2). В этом случае определяют ограниченный предел выносливости – наибольшее напряжение, которое выдерживает металл (сплав) в течение заданного (базового) числа циклов нагружения  $N_6$ . База испытания должна быть не менее  $10 \cdot 10^6$  циклов для стали и  $100 \cdot 10^6$  для цветных металлов и их сплавов.

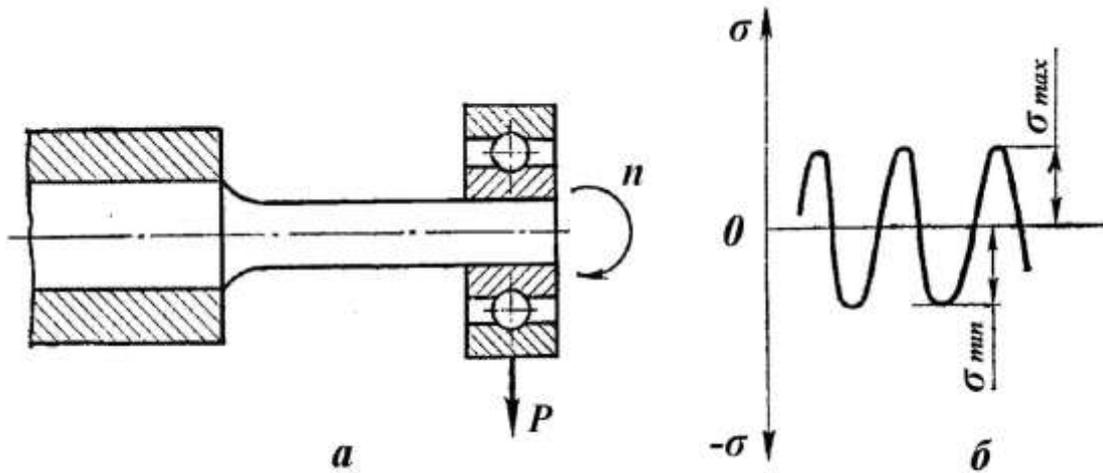


Рис. 5. Испытание на усталость: *a* – схема испытания, *б* – цикл изменения напряжений

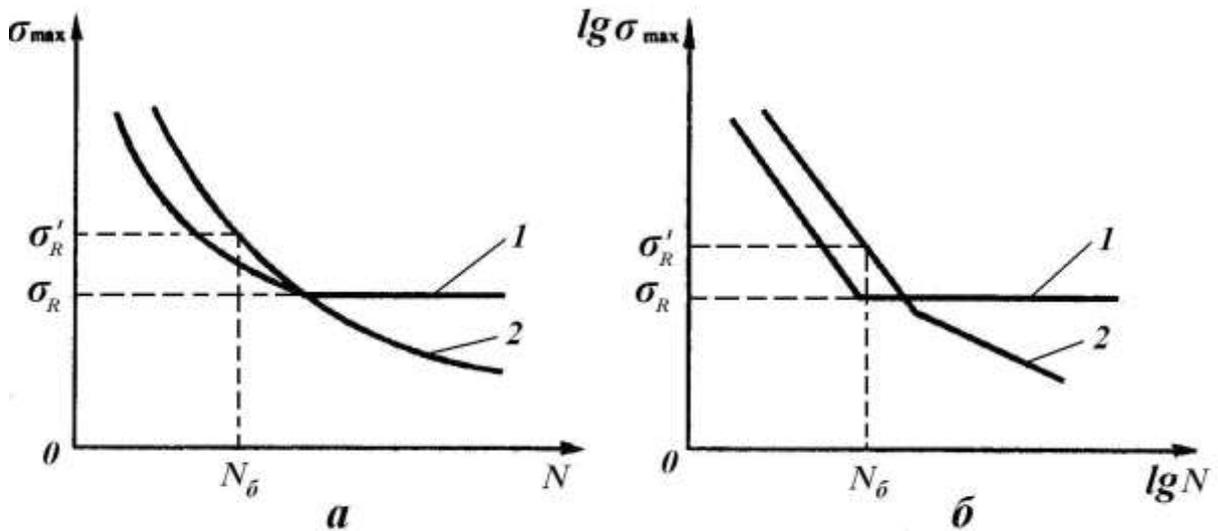


Рис. 5. Кривые усталости в координатах: *a* –  $\sigma_{max} - N$ , *б* –  $\lg \sigma_{max} - \lg N$

### 3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Изучить основные теоретические положения.
2. Оформить отчет.

#### **4. ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА**

Отчет должен содержать: наименование и цель занятия, перечень основных методов испытаний, схемы испытаний, расчетные формулы.

#### **5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Какие испытания называются статическими?
2. Какие механические характеристики металлов определяют при испытании на растяжение?
3. Что такое твердость?
4. Чем отличаются статические испытания металлов от динамических?
5. Какие образцы применяют при испытании на ударный изгиб?
6. С какой целью проводят испытания на усталость?
7. Что такое предел выносливости?

#### **6. СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Материаловедение: учебник для студентов вузов / под ред. Б. Н. Арзамасова, Г. Г. Мухина. – Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – 648 с.
2. Материаловедение: учебник для вузов / Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева. – 4-е изд. – Москва: Альянс, 2009. – 528 с.
3. Металлы и сплавы: справочник / под ред. Ю. П. Солнцева. – Санкт-Петербург: АНО НПО «Профессионал», АНО НПО «Мир и Семья», 2003. – 1066 с.

# Лабораторная работа №2 «МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТВЕРДОСТИ»

Составитель: Драчев В. В.

## 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Изучение методов измерения твердости.
2. Приобретение практических навыков измерения твердости различными методами.

## 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

### 2.1 Твердость и методы её измерения

Твердостью называют свойство материала оказывать сопротивление проникновению в его поверхность другого, более твердого тела. Измерение твердости вследствие быстроты и простоты осуществления, а также возможности без разрушения изделия судить о его свойствах получило широкое распространение для контроля качества металла в изделиях.

Существуют следующие методы измерения твердости: по Бринеллю (ГОСТ 9012-59), по Роквеллу (ГОСТ 9013-59), по Виккерсу (ГОСТ 2999-75), измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников (ГОСТ 9450-76), методом ударного отпечатка (ГОСТ 18661-73), методом упругого отскока бойка (ГОСТ 23273-78), измерение пластической твердости (ГОСТ 18835-73). Наибольшее распространение нашли первые три метода измерения твердости.

### 2.2 Измерение твердости по Бринеллю

При измерении твердости методом Бринелля шарик из закаленной стали или твердого сплава вдавливается в испытуемый образец (изделие) под действием нагрузки, приложенной в течение определенного времени (от 10 до 15 с для черных металлов и от 10 до 180 с для цветных). Диаметры применяемых шариков 1,0; 2,0; 2,5; 5 и 10 мм. Нагрузка выбирается в пределах от 9,8 Н (1 кгс) до 29420 Н (3000 кгс).

Число твердости по Бринеллю определяется путем деления нагрузки, при которой происходило вдавливание, на площадь поверхности отпечатка, оставшегося после снятия нагрузки, по формуле

$$HB = \frac{P}{F} = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}, \quad (1)$$

где  $P$  – нагрузка, кгс;

$F$  – площадь поверхности отпечатка, мм<sup>2</sup>;

$D$  – диаметр шарика, мм;

$d$  – диаметр отпечатка, мм.

Или, если нагрузка измеряется в ньютонах:

$$HB = \frac{0.102 \cdot P}{F} = \frac{0.102 \cdot 2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}. \quad (2)$$

Чтобы не производить каждый раз вычисления, на практике пользуются специально составленной таблицей (см. приложение).

Диаметр шарика и нагрузку выбирают по табл. 1 так, чтобы диаметр отпечатка находился в пределах от  $0,25$  до  $0,6D$ .

Поверхность образца для испытания должна быть свободна от окалины и других посторонних веществ. Толщина образца – не менее восьмикратной глубины отпечатка. Расстояние от центра отпечатка до края образца должно быть не менее  $2,5d$ , а между центрами двух соседних отпечатков – не менее  $4d$  ( $d$  – диаметр отпечатка, мм). Для мягких материалов ( $HB$  менее 35) соответственно  $3d$  и  $6d$ .

Твердость по Бринеллю измеряют приборами различных конструкций, отличающихся способом приложения нагрузки: механическим (вручную или от электромотора) или гидравлическим. Диаметр отпечатка измеряют с помощью отсчетного микроскопа, входящего в состав приборов, в двух взаимно перпендикулярных направлениях и вычисляют как среднее арифметическое двух измерений.

При измерении твердости шариком диаметром 10,0 мм с нагрузкой 29430 Н (3000 кгс) и выдержкой 10–15 с число твердо-

сти по Бринеллю обозначается цифрами, характеризующими величину твердости, и буквами НВ при применении стального шарика или НВW при применении шарика из твердого сплава.

**Например:** 400 НВ

Таблица 1

Параметры испытания при измерении твердости по Бринеллю

Металлы и сплавы	Интервал твердости <i>НВ</i>	Диаметр шарика <i>D</i> , мм	Нагрузка <i>P</i> , Н (кгс)
Сталь, чугун и др. высокопрочные сплавы	96-450	1,0	294,2 (30)
		2,0	1177 (120)
		2,5	1839 (187,5)
		5,0	7355 (750)
		10,0	29420 (3000)
Титан и его сплавы	50-220	10,0	14710 (1500)
Медь, алюминий и их сплавы	32-200	1,0	98,07 (10)
		2,0	392,3 (40)
		2,5	612,9 (62,5)
		5,0	2452 (250)
		10,0	9807 (1000)
Магний и его сплавы	16-100	1,0	49,03 (5)
		2,0	196,1 (20)
		2,5	306,0 (31,2)
		5,0	1226 (125)
		10,0	4903 (500)
Подшипниковые сплавы	8-50	1,0	24,52 (2,5)
		2,0	98,07 (10)
		2,5	153,0 (15,6)
		5,0	612,9 (62,5)
		10,0	2452 (250)
Свинец, олово и другие мягкие металлы	3,2-20	1,0	9,807 (1)
		2,0	39,23 (4)
		2,5	60,80 (6,2)
		5,0	245,2 (25)
		10,0	980,7 (100)

При других условиях измерения обозначение НВ (НВW) дополняется индексом, указывающим условия измерения в сле-

дующем порядке: диаметр шарика, нагрузка и продолжительность выдержки.

**Например:** 200 НВ 5/250/30 – число твердости по Бринеллю 200, испытание проводилось шариком диаметром 5,0 мм при нагрузке 2453 Н (250 кгс), приложенной в течение 30 с.

Достоинства метода Бринелля:

1. Высокая точность и хорошая воспроизводимость результатов измерения.

2. Существование зависимости между числом твердости по Бринеллю и временным сопротивлением при растяжении  $\sigma_b$ , МПа (для углеродистых сталей  $\sigma_b \approx 3,4$  НВ, для медных сплавов  $\sigma_b \approx 4,5$  НВ, для алюминиевых сплавов  $\sigma_b \approx 3,5$  НВ).

Недостатки метода:

1. При использовании стального шарика невозможно испытать материалы твердостью более 450 НВ (закаленные стали, белые чугуны).

2. Невозможность испытания твердости тонкого поверхностного слоя (менее 1 мм), а также изделий малых размеров.

3. После испытания остаются большие и глубокие отпечатки.

Таким образом, метод Бринелля используется для испытания материалов низкой и средней твердости – цветных металлов и их сплавов, незакаленных сталей. Метод применим для определения твердости неоднородных по структуре сплавов (чугуны, подшипниковые сплавы). Так как к поверхности испытываемых изделий не предъявляется высоких требований, метод Бринелля широко используется в цеховых условиях.

### 2.3 Измерение твердости по Роквеллу

При измерении твердости методом Роквелла в испытываемый образец или изделие вдавливаются алмазный конус с углом при вершине  $120^\circ$  или стальной закаленный шарик диаметром 1,588 и 3.175 мм под действием двух последовательно прилагаемых нагрузок: предварительной  $P_0$  и основной  $P_1$ . Общая нагрузка  $P = P_0 + P_1$ .

Твердость определяют по глубине внедрения наконечника в испытуемый образец, измеренной после снятия основной нагрузки при сохранении предварительной. За единицу твердости по Роквеллу принята условная величина, соответствующая осевому перемещению наконечника на 0,002 мм.

В зависимости от материала испытуемого образца твердость измеряют по девяти шкалам: А, С, D (используют алмазный конус), В, F, G (стальной шарик диаметром 1,588 мм), Е, Н, К (стальной шарик диаметром 3,175 мм). Чаще всего используют шкалы А, В и С (табл. 2).

Таблица 2

Параметры испытания при измерении твердости по Роквеллу

Обозначение		Наконечник	Нагрузка, Н (кгс)			Пределы измерения в единицах твердости по Роквеллу	Область применения
шкал	чисел твердости		$P_0$	$P_1$	$P$		
В	HRВ	Стальной шарик диаметром 1,588 мм	98 (10)	883 (90)	981 (100)	25-100	Цветные сплавы, не термообработанные стали
С	HRC	Алмазный конус	98 (10)	1373 (140)	1471 (150)	22-68	Твердые термообработанные стали
А	HRA	Алмазный конус	98 (10)	490 (50)	588 (60)	70-85	Сверхтвердые сплавы, тонкие поверхностные слои, тонколистовой материал

Поверхность образца для испытания может быть как плоской, так и криволинейной с радиусом кривизны не менее 15 мм. Поверхность должна быть свободна от окалины и других посторонних веществ, на ней не должно быть трещин, выбоин и т.п. Минимальная толщина образца должна быть не меньше десятикратной глубины внедрения наконечника после снятия основной нагрузки. Расстояние между центрами двух соседних отпечатков должно быть не менее 2 мм, от центра отпечатка до края образца – не менее 1 мм.

Твердость измеряют на приборах с ручным или электрическим приводом. Результаты испытания читаются прямо по шкале прибора, без дополнительных измерений. На каждом образце должно быть произведено не менее трех испытаний.

Твердость по Роквеллу обозначают цифрами, характеризующими величину твердости, и буквами HR с указанием шкалы твердости.

**Например:** 50 HRC – твердость по Роквеллу 50, определенная по шкале С.

К достоинствам метода Роквелла относятся:

1. Возможность испытания как мягких, так и твердых материалов.
2. Быстрота измерения.
3. Сохранение качественной поверхности после испытания, так как отпечаток имеет небольшие размеры.

Недостатки метода:

1. Безразмерность и условность чисел твердости, что затрудняет их перевод в другие величины твердости или прочности при растяжении.
2. Менее удовлетворительная, чем у метода Бринелля, повторяемость результатов измерений.
3. Невозможность измерения твердости очень тонких слоев металла (менее 0,3 мм).
4. Метод не рекомендуют применять для определения твердости неоднородных по структуре сплавов (например чугуна).

Несмотря на указанные недостатки, метод Роквелла, благодаря своей скорости и простоте, нашел самое широкое применение.

ние в промышленности для контроля твердости готовых штучных деталей.

## 2.4 Измерение твердости по Виккерсу

Измерение твердости методом Виккерса основано на вдавлении алмазной четырехгранной пирамиды с углом при вершине  $136^\circ$  в образец (изделие) под действием нагрузки, приложенной в течение определенного времени (обычно 10-15 с). Нагрузка выбирается в пределах от 9,8 Н (1 кгс) до 980,7 (100 кгс).

Твердость по Виккерсу вычисляют путем деления нагрузки на площадь поверхности отпечатка, оставшегося на образце, по формуле

$$HV = \frac{P}{F} = \frac{2P \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2} = 1.854 \frac{P}{d^2}, \quad (3)$$

где  $P$  – нагрузка, кгс;

$F$  – площадь поверхности отпечатка,  $\text{мм}^2$ ;

$\alpha$  – угол между противоположными гранями пирамиды при вершине, равный  $136^\circ$ ;

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

Или, если нагрузка измеряется в ньютонах:

$$HV = \frac{0.102 \cdot 2P \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2} = 0.189 \frac{P}{d^2}. \quad (4)$$

Нагрузку выбирают в зависимости от толщины образца и его примерной твердости по табл. 3.

Поверхность используемого образца должна быть тщательно отшлифована (шероховатость  $Ra$  не более 0,16 мкм), на ней не должно быть окисных пленок и других посторонних веществ. Радиус кривизны поверхности не менее 5 мм. Минимальная толщина стальных образцов должна быть больше диагонали отпечатка в 1,2 раза, а образцов из цветных металлов – в 1,5 раза. Расстоя-

ние между центром отпечатка и краем образца или краем соседнего отпечатка – не менее 2,5 длины диагонали отпечатка.

Таблица 3

Нагрузка при измерении твердости по Виккерсу

Толщина образца или поверхностного слоя, мм	Наибольшая допустимая нагрузка, Н (кгс), при твердости					
	100	200	400	600	800	1000
0,1	-	-	9,8(1)	9,8(1)	9,8(1)	19,6(2)
0,2	9,8(1)	9,8(1)	19,6(2)	49,0(5)	49,0(5)	98,1(10)
0,3	9,8(1)	19,6(2)	49,0(5)	98,1(10)	98,1(10)	196,1(20)
0,4	19,6(2)	49,0(5)	98,1(10)	196,1(20)	294,2(30)	294,2(30)
0,5	49,0(5)	98,1(10)	196,1(20)	294,2(30)	294,2(30)	490,3(50)
0,6	49,0(5)	98,1(10)	294,2(30)	490,3(50)	490,3(50)	490,3(50)
0,7	98,1(10)	196,1(20)	294,2(30)	490,3(50)	490,3(50)	980,7(100)
0,8	98,1(10)	294,2(30)	490,3(50)	490,3(50)	980,7(100)	980,7(100)
0,9	98,1(10)	294,2(30)	490,3(50)	980,7(100)	980,7(100)	980,7(100)
1,0	196,1(20)	294,2(30)	490,3(50)	980,7(100)	980,7(100)	980,7(100)
>1,0	980,7(100)	980,7(100)	980,7(100)	980,7(100)	980,7(100)	980,7(100)

Приборы для измерения твердости по Виккерсу имеют встроенный микроскоп или проекционную оптическую систему, с помощью которых измеряют длины диагоналей отпечатка.

Твердость по Виккерсу при испытании под нагрузкой 294,2 Н (30 кгс) и временем выдержки под нагрузкой 10–15 с обозначает-

ся цифрами, характеризующими величину твердости, и буквами HV.

*Например:* 500 HV.

При других условиях испытания после букв HV указывается нагрузка и время выдержки.

*Например:* 220 HV 10/30 – число твердости 220, полученное при нагрузке 98,1 Н (10 кгс) и времени выдержки 30 с.

Достоинства метода:

1. Возможность измерения твердости как мягких, так и сверхтвердых материалов с высокой точностью.

2. Возможность определения твердости тонких (до 0,3 мм) деталей и очень тонких (до 0,03 мм) поверхностных слоев металла.

3. Очень малые размеры отпечатка.

Недостатки метода:

1. Большая длительность и трудоемкость процесса измерения твердости.

2. Очень высокие требования к качеству поверхности образца.

3. Сравнительная сложность и дороговизна приборов для определения твердости.

Указанные недостатки препятствуют широкому использованию метода Виккерса в цеховых условиях. В основном он применяется для тонкого контроля металлов и сплавов в лабораториях.

### **3. ОБОРУДОВАНИЕ, ИНСТРУМЕНТ, МАТЕРИАЛЫ**

1. Прибор для определения твердости по Бринеллю.

2. Прибор для определения твердости по Роквеллу.

3. Прибор для определения твердости по Виккерсу.

4. Шлифовальный станок.

5. Образцы для испытания.

#### 4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАНЯТИЯ

1. Подготовить образцы к испытанию.
2. Выбрать параметры испытания по табл. 1, 2, 3.
3. Измерить твердость методом Бринелля.
4. Измерить твердость методом Роквелла.
5. Измерить твердость методом Виккерса.

#### 5. ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать:

1. Наименование и цель практического занятия.
2. Краткое изложение основных теоретических положений.
3. Результаты испытаний на твердость, сведенные в табл. 4.
4. Выводы о соответствии между значениями твердости, полученными различными методами (использовать приложение).

Таблица 4

Результаты испытаний

№ образца	Материал и тер-мообработка	Твердость по Бринеллю				Твердость по Роквеллу				Твердость по Виккерсу			
		d <sub>1</sub> , мм	d <sub>2</sub> , мм	d <sub>ср</sub> , мм	число твердости	1	2	3	среднее значение	d <sub>1</sub> , мм	d <sub>2</sub> , мм	d <sub>ср</sub> , мм	число твердости

#### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как проводят измерение твердости методом Бринелля?
2. Какие недостатки имеет метод Бринелля?
3. Как измеряют твердость методом Роквелла?
4. Перечислите основные достоинства и недостатки метода Роквелла.
5. Как определяют твердость по Виккерсу?

6. Какие преимущества имеет метод измерения твердости по Виккерсу по сравнению с методами Бринелля и Роквелла?

### **СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Материаловедение: учебник для студентов вузов / под ред. Б. Н. Арзамасова, Г. Г. Мухина. – Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – 648 с.

2. Материаловедение: учебник для вузов / Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева. – Москва: Альянс, 2009. – 528 с.

Приложение

Соотношение между значениями твердости,  
измеряемыми различными методами

Твердость по Бринеллю HB		Твердость по Роквеллу			Твердость по Виккерсу HV	
диаметр отпечатка, мм	число твердости	HRB	HRC	HRA	диагональ отпечатка, мм	число твердости
2,30	712	-	68	86	0,233	1022
2,35	682	-	66	85	0,243	941
2,40	653	-	64	84	0,253	868
2,45	627	-	62	83	0,263	804
2,50	601	-	60	82	0,273	746
2,55	578	-	58	81	0,283	694
2,60	555	-	56	79	0,293	649
2,65	534	-	54	78	0,303	606
2,70	514	-	52	77	0,308	587
2,75	495	-	50	76	0,318	551
2,80	477	-	49	76	0,323	534
2,85	461	-	48	75	0,333	502
2,90	444	-	46	74	0,343	473
2,95	429	-	45	73	0,348	460
3,00	415	-	44	72	0,358	435
3,05	401	-	42	71	0,368	412
3,10	388	-	41	71	0,373	401
3,15	375	-	40	70	0,378	390
3,20	363	-	39	70	0,383	380
3,25	352	-	38	-	0,393	361
3,30	341	-	37	-	0,402	344
3,35	331	-	36	-	0,408	335
3,40	321	-	35	-	0,417	320
3,45	311	-	34	-	0,422	312
3,50	302	-	33	-	0,427	305
3,55	293	-	31	-	0,437	291

Продолжение приложения

Твердость по Бринеллю HB		Твердость по Роквеллу			Твердость по Виккерсу HV	
диаметр отпечат- ка, мм	число твердо- сти	HRB	HRC	HRA	диаго- наль от- печатка, мм	число твердо- сти
3,60	285	-	30	-	0,442	285
3,35	277	-	29	-	0,447	278
3,70	269	-	28	-	0,452	272
3,75	262	-	27	-	0,462	261
3,80	255	-	26	-	0,467	255
3,85	248	-	25	-	0,472	250
3,90	241	100	24	-	0,481	240
3,95	235	99	23	-	0,487	235
4,00	229	98	22	-	0,496	226
4,05	223	97	-	-	0,502	221
4,10	217	97	-	-	0,506	217
4,15	212	96	-	-	0,511	213
4,20	207	95	-	-	0,516	209
4,25	201	94	-	-	0,526	201
4,30	197	93	-	-	0,531	197
4,35	192	92	-	-	0,541	190
4,40	187	91	-	-	0,547	186
4,45	183	89	-	-	0,551	183
4,50	179	88	-	-	0,561	177
4,55	174	87	-	-	0,565	174
4,60	170	86	-	-	0,570	171
4,65	167	85	-	-	0,581	165
4,70	163	84	-	-	0,586	162
4,75	159	83	-	-	0,591	159
4,80	156	82	-	-	0,601	154
4,85	152	81	-	-	0,605	152
4,90	149	80	-	-	0,611	149
4,95	146	78	-	-	0,615	147
5,00	143	76	-	-	0,622	144

Продолжение приложения

Твердость по Бринеллю HB		Твердость по Роквеллу			Твердость по Виккерсу HV	
диаметр отпечатка, мм	число твердости	HRB	HRC	HRA	диагональ отпечатка, мм	число твердости
5,05	140	76	-	-	-	-
5,10	137	75	-	-	-	-
5,15	134	74	-	-	-	-
5,20	131	72	-	-	-	-
5,25	128	71	-	-	-	-
5,30	126	69	-	-	-	-
5,35	123	69	-	-	-	-
5,40	121	67	-	-	-	-
5,45	118	66	-	-	-	-
5,50	116	65	-	-	-	-
5,55	114	64	-	-	-	-
5,60	111	62	-	-	-	-
5,65	109	61	-	-	-	-
5,70	107	59	-	-	-	-
5,75	105	58	-	-	-	-
5,80	103	57	-	-	-	-
5,85	101	56	-	-	-	-
5,90	99,2	54	-	-	-	-
5,95	97,3	53	-	-	-	-
6,00	95,5	52	-	-	-	-

Примечания:

1. Числа твердости по Бринеллю получены при нагрузке 29430 Н (3000 кгс) и шарике диаметром 10 мм.

2. Числа твердости по Виккерсу получены при нагрузке 294,2 Н (30 кгс).

# Лабораторная работа №3 «МИКРОСТРУКТУРА, СВОЙСТВА И МАРКИРОВКА УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ»

Составители: Драчев В. В., Петренко К. П.

## 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение классификации, микроструктуры, маркировки, свойств и области применения углеродистых сталей.

## 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

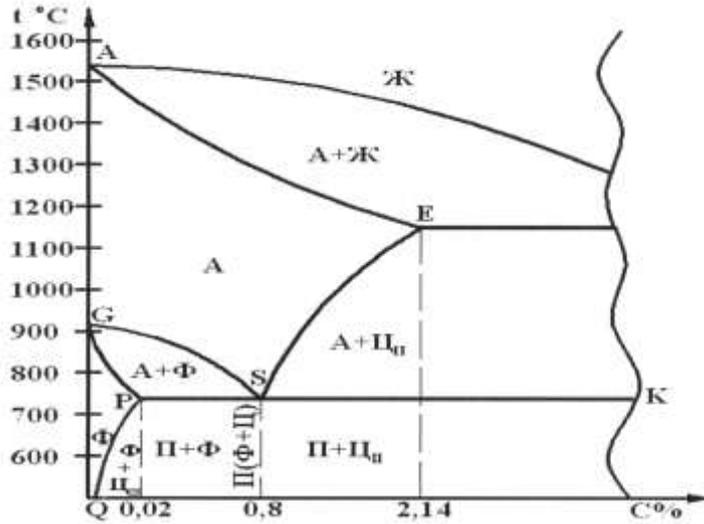
Углеродистые стали – это сплавы железа и углерода, содержащие не более 2,14 % углерода. Кроме этого стали содержат примеси: постоянные и случайные. К постоянным примесям относят марганец (до 0,8 %), кремний (до 0,4 %), серу (до 0,05 %), фосфор (до 0,04 %) и газы: азот, кислород и водород (тысячные доли процента). Их наличие обусловлено технологическими особенностями производства стали (марганец, кремний) или невозможностью полного удаления из металла (сера, фосфор, газы). Случайные примеси (хром, никель, медь и др.) попадают в сталь из-за того, что они содержатся в рудах данного географического района или связаны с определённым технологическим процессом производства.

### 2.1. Фазы и структурные составляющие в системе железо-углерод

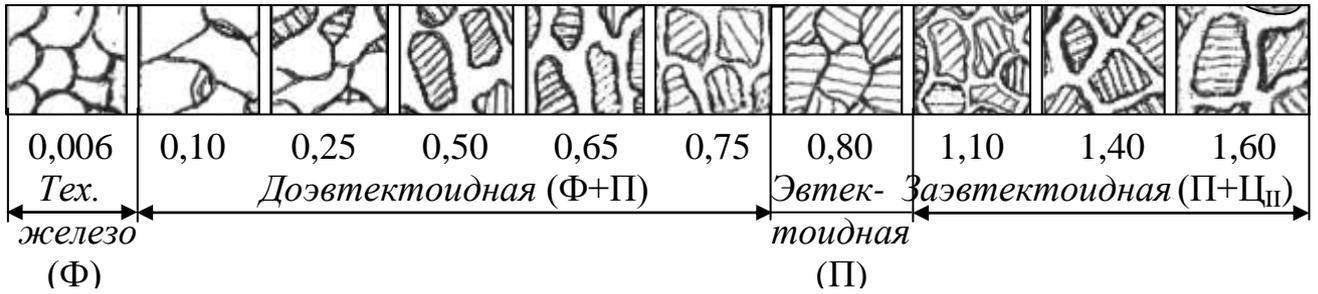
В системе железо-углерод различают следующие фазы: жидкий сплав, феррит, аустенит, цементит и графит (в сталях отсутствует).

Феррит – твердый раствор внедрения углерода в  $\alpha$ -железе. Кристаллическая решетка – кубическая объемно-центрированная. Феррит существует в области QPG диаграммы Fe-Fe<sub>3</sub>C (рис. 1, а). Максимальное содержание углерода в нём составляет 0,02 % при температуре 727 °С. При температуре 20 °С в феррите содержится 0,006 % углерода. Механические свойства феррита:  $\sigma_B=250$  МПа,  $\delta=50\%$ ,  $\psi=80\%$ , 80-100 НВ.

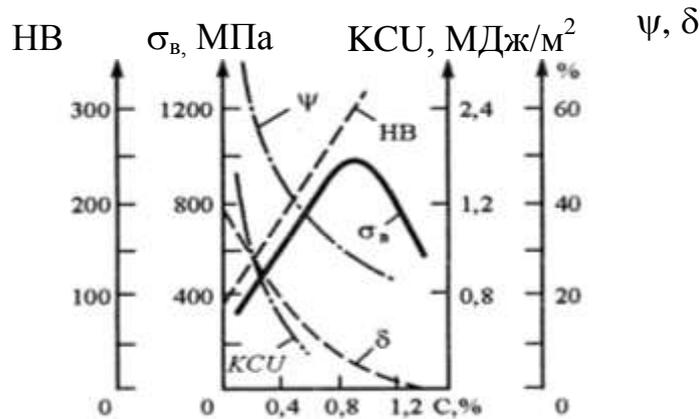
Аустенит – твердый раствор внедрения углерода в  $\gamma$ -железе. Решетка – кубическая гранецентрированная. Аустенит существует в области AESG (рис.1, а). Максимальная растворимость углерода 2,14 % при температуре 1147 °С. Аустенит имеет следующие



а



б



в

Рис. 1. Часть диаграммы состояния Fe-Fe<sub>3</sub>C (а), микроструктура (б) и механические свойства углеродистых сталей в отожженном равновесном состоянии (в)

механические свойства:  $\sigma_{\text{в}} = 500\text{--}800$  МПа,  $\delta = 50$  %, 160-200 НВ.

Цементит – химическое соединение железа с углеродом, карбид железа  $\text{Fe}_3\text{C}$ . Содержание углерода в цементите 6,67 %. Механические свойства:  $\delta = 0$  %, 800 НВ.

Структурные составляющие системы железо-углерод: перлит и ледебурит. В структуре сталей ледебурит отсутствует.

Перлит – эвтектоидная механическая смесь двух фаз: феррита и цементита. Образуется из аустенита при температуре 727 °С. Содержание углерода в перлите 0,8 %. Цементит, входящий в состав перлита, может иметь форму пластин и глобулей (зерен). Поэтому различают перлит пластинчатый и зернистый. Механические свойства пластинчатого перлита:  $\sigma_{\text{в}} = 820\text{--}900$  МПа,  $\delta = 15$  %, 180-220 НВ. Зернистый перлит по сравнению с пластинчатым имеет пониженную твердость и прочность, но повышенную пластичность.

## 2.2. Микроструктура углеродистых сталей

Углеродистые стали в соответствии с диаграммой Fe-Fe<sub>3</sub>C (рис. 1, а, б) по содержанию углерода и по структуре подразделяют на доэвтектоидные (содержат 0,02–0,8 % углерода), эвтектоидные (0,8 % углерода), заэвтектоидные (0,8–2,14 % углерода). Сплавы, содержащие менее 0,02 % углерода, называются техническим железом.

Микроструктура технического железа – феррит.

Микроструктура доэвтектоидной стали состоит из перлита и феррита. С увеличением содержания углерода в стали количество перлита увеличивается. Содержание углерода в доэвтектоидной стали определяют по формуле

$$\tilde{N} = \frac{0,8F_n}{100}, \quad (1)$$

где  $F_n$  – площадь, занятая перлитом на шлифе, %;

0,8 – содержание углерода в перлите.

При просмотре шлифа количество перлита определяют визуально методом сравнения с эталоном шкалы ГОСТ 8233-56

(рис. 2) либо методами количественной металлографии.

Микроструктура эвтектоидной стали – пластинчатый перлит.

Микроструктура заэвтектоидной стали состоит из пластинчатого перлита и вторичного цементита, который выделяется в виде сетки по границам перлитных зерен. Содержание углерода в заэвтектоидной стали можно определить по формуле

$$C = \frac{0,8F_n + 6,67F_{ц}}{100}, \quad (2)$$

где  $F_n$  – площадь, занятая перлитом, %;

0,8 – содержание углерода в перлите;

$F_{ц}$  – площадь, занятая цементитом, %;

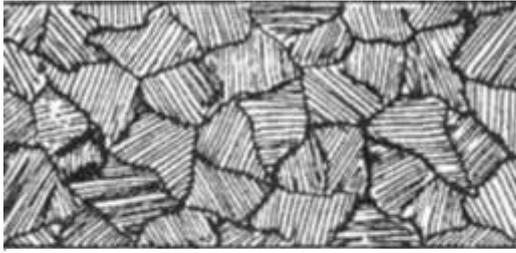
6,67 – содержание углерода в цементите.

### **2.3. Влияние углерода и постоянных примесей на свойства сталей**

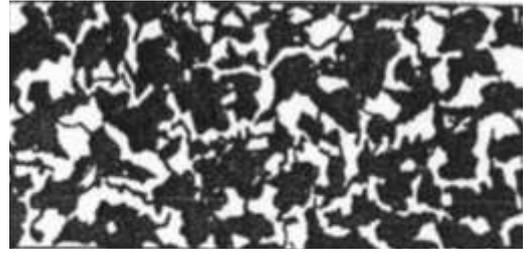
Углерод повышает твердость и прочность (при содержании до 1%), но снижает пластичность и вязкость стали (рис. 1, в). Он влияет и на технологические свойства. С увеличением содержания углерода снижается способность стали деформироваться в горячем и особенно в холодном состояниях, ухудшаются литейные свойства и свариваемость.

Марганец и кремний являются полезными примесями. Марганец повышает прочность стали, не снижая пластичности, увеличивает прокаливаемость, уменьшает красноломкость (хрупкость при высоких температурах). Кремний упрочняет сталь, но снижает её пластичность.

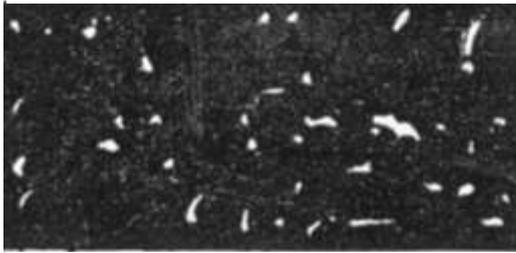
Сера, фосфор и газы (азот, кислород, водород) – вредные примеси. Сера снижает пластичность и вязкость стали, придаёт ей красноломкость, ухудшает свариваемость и коррозионную стойкость. Фосфор также снижает пластичность и вязкость, вызывает хладноломкость стали (охрупчивание при пониженных температурах). Вредное влияние газов проявляется в снижении пластичности и повышении склонности стали к хрупкому разрушению.



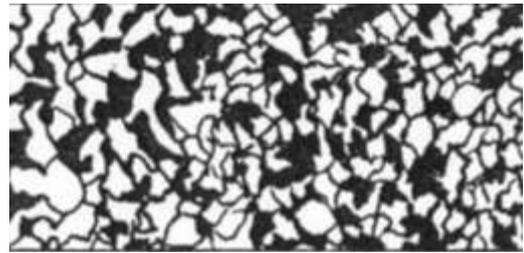
100 : 0



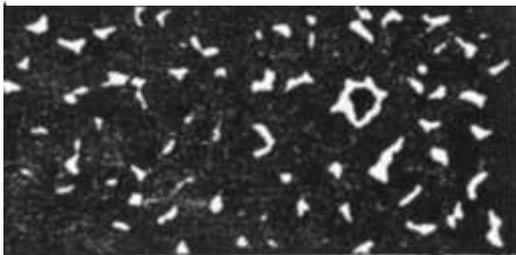
50 : 50



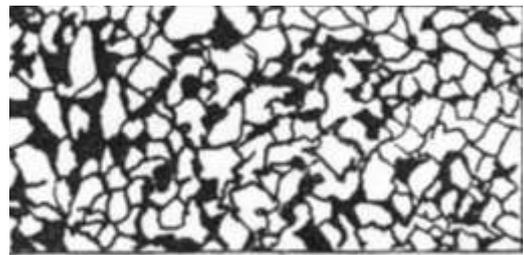
95 : 5



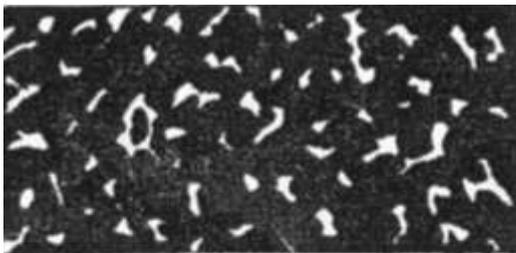
35 : 65



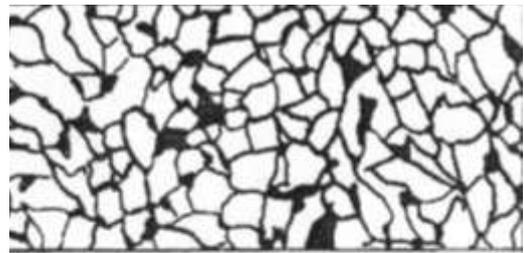
85 : 15



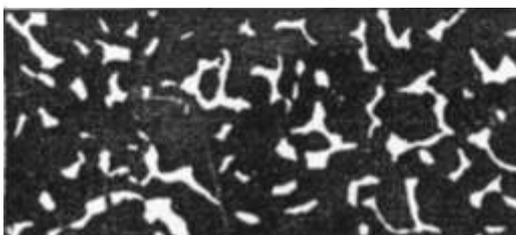
20 : 80



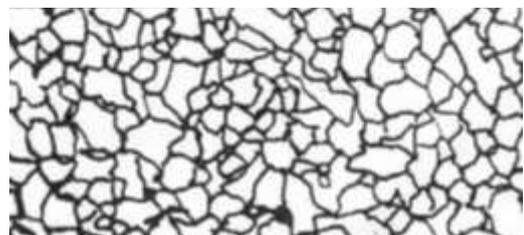
75 : 25



5 : 95



65 : 35



0 : 100

Рис. 2. Эталоны микроструктуры стали (ГОСТ 8233–56)

## 2.4. Классификация углеродистых сталей

Углеродистые стали классифицируют по содержанию углерода, качеству, способу производства, степени раскисления, структуре и назначению.

По содержанию углерода стали делят на низкоуглеродистые (содержат менее 0,3 % углерода), среднеуглеродистые (0,3–0,6 % углерода) и высокоуглеродистые (более 0,6 % углерода).

По качеству (содержанию вредных примесей: серы и фосфора) углеродистые стали классифицируют на стали обыкновенного качества (содержат не более 0,05 % серы и не более 0,04 % фосфора), качественные (не более 0,04 % серы и 0,035 % фосфора) и высококачественные (не более 0,025 % серы и 0,025 % фосфора).

По способу производства различают стали выплавленные в электропечах, мартеновских печах и в кислородных конвертерах.

По степени раскисления стали подразделяют на спокойные, полуспокойные и кипящие. Раскисление – процесс удаления из жидкой стали кислорода, который уменьшает её прочность, пластичность и вязкость. Спокойные стали получают полным раскислением марганцем, кремнием и алюминием. Они содержат мало кислорода и затвердевают спокойно без газовыделения. Кипящие стали раскисляют только марганцем. В них содержится повышенное количество кислорода, который при затвердевании, взаимодействуя с углеродом, образует газ CO. Выделение пузырьков CO создает впечатление кипения стали. Спокойная сталь обладает лучшими свойствами, но является более дорогой. Полуспокойные стали (раскисляют марганцем и кремнием) занимают промежуточное положение между спокойными и кипящими.

По структуре стали разделяют на доэвтектоидные (структура – феррит и перлит), эвтектоидные (перлит) и заэвтектоидные (перлит и цементит).

По назначению углеродистые стали делят на конструкционные (предназначены для изготовления деталей машин, конструкций и сооружений) и инструментальные (для изготовления различного инструмента).

## **2.5. Маркировка углеродистых сталей**

### **2.5.1. Углеродистые конструкционные стали обыкновенного качества (ГОСТ 380-2005)**

Это самые дешевые конструкционные стали. В процессе выплавки они меньше всех очищаются от вредных примесей.

Стали обыкновенного качества маркируют буквами «Ст» (Сталь) и цифрами от 0 до 6, которые означают условный номер марки. Чем больше номер стали, тем больше в ней содержание углерода и, следовательно, выше прочность и ниже пластичность. Буква «Г» означает марганец при его содержании в стали более 0,8 %. Степень раскисления указывают буквами: «сп» – спокойная, «пс» – полуспокойная, «кп» – кипящая. Сталь Ст0 по степени раскисления не разделяют, в ней регламентируют только содержание углерода (не более 0,23 %), серы (до 0,06 %) и фосфора (до 0,07 %).

**Например:** Ст3кп – сталь углеродистая обыкновенного качества, номер 3, кипящая.

Из сталей обыкновенного качества изготавливают горячекатаный прокат: балки, швеллеры, уголки, а также листы и трубы. Их широко применяют в строительстве для сварных, клепаных и болтовых конструкций, реже для изготовления малонагруженных деталей машин (валы, оси, звёздочки и т. д.).

### **2.5.2. Углеродистые конструкционные качественные стали (ГОСТ 1050-88)**

К таким сталям предъявляются более высокие требования по содержанию вредных примесей (серы не более 0,04 %, фосфора не более 0,035 %), а также по неметаллическим включениям. Качественные углеродистые конструкционные стали маркируют числами: 08, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 58, 60, которые указывают среднее содержание углерода в сотых долях процента. Степень раскисления обозначают: кипящую – «кп», полуспокойную – «пс», спокойную – без индекса.

**Например:** сталь 15 – углеродистая конструкционная качественная, содержит в среднем 0,15 % углерода, спокойная.

Качественные конструкционные стали широко применяют для изготовления самых разнообразных деталей машин во всех отраслях машиностроения.

### **2.5.3. Углеродистые инструментальные стали (ГОСТ 1438-99)**

Эти стали выпускаются качественными (содержание серы не более 0,028 %, фосфора не более 0,03 %) и высококачественными (серы не более 0,018 %, фосфора не более 0,025 %).

Углеродистые инструментальные стали маркируют буквой «У» (углеродистая) и числом, показывающим среднее содержание углерода в десятых долях процента. Буква «А» в конце марки указывает на то, что сталь высококачественная. Буква «Г» означает повышенное содержание марганца (0,33–0,58 %).

**Например:** У10А – углеродистая инструментальная сталь, содержащая в среднем 1 % углерода, высококачественная.

Углеродистые инструментальные стали используют для изготовления измерительных инструментов (калибры простой формы), небольших штампов холодной высадки и вытяжки, режущих инструментов (мелкие метчики, сверла, напильники, пилы и др.), работающих при небольших скоростях резания.

## **3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАНЯТИЯ**

1. Просмотреть коллекцию микрошлифов с помощью металлографического микроскопа.
2. Определить содержания углерода в сталях, используя формулы (1) и (2).
3. По содержанию углерода определить марку сталей.
4. Используя приложения, определить химический состав, механические свойства и область применения каждой стали.

## **4. ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА**

Отчёт должен содержать:

1. Наименование и цель практического занятия.
2. Краткое изложение основных теоретических положений.
3. Результаты выполнения занятия, сведенные в таблицу.

## 5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение фаз в системе Fe-Fe<sub>3</sub>C.
2. Что такое перлит?
3. Опишите структуру технического железа, доэвтектоидной, эвтектоидной, заэвтектоидной сталей.
4. Как определяют содержание углерода в сталях по микроструктуре?
5. Назовите постоянные примеси в углеродистых сталях.
6. Как влияет углерод и постоянные примеси на свойства сталей?
7. Как классифицируют стали по содержанию углерода?
8. Как маркируют углеродистые инструментальные стали?

## СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лахтин, Ю. М. Материаловедение / Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева. – Москва: Машиностроение, 1990. – 380 с.
2. Арзамасов, Б. Н. Материаловедение / Б. Н. Арзамасов. – Москва: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. – 646 с.
3. Материаловедение / под ред. Б. Н. Арзамасова. – Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 648 с.
4. Марочник сталей и сплавов / под ред. В. Г. Сорокина. – Москва: Машиностроение, 1989. – 640 с.
5. Марочник сталей и сплавов / под ред. А. С. Зубченко. – Москва: Машиностроение, 2001. – 672 с.
6. ГОСТ 1435-99. Прутки, полосы и мотки из инструментальной нелегированной стали. Общие технические условия. – Москва: Изд-во стандартов, 2001. – 21 с.
7. ГОСТ 380-2005. Сталь углеродистая обыкновенного качества. Марки. – МОСКВА: Стандартинформ, 2007. – 7 с.
8. ГОСТ 1050-88. Прокат сортовой, калиброванный со специальной отделкой поверхности из углеродистой качественной конструкционной стали. Общие технические условия. – Москва: Изд-во стандартов, 1989. – 29 с.

Таблица

Оформление отчета

Номер шлифа	Микроструктура Рисунок	Химический состав, % Название	Химический состав, %					Марка стали	Механические свойства			Область применения
			C	Mn	Si	S	P		НВ	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	

---

Химический состав (ГОСТ 380-2005) и механические свойства горячекатаного проката из конструкционной углеродистой стали обыкновенного качества

Марка стали	Химический состав, %					Механические свойства		Область применения
	C	Mn	Si	S	P	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	
Ст0	$\leq 0,23$	-	-	$\leq 0,06$	$\leq 0,07$	$\geq 300$	23	Неответственные строительные конструкции, прокладки, шайбы
Ст1кп	0,06–0,12	0,25–0,90	$\leq 0,05$	не более 0,05	не более 0,04	300–390	35	Малонагруженные детали: заклепки, шайбы, прокладки, кожухи
Ст1пс	0,06–0,12	0,25–0,50	0,05–0,15			310–410	34	
Ст1сп	0,06–0,12	0,25–0,50	0,15–0,30			310–410	34	
Ст2кп	0,09–0,15	0,25–0,50	$\leq 0,05$			320–410	33	Детали металлоконструкций: рамы, оси, валики
Ст2пс	0,09–0,15	0,25–0,50	0,05–0,15			330–430	32	
Ст2сп	0,09–0,15	0,25–0,50	0,15–0,30			330–430	32	
Ст3кп	0,14–0,22	0,40–0,65	$\leq 0,05$			360–460	27	

Марка стали	Химический состав, %				Механические свойства		Область применения	
	С	Mn	Si	S	P	$\sigma_{в}$ , МПа		$\delta$ , %
Ст3сп	0,14– 0,22	0,40– 0,65	0,15– 0,30	не более 0,05	не более 0,04	370–480	26	Рамы, крюки кранов, кольца, цилиндры, крышки, цементируемые детали
Ст3Гпс	0,14– 0,22	0,80– 1,10	$\leq 0,15$			370–490	26	
Ст3Гсп	0,14– 0,20	0,80– 1,10	0,15– 0,30			390–570	26	
Ст4кп	0,18– 0,27	0,40– 0,70	$\leq 0,05$			400–510	25	Валы, оси, тяги, пальцы, крюки, болты, гайки при невысоких требованиях к прочности
Ст4пс	0,18– 0,27	0,40– 0,70	0,05– 0,15			410–530	24	
Ст4сп	0,18– 0,27	0,40– 0,70	0,15– 0,30			410–530	24	
Ст5сп	0,28– 0,37	0,50– 0,80	0,05– 0,15			490–630	20	Валы, оси, звездочки, крепежные детали при повышенных требованиях к прочности
Ст5сп	0,28– 0,37	0,50– 0,80	0,15– 0,30			490–630	20	
Ст5Гпс	0,22– 0,30	0,80– 1,20	$\leq 0,15$			540–590	20	
Ст6пс	0,38– 0,49	0,50– 0,80	0,05– 0,15			$\geq 590$	15	Валы, оси, муфты, цепи с высокой прочностью

Химический состав и свойства углеродистых качественных конструкционных сталей в нормализованном состоянии (ГОСТ 1050–88)

Марка стали	Химический состав, %					Механические свойства			Область применения
	C	Mn	Si	S	P	НВ	$\sigma_{в}$ , МПа	$\delta$ , %	
						не более	не менее		
08	0,05–0,12	0,35–0,65	0,17–0,37	не более 0,040	не более 0,035	131	320	33	Шайбы, патрубки, прокладки
10	0,07–0,14	0,35–0,65				143	330	31	Шайбы, прокладки, трубы
15	0,12–0,19	0,35–0,65				149	370	27	Без ТО – болты, винты, крепеж. После ХТО – рычаги, кулачки
20	0,17–0,24	0,35–0,65				163	410	25	Без ТО – крюки кранов и муфты. После ХТО – шестерни, червяки
25	0,22–0,30	0,50–0,80				170	450	23	Без ТО – оси, валы, соединительные муфты. После ХТО – винты, втулки
30	0,27–0,35	0,50–0,80				179	490	21	Тяги, траверсы, рычаги, звездочки, шпиндели

Марка стали	Химический состав, %					Механические свойства			Область применения
	C	Mn	Si	S	P	НВ	$\sigma_{в}$ , МПа	$\delta$ , %	
						не более	не менее		
35	0,32–0,40	0,50–0,80	0,17–0,37	не более 0,040	не более 0,035	207	530	20	Оси, цилиндры, коленчатые валы, шатуны
40	0,37–0,45					217	570	19	Коленчатые валы, шатуны, зубчатые венцы, оси
45	0,42–0,50					229	600	16	Вал-шестерни, коленчатые и распределительные валы, шпиндели
50	0,47–0,55					241	630	14	Прокатные валки, штоки, оси, бандажи
55	0,52–0,60					255	650	13	Зубчатые колеса, муфты сцепления короб передач
60	0,57–0,65					255	680	12	Колеса вагонов, диски сцепления, шпиндели

Химический состав и свойства углеродистых инструментальных сталей после отжига  
(ГОСТ 1435-99)

Марка стали	Химический состав, %					Механические свойства			Область применения
	С	Mn	Si	S	P	НВ	$\sigma_{в}$ , МПа	$\delta$ , %	
				не более					
У7	0,65–0,74	0,17-0,33	0,17–0,33	0,028	0,030	187	650	не определяется ГОСТом	Инструмент для обработки дерева: топоры, колуны, стамески
У7А	0,65–0,74	0,17-0,28		0,018	0,025	187	650		
У8	0,75–0,84	0,17-0,33		0,028	0,030	187	650		Инструмент для обработки дерева: фрезы, зенковки, пилы продольные и дисковые. Слесарно-монтажный инструмент: отвертки, кернеры, плоскогубцы, кусачки
У8А	0,75–0,84	0,17-0,28		0,018	0,025	187	650		
У8Г	0,80–0,90	0,33-0,58		0,028	0,030	187	650		
У8ГА	0,80–0,90	0,33-0,58		0,018	0,025	187	650		

Марка стали	Химический состав, %					Механические свойства			Область применения
	C	Mn	Si	S	P	НВ	$\sigma_{в}$ , МПа	$\delta$ , %	
				не более	не более		не более		
У9	0,85–0,94	0,17-0,33	0,17–0,33	0,028	0,030	192	650	не определяется ГОСТом	Инструмент для обработки дерева: фрезы, зенковки, пилы продольные и дисковые. Слесарно-монтажный инструмент: отвертки, кернеры, плоскогубцы, кусачки
У9А	0,85–0,94	0,17-0,28		0,018	0,025	192	650		
У10	0,75–0,84	0,17-0,33		0,028	0,030	212	750		Инструмент для обработки дерева: пилы ручные, сверла спиральные
У10А	0,95–1,09	0,17-0,28		0,018	0,025	212	750		
У12	1,10–1,29	0,17-0,33		0,028	0,030	217	750		Метчики, напильники, шаберы и штамповый инструмент для холодной деформации
У12А	1,10–1,29	0,17-0,28		0,018	0,025	217	750		

# Лабораторная работа №4 «МИКРОСТРУКТУРА И СВОЙСТВА ЧУГУНОВ»

Составитель: С. В. Лащинуна

## 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение микроструктуры белых, серых, высокопрочных и ковких чугунов. Установление зависимости между структурой и механическими свойствами чугунов. Ознакомление с маркировкой и применением серых, высокопрочных и ковких чугунов.

## 2. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

*Чугунами* называются железоуглеродистые сплавы с повышенным (более 2,14 % С) содержанием углерода. Повышенное количество углерода в составе чугунов приводит либо к образованию в структуре сплава твердой и хрупкой эвтектики в соответствии с диаграммой Fe-Fe<sub>3</sub>C, либо к появлению свободного углерода в виде графита в результате процесса графитизации (табл. 1).

Образование кристаллов графита (графитизация чугуна) зависит в основном *от двух условий*: скорости охлаждения и наличия в чугуне «графитизирующих» примесей Si, Ni, Al и др. Препятствуют графитизации быстрое охлаждение и наличие карбидообразующих примесей Mn, Cr и др., а также серы. Для расчета шихты при выплавке чугуна пользуются структурными диаграммами, простейшие из которых представлены на рис. 1, а, б.

Так как графит содержит 100 % углерода, а цементит всего 6,67 %, то следует заключить, что жидкая фаза и аустенит по составу более близки к цементиту, чем к графиту, и поэтому образование цементита из жидкой фазы и аустенита должно протекать легче, чем графита, что и наблюдается по диаграмме Fe-Fe<sub>3</sub>C.

## 3. СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ЧУГУНОВ, КЛАССИФИКАЦИЯ И МАРКИРОВКА

Из диаграммы рис. 1 следует, что в зависимости от скорости охлаждения и содержания углерода и кремния можно получить чугуны разных структурных классов.

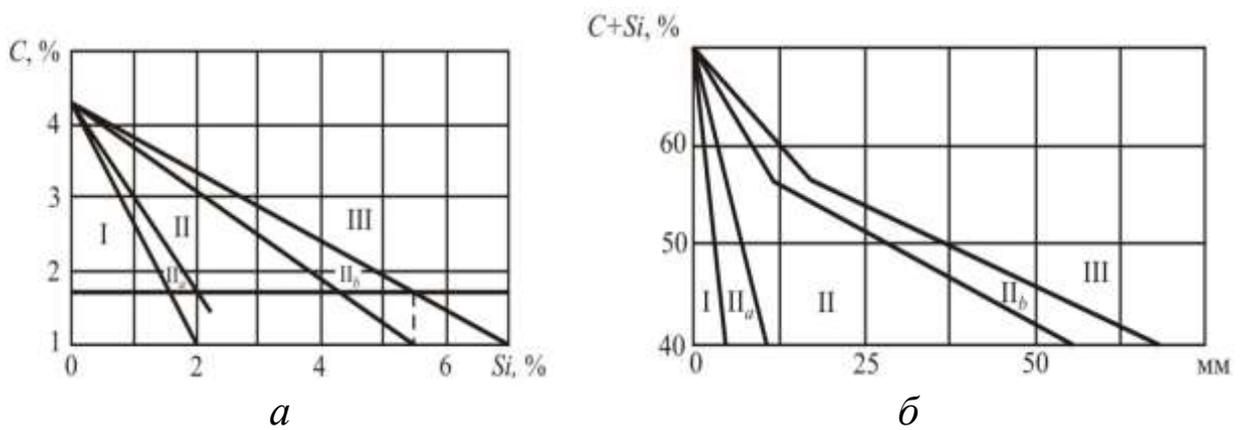


Рис. 1. Структурная диаграмма чугунов:  
а – в зависимости от соотношения углерода и кремния;  
б – в зависимости от суммарного содержания C + Si  
и от толщины стенки детали

- I – белые чугуны, структура П + Л;
- II<sub>а</sub> – половинчатые чугуны, структура П + Г + Л;
- II – серые перлитные чугуны, структура П + Г;
- II<sub>б</sub> – серые феррито-перлитные чугуны, структура Ф + П + Г;
- III – серые ферритные чугуны, структура Ф + Г

Механизм формирования структуры в зависимости от степени графитизации проиллюстрирован в табл. 1. Основное отличие серых чугунов от белых заключается в отсутствии в их структуре первичного цементита, входящего в состав карбидной эвтектики.

Таблица 1

## Механизм кристаллизации чугунов

Наименование чугуна		I кристаллизация	II кристаллизация	Структура
1	Белые чугуны (БЧ)	$\text{Ж} \rightarrow \text{A}$ $\text{Ж}_{4,3} \xrightarrow{1147} \text{Л}(\text{A} + \text{Ц}_I)$	$\text{A}_{2,14-0,8} \xrightarrow{1147-727} \text{Ц}_{II}$ $\text{A}_{0,8} \xrightarrow{727} \text{П}(\Phi + \text{Ц})$	$\text{П} + \text{Ц}_{II} + \text{Л}(\text{П} + \text{Ц})$ 
2	Половинчатые	$\text{Ж}_{4,3} \xrightarrow{1153} \text{A} + \text{Гр} \rightarrow \text{СЧ}$ $\text{Ж}_{4,3} \xrightarrow{1147} \text{Л}(\text{A} + \text{Ц}_I) \rightarrow \text{БЧ}$	$\text{A}_{2,14-0,8} \xrightarrow{1147-727} \text{Ц}_{II}$ $\text{A}_{0,8} \xrightarrow{727} \text{П}(\Phi + \text{Ц})$	$\text{П} + \text{Ц}_{II} + \text{Л} + \text{Гр}$ 
3	Серый чугун на перлитной основе (СЧ)	$\text{Ж}_{4,3} \xrightarrow{1153} \text{A} + \text{Гр}$	$\text{A}_{2,14-0,8} \xrightarrow{1147-727} \text{Ц}_{II}$ $\text{A}_{0,8} \xrightarrow{727} \text{П}(\Phi + \text{Ц})$	$\text{П} + \text{Гр}$ 
4	СЧ на феррито-перлитной основе	$\text{Ж}_{4,3} \xrightarrow{1153} \text{A} + \text{Гр}$	$\text{A}_{2,14-0,8} \xrightarrow{1147-727} \text{Ц}_{II}$ $\text{A}_{0,8} \xrightarrow{738} \Phi + \text{Гр}$ $\text{A}_{0,8} \xrightarrow{727} \text{П}(\Phi + \text{Ц})$	$(\Phi + \text{П}) + \text{Гр}$ 
5	СЧ на ферритной основе	$\text{Ж}_{4,3} \xrightarrow{1153} \text{A} + \text{Гр}$	$\text{A}_{2,14-0,8} \xrightarrow{1147-727} \text{Гр}$ $\text{A}_{0,8} \xrightarrow{738} \Phi + \text{Гр}$	$\Phi + \text{Гр}$ 

### 3.1. Белые чугуны

**Белыми** называют чугуны, в которых весь углерод находится в связанном состоянии – в виде цементита. Структуры таких чугунов соответствуют структурам диаграммы Fe-Fe<sub>3</sub>C при содержании углерода более 2,14 %. По структуре различают *доэвтектические* (<4,3 % С), *эвтектический* (4,3 % С) и *заэвтектические* (>4,3 % С) белые чугуны. Большое количество цементита в структуре определяет их механические свойства, они обладают высокой твердостью (НВ 450...550 в доэвтектических чугунах и до НВ 700 в заэвтектических) и хрупкостью, очень трудно обрабатываются резанием. Поэтому нашли ограниченное применение как конструкционные материалы только доэвтектические белые чугуны, в том числе легированные, для деталей, работающих в условиях абразивного трения (шары и бронеплиты шаровых мельниц, рабочие колеса центробежных насосов для перекачки водоугольных суспензий, тормозные колодки и др.). Эвтектические и заэвтектические белые чугуны нашли применение как передельные чугуны в производстве стали. Повышение содержания углерода приближает сплав к эвтектическому составу, уменьшает температуру плавления и температурный интервал кристаллизации, что положительно отражается на литейных свойствах сплавов.

Структуры белых чугунов представлены на рис. 2.

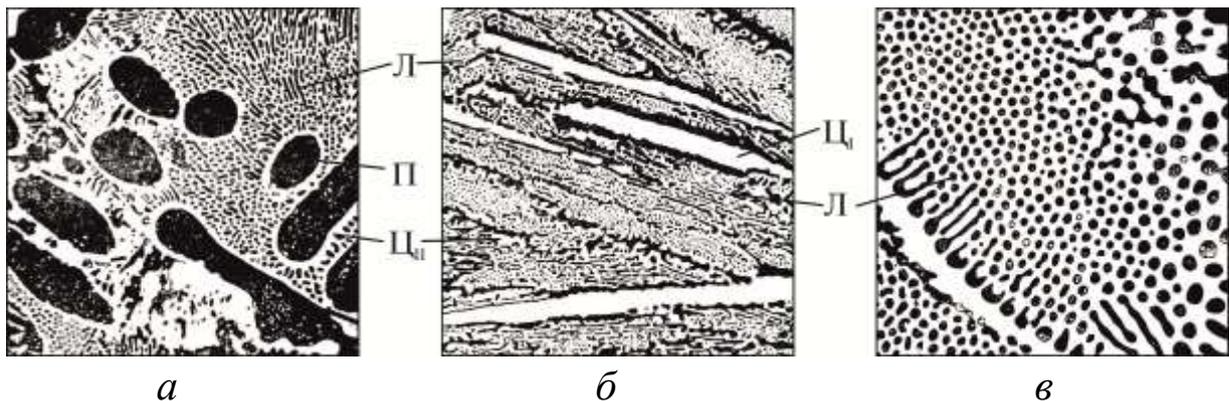


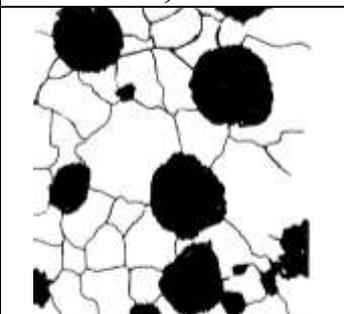
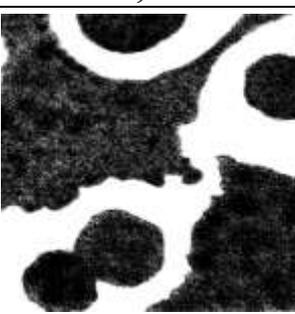
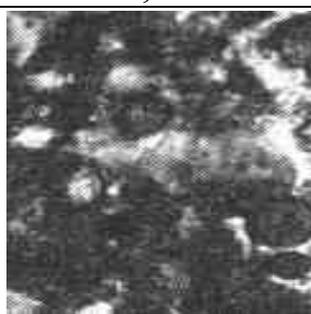
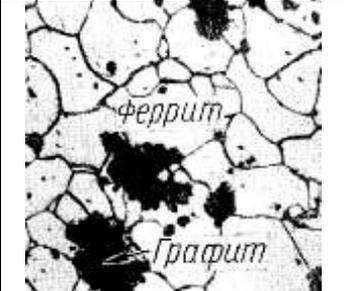
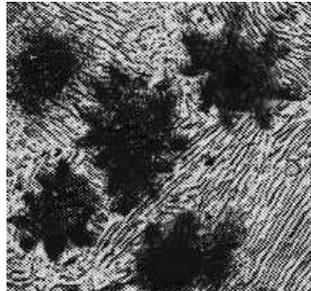
Рис. 2. Структуры белых чугунов: *а* – доэвтектического; *б* – заэвтектического; *в* – эвтектического (П – перлит; Ц – цементит; Л – ледебурит)

### 3.2. Серые чугуны

*Серыми* называют чугуны, в которых часть углерода находится в виде цементита ( $C_{\text{связ}} \leq 0,8 \%$ ), остальной углерод образует кристаллы графита. Структуры таких чугунов соответствуют областям II, II<sub>b</sub>, III диаграмм рис. 1 и приведены в табл. 1. В зависимости от степени графитизации меняется структура металлической основы и, соответственно, количество и размеры кристаллов графита. Подбором химсостава (C + Si) % и скоростью охлаждения можно обеспечить получение различной структуры металлической основы. Однако этот путь ограничен получением предела прочности при растяжении не более 250–280 МПа в перлитном сером чугуне. Повышение прочностных характеристик чугуна возможно с применением технологических приемов, обеспечивающих изменение формы, размеров и распределение графитовых включений. К таким приемам относятся модифицирование, термообработка чугуна. Примеры структур серого чугуна в зависимости от формы графита и структуры основы представлены в табл. 2.

Чем больше графита, чем он крупнее, чем неравномернее он расположен в металлической основе – тем ниже прочность чугуна. При одинаковой форме графита, прочность тем выше, чем больше в структуре металлической основы перлита. Наибольшей прочностью и твердостью обладают перлитные серые чугуны.

Структура серых чугунов

Название, группа, марка	Структурный класс чугуна		
	ферритный	феррито-перлитный	перлитный
Серый чугун			
Марка	СЧ10; СЧ15	СЧ15; СЧ20	СЧ25; СЧ30*
Высокопрочный чугун			
Марка**	ВЧ40	ВЧ45; ВЧ50	ВЧ60; ВЧ70
Ковкий чугун			
Марка	КЧ33-8; КЧ37-12	КЧ45-7; КЧ50-5	КЧ60-3; КЧ65-3

Примечания:

\* – Модифицированный кремнием серый чугун

\*\* – Модифицированный магнием высокопрочный чугун

### 3.2.1. Модифицированный кремнием серый чугун

Цель – получение перлитного серого чугуна с мелким «завихренным» равномерно распределенным пластинчатым графитом. Достигается это путем обработки жидкого чугуна при выпуске из плавильной печи небольшими добавками (0,3–0,5 %) ферросилиция или

силикокальция. Под струю металла в литейный ковш засыпается порция свежеразмолотого ферросилиция, который растворяется и размешивается в чугуна. Жидкий чугун должен быть перегрет до 1400 °С, иметь химсостав, который после затвердевания дал бы структуру половинчатого чугуна (см. табл. 1). Добавление кремния в жидкий металл переводит по химсоставу чугун из области  $\Pi_a$  в область  $\Pi$ , т. е. обеспечивает получение перлитного серого чугуна (см. рис. 1). Часть кремния расходуется на связывание растворенного в чугуна кислорода, при этом образуются мелкие твердые частицы  $\text{SiO}_2$  ( $T_{\text{пл}} \sim 1710$  °С), которые служат дополнительными зародышами кристаллов графита. Таким образом, графит измельчается, более равномерно распределяется, временное сопротивление может быть повышено до 350–400 МПа.

### **3.2.2. Модифицированный магнием высокопрочный чугун**

Это разновидность серого чугуна, получившая другое название из-за существенного различия механических характеристик. Цель модифицирования магнием – получить шаровидный графит, который по сравнению с пластинчатым является значительно меньшим концентратором напряжений, меньше «ослабляет» металлическую основу, тем самым повышая прочность чугуна. Для этого жидкий перегретый до 1400–1500 °С чугун обрабатывается добавками в ковш 0,3–0,5 % по массе магния, который должен раствориться в чугуна, и при кристаллизации, будучи поверхностно-активным веществом относительно растущих кристаллов графита, обеспечить одинаковую скорость роста во всех направлениях и получение шаровидной формы графита. Чтобы магний не расходовался на реакции с кислородом и серой, перед обработкой магнием в ковш дают 0,3 % ферросилиция, а выплавленный чугун должен быть очень чистым по сере ( $\leq 0,01$ – $0,02$  % S). Введение магния в жидкий чугун сопряжено с рядом трудностей: магний – легкий металл ( $\rho \sim 1,7$  г/см<sup>3</sup>), его температура кипения ниже температуры жидкого чугуна. Один из вариантов современной технологии – введение магния «под колоколом» в ковш с жидким чугуном, помещенный в герметичную камеру – автоклав, где предварительно повышается давление до 10 атм.

Структуры высокопрочного чугуна приведены в табл. 2. Прочность при растяжении в таком чугуне достигает 800 МПа, а после термообработки – 1000 МПа.

### 3.2.3. Получение ковкого чугуна с хлопьевидным графитом

Хлопьевидный графит (углерод отжига) меньше, чем пластинчатый, ослабляет металлическую основу, поэтому чугун с таким графитом более прочен, чем серый чугун. Получают чугун с такой формой графита и перлитной или ферритной основой высокотемпературным отжигом белого доэвтектического чугуна (рис. 3).

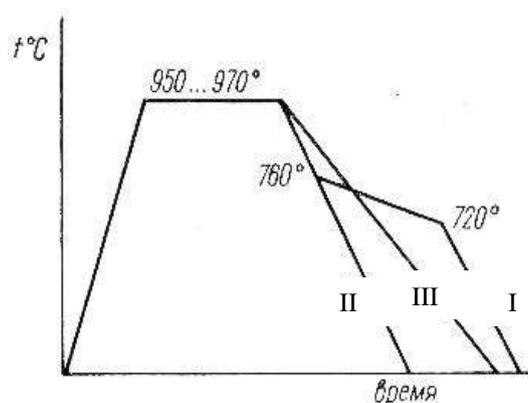


Рис. 3. Схемы режимов отжига отливок на ковкий чугун:

- I – отжиг на ферритный чугун;
- II – отжиг на перлитный чугун;
- III – отжиг на феррито-перлитный чугун

Для этого используется белый чугун (область I, рис. 1). Он разливается в формы и после затвердевания имеет структуру П + ЦП + Л. Последующий отжиг при температуре 950–1000 °С с длительной выдержкой вызывает распад первичного цементита и диффузию атомов углерода, собирающихся в компактные включения графита хлопьевидной формы (см. табл. 2). Различная степень графитизации регулируется разными режимами охлаждения и получается ферритный (режим I, рис. 3), перлитный (режим II, рис. 3) либо феррито-перлитный ковкий чугун (режим III, рис. 3). Общая продолжительность отжига достигает 70–80 ч, что сильно удорожает процесс. Возможность гарантированного получения структуры белого чугуна только в тонком сечении (область I, рис. 1) ограничива-

ет применение этого чугуна только для мелких тонкостенных деталей.

Структуры ковкого чугуна представлены в табл. 2. Прочность при растяжении у ковких чугунов может быть до 800 МПа.

### 3.3. Маркировка чугунов

Серые чугуны с пластинчатым графитом регламентируются ГОСТ 1412–85. Они маркируются буквами СЧ и цифрами, например СЧ25. Цифры указывают, что прочность на растяжение этого чугуна не менее 250 МПа (25 кгс/мм<sup>2</sup>).

Высокопрочные чугуны с шаровидным графитом по ГОСТ 7293–85 маркируются буквами ВЧ и цифрами, значение цифр то же, что и у серого чугуна. Например, ВЧ60 имеет  $\sigma_B \geq 600$  МПа (60 кгс/мм<sup>2</sup>).

Ковкие чугуны с хлопьевидным графитом по ГОСТ 1215–79 маркируются буквами КЧ и двумя группами цифр. Первая группа цифр показывает временное сопротивление растяжению, вторая группа цифр обозначает относительное удлинение. Например, КЧ37–12 имеет  $\sigma_B \geq 370$  МПа (37 кгс/мм<sup>2</sup>) и  $\delta \geq 12\%$ .

Серые чугуны – широко применяемые конструкционные материалы, обладающие хорошими технологическими свойствами, хорошо работают на сжатие, изгиб, обладают антифрикционными свойствами, гасят вибрации. Примеры применения чугунов различных марок даны в прил. 1, а их свойства – в прил. 2.

## 4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАНЯТИЯ

1. Изучить микроструктуру белых и серых чугунов при просмотре коллекции микрошлифов на металлографическом микроскопе.

2. Зарисовать микроструктуры в таблице отчета (табл. 3) и расшифровать их, обозначив структурные составляющие.

3. Сравнить зарисованные структуры с классификатором структур рис. 3, назвать чугун каждого образца, его марку и примерное назначение по прил. 1.

4. Пользуясь таблицами химического состава и механических свойств ГОСТ 1412–85, ГОСТ 7293–85, ГОСТ 1215–79 (прил. 2), заполнить соответствующие графы таблицы отчета.

Форма отчета

№ шлифа	Микроструктура		Название чугуна, марка, ГОСТ	Хим. состав, %					Мех. свойства			Примерное назначение
	рисунок	название		C	Si	Mn	P	S	H B	$\sigma_B$	$\delta$	

5. Проанализировать информацию, содержащуюся в таблице отчета и сделать выводы:

- о влиянии структуры металлической основы при одинаковой форме графита на  $\sigma_B$ ; HB;  $\delta$ ;

- влиянии формы графитовых включений при одинаковой структуре металлической основы на HB;  $\sigma_B$ ;  $\delta$ .

## 5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие железоуглеродистые сплавы называют «белые чугуны»?

2. Какое содержание углерода в доэвтектическом белом чугуне? Заэвтектическом? Эвтектическом?

3. Железоуглеродистые сплавы имеют структуру:

а) П + Л + Ц

г) П +  $\Gamma_{ХЛ}$

б) Ф + П +  $\Gamma_{ПЛ}$

д) Ф +  $\Gamma_{Ш}$

в) Л + Ц

е) П +  $\Gamma_{ПЛ}$

Назовите их.

4. Серые чугуны имеют структуру:

а) Ф + Г;

б) П + Г;

в) Ф + П + Г.

Какой из них наиболее прочен?

5. Чугун со структурой П + Г лучше работает на растяжение?

На сжатие?

## 6. СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Материаловедение : учеб. для вузов ; под общ. ред. Б. Н. Арзамасова, Г. Г. Мухина. – Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 648 с. : ил.

2. Фетисов, Г. П. Материаловедение и технология материалов / Г.П. Фетисов [и др.]. – М. : Высш. шк., 2002. –638 с.
3. ГОСТ 1412–85. Чугун с пластинчатым графитом для отливок. Марки. – Введ. 1987–01–01. – Москва: Изд-во стандартов, 1985.–5с.
4. ГОСТ 7293–85. Чугун с шаровидным графитом для отливок. Марки. – Введ. 1987–01–01. – Москва: Изд-во стандартов, 1985.–3 с.
5. ГОСТ 1215–79. Отливки из ковкого чугуна. Общие технические условия. – Введ. 1987–01–01. – Москва: Изд-во стандартов, 1979.–5 с.

Область применения серых чугунов

Марка чугуна	Примерное применение
СЧ 10	<p style="text-align: center;"><u>Серые чугуны [1]</u></p> Грузы, противовесы, ширпотреб (печное литье)
СЧ 15	Слабонагруженные корпусные детали станков, пилорам – станины, стойки, кронштейны
СЧ 20 СЧ 25	Нагруженные корпусные детали: станины крупных станков, корпуса редукторов, шкивы, маховики, блоки цилиндров, гильзы автотракторных двигателей и т. д.
СЧ 30 СЧ 35	Тяжелонагруженные детали электродвигателей (станины, щиты подшипниковые), дизельных двигателей (блоки цилиндров, гильзы, диски сцепления), зубчатые колеса, муфты и другие детали станков
ВЧ 40 ВЧ 45	<p style="text-align: center;"><u>Высокопрочные чугуны [2]</u></p> Балки рольгангов, траверса, рама реверсивного прокатного стана, блок экскаватора, вал эксцентрика, детали гидро- и паровых турбин.
ВЧ 50	Коленчатые валы крупных двигателей 600, 900, 1200, 2000 л.с, детали горнорудного и размольного оборудования, корпус, траверса, кронштейн рабочей клетки прокатного стана, ковочного прессы и др.
ВЧ 60 ВЧ 70	Коленчатые валы легковых автомобилей, тракторов, комбайнов, цилиндрические конические шестерни, венец барабана канатного подъемника, шестерня угледробилки и др.
КЧ 33-8 КЧ 35-10	<p style="text-align: center;"><u>Ковкие чугуны [2]</u></p> Для сельхозмашин: детали шасси, корпусные, кронштейны, втулки, фитинги, пробки, барашки
КЧ 37-12 КЧ 45-6	Для автомобилей: корпусные детали шасси, подвески, картеры мостов, коробки передач, дифференциала, втулки, рычаги, кронштейны и др.

## Химический состав и механические свойства чугунов

## Химический состав отливок из серого чугуна ГОСТ 1412–85

Марка чугуна	Массовая доля элементов, %		
	Углерод	Кремний	Марганец
СЧ 10	3,5–3,7	2,2–2,6	0,5–0,8
СЧ 15	3,5–3,7	2,0–2,4	0,5–0,8
СЧ 20	3,3–3,5	1,4–2,4	0,7–1,0
СЧ 25	3,2–3,4	1,4–2,2	0,7–1,0
СЧ 30	3,0–3,2	1,3–1,9	0,7–1,0
СЧ 35	2,9–3,0	1,2–1,5	0,7–1,1

**Примечание:** 1)  $P \leq 0,3-0,2$ ; 2)  $S \leq 0,15-0,12$

Механические свойства отливок из серого чугуна  
ГОСТ 1412–85

Марка чугуна	Временное сопротивление при растяжении $\sigma_B$ , МПа (кгс/мм <sup>2</sup> ), не менее	Твердость НВ, не менее
СЧ 10	100 (10)	156
СЧ 15	150 (15)	163
СЧ 20	200 (20)	170
СЧ 25	250 (25)	187
СЧ 30	300 (30)	197
СЧ 35	350 (35)	229

Примечание: 1. Для отливки толщиной стенки 15 мм  
2. Относительное удлинение 0 %

Химический состав высокопрочного чугуна  
ГОСТ 7293–85

Марка чугуна	Массовая доля элементов, %		
	Углерод	Кремний	Марганец
ВЧ 35	3,3–3,5	1,9–2,9	0,2–0,6
ВЧ 40	3,3–3,6	1,9–2,9	0,2–0,6
ВЧ 45	3,3–3,6	1,9–2,9	0,3–0,7
ВЧ 50	3,3–3,6	1,9–2,9	0,3–0,7
ВЧ 60	3,3–3,6	2,4–2,6	0,4–0,7
ВЧ 70	3,3–3,6	2,6–2,9	0,4–0,7
ВЧ 80	3,3–3,6	2,6–2,9	0,4–0,7
ВЧ 100	3,3–3,6	3,0–3,8	0,4–0,7

Примечание: 1) P ≤ 0,1, S ≤ 0,01–0,02; 2) Mg ≤ 0,005

Механические свойства высокопрочного чугуна  
ГОСТ 7293–85

Марка чугуна	Временное сопротивление при растяжении $\sigma_b$ , МПа(кгс/мм <sup>2</sup> ) не менее	Относительное удлинение $\delta$ %, не менее	Твердость по Бригеллю, НВ
ВЧ 35	350 (35)	22	140–170
ВЧ 40	400 (40)	15	140–200
ВЧ 45	450 (45)	10	160–220
ВЧ 50	500 (50)	7	170–240
ВЧ 60	600 (60)	3	190–280
ВЧ 70	700 (70)	2	240–300
ВЧ 80	800 (80)	2	250–330
ВЧ 100	1000 (100)	2	270–360

Химический состав ковких чугунов  
ГОСТ 1215–79

Марка чугуна	Химический состав, %					
	Углерод	Кремний	Марганец	Фосфор	Сера	Хром
Чугун ферритного класса						
КЧ 30-6 КЧ 33-8	2,6– 2,2	1,0– 1,6	0,4–0,6	0,18	0,20	0,08
КЧ 35-10 КЧ 37-12	2,5– 2,8 2,4– 2,7	1,1– 1,3 1,2– 1,4	0,3–0,6 0,2–0,4	0,12 0,12	0,20 0,06	0,06 0,06
Чугун перлитного класса						
КЧ 45-7 КЧ 50-5 КЧ 55-4	2,5– 2,8	1,2– 1,4	0,3–1,0	0,1	0,2	0,08
КЧ 60-3 КЧ 65-3 КЧ 70-3 КЧ 80-1,5	2,4– 2,7	1,2– 1,4	0,3–1,0	0,1	0,06	0,08

Механические свойства ковких чугунов ГОСТ 1215–79

Марка чугуна	Временное сопротивление разрыву $\sigma_b$ , МПа(кгс/мм <sup>2</sup> ), не менее	Относительное удлинение $\delta$ %, не менее	Твердость, НВ
КЧ 30-6	294 (30)	6	100–163
КЧ 33-8	323 (33)	8	100–163
КЧ 35-10	333 (35)	10	100–163
КЧ 37-12	362 (37)	12	110–163
КЧ 45-7	441 (45)	7	150–207
КЧ 50-5	490 (50)	5	170–230
КЧ 55-4	539 (55)	4	192–241
КЧ 60-3	588 (60)	3	200–269

Марка чугуна	Временное сопротивление разрыву $\sigma_B$ , МПа(кгс/мм <sup>2</sup> ), не менее	Относительное удлинение $\delta$ %, не менее	Твердость, НВ
КЧ 65-3	637 (60)	3	212–269
КЧ 70-3	686 (70)	2	241–285
КЧ 80-1,5	784 (80)	1,5	270–326

# Лабораторная работа №5 «ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СТАЛИ»

Составитель: Лащнина С. В.

## 1. ЦЕЛЬ И СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Цель занятия – закрепление материала лекций по разделу «Термическая обработка». В ходе подготовки к занятию студенты должны на лекциях усвоить материал по теории превращений в сталях при нагреве и охлаждении, выбору температурно-временного режима основных технологических операций термообработки, назначение этих операций и область применения.

Содержание занятия – студенты по заданию преподавателя выбирают режимы нескольких операций термообработки для заданных марок сталей, выполняют эти операции на практике, контролируя изменения твердости, анализируют полученные результаты.

## 2. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Любая операция термической обработки состоит в нагреве детали (образца) до определенной температуры (ниже температуры солидуса, т. е. в твердом состоянии), выдержке при этой температуре в течение промежутка времени, необходимого для завершения всех предусмотренных превращений, и охлаждении с заданной скоростью, обеспечивающей формирование требуемой структуры и свойств.

В технологии термообработки сталей применяется много разных по назначению операций, которые принято делить на следующие группы:

- отжиг I рода (без фазовой перекристаллизации);
- отжиг II рода (с фазовой перекристаллизацией);
- закалка;
- отпуск.

Первые две группы операций имеют целью получение равновесной мелкозернистой структуры без внутренних напряжений с наиболее благоприятными технологическими свойствами – обрабатываемостью резанием, давлением и т. д. Их обычно относят к предварительным операциям термообработки, подготавливающим металл заготовок к последующим технологическим операциям.

Закалка и отпуск предназначены для формирования структуры и свойств металла, наиболее отвечающих требованиям условий службы готовых деталей; их принято считать операциями окончательной термообработки.

Структуры сталей после предварительной термообработки соответствуют структурам, показанным на участке диаграммы Fe-Fe<sub>3</sub>C (рис. 1), с механическими свойствами некоторых марок сталей, с равновесными структурами студенты ознакомились на предыдущих лабораторных занятиях.

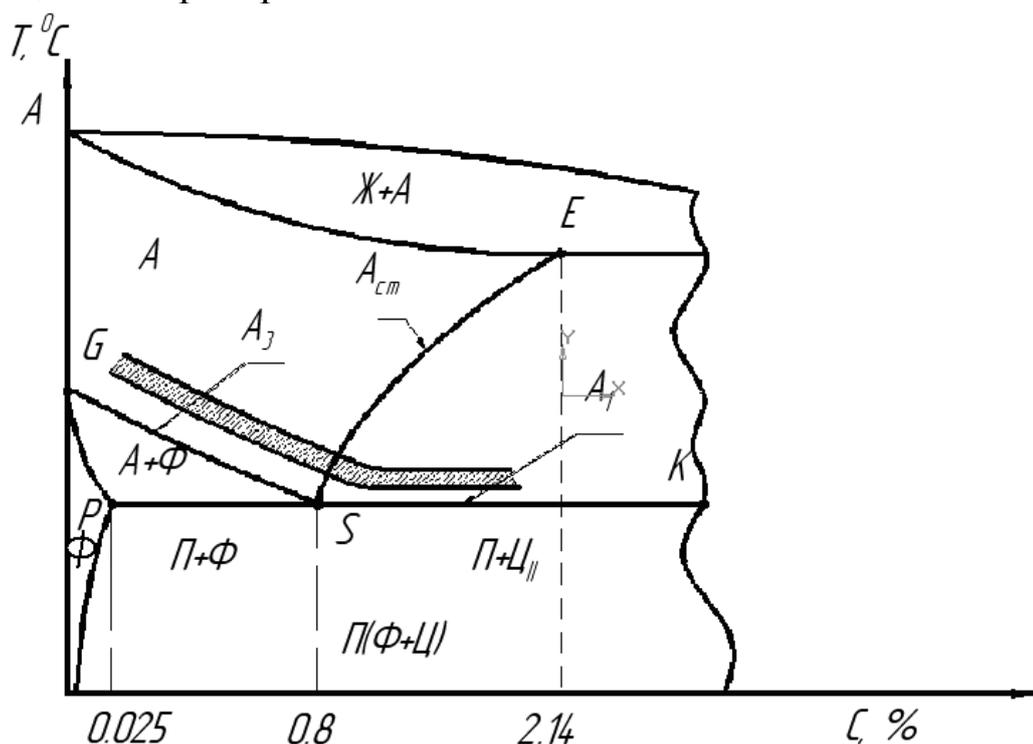


Рис. 1. Диаграмма состояния Fe-Fe<sub>3</sub>C:



- температуры нагрева для отжига II рода и закалки

На диаграмме (см. рис. 1) показаны также критические температуры  $A_1$ ,  $A_3$ ,  $A_{cm}$ , которые используются при выборе температурно-временного режима конкретной операции термообработки. Эти критические точки, обозначаемые при нагреве дополнительным индексом «с», а при охлаждении индексом «г», лежат на линиях диаграммы:

$$PSK - A_{c1} (A_{r1})$$

$$GS - A_{c3} (A_{r3})$$

$$SE - A_{cm}$$

Там же (см. рис. 1) условно показана заштрихованная область температур нагрева, рекомендуемых для операций отжига II рода и

закалки, при этом общее представление о превращениях, происходящих в сталях при нагреве, можно получить из этой диаграммы. Более подробно режимы нагрева, охлаждения и примерное назначение некоторых операций приведены в табл. 1.

Таблица 1

Перечень основных операций термообработки,  
их режимов и назначения

№ операции	Наименование операции термообработки	Режим термообработки		Примерное назначение
		Температура нагрева	Охлаждающая среда	
<b>ОТЖИГ I РОДА</b>				
1	Рекристаллизационный отжиг	$T_{\text{нагр}} \geq T_{\text{рекр}}$ ( $T_{\text{рекр}} = 0,4 \dots 0,6 T_{\text{пл}}$ )	Печь	После холодной пластической деформации для снятия наклепа
2	Диффузионный отжиг	1100...1250 °С	Печь	Легированные стали, для устранения ликвации
3	Низкий отжиг	650...700 °С	Печь	Для снятия остаточных напряжений отливок, поковок, сварных конструкций
<b>ОТЖИГ II РОДА</b>				
4	Полный отжиг	$A_{c3} + (30 \dots 50 \text{ °С})$	Печь	Конструкционные (доэвтектоидные) стали
5	Изотермический отжиг	$A_{c3} + (30 \dots 50 \text{ °С})$	Печь (630–680 °С) воздух	Взамен п. 4 для сокращения цикла термообработки
6	Неполный отжиг	$A_{c1} + (30 \dots 50 \text{ °С})$	Печь	Инструментальные (заэвтектоидные) стали
7	Нормализация	$A_{c3} + (40 \dots 60 \text{ °С})$	Воздух	Взамен п. 4 для малоуглеродистых сталей. Взамен улучшения для ответственных деталей из среднеуглеродистых сталей
8	Нормализация	$A_{cm} + (40 \dots 60 \text{ °С})$	Воздух	Для устранения цементитной сетки в заэвтектоидных сталях с последующим п. 6

ЗАКАЛКА				
9	Полная закалка	$A_{c3}+(30...50\text{ }^{\circ}\text{C})$	Масло, вода, растворы солей	Конструкционные (доэвтектоидные стали), Видин Д.В. для получения структуры мартенсита
10	Неполная закалка	$A_{c1}+(30...50\text{ }^{\circ}\text{C})$		Инструментальные (заэвтектоидные) стали для получения структуры (М+Ц <sub>II</sub> )
ОТПУСК				
11	Низкий отпуск	160...220 °С, 1–3 ч	Воздух	После закалки, для получения структуры М <sub>отп</sub>
12	Средний отпуск	350...450 °С, 1–3 ч	Воздух	После закалки, для получения структуры Т <sub>отп</sub>
13	Высокий отпуск	550...650 °С, 0,5–1 ч	Воздух	После закалки, для получения структуры С <sub>отп</sub>

Структуры сталей после окончательной термообработки, т. е. закалки и отпуска, считаются неравновесными, а потому на диаграмме (см. рис. 1) они не показаны, их получение можно объяснить положением векторов скорости охлаждения на поле изотермической диаграммы превращения переохлажденного аустенита. На примере эвтектоидной стали это показано на рис. 2.

В зависимости от степени переохлаждения (волнистые участки вектора) превращение аустенита может быть диффузионным (температурный интервал – область I), промежуточным (область II) или бездиффузионным (область III). Скорости охлаждения  $v_1, v_2, v_3, v_4$  определяют разные степени переохлаждения и получение различных структур: перлита (равновесный) при  $v_1$ , сорбита, троостита, мартенсита (неравновесные структуры) соответственно при  $v_2, v_3$  и  $v_4$ . Получить структуру бейнита при непрерывном охлаждении нельзя, нужна изотермическая закалка (см. рис. 5).

Механические свойства неравновесных структур значительно отличаются от равновесных, некоторое представление об этом на примере изменения твердости дает график (рис. 3).

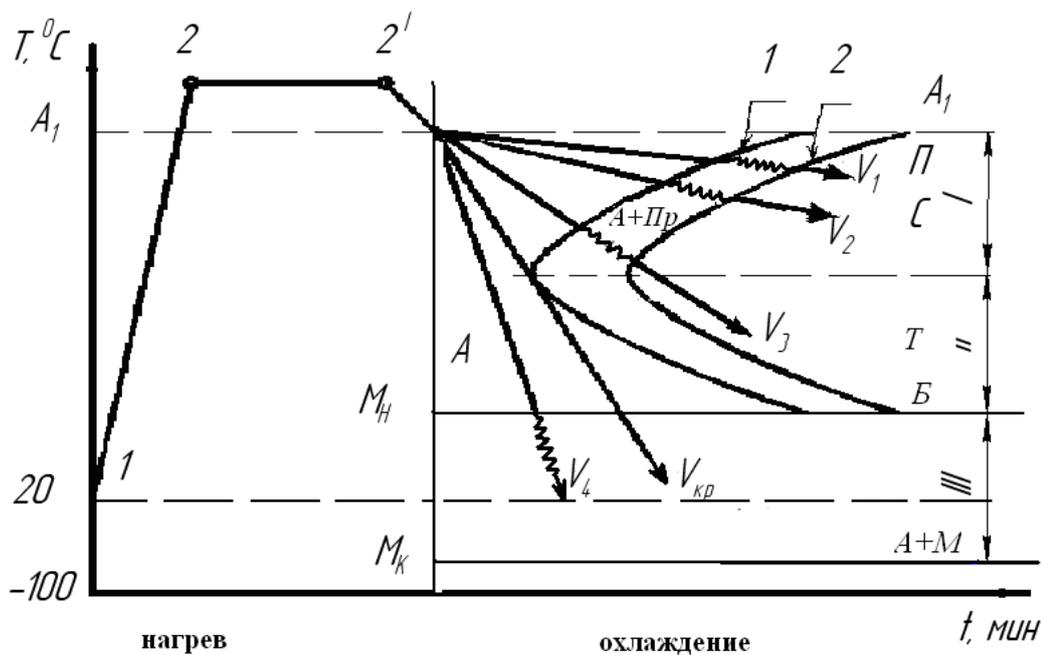


Рис. 2. Схема термических режимов отжига, нормализации и заковки стали: I – область перлитного превращения; II – область промежуточного превращения; III – область мартенситного превращения; 1 – линия начала превращения А → П, 2 – линия конца превращения А → П;  $M_H$ ,  $M_K$  – линии начала и конца мартенситного превращения.

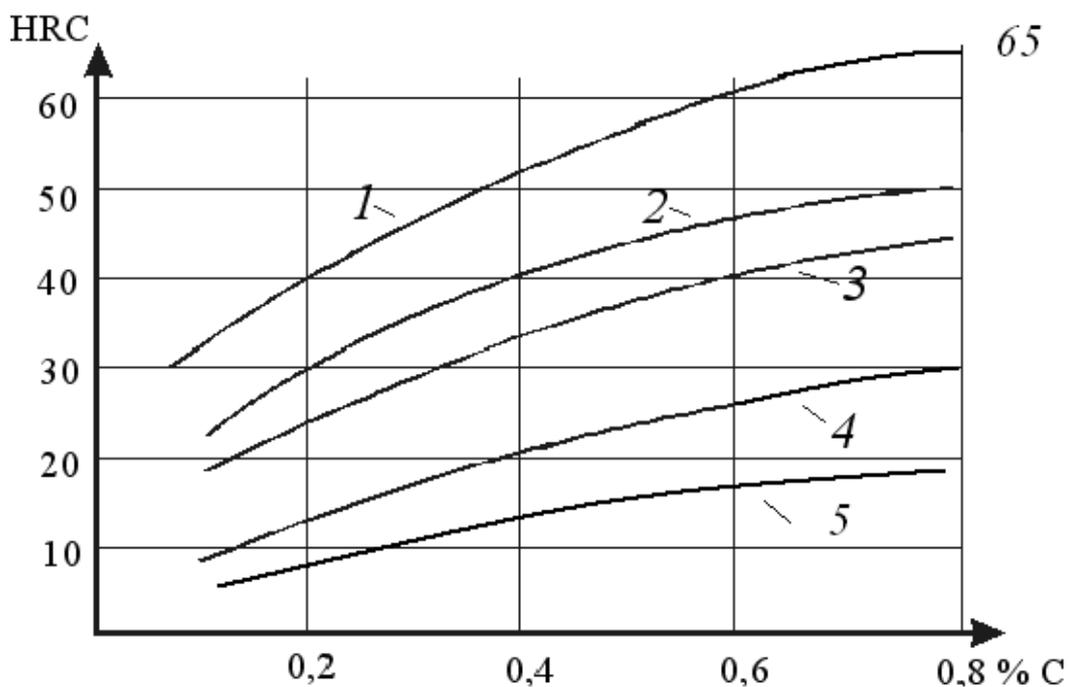


Рис. 3. Зависимость твердости мартенсита 1, полумартенситной структуры 2 (50%М + 50%Т), троостита 3, сорбита 4, (феррит+перлит) 5 от содержания углерода в стали

*Мартенсит* – пересыщенный твердый раствор углерода в  $\alpha$ -железе. Его высокая твердость обусловлена сильным искажением кристаллической решетки  $\alpha$ -железа, сопровождаемым высокими внутренними напряжениями, высокой плотностью дислокаций, внутрифазовым наклепом при превращении аустенита в мартенсит из-за скачкообразного изменения плотности. Образуется мартенсит при переохлаждении аустенита ниже температуры  $M_H$ , когда охлаждение ведется со скоростью  $v_4 > v_{кр}$  (см. рис. 2).  $v_{кр}$  – критическая скорость закалки на мартенсит.

*Троостит* – перлитоподобная мелкодисперсная (толщина пластинок феррита + цементита  $\Delta_0 \sim 0,10\text{--}0,20$  мкм) смесь кристаллов феррита и цементита с содержанием углерода, равным его содержанию в стали (т. е. в доэвтектоидном троостите менее 0,8 %С, в заэвтектоидном более 0,8 %С). Высокая твердость обусловлена дисперсностью кристаллов, образуется из переохлажденного аустенита при 500–550 °С, что примерно происходит при охлаждении со скоростью  $v_3$  (см. рис. 2). *Сорбит* – перлитоподобная мелкодисперсная ( $\Delta_0 \sim 0,25\text{--}0,40$  мкм) смесь кристаллов феррита и цементита, образуется при переохлаждении аустенита до 550–600 °С (скорость охлаждения  $v_2$ , рис. 2). Твердость – следствие степени дисперсности.

Эти неравновесные структуры, полученные из аустенита при разных степенях переохлаждения имеют пластинчатое строение.

Подобные структуры (феррито-цементитные смеси) с примерно такой же дисперсностью могут быть получены при отпуске закаленной стали, они получили название троостит и сорбит отпуска ( $T_{отп}$ ,  $C_{отп}$ ). Последние отличаются формой кристаллов цементита, результатом процесса коагуляции карбидов, начинающегося при температурах отпуска 350–400 °С и завершающегося при 600–650 °С, т. е. при высоком отпуске. Цементит приобретает форму округлых зерен, что придает стали максимальную ударную вязкость (сорбит отпуска) при прочности и твердости аналогичной сорбиту «закалки», т. е. полученному при охлаждении аустенита со скоростью  $v_2$  (см. рис. 2).

### 3. ТЕХНОЛОГИЯ ТЕРМООБРАБОТКИ СТАЛИ

#### 3.1. Отжиг

Ограничимся сведениями, содержащимися в табл. 1 для операций отжига I рода, рассмотрим несколько подробнее цели, температурно-временные режимы разных вариантов отжига II рода. Это полный и неполный отжиг, изотермический отжиг, нормализация. Режимы некоторых видов отжига наглядно представлены графиками на рис. 4.

Полный отжиг (кривая 1, см. рис. 4) применяется для исправления структуры (крупнозернистость, строчечная структура и др.) и снятия внутренних напряжений в литых, обработанных давлением и сварных заготовках из конструкционной доэвтектоидной стали и заключается в нагреве до температуры  $A_{c3} + (30-50 \text{ }^\circ\text{C})$ , выдержке, медленном охлаждении (с печью  $v = 20-100$  град/час) до температуры  $600-650 \text{ }^\circ\text{C}$  и дальнейшем охлаждении на воздухе.

Изотермический отжиг (кривая 3, см. рис. 4) применяется с той же целью, что и полный отжиг, главным образом для конструкционных легированных сталей. Нагрев и выдержка – как при полном отжиге, затем охлаждение на воздухе ниже  $A_{r1}$ , загрузка в другую печь с температурой  $630-680 \text{ }^\circ\text{C}$ , выдержка при этой температуре 4–6 ч и последующее охлаждение на воздухе. Такой график режима дает сокращение общего цикла времени в сравнении с полным отжигом, более точно позволяет управлять процессом превращения аустенит-перлит (изотермическое превращение), но более сложен в исполнении – нужны две печи. Неполный отжиг (кривая 2, см. рис. 4) применяется для заэвтектоидных сталей с целью получения структуры зернистого перлита, если в исходной структуре нет цементитной сетки, которая охрупчивает сталь и сильно затрудняет обработку резанием. Если же есть цементитная сетка, то выполняют две операции: нормализацию (устраняет цементитную сетку) и неполный отжиг (сфероидизирует цементит и снимает внутренние напряжения) и получают структуру зернистого перлита.

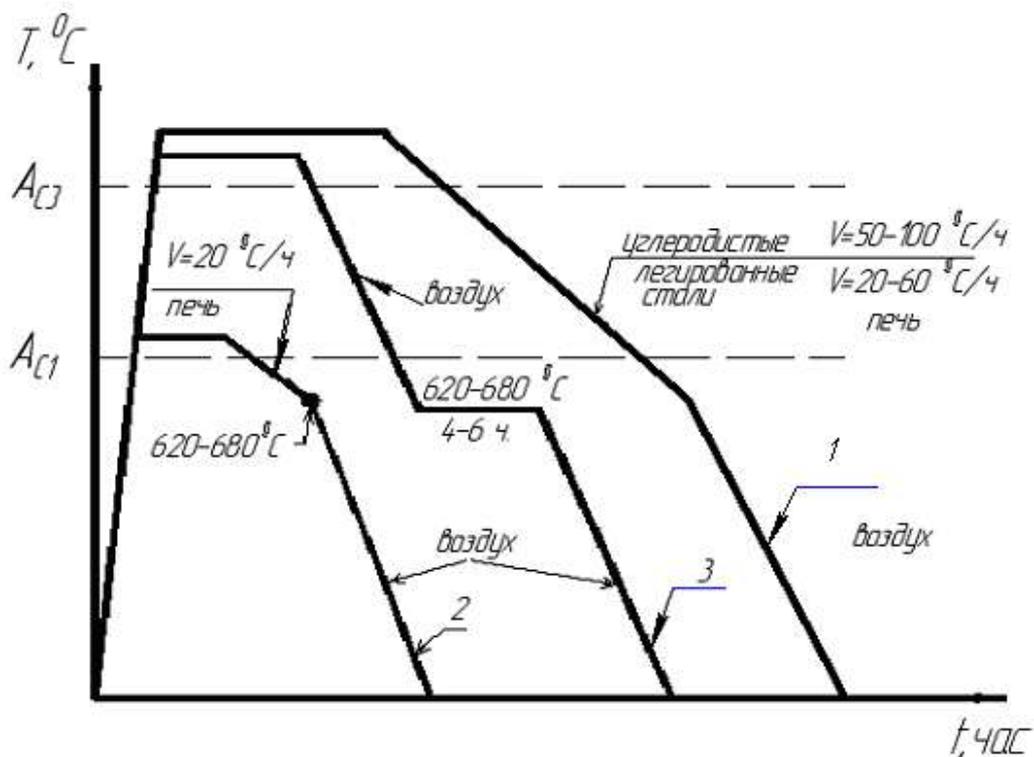


Рис. 4. График термических режимов отжига:  
 1 — полного; 2 — неполного; 3 — изотермического отжига

Нормализация отнесена к группе отжига II рода, так как в мало- и среднеуглеродистых (до 0,4%) сталях она формирует феррито-перлитную структуру, но с более мелким зерном, чем при полном отжиге. Однако при больших содержаниях углерода получается структура сорбита, и тогда нормализация используется как упрочняющая операция вместо закалки и высокого отпуска (улучшения) для деталей неотчетливого назначения. В высокоуглеродистых заэвтектоидных сталях нормализация используется для исправления структуры с цементитной сеткой: после нормализации получают структуру сорбита и троостита, последующий неполный отжиг формирует структуру зернистого перлита. Операция нормализации состоит в нагреве выше температур  $A_{c3}$  (доэвтектоидные стали) или  $A_{cm}$  (заэвтектоидные стали), выдержке при этой температуре до полной аустенизации и охлаждении на спокойном воздухе. График температурно-временного режима похож на график полного отжига (кривая 1, см. рис. 4) с тем отличием, что охлаждение идет в одной среде — на воздухе.

### 3.2. Закалка

*Закалка* – основная упрочняющая операция в технологии термообработки стали, но всегда должна выполняться в комбинациях с последующим отпуском. Таким образом, формирование конечной структуры и свойств упрочненной стали выполняется отпуском. Наиболее часто применяется «закалка на мартенсит», иногда для легированных конструкционных сталей более благоприятное сочетание эксплуатационных свойств дает «закалка на бейнит». Сущность закалки заключается в нагреве выше критической температуры, выдержке и последующем охлаждении со скоростью выше критической скорости закалки.

*Критическая скорость закалки* – такая минимальная скорость охлаждения, которая обеспечивает переохлаждение аустенита до температур мартенситного превращения без его даже частичного распада в зоне температур диффузионного превращения. На рис. 5 представлены графики режимов нагрева – выдержки – охлаждения при выполнении различных способов закалки доэвтектоидных сталей. При охлаждении с высокими скоростями в охлаждаемой детали возникает большая разность температур поверхности и сердцевины, что вызывает большие внутренние термические напряжения. В определенных случаях величина этих напряжений может превысить предел прочности – начнется разрушение металла – появятся закалочные трещины. Особенно опасны большие напряжения для структуры мартенсита с минимальной, часто нулевой пластичностью. В вариантах закалки с охлаждением в двух средах (кривые 2, 3, 4, см. рис. 5) скорость охлаждения в зоне температур, наименьшей устойчивости аустенита (500–550 °С), выше  $v_{кр}$ , а в зоне мартенситного превращения скорость охлаждения сильно уменьшается, либо даже делается выдержка температуры, что уменьшает разность температур поверхности и сердцевины, т. е. уменьшает термические напряжения.

Способ непрерывной закалки (кривая 1, см. рис. 5) самый простой. Но в случае сложной геометрической формы детали (неравномерное охлаждение), пониженной теплопроводности (легированные стали) нужно применять более сложноисполнимые, но гарантирующие высокое качество термообработки способы закалки.

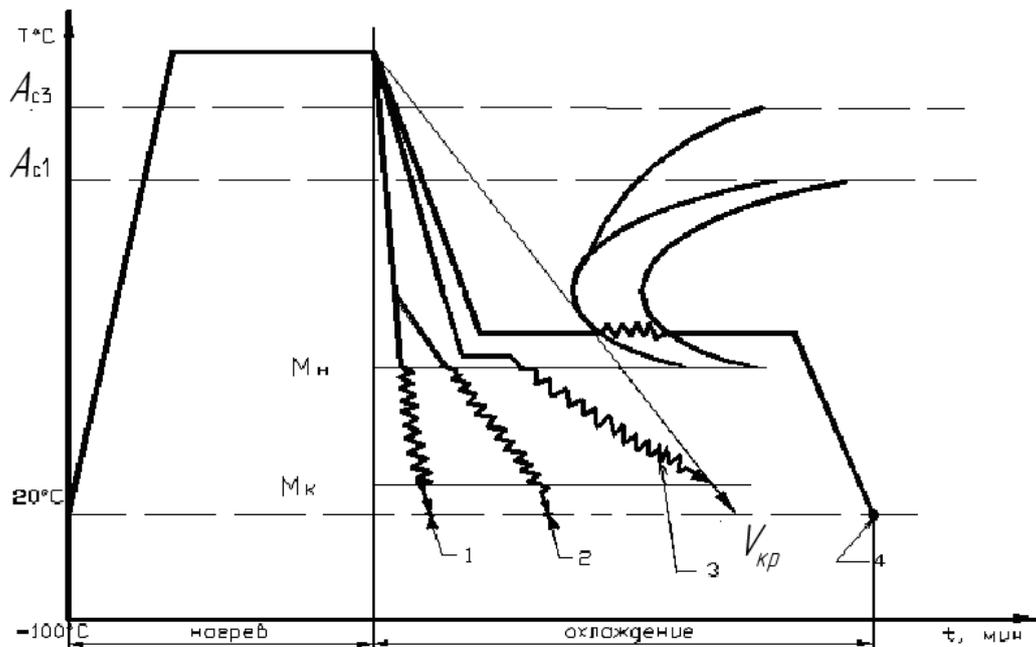
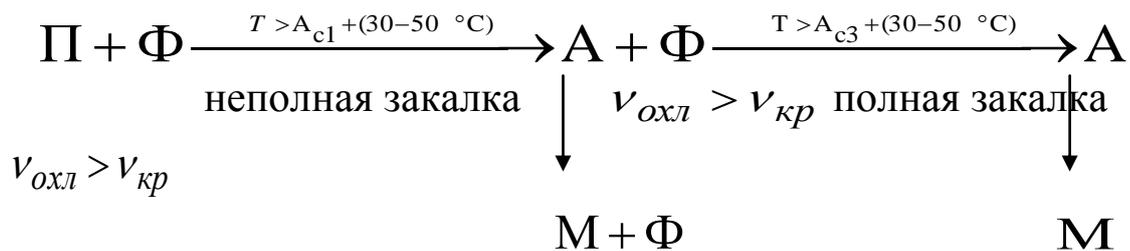


Рис. 5. Полная закалка доэвтектоидной стали: 1 – непрерывная; 2 – прерывистая; 3 – ступенчатая; 4 – изотермическая

По температуре нагрева различают два вида закалки: *полную* (нагрев до  $A_{c3} + 30 \dots 50 \text{ °C}$ ) и *неполную* (нагрев до  $A_{c1} + 30 \dots 50 \text{ °C}$ ) закалки. Полная закалка дает наилучший эффект (max HRC) в доэвтектоидных сталях, неполная – в заэвтектоидных сталях.

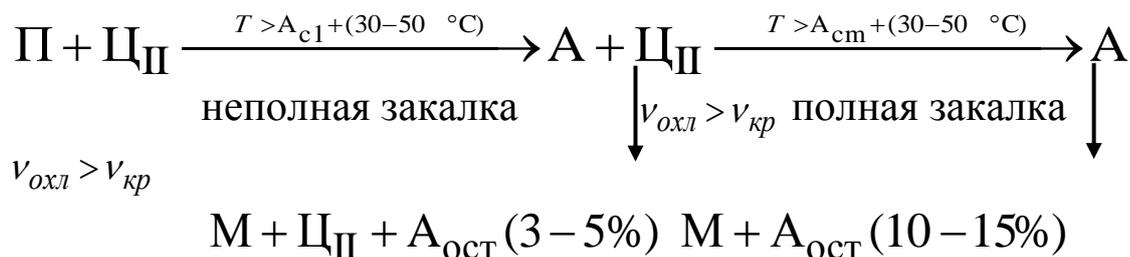
Это можно объяснить с помощью условных схем превращения в сталях при нагреве и охлаждении.

Доэвтектоидные стали:



Очевидно, что твердость М выше, чем М+Φ.

Заэвтектоидные стали:



Очевидно что твердость структуры  $M + C_{II} + (3-5\%)A_{ост}$  выше, чем у структуры  $M + (10-15\%)A_{ост}$  (твердость многофазных структур подсчитывается как среднеарифметическое твердости фаз с учетом их удельного объема в структуре).

Охлаждающими средами при закалке на мартенсит являются вода, растворы солей и щелочей (углеродистые стали) и минеральное масло (легированные стали). Легирующие элементы (кроме  $Co$ ) уменьшают критическую скорость закалки, охлаждение в более «мягком» охладителе – (в масле) – позволяет обеспечить мартенситное превращение с меньшими термическими напряжениями.

Варианты закалки с охлаждением в двух средах и в специфических технологиях применяют и другие охлаждающие среды (расплавленные соли, металлы, водоохлаждаемые «штампы» и др.).

### 3.3. Отпуск

Структуры закалки (мартенсит) термодинамически неустойчивы, со временем в них происходят самопроизвольные изменения, сопровождаемые изменением свойств, что может сделать деталь (и машину) неработоспособной. Назначение отпуска – стабилизация структуры, снятие внутренних закалочных напряжений, формирование структуры и свойств, отвечающих конкретным условиям эксплуатации. *Отпуск* заключается в нагреве закаленной стали до температур ниже  $A_{c1}$ , выдержке и охлаждении на воздухе (или в воде, масле). В зависимости от температуры отпуска реализуются разные стадии превращений и получаются разные структуры. В связи с этим различают три технологические операции: низкотемпературный (низкий) отпуск на «отпущенный» мартенсит ( $M_{отп}$ ), среднетемпературный (средний) отпуск на троостит отпуска ( $T_{отп}$ ) и высокотемпературный (высокий) отпуск на сорбит отпуска ( $S_{отп}$ ).

*Низкий отпуск* (Н. О.) заключается в нагреве закаленной стали до температур 160 – 220 °С, выдержке при этой температуре и охлаждении на воздухе, отпущенный мартенсит придает изделию высокую твердость, износостойкость. Применяется низкий отпуск при термообработке инструмента из нетеплостойких инструментальных сталей, деталей, работающих в условиях трения качения или скольжения, в том числе после цементации и неполной закалки.

*Средний отпуск* (С. О.) заключается в нагреве закаленной стали до температур 350 – 450 °С (иногда и 500 °С), выдержке 1–3 ч и охлаждении на воздухе. Структура  $T_{отп}$  отличается высоким пределом упругости. Применяется средний отпуск при термообработке

пружин, рессор и других упругих элементов из высокоуглеродистых (0,55–0,85 %С) конструкционных сталей, в том числе легированных кремнием, а также штампового инструмента для горячей обработки давлением из полутеплостойких инструментальных сталей.

*Высокий отпуск* (В. О.) заключается в нагреве закаленной стали до температур 550–650 °С, выдержке 0,5–1 ч и охлаждении на воздухе (или в воде для склонных к отпускной хрупкости легированных Cr и Ni сталей). Структура С<sub>отп</sub> отличается высокой ударной вязкостью. Применяется высокий отпуск при термообработке деталей, работающих в условиях динамических (ударных) нагрузок, изготовленных из среднеуглеродистых (0,3...0,5 %С) конструкционных сталей.

### **3.4. Технология нагрева**

При выполнении любых операций термообработки необходимо придерживаться некоторых общих требований к технологии нагрева. При выборе температуры нагрева для конкретной операции можно использовать рекомендации табл. 1. Важную роль в технологии нагрева играет скорость нагрева. С точки зрения экономики она должна быть максимально допустимой. Ограничения в скорости нагрева связаны с возникновением перепада температур «поверхность – сердцевина» и термическими напряжениями внутри детали: чем выше скорость нагрева, тем больше перепад температур, тем больше величина внутренних напряжений, способных вызвать коробление или даже образование скрытых внутренних трещин. Практика термообработки выработала методики расчета продолжительности нагрева в разных нагревательных устройствах. Применительно к условиям нагрева малых цилиндрических образцов в лабораторных муфельных печах под операции отжига, нормализации, закалки можно воспользоваться формулой

$$\tau_{\text{общ.}} = 0,75 \cdot d + 5,$$

где  $\tau_{\text{общ.}}$  – время нагревания и выдержки в мин;

$d$  – диаметр цилиндрического образца, мм.

## **4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ**

1. Студенты выполняют работу бригадами по 2–3 человека. Каждой бригаде выдается преподавателем задание на проведение определенной операции и образец.

2. Студенты выбирают режим для заданной операции и вносят его в общую для группы таблицу прил. 1. При этом температура нагрева определяется из рекомендаций табл. 1.

3. Студенты измеряют твердость образца до термообработки, выполняют практически термообработку и замеряют твердость после термообработки. Все данные измерений вносят в общую таблицу отчета (см. прил. 1).

4. Изучается микроструктура до и после термообработки, анализируются результаты наблюдений по образцам всех бригад и формулируются выводы. По результатам термообработки строятся графики зависимости:

- а) твердости от скорости охлаждения;
- б) твердости от температуры отпуска.

## **5. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ**

При выполнении занятия необходимо соблюдать правила техники безопасности в термической лаборатории 3213, изложенные в инструкции, утвержденной ректором института.

## **6. ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА**

Отчет должен содержать краткие сведения о проделанной работе, таблицу результатов, графики режимов термообработки, рисунки микроструктур, выводы.

## **7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Что такое мартенсит, троостит, сорбит?
2. Как получить в доэвтектоидной стали структуры мартенсита, троостита, сорбита?
3. Чем отличается сорбит отпуска от сорбита, полученного при охлаждении аустенита?
4. Какая структура получится в доэвтектоидной стали после полной закалки? В заэвтектоидной стали?
5. Какая структура получится после неполной закалки в доэвтектоидной стали? В заэвтектоидной стали?
6. Какая структура получится в доэвтектоидной стали после полной закалки и низкого отпуска, среднего отпуска, высокого отпуска?

7. Каковы соотношения твердости (выше, ниже) применительно к вопросам 5, 6, 7?

### **СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Лахтин Ю. М. Материаловедение / Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева. – Москва: Металлургия, 1984.

2. Марочник сталей и сплавов / под ред. В. Г. Сорокина – Москва: Машиностроение, 1989.

3. Арзамасов Б. Н. Материаловедение / Б. Н. Арзамасов – Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003.

4. Методические указания к лабораторным работам:

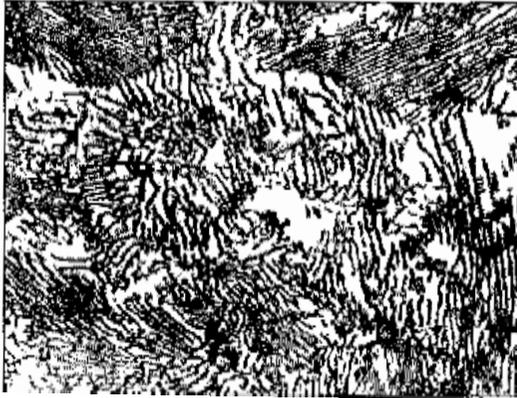
- Методы измерения твердости;

- Микроструктура и свойства углеродистых сталей;

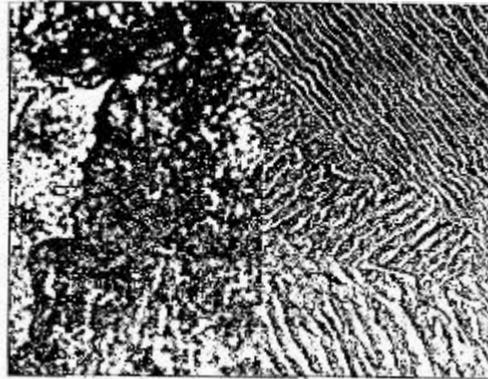
- Атлас микроструктур углеродистых и низколегированных сталей.



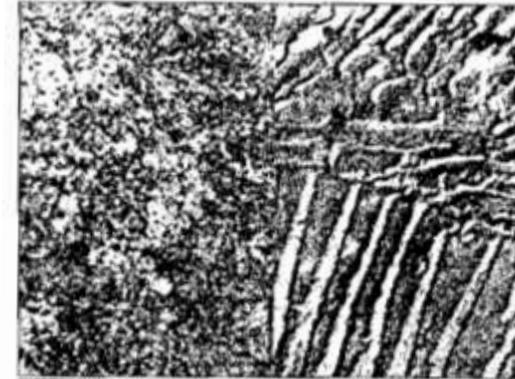
Перлит



Сорбит



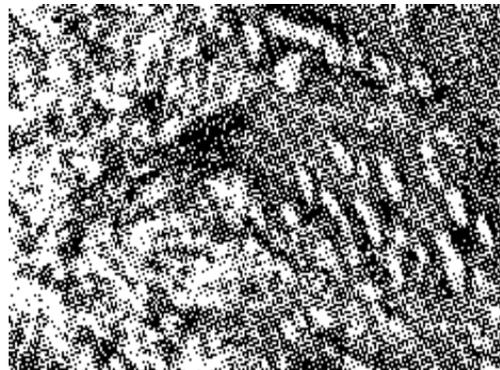
Троостит



*a*



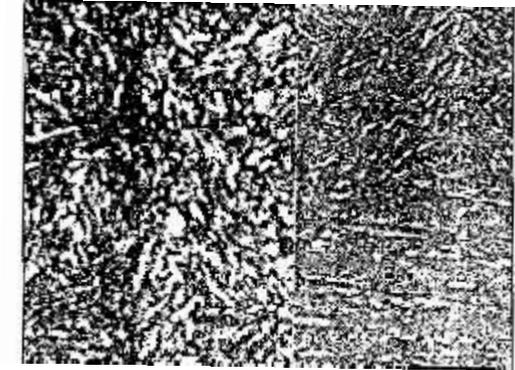
x200



x500

x10000

*б*



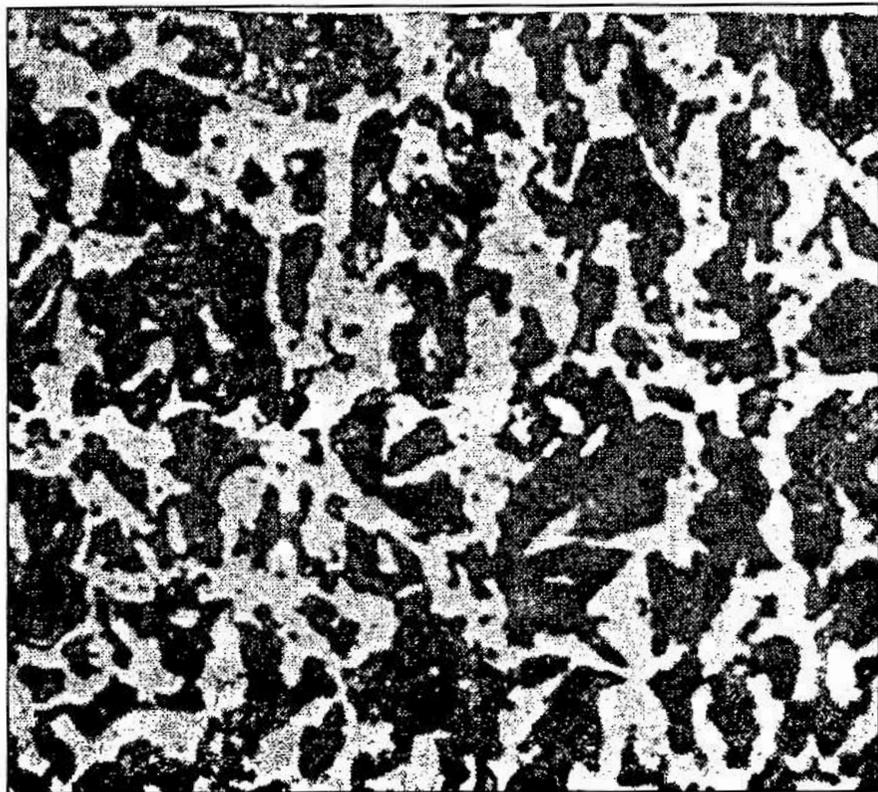
x500

x10000

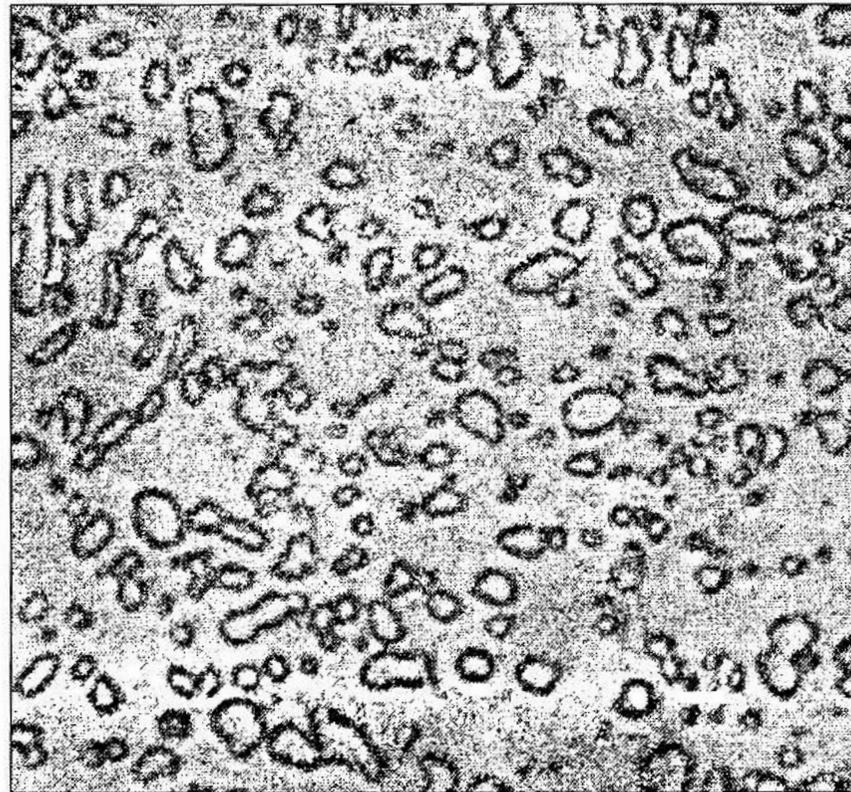
Микроструктура перлита, сорбита, троостита:

*a* – получены при непрерывном охлаждении; *б* – получены после закалки и отпуска

Феррит+Перлит



Перлит зернистый + Карбиды II



Мартенсит + Феррит

Мартенсит

Мартенсит + Феррит



Мартенсит + Цементит + Аустенит остаточный

а)

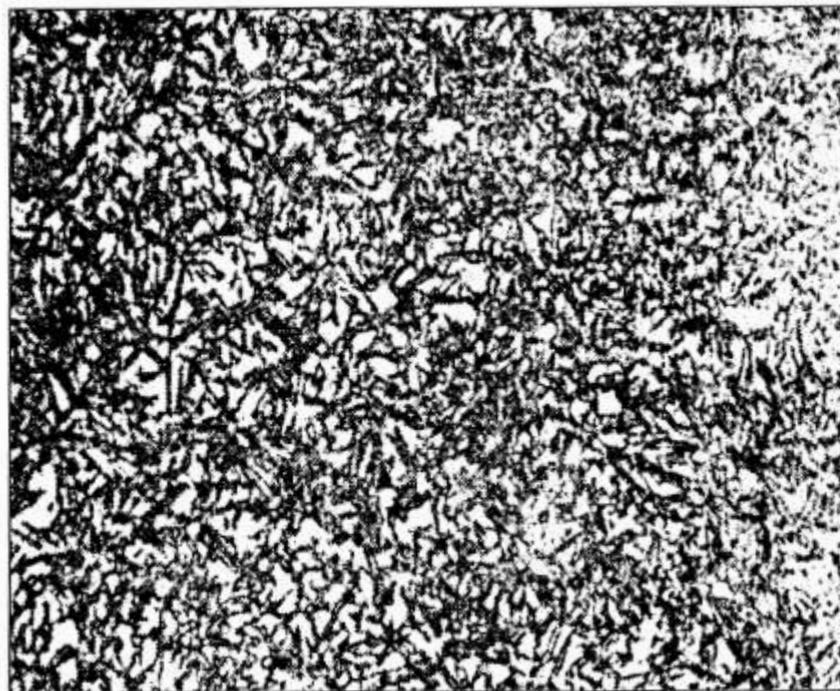
Мартенсит



Мартенсит + Аустенит остаточный

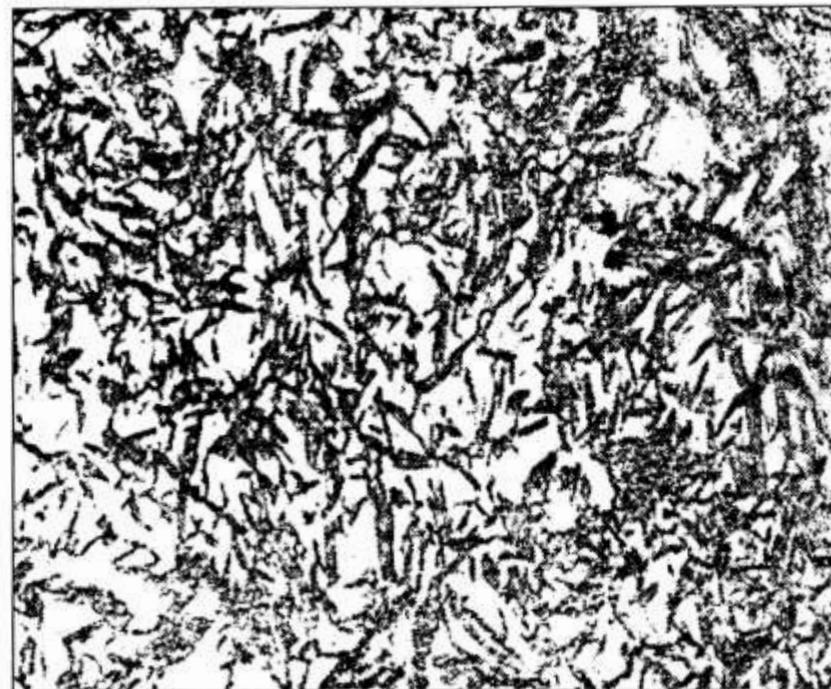
б)

Мартенсит + Цементит + Аустенит остаточный



а)

Мартенсит + Аустенит остаточный



б)

# Лабораторная работа №6 «ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СТАЛИ»

Составители: Драчев В. В., Петренко К. П.

## 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Ознакомиться с технологическим процессом химико-термической обработки на примере цементации, нитроцементации и азотирования. Исследовать структуру и свойства обработанных поверхностных слоев деталей.

## 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Химико-термической обработкой (ХТО) называют поверхностное насыщение стали различными элементами путем их диффузии из внешней среды при высокой температуре. Цель ХТО – повышение твердости, износостойкости, усталостной прочности, контактной выносливости и коррозионной стойкости поверхности деталей машин.

Процесс ХТО состоит из трех стадий:

1. Диссоциация – выделение насыщающего элемента в активном атомарном состоянии.
2. Адсорбция – захват поверхностью стали свободных атомов насыщающего элемента.
3. Диффузия – проникновение насыщающего элемента в глубь металла.

В зависимости от того, каким элементом насыщают поверхностный слой, существуют следующие виды ХТО:

- цементация (углеродом);
- азотирование (азотом);
- нитроцементация, цианирование (углеродом и азотом одновременно);
- диффузионное насыщение металлами и неметаллами (хромирование – хромом, алитирование – алюминием, силицирование – кремнием, борирование – бором и др.).

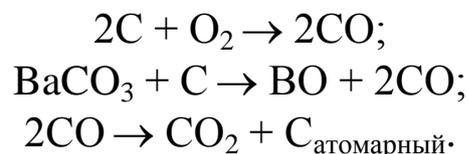
## 2.1. Цементация

Цементация – процесс насыщения поверхностного слоя стали углеродом.

Цементации подвергают детали машин, которые должны иметь износостойкую рабочую поверхность и вязкую сердцевину: зубчатые колеса, валы, пальцы, кулачки, червяки и т. д. Такие свойства обеспечивают вязкие низкоуглеродистые стали, содержащие 0,10-0,25 % углерода. Для цементации используют стали марок 10, 15, 20, 25, 15Х, 20Х, 15ХГР, 18ХГТ, 25ХГТ, 12ХНЗА, 20ХН4А, 20ХН2М и др. Поверхность насыщается углеродом до 0,8 – 1,1 % на глубину 0,5 – 2 мм.

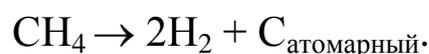
В промышленности применяют два способа цементации: в твердом и в газовом карбюризаторе (науглероживающей среде).

Наиболее распространенный твердый карбюризатор состоит из древесного угля с добавками 20–25 %  $\text{BaCO}_3$  для интенсификации процесса и 3–5 %  $\text{CaCO}_3$  для предотвращения спекания частиц карбюризатора. Детали, подлежащие цементации, и карбюризатор упаковывают в стальной ящик и нагревают в печи до температуры 910–930 °С. При этом протекают реакции:



Образующиеся активные атомы углерода диффундируют вглубь металла. Слой толщиной 1 мм образуется за 8–10 ч. После цементации ящик охлаждают на воздухе до 400–500 °С и затем раскрывают.

При газовой цементации в качестве карбюризатора используют природный газ, состоящий почти полностью из метана  $\text{CH}_4$ , а также жидкие углеводороды (керосин, бензол и др.), каплями подаваемые в герметичное рабочее пространство печи, где они образуют газовую среду по реакции:



Температура цементации 930–950 °С. Слой толщиной 1 мм образуется за 6–7 ч. В случае газовой цементации можно получить заданную концентрацию углерода в слое, сокращается длительность процесса (не надо прогревать ящики), обеспечивается возможность полной механизации и автоматизации процессов, упрощается последующая термическая обработка изделий. Ее широко применяют на заводах, изготавливающих детали массовыми партиями. Цементация в твердом карбюризаторе используется в условиях единичного и мелкосерийного производства.

Структура цементованного слоя после медленного охлаждения определяется содержанием углерода и, в соответствии с диаграммой Fe–Fe<sub>3</sub>C, состоит из трех зон: заэвтектоидной наружной (C > 0,8 %, структура – перлит и цементит вторичный), эвтектоидной (C = 0,8 %, структура – перлит) и доэвтектоидной (C < 0,8 %, структура – феррит и перлит) (рис. 1). Структура доэвтектоидной (переходной) зоны отличается от структуры сердцевины меньшим количеством феррита, доля которого возрастает от поверхности к сердцевине. Принято различать полную и эффективную толщину цементованного слоя. За эффективную толщину принимают сумму заэвтектоидной, эвтектоидной и половины доэвтектоидной зоны.

После цементации обязательно выполняют термическую обработку с целью обеспечения максимальной твердости цементованного слоя и вязкой сердцевины. В зависимости от условий работы детали, а также от технологических свойств стали применяют различные режимы термической обработки (рис. 2).

Для ответственных, тяжело нагруженных деталей машин, испытывающих динамические нагрузки, применяют сложную термическую обработку, состоящую из двух закалок (полной и неполной) и низкого отпуска (рис. 2, а). При первой закалке (полной) с нагревом выше температуры A<sub>c3</sub> на 30–50 °С происходит перекристаллизация сердцевины детали с образованием мелкого аустенитного зерна, что обеспечивает мелкозернистость продуктов распада. Одновременно при этом в поверхностном слое растворяется цементитная сетка, которая при быстром охлаждении вновь не образуется. Вторую закалку (неполную) с нагревом выше A<sub>c1</sub> на 30–50 °С проводят для устранения перегрева цементованного слоя и придания ему высокой твердости.

Заключительной операцией является низкий отпуск при 160–200 °С, переводящий мартенсит закалки в поверхностный слой в отпущенный мартенсит и уменьшающий остаточные напряжения.

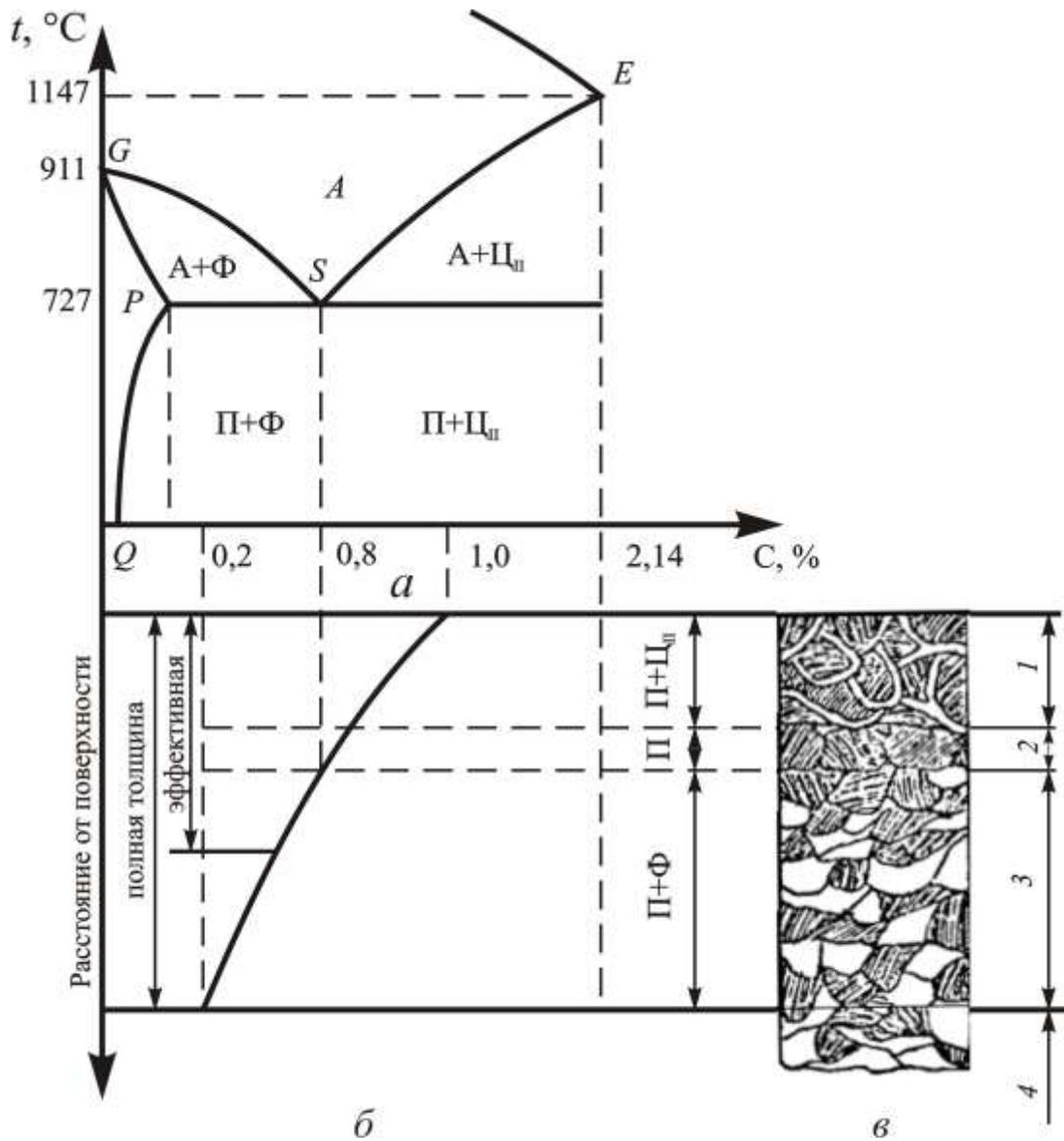


Рис. 1. Влияние содержания углерода на структуру цементованного слоя:

$a$  – диаграмма состояния Fe–Fe<sub>3</sub>C;  $b$  – изменение содержания углерода в цементованном слое;  $v$  – структура цементованного слоя (1 – заэвтектоидная зона, 2 – эвтектоидная зона, 3 – доэвтектоидная (переходная) зона, 4 – сердцевина)

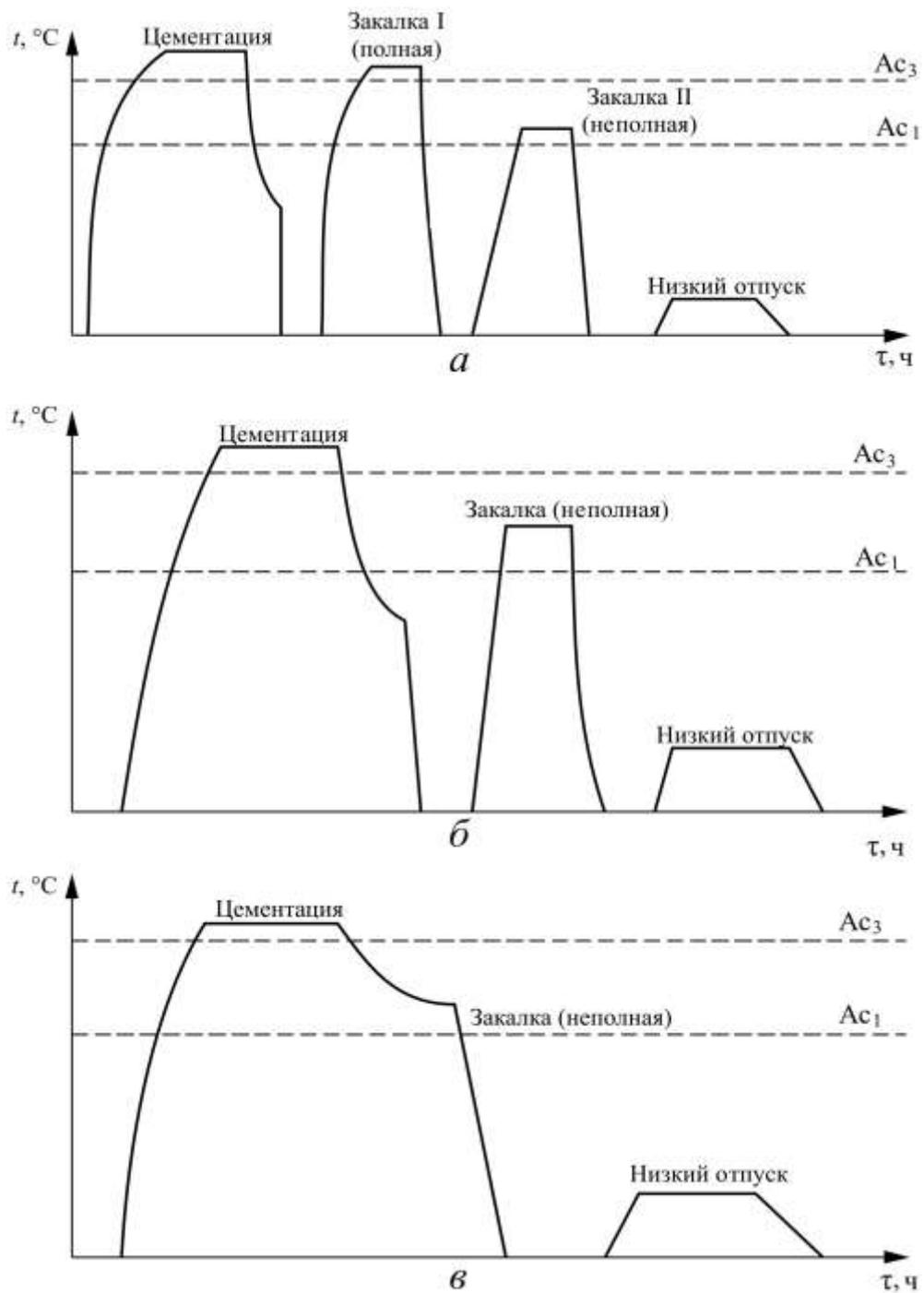


Рис. 2. Режимы термической обработки цементованных деталей:  
*a* – для ответственных деталей; *б*, *в* – для менее ответственных  
 деталей из углеродистых сталей и для деталей из легированных  
 наследственно мелкозернистых сталей

Для менее ответственных деталей из углеродистых сталей и для деталей из легированных наследственно мелкозернистых сталей применяют более простую термообработку, состоящую из одной неполной закалки и низкого отпуска (рис. 2, б). В этом случае температура неполной закалки несколько повышается, чтобы растворить цементитную сетку в заэвтектоидной зоне цементованного слоя и обеспечить образование глобулярных вторичных карбидов.

В случае газовой цементации закалку можно проводить после подстуживания с цементационного нагрева (рис. 2, в). Такая обработка является наиболее экономичной.

В результате термической обработки поверхностный слой будет иметь структуру отпущенного мартенсита с глобулярными включениями вторичных карбидов (твердость 56–62 HRC или 650–800 HV). Структура сердцевины зависит от химического состава стали и может быть: феррито-перлитной (160–180 HB) – в углеродистых сталях (стали 15, 20, 25), сорбитной (25–35 HRC) – в низколегированных сталях (15X, 20X, 15XФ, 20Г2), бейнитной или даже мартенситной с пониженным содержанием углерода (40–45 HRC) – в среднелегированных сталях (20ХН3А, 20Х2Н4А, 20ХН3ФА).

## 2.2. Азотирование

Азотированием называется процесс диффузионного насыщения поверхности стали азотом. Для азотирования применяют среднеуглеродистые стали, содержащие Cr, Mo, V, W, Al, Ti. Нитриды этих элементов обладают высокой твердостью и термической устойчивостью. Типичными для азотирования являются стали 38Х2МЮА, 38ХМЮА, 35ХМЮА. В настоящее время для этой цели применяют также конструкционные стали 40ХФА, 30Х3МФ1, 38ХНМФА, 40ХГМ, 30Х3ВА, 30ХГТ, 30ХТ2, 30ХТ2Н3Ю, а при невысоких контактных нагрузках – 30Х, 40Х. Кроме того, для повышения коррозионной стойкости азотированию подвергают жаропрочные и коррозионно-стойкие конструкционные стали, а также высокопрочные чугуны.

Перед азотированием детали подвергают термической обработке, состоящей из закалки и высокого отпуска (температура

отпуска должна быть выше температуры азотирования) – улучшению на структуру сорбита отпуска. Затем производят механическую обработку, придающую окончательные размеры изделию. После азотирования производят окончательное шлифование или полирование.

Азотирование проводят в герметичных камерах, куда подается аммиак  $\text{NH}_3$ . При нагреве он диссоциирует по реакции:



Атомарный азот адсорбируется поверхностью стали и диффундирует вглубь металла.

Существует две разновидности азотирования: низкотемпературное – для повышения поверхностной твердости и износостойкости и высокотемпературное – для улучшения коррозионной стойкости.

Обычно применяют низкотемпературное азотирование, которое проводят при температуре 500–520 °С в течение 24–60 ч. Толщина слоя составляет 0,3–0,6 мм, твердость 1100–1200 HV. Высокотемпературное азотирование ведут при 650–700 °С. Продолжительность процесса 1–6 ч при толщине слоя 0,3–0,4 мм и твердости 800–950 HV.

Структура азотированного слоя, распределение азота и твердости в ней приведены на рис. 3. Она включает в себя темный тонкий слой коррозионно-стойкой  $\epsilon$ -фазы (твердый раствор на основе  $\text{Fe}_2\text{N}$ ), затем следует зона белой нетравящейся  $\gamma'$ -фазы (твердый раствор на основе  $\text{Fe}_4\text{N}$ ), третья зона представляет из себя азотистый эвтектоид – смесь азотистого феррита  $\alpha$ ,  $\gamma'$ -фазы, карбонитридов и нитридов. Эффективной азотируемой зоной считается зона внутреннего азотирования без первой зоны.

По сравнению с цементацией азотирование имеет ряд преимуществ: более высокая твердость и износостойкость поверхностного слоя, сохранение им высоких свойств при нагреве до 500 °С (цементованный слой – до 200 °С), повышенное сопротивление коррозии. Недостатками азотирования являются большая длительность процесса и необходимость применения дорогих легированных сталей.

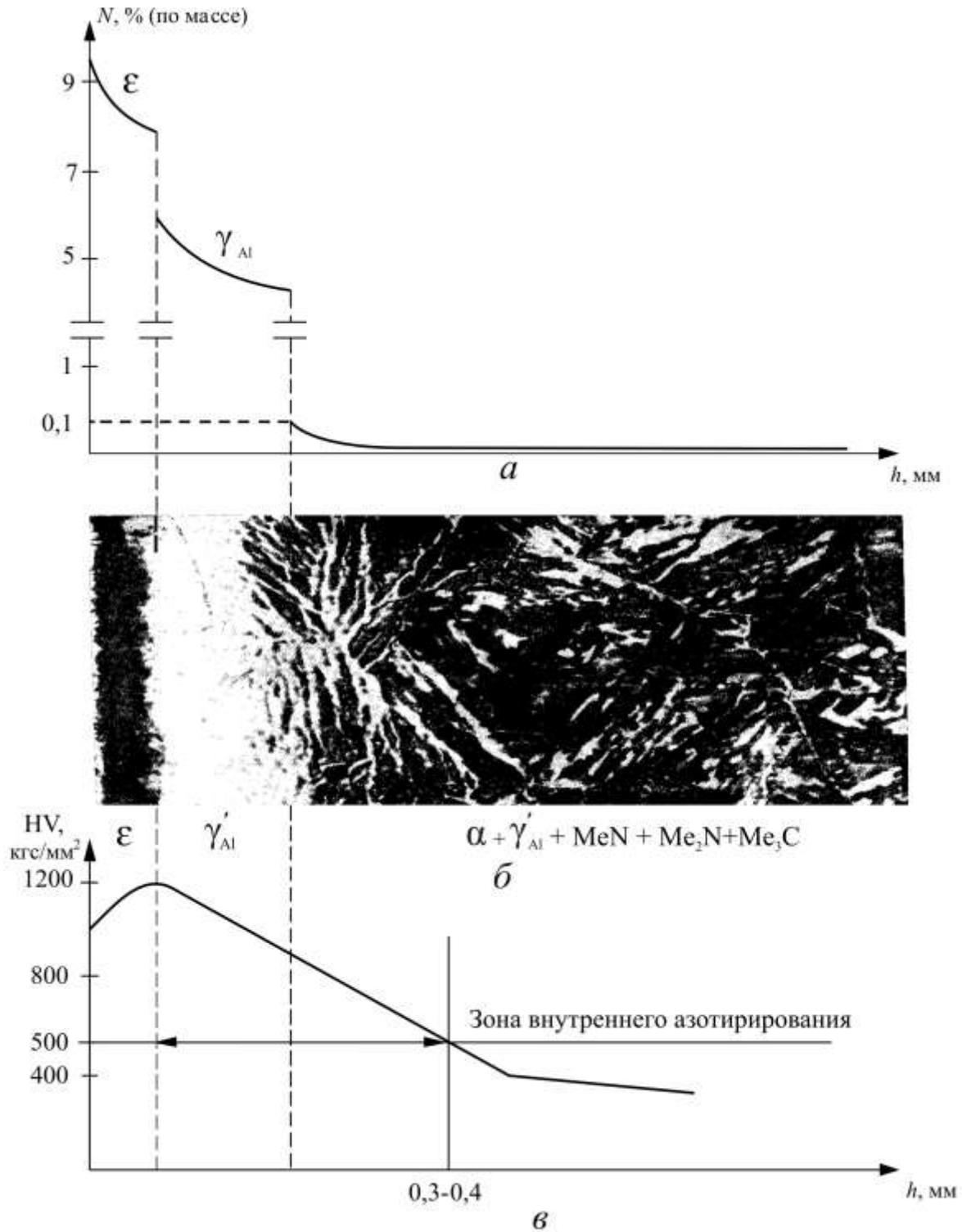


Рис. 3. Структура и свойства азотированного слоя:  
 $a$  – распределение азота;  $b$  – структура;  
 $v$  – распределение твердости

Азотирование применяют для изготовления деталей, испытывающих высокие циклические нагрузки, трение, абразивный износ: коленчатые валы, гильзы цилиндров, червяки, шестерни и др.

### 2.3. Нитроцементация

Нитроцементация – процесс насыщения поверхности стали одновременно углеродом и азотом. Этот метод ХТО применяется с той же целью и на тех же сталях, что и цементация.

Нитроцементацию проводят в газовой среде, состоящей из смеси природного газа и аммиака, при 840–860 °С. Продолжительность процесса 4–10 ч, толщина слоя 0,2–0,8 мм. После нитроцементации следует закалка непосредственно из печи и низкий отпуск при 160–180 °С (рис. 2, в).

Одновременное насыщение стали углеродом и азотом может также производиться при 820–860 °С в расплавленных солях, содержащих цианистый натрий: 20–25 % NaCN, 25–50 % NaCl и 25–50 % Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>. Такой процесс называют цианированием. Несмотря на сокращение длительности (слой толщиной 0,15–0,30 мм образуется за 30 – 90 мин), цианирование используется реже из-за токсичности цианистых солей.

Структура поверхностного слоя после термической обработки состоит из мартенсита отпуска, остаточного аустенита и небольшого количества мелких, равномерно распределенных карбонитридов. Твердость 58–60 HRC (700–750 HV). Сердцевина имеет ту же структуру, что и после цементации. Чаще всего это троостит, бейнит или низкоуглеродистый мартенсит с твердостью 40–45 HRC.

Преимуществами нитроцементации по сравнению с цементацией являются меньшая длительность процесса за счет ускорения диффузии углерода в присутствии азота, меньшая деформация деталей из-за более низкой температуры процесса, более простая термообработка за счет совмещения операций нитроцементации и закалки, большее сопротивление износу и коррозии. Однако, из-за меньшей глубины слоя, детали после нитроцементации уступают цементованным по контактной усталостной прочности.

Нитроцементацию широко применяют в автомобиле- и тракторостроении для изготовления деталей сложной конфигурации, склонных к короблению.

## 2.4. Диффузионное насыщение металлами и неметаллами

Эти процессы применяют для повышения коррозионной стойкости, жаростойкости, твердости и износостойкости сталей и сплавов. Диффузионное насыщение обычно осуществляют в твердых средах (порошках) соответствующего состава. Насыщаемые детали вместе с порошком упаковывают в металлические контейнеры, нагревают до 1000–1200 °С и выдерживают несколько часов.

В структуре насыщенного слоя образуются твердые растворы легирующего элемента в  $\alpha$ -железе и упрочняющие вторичные фазы в виде химических соединений ( $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ ,  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{FeV}$ ,  $\text{Fe}_2\text{V}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Упрочняющие фазы повышают твердость и износостойкость, а окислы – коррозионную стойкость и жаростойкость.

Состав смесей, свойства и применение приведены в таблице.

Процессы диффузионного насыщения

Процесс ХТО	Состав смеси, %	Твердость HV; глубина слоя $h$ , мм	Применение
Алиитрование	I. 49 – 49,5 Al; 49 – 49,5 $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; 1 – 2 $\text{NH}_4\text{Cl}$ II. 99,5 FeAl; 0,5 $\text{NH}_4\text{Cl}$	500 HV; $h = 0,2 – 1,0$	Для повышения жаростойкости, коррозионной и эрозивной стойкости
Хромирование	I. 50 FeCr; 43 $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; 7 $\text{NH}_4\text{Cl}$ II. 60 FeCr; 38,8 каолин; 1,2 $\text{NH}_4\text{Cl}$	1200 – 1300 HV; $h = 0,1 – 0,2$	Для повышения коррозионной стойкости, износостойкости, жаростойкости
Силицирование	I. 40 Si; 59 $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; 1 $\text{NH}_4\text{Cl}$ II. 75 FeSi; 20 шамот; 5 $\text{NH}_4\text{Cl}$	200 – 300 HV; $h = 0,3 – 1,0$	Для повышения коррозионной стойкости, износостойкости и твердости

Продолжение таблицы

Процесс ХТО	Состав смеси, %	Твердость HV; глубина слоя $h$ , мм	Применение
Борирование	I. $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ II. $\text{NaCl}$ ; $\text{BaCl}_2$ ; $\text{B}_4\text{C}$	1800 – 2000 HV; $h = 0,1 - 0,2$	Для повышения средней износостойкости в 4 – 6 раз по сравнению с цементацией, высокой коррозионной стойкости в агрессивных средах

### 3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с основными теоретическими положениями.
2. С помощью металлографического микроскопа изучить структуру цементованного слоя после цементации и после термической обработки, а также азотированного слоя. Зарисовать их.
3. Измерить распределение твердости в термообработанных образцах после цементации.
4. Используя окуляр со шкалой, измерить толщину заэвтектоидной, эвтектоидной и доэвтектоидной зон и рассчитать эффективную глубину цементованного слоя на образцах до термической обработки. Цену деления окулярной шкалы определить с помощью объект-микрометра с ценой деления 0,01 мм по формуле:

$$Ц = \frac{n_1 \cdot 0,01}{n_2},$$

где  $Ц$  – цена деления окулярной шкалы, мм;

$n_1$  – количество делений на объект-микрометре;

$n_2$  – количество делений на окулярной шкале.

### 4. ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать:

1. Наименование и цель лабораторной работы.
2. Рисунки структур цементованного и азотированного слоев.
3. Расчет эффективной толщины цементованного слоя.

## 5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое цементация, нитроцементация, азотирование?
2. С какой целью проводят ХТО?
3. Какие стали используются для различных видов ХТО?
4. Какие существуют способы цементации, азотирования?
5. В чем преимущество газовой цементации по сравнению с цементацией в твердом карбюризаторе?
6. Из каких зон состоит цементованный слой?
7. С какой целью проводится термическая обработка после цементации, нитроцементации, какие существуют варианты?
8. Каковы преимущества нитроцементации?
9. Особенности технологии азотирования, область применения.
10. Методы диффузионного насыщения металлами и неметаллами, их применение.

## СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Материаловедение: учебник для студентов вузов / под ред. Б. Н. Арзамасова, Г. Г. Мухина. – Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – 648 с.
2. Материаловедение: учебник для вузов / Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева. – 4-е изд. – Москва: Альянс, 2009. – 528 с.
3. Лахтин, Ю. М. Химико-термическая обработка металлов / Ю. М. Лахтин, Б. Н. Арзамасов. – Москва: Металлургия, 1985. – 256 с.

# Лабораторная работа №7 «ЛЕГИРОВАННЫЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ СТАЛИ ОБЩЕГО И СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ»

Составители: Короткова Л. П., Лащенина С. В.

## 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Цель – изучение микроструктуры, свойств, типовых режимов термической обработки легированных конструкционных сталей.

## 2. КЛАССИФИКАЦИЯ ЛЕГИРОВАННЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ ПО НАЗНАЧЕНИЮ

Конструкционные стали – это стали, из которых изготавливают всевозможные детали машин, инженерные конструкции, приборы. Их можно подразделить на стали общего и специального назначения.

Из сталей общего назначения изготавливают большинство деталей машин и конструкций. Их подразделяют:

- 1) на строительные;
- 2) цементуемые;
- 3) улучшаемые.

Стали специального назначения – это такие стали, которые обладают специфическими основными или технологическими свойствами. В связи с этим они имеют специализированную область применения. Свойства таких сталей обеспечиваются определенным химическим составом и термической обработкой.

Среди применяемых в настоящее время можно выделить следующие группы специальных сталей:

– *группа специализированных конструкционных сталей*

- 1) с высокими упругими свойствами (рессорно-пружинные);
- 2) износостойкие стали (подшипниковые, стали Гатфильда);
- 3) с повышенной обрабатываемостью резанием (автоматные);
- 4) с улучшенными литейными свойствами;

– *группа специальных сталей*

- 5) коррозионностойкие;
- 6) жаропрочные;

7) с особыми физическими свойствами (электротехнические, магнитные, с заданным температурным коэффициентом линейного расширения и др.).

### 3. КЛАССИФИКАЦИЯ ЛЕГИРОВАННЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ ПО СТРУКТУРЕ В РАВНОВЕСНОМ СОСТОЯНИИ

В современных легированных сталях в качестве легирующих элементов используют в основном: хром, никель, марганец, кремний, молибден, вольфрам, ванадий, титан, реже – кобальт, алюминий, медь, цирконий, бор, азот. Эти легирующие элементы растворяются в твердом растворе, карбидах, при определенных концентрациях образуют специальные фазы. Кроме того, они меняют положение линий на диаграмме состояний, что отражается на структуре сталей в равновесном состоянии (рис. 1). Легированные стали по структуре в равновесном состоянии подразделяют на классы.

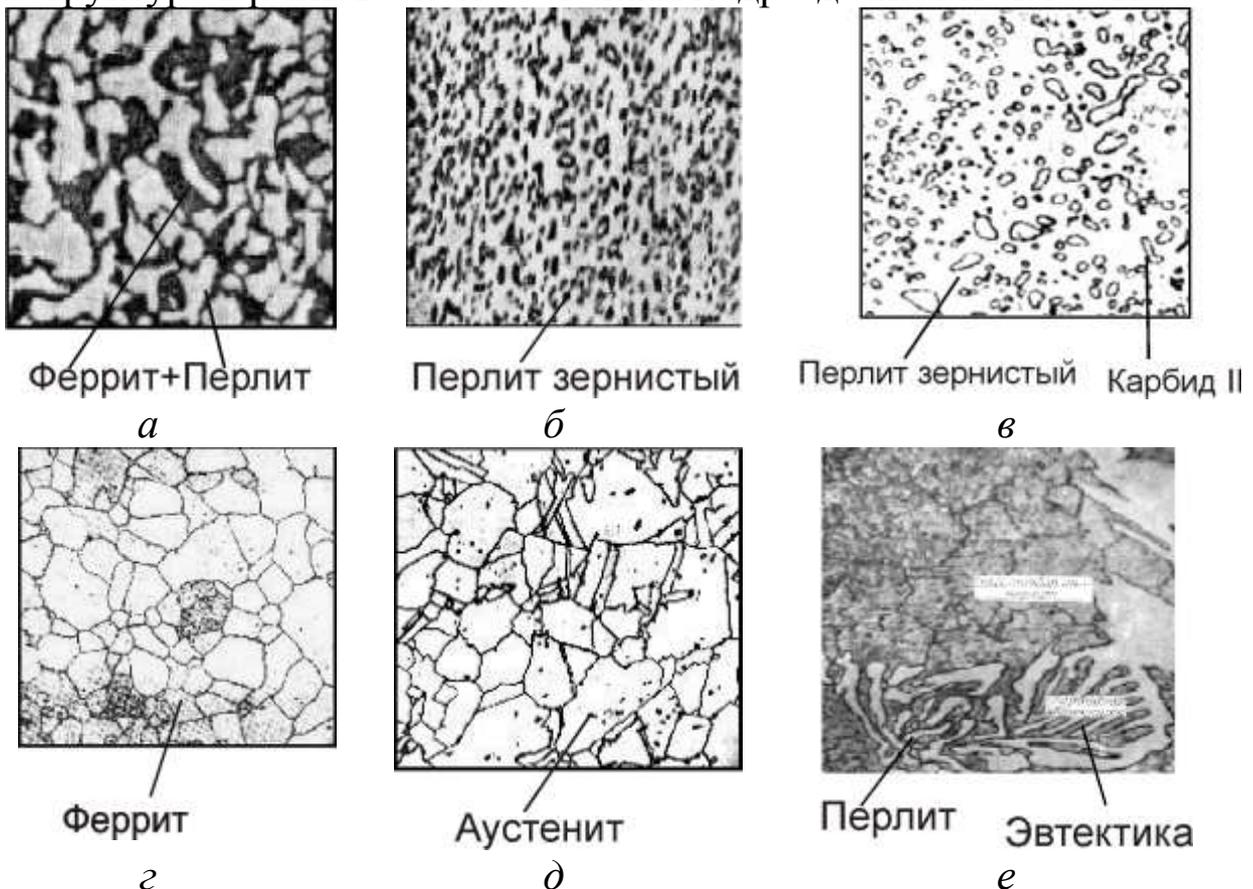


Рис. 1. Структура сталей в равновесном состоянии:

*a, б, в* – перлитный класс; *г* – ферритный класс;  
*д* – аустенитный класс; *е* – карбидный класс (ледебуритный)

**Перлитный класс.** Суммарное количество легирующих элементов в них не превышает 5 %.

В зависимости от содержания углерода они имеют структуру до-, за- или эвтектоидной стали (рис. 1, а, б, в).

**Ферритный класс.** Низкоуглеродистые ( $C \leq 0,2$  %), высокохромистые либо кремнесодержащие (2–4 % кремния) стали.

Имеют структуру феррита при всех температурах до температур плавления (рис. 1, г).

**Аустенитный класс.** Низкоуглеродистые ( $C \leq 0,2$  %), содержание Ni и Mn в сумме  $\geq 10$  %.

Имеют структуру аустенита при всех температурах до температур плавления (рис. 1, д).

**Ледебуритный или карбидный класс.** Высокоуглеродистые ( $C \geq 0,8$  %), содержащие карбидообразующие элементы в сумме  $\geq 10$  %.

В структуре таких сталей имеется грубая карбидная эвтектика (рис. 1, е).

### 3.1. Влияние легирующих элементов на структуру сталей в равновесном состоянии

Легирующие элементы при введении в сталь в количестве менее 5 % растворяются в кристаллических решетках железа и цемента, образуя легированный феррит, аустенит, цементит. Стали с такой структурой называют сталями *перлитного класса*, так как они сохраняют структуру углеродистых сталей.

При большем количестве легирующих элементов превышает предельная растворимость твердых растворов, что приводит к образованию специальных избыточных фаз в виде карбидов либо интерметаллидов.

Растворяясь в железе, легирующие элементы изменяют температуры полиморфных превращений  $Fe_{\alpha} \rightarrow Fe_{\gamma}$ ,  $Fe_{\gamma} \rightarrow Fe_{\alpha}$ , т. е.  $A_4$  и  $A_3$  соответственно, температуры эвтектоидной  $A_1$  и эвтектической реакций, температуру магнитного превращения  $A_2$ . Дополнительно под влиянием легирующих элементов меняется растворимость углерода в железе, что приводит к смещению линий растворимости твердых растворов и в целом к изменению диаграмм состояния по сравнению с диаграммой Fe – Fe<sub>3</sub>C (рис. 2, а).

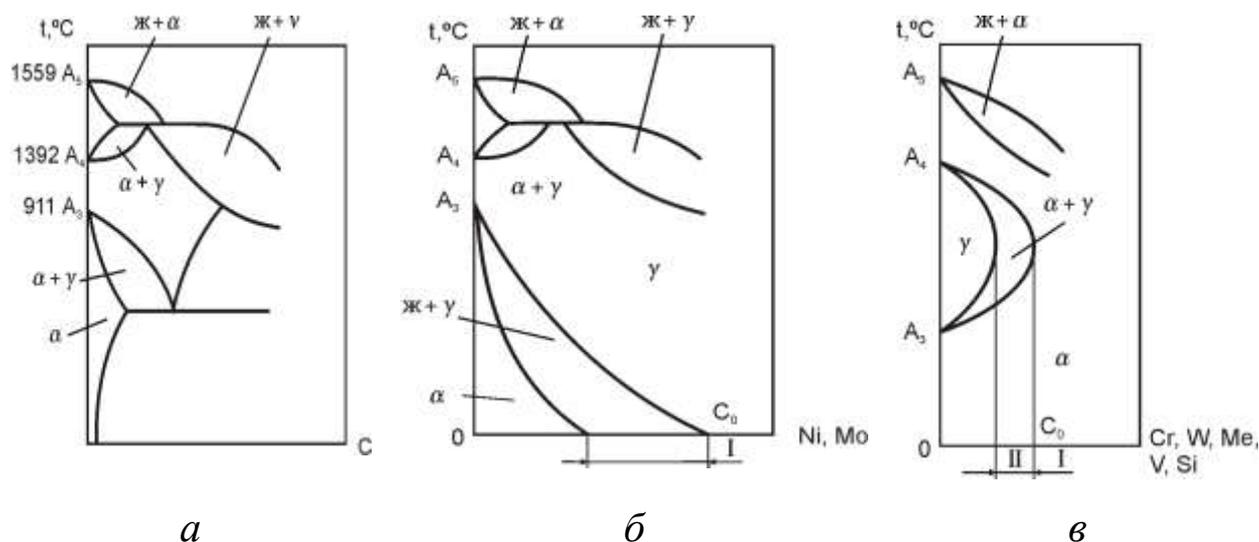


Рис. 2. Диаграммы состояния железо – легирующий элемент

Все легирующие элементы по влиянию на температуры полиморфного превращения делятся на две группы.

1. Никель, марганец, углерод, азот расширяют область существования аустенита ( $\gamma$ -область) за счет повышения  $A_4$  и понижения  $A_3$  (рис. 2, б).

В соответствии с диаграммой состояния стали с концентрацией легирующих элементов более  $C_0$  называются сталями **аустенитного класса** (I), так как в них полностью отсутствует полиморфное превращение  $Fe_\gamma \rightarrow Fe_\alpha$ , если частично – полуаустенитного класса (II).

2. Хром, молибден, вольфрам, ванадий, кремний, титан и др. расширяют область существования феррита за счет понижения  $A_4$  и повышения  $A_3$  (рис. 2, в). В результате область  $\gamma - Fe$  закрывается, а область  $\alpha - Fe$  – открывается.

В соответствии с диаграммой состояния, стали с концентрацией легирующих элементов более  $C_0$ , в которых полностью отсутствует  $Fe_\alpha \rightarrow Fe_\gamma$ , называют сталями **ферритного класса** (I), если частично – полуферритного (II). Под влиянием легирующих элементов изменяются предельная растворимость углерода в твердых растворах, эвтектическая и эвтектоидная концентрации, как правило, в сторону уменьшения. Поэтому в структуре сталей, особенно с содержанием карбидообразующих элементов более 10 % при концентрации углерода 1 % и более, появляется карбидная эвтектика, и эти стали называют сталями **карбидного** или **ледебуритного класса**.

В зависимости от легирующих элементов в сталях могут встречаться следующие виды карбидов:  $Mn_3C$ ,  $Fe_3C$  ( $Me_3C$ );  $Cr_7C_3$  ( $Me_7C_3$ );  $Cr_{23}C_6$  ( $Me_{23}C_6$ );  $Mo_6C$ ,  $W_6C$  ( $Me_6C$ );  $VC$ ,  $TiC$ ,  $ZrC$  ( $MeC$ ).

Так как в решетках карбидов могут растворяться другие легирующие элементы, то карбиды часто обозначают в общем виде, где пишется значок  $Me$  – это металл.

По склонности карбидообразования легирующие элементы расположены в следующем порядке (возрастает от  $Fe$  к  $Ti$ ):

$Fe$ ,  $Mn$ ,  $Cr$ ,  $Mo$ ,  $W$ ,  $V$ ,  $Nb$ ,  $Zr$ ,  $Ti$ .

Углерод в первую очередь связывается в карбиды с самым сильным карбидообразующим элементом титаном, и если углерод остается, то с менее сильным карбидообразующим элементом и в последнюю очередь с железом, как самым слабым карбидообразующим элементом.

## **4. КОНСТРУКЦИОННЫЕ СТАЛИ ОБЩЕГО НАЗНАЧЕНИЯ**

### **4.1. Особенность легирования**

Основными легирующими элементами конструкционных сталей общего назначения являются недорогие и недефицитные  $Cr$  (до 2 %),  $Mn$  (до 1,5 %),  $Si$  (до 2 %). Кроме того, в некоторых случаях вводят дефицитные и дорогие  $Ni$  (от 1 до 5 %),  $W$  (от 0,8 до 1,2 %),  $Mo$  (от 0,2 до 0,4 %),  $V$  (до 0,3 %),  $Ti$  (до 0,1 %). Суммарное количество легирующих элементов в этих сталях не превышает 5 %. Легирующие элементы растворяются в феррите и цементите, не образуя специальных фаз. Поэтому по структурному признаку это стали перлитного класса.

Основная цель легирования – повышение конструктивной прочности, повышение прокаливаемости, получение мелкого зерна.  $Si$ ,  $Mn$ ,  $Cr$  растворяются в феррите и упрочняют его, однако при введении этих легирующих элементов более 1 %, а  $Mn$  – 2 % резко снижается пластичность сталей, что недопустимо для конструктивных сталей. Исключение составляет  $Ni$ , который повышает прочность, не снижает пластичность сталей (рис. 3).

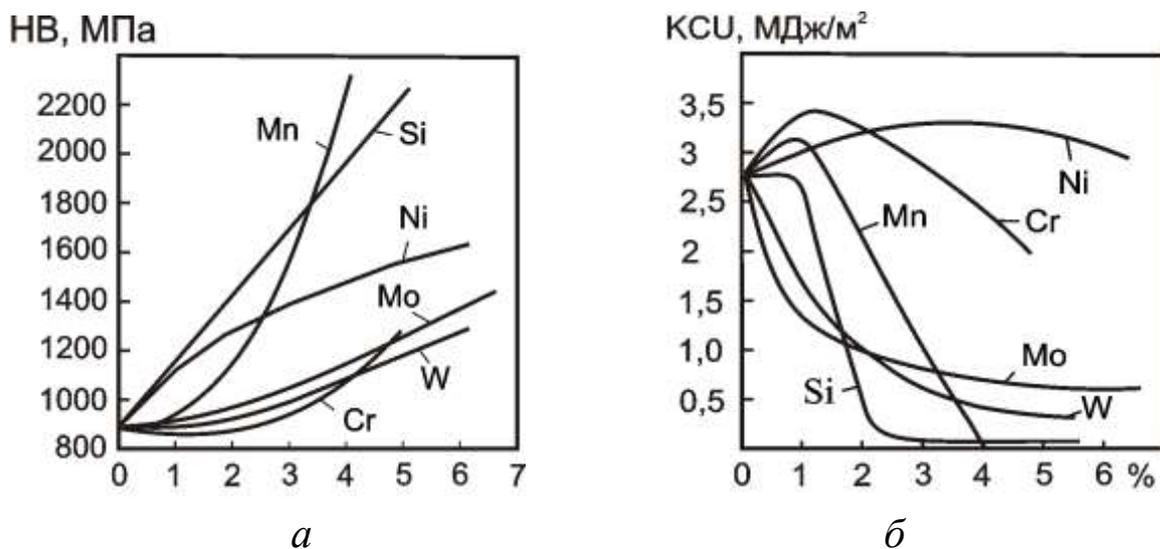


Рис. 3. Влияние легирующих элементов на свойства феррита:  
 а – твердость; б – ударная вязкость

Максимальное количество Ni в конструкционных сталях составляет 5 %. Дополнительная положительная роль Ni заключается в снижении порога хладноломкости (1 % понижает  $T_{п.хл}$  на 20–30 °С).

Все перечисленные легирующие элементы повышают прокаливаемость стали, так как замедляют диффузионные процессы, снижая скорость распада мартенсита при нагреве. Чем больше сумма легирующих элементов, тем выше прокаливаемость (от 15–20 мм в хромистых и более 100 мм в хромоникелевых).

Карбидообразующие элементы W, Mo, V, Ti вводят в основном для измельчения зерна и уменьшения склонности низколегированных, особенно хромистых сталей, к отпускной хрупкости второго рода за счет увеличения объемной доли карбидной фазы. Но при этом снижается прокаливаемость сталей.

#### 4.2. Маркировка легированных сталей

Легированные стали маркируют буквами и цифрами (ГОСТ 4543–71).

Принято обозначать:

Cr – X,	Ni – H,	Mn – Г,	Si – С,	Mo –	W – В,
				М,	
Ti – Т,	V – Ф,	Al –	Cu – Д,	Nb – Б,	Co – К,
		Ю,			
B – Р,	N – А,	Zr – Ц,	P – П.		

Цифра после буквы указывает на примерное содержание легирующих элементов в процентах. Если цифра отсутствует, то легирующего элемента меньше или около 1 %, а карбидообразующих элементов в конструкционных сталях в этом случае десятые доли процента. Две цифры в начале маркировки указывают на содержание углерода в сотых долях процента в конструкционных сталях, а в инструментальных – на содержание углерода в десятых долях. Если перед маркировкой стоят буквы, то они означают: Ш – подшипниковая, А – автоматная. А, Ш в конце маркировки означают, что сталь высококачественная, особовысококачественная соответственно.

### **4.3. Типовые режимы термической обработки**

#### **4.3.1. Строительные стали**

Содержат до 0,22 % углерода (из соображений хорошей свариваемости). Это в основном недорогие марганцевистые, хромистые стали следующих марок: 09Н2, 14Г2, 12ГС, 17ГС, 17Г1С, 09Г2С, 10Г2С1, 15Г2СФД, 1612АФ, 14ХГС, 10ХСНД, 15ХСНД, 25ХСНД, 25Г2С, 35ГС (ГОСТ 19281–89).

Поступают чаще всего строительные стали в виде нормализованного проката (рис. 4, а) либо после закалки и высокого отпуска (рис. 4, в).

Структура после нормализации состоит из феррита и перлита мелкозернистых (НВ 160–220) (рис. 5, е), после улучшения – из сорбита (НВ 200–250) (рис. 5, з).

#### **4.3.2. Цементуемые стали**

Содержат менее 0,25 % С (ГОСТ 4543–71): 15Х, 20Х, 15Г, 18ХГР, 15ХФ, 25ХГТ, 20ХН, 12ХН2А, 12ХН3ФА, 12Х2Н4А, 20Х2Н4А.

Подвергаются цементации с последующей закалкой и низким отпуском (см. рис. 4, б). Термическая обработка направлена на получение высокой твердости на поверхности (HRC 58–62) со структурой мартенсита и вторичных карбидов за счет неполной закалки и на получение повышенной пластичности в сердцевине с сорбитной структурой с HRC 25–35 за счет полной закалки. Заключительной

операцией обязательно является низкий отпуск, цель которого снять напряжение и ликвидировать остаточный аустенит.

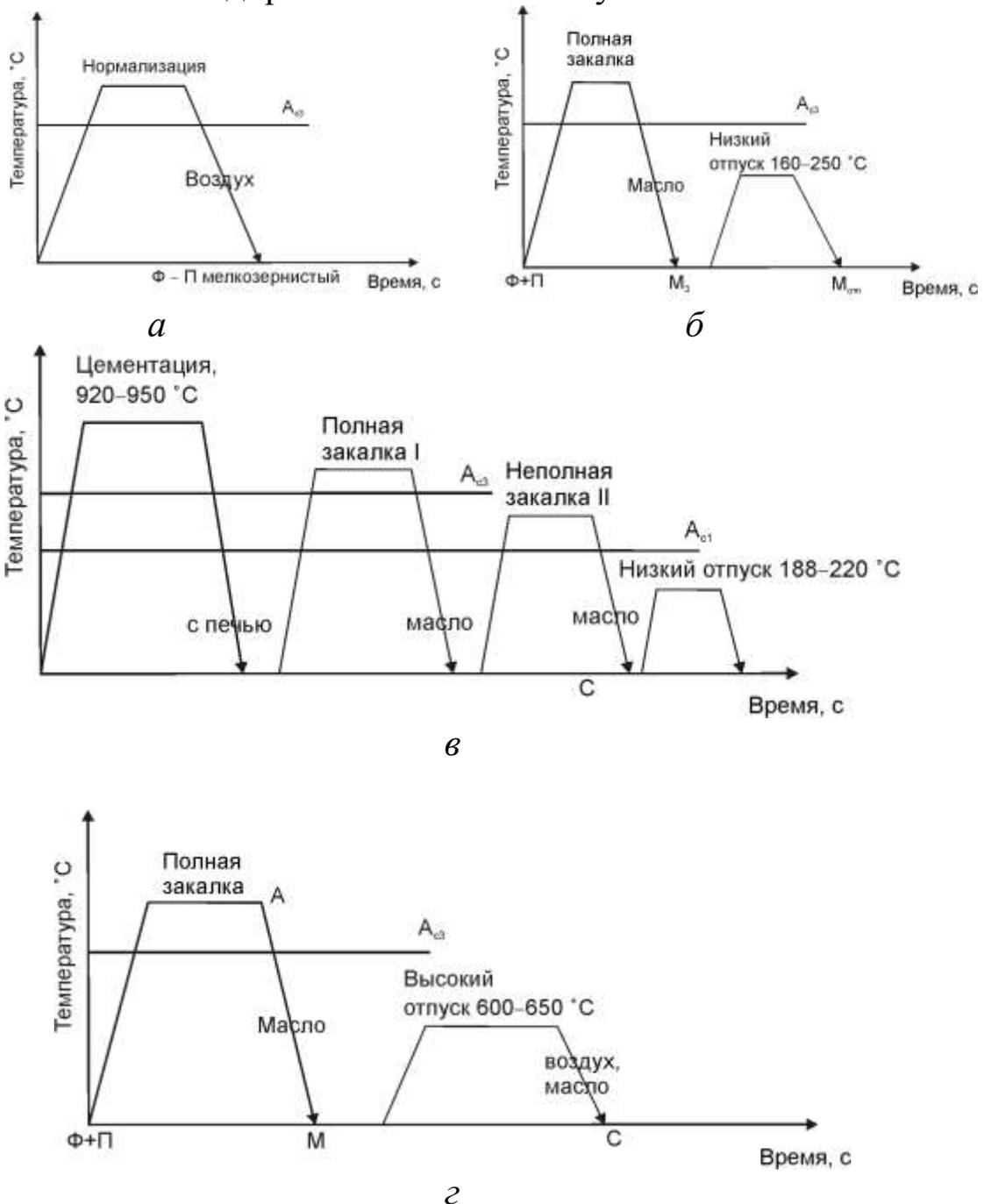


Рис. 4. Типовые режимы термической обработки сталей общего назначения: *а, б* – строительных; *в* – цементуемых; *г* – улучшаемых (Ф – феррит, П – перлит, К – карбид, М – мартенсит, С – сорбит)

В некоторых случаях возможна отмена полной закалки с нагревом выше линии  $A_{c3}$ . Во-первых, для легированных карбидообразующими элементами сталей, которые не склонны к росту зерна при

температурах цементации. Во-вторых, в случае пониженных требований к общей прочности деталей.

#### 4.3.3. Улучшаемые стали

Содержат 0,3–0,5 % С (ГОСТ 4543–71): 30Х, 35Х, 38ХА, 40Х, 50Х, 30Г, 40Г, 35Г, 50Г, 35Г2, 40Г2, 45Г2, 50Г2, 30ХГТ, 40ХФА, 33ХС, 38ХС, 40ХС, 30ХГС, 35ХГСА, 30ХМ, 35ХМ, 40ХН, 50ХН, 30ХН3А, 38ХГН, 30ХН2МА, 40Х2Н2МА и др.

Подвергаются термической обработке – улучшению (см. рис. 4, в) на структуру сорбит (см. рис. 5, г) с твердостью НРС 30–35. Такая термическая обработка обеспечивает наилучшее сочетание прочности и вязкости, что обеспечивает конструктивную прочность деталям машин.

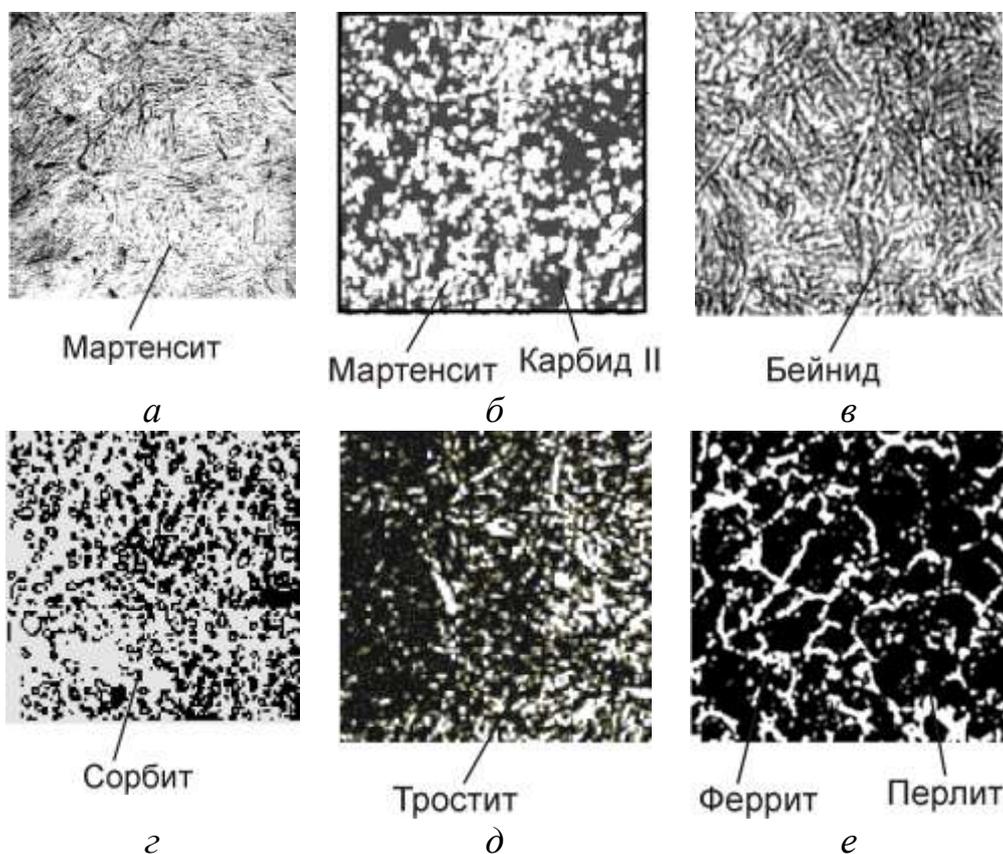


Рис. 5. Структура сталей после упрочняющей термической обработки:

*а, б* – после закалки и низкого отпуска; *в* – после изотермической закалки; *г, д* – после закалки и отпуска высокого и среднего соответственно для до- и заэвтектоидных сталей;  
*е* – после нормализации

Для повышения контактной прочности, износостойкости трущихся поверхностей используют методы поверхностного упрочнения – поверхностную закалку или азотирование, которые выполняют после улучшения. Улучшение обеспечивает сорбитную структуру в сердцевине. Реже применяют цементацию из-за повышенного содержания углерода в сердцевине.

Поверхностная закалка ТВЧ используется в массовом производстве для деталей простой формы, часто из углеродистых сталей марок 50, 55 либо для местного упрочнения деталей сложной формы из низколегированных сталей (40Х, 35Х, 30ХГТ). Вследствие образования мелкоигльчатого мартенсита на глубине 1–3 мм обеспечивается твердость HV 7000–9000 (HRC 52–58).

Азотирование наиболее эффективно для сложнолегированных сталей с карбидообразующими элементами. Классические для азотирования стали – 38ХМЮА, 38Х2МЮА, 40Х, 40ХН3ФА. Азотирование при 500–520 °С обеспечивает твердость HV 800–1000 на глубине 0,5 мм. Такие детали имеют повышенную износостойкость, теплостойкость до 500 °С и коррозионную стойкость.

## **5. ТИПОВЫЕ РЕЖИМЫ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НЕКОТОРЫХ ЛЕГИРОВАННЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

### **5.1. Рессорно-пружинные**

Стали предназначены для изготовления пружин, упругих элементов, рессор. К ним предъявляются требования по пределу выносливости, упругости, релаксационной стойкости при достаточной пластичности и вязкости.

Указанные свойства достигаются повышенным содержанием углерода 0,5–0,8 %, введением основных легирующих элементов кремния 1,5–2,8 %, марганца 0,6–1,2 %, повышающих упругость, и термической обработкой на структуру троостит отпуска. Пружинные стали дополнительно могут содержать хром, ванадий, вольфрам, никель, которые повышают прочность, прокаливаемость, закаливаемость стали, снижают склонность к росту зерна и к обезуглероживанию. По структурному признаку это стали перлитного класса.

Углеродистые стали 65, 70, 75, 80, 85, 60Г, 65Г, 70Г по ГОСТ 1050–88 используются для пружин малого сечения. Наибольшее применение из легированных находят кремнистые стали марок 55С2, 60С2А, 70С3А; для крупных тяжело нагруженных пружин и рессор используются стали, легированные комплексно, типа 60С2ХФА, 65С2ВА, 50ХГФА, для работающих с динамическими нагрузками – стали с никелем 60С2Н2А по ГОСТ 14 959–79. При выборе марки стали необходимо учитывать, что она должна обеспечить полную прокаливаемость по  $D_{99}$  или  $D_{95}$  для заданной толщины изделия.

Типовой режим термической обработки (рис. 6, а) заключается в полной закалке и среднетемпературном отпуске на структуру троостита с твердостью HRC 38–48 (рис. 5, д). Срок службы пружин повышает обработка ППД, а также использование патентирования холоднотянутой проволоки.

## 5.2. Износостойкие стали

Предназначены для изготовления деталей машин, работающих в условиях интенсивного абразивного, усталостного изнашивания, а также в условиях больших давлений и ударных нагрузок. Высокая контактная выносливость может быть обеспечена за счет максимальной твердости поверхности. Поэтому к износостойким материалам относятся стали с высоким содержанием углерода, которые обрабатывают на максимальную твердость.

Стали, устойчивые к усталостному изнашиванию, марок ШХ4, ШХ15, ШХ15ГС, ШХ20СГ (ГОСТ 801–78) называются подшипниковыми. Они предназначены для изготовления шариков, роликов, внутренних и внешних колец подшипников качения. Для обеспечения максимальной твердости эти стали содержат 1 % С, а для улучшения технологических свойств, в том числе и прокаливаемости, их легируют хромом, который указывается в маркировке в десятых долях процента. По структурному признаку это стали перлитного класса, заэвтектоидные.

В состоянии поставки подшипниковые стали должны иметь структуру зернистого перлита (НВ 180–220) (см. рис. 1, в). Для повышения усталостной прочности к ним предъявляются высокие требования по качеству, а именно по наличию карбидной неоднородности и неметаллических включений они относятся к высокока-

чественным. Типовой режим термической обработки соответствует заэвтектоидным сталям (рис. 6, б): неполная закалка от 820–850 °С и низкий отпуск при 160–220 °С на структуру мартенсит и вторичные карбиды  $Me_3C$  (HRC 60–64) (рис. 5, в).

В качестве износостойчивой стали широкое распространение получила высоколегированная сталь марки 110Г13Л, содержащая 0,9–1,3 % С и 11,5–14,5 % Мп (аустенитный класс). Эта сталь обладает очень высокими вязкостью и сопротивляемостью ударному истиранию: в условиях больших давлений и ударной нагрузки твердость и износостойкость ее возрастает от наклепа. Из этой стали изготавливают стрелки и крестовины железных дорог, черпаки и козырьки землечерпальных машин, гусеницы тракторов. Детали из стали марки 110Г13Л получают литьем и закаливают после нагрева до 1000–1050 °С для растворения карбидов, снижающих вязкость и прочность стали. После закалки сталь имеет структуру аустенита без карбидов (см. рис. 1, д) и ввиду большой вязкости и способности наклепываться очень трудно поддается обработке резанием, ее обрабатывают при малых режимах резания твердосплавным инструментом и абразивами.

### 5.3. Автоматные стали

Это стали хорошей обрабатываемости резанием, созданные для обработки на автоматических линиях. Обрабатываемость резанием низкоуглеродистых сталей улучшается за счет введения повышенного количества серы (0,08–0,3 %) и фосфора (0,05–0,15 %), а также свинца (0,15–0,3 %) и кальция (0,002–0,008 %), которые способствуют из-за наличия глобульных включений образованию стружки скалывания.

В настоящее время используются стали марок А12, А20, А30, А35, А40Г, АС14, АС40, АС35Г2, АС45Г2, АЦ20, АЦ30, АЦ40Х, АЦ30ХН (ГОСТ 1414–75), в которых цифры указывают содержание углерода в сотых долях процента; С – стали со свинцом, Ц – стали с кальцием. Они являются низко- и среднеуглеродистыми сталями, и поэтому типовые режимы упрочняющей термообработки заключаются либо в нормализации, либо в улучшении, либо в цементации с последующей закалкой и низким отпуском (рис. 4). Вид термической обработки определяется назначением детали.

Эти стали широко применяются в массовом производстве, особенно в автомобилестроении, станкостроении, тракторном машиностроении для изготовления слабо- и средненагруженных деталей машин.

#### 5.4. Нержавеющие стали

Это стали, к которым предъявляются повышенные требования по коррозионной стойкости. Она обеспечивается за счет легирования и термической обработки.

В общем машиностроении широко применяются хромистые стали 08X13, 12X13, 20X13, 30X13, 40X13, 12X17, 15X25T (ГОСТ 5632–72). Стали содержат более 12,5 % хрома, что изменяет их электропотенциал с электроотрицательного на электроположительный.

Структура и свойства хромистых сталей зависят от количества углерода и хрома.

08X13, 12X17, 15X25T по своему признаку являются сталями ферритного класса и имеют структуру феррита или феррита с небольшим количеством карбидов хрома. Упрочняющей обработке поэтому они не подвергаются, только рекристаллизационному отжигу после холодной обработки давлением для получения рекристаллизованной мелкозернистой структуры феррита (рис. 6, в). Может применяться закалка по стабилизации феррита с целью растворения карбидов от 1000 °С и отпуска при 600–700 °С.

Остальные из перечисленных марок хромистых сталей относятся к сталям мартенситного класса (кроме 12X13 – феррито-мартенситная). Это значит, что они претерпевают полное фазовое  $\gamma - \alpha$  превращение и закаливаются на воздухе.

Упрочняющая обработка этих сталей зависит от назначения.

Стали 20X13, 30X13 могут использоваться после типового термического улучшения (шестерни, валы) со структурой сорбита (рис. 4, в) или после закалки и среднего отпуска (пружины, рессоры) со структурой троостита (рис. 6, а).

Стали 30X13, 40X13 могут применяться для изготовления коррозионностойкого режущего инструмента и подшипников, поэтому типовой режим их обработки соответствует инструментальным сталям и заключается в закалке и низкотемпературном отпуске на структуру мартенсит и вторичные карбиды (рис. 6, б).

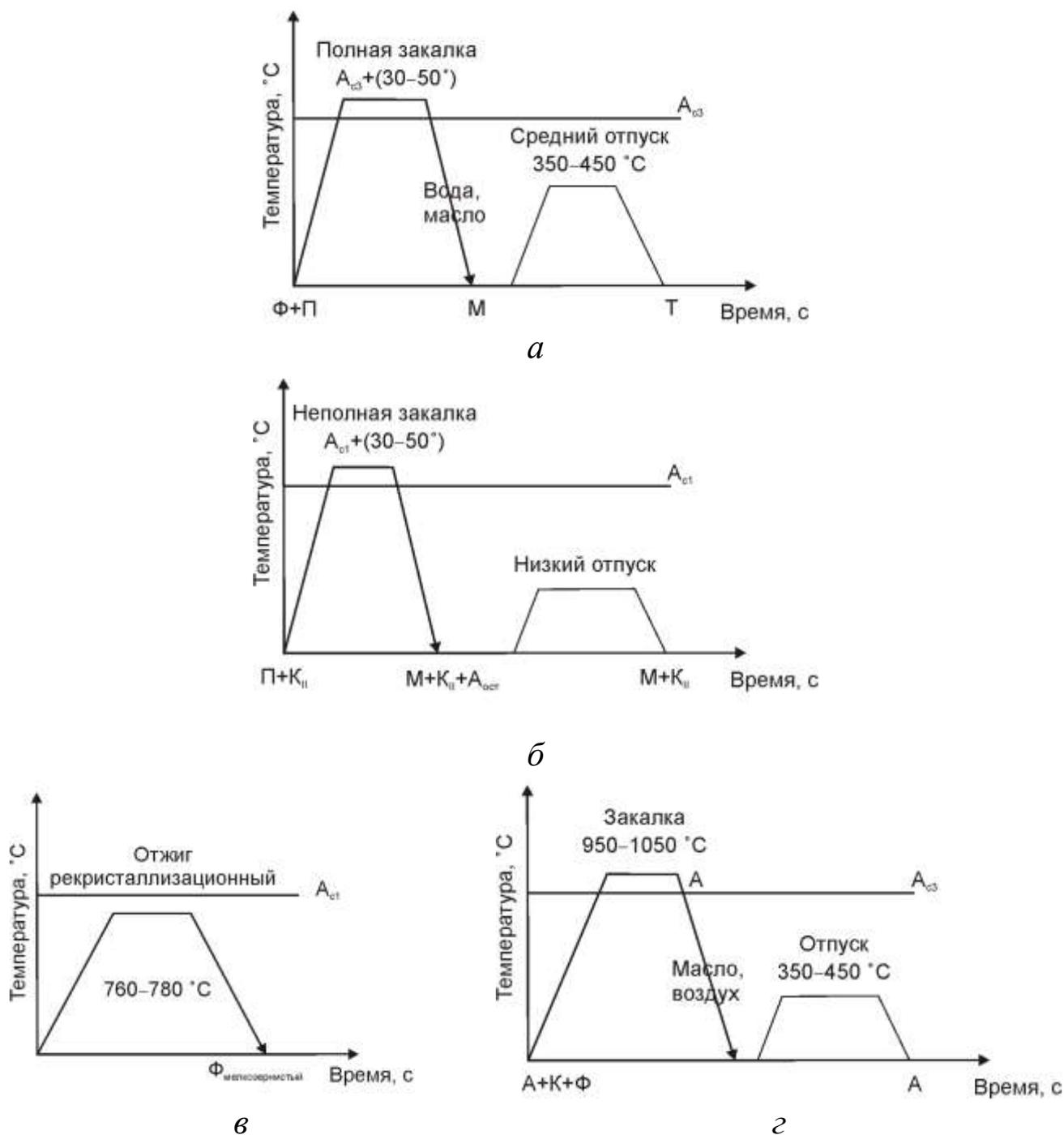


Рис. 6. Типовые режимы термической обработки сталей специального назначения:

*а* – рессорно-пружинные стали; *б* – подшипниковые стали;

*в* – нержавеющие стали ферритного класса;

*г* – нержавеющие стали

Второй важной группой нержавеющих сталей являются хромо-никелевые 04X18H10, 08X18H10, 12X18H10T, 17X18H9,

10X13H2T, 10X14Г14Н4Т, 12X17Г9АН4 аустенитного класса (ГОСТ 5632–72).

Структура хромоникелевых сталей зависит от содержания углерода и может включать в себя кроме аустенита феррит и карбиды хрома. Из-за разности электропотенциалов фаз между ними возникает межкристаллитная коррозия. Для снижения этого явления общей для всех сталей аустенитного класса является термообработка, направленная на стабилизацию аустенитной структуры. Она заключается в закалке из однофазной аустенитной области. Быстрое охлаждение в воде фиксирует аустенитную структуру и подавляет полиморфное превращение  $\gamma - \alpha$ , а также выделение вторичных карбидных фаз. Заключительной операцией является отпуск для снятия напряжений или старение для обеспечения эффекта упрочнения (рис. 6, з).

Упрочнить аустенитные стали, так же как ферритные, можно только холодной пластической деформацией, т.е. наклепом.

### **5.5. Жаростойкие и жаропрочные стали**

*Жаропрочность* – свойство материала работать в нагруженном состоянии при высоких температурах в течение длительного времени без существенного снижения прочности. Это свойство обеспечивается прежде всего стабильностью структуры – твердого раствора и вторичных фаз в течение определенного времени в процессе эксплуатации в условиях действующих температур и нагрузок. Жаропрочные стали – это высоколегированные хромом, кремнием, никелем, алюминием стали, в состав которых в том числе входят карбидообразующие элементы – молибден, вольфрам, ванадий. Жаропрочные стали, как и нержавеющей стали, выпускают по ГОСТ 5632–72. Используют их в двигателестроении, преимущественно для изготовления впускных и выпускных клапанов моторов. Жаропрочные стали классифицируются по структуре.

Перлитные стали содержат малое количество углерода, легируются хромом, молибденом, ванадием (12X1МФ, 25X2М1Ф). Используют для изготовления труб, паропроводов и других деталей, работающих при температуре 500–550 °С. Оптимальной термической обработкой являются нормализация после нагрева до 1000 °С и последующий отпуск при 650–750 °С в течение 2–3 часов.

Мартенситные стали – сильхромы, легированные хромом 6–14 %, кремнием 2–3 %, молибденом 0,2–0,4 %, углеродом 1,5–0,8 %.

В зависимости от химического состава работают при разных температурах:

- стали марок 15X6CЮ, 10X13CЮ – до 750 °С;
- стали марок 40X10C2M, 40X9C2 – до 700–800 °С;
- сталь 30X13H7C2 – до 600 °С.

Термообработка заключается в высокотемпературной закалке и отпуске. При нагреве под закалку до 1000–1050 °С происходит растворение вторичных фаз, следовательно, обогащение твердого раствора легирующими элементами – одно из условий получения жаропрочного мартенсита. После закалки проводится высокотемпературный отпуск, который способствует выделению из мартенсита дисперсных карбидов хрома  $Cr_{23}C_6$ ,  $Cr_7C_3$ , а при наличии тугоплавких элементов вольфрама, молибдена, ванадия – более термостабильных карбидов  $W_6C$ ,  $Mo_6C$  и  $VC$ . Эти частицы специальных карбидов при нагреве медленнее коагулируют и обеспечивают условие повышения жаропрочности. Температура отпуска выбирается на 100–150 °С выше, по сравнению с рабочей температурой. В этом случае сохранение прочности при повышенных температурах обеспечивается стабильностью структуры.

Технологический их недостаток – они плохо обрабатываются резанием, поэтому клапаны из них изготавливают обработкой давлением. Сильхромы являются надежным и дешевым материалом, предназначенным для производства преимущественно впускных клапанов автомобильных, тракторных и дизельных двигателей, но они не используются для форсированных двигателей ввиду ограничений рабочей температуры.

Аустенитные стали легированы хромом до 14–18 %, никелем до 9–15 %, молибденом, вольфрамом, ванадием в небольшом количестве, содержат углерода до 0,5 % (09X14H16Б, 09X14H19Б2БР, 12X18H10Т, 45X14H14В2М, 55X20Г9АН4, 45X22H4МЗ, 45X14В2М). Аустенитные стали по жаропрочности превосходят перлитные и мартенситные стали, используют их при температуре выше 600 °С. Из этих сталей изготавливают детали газовых турбин, кроме того, они являются основными для изготовления преимущественно впускных клапанов, в том числе в форсированных двигателях.

Жаропрочность этих сталей обеспечивается высоколегированным аустенитом, присутствием в структуре дисперсных карбидов хрома  $M_{23}C_6$ , а также вольфрама  $W_6C$  и молибдена  $M_6C$ . В большом количестве по объему по сравнению с сильхромами. Формируется дисперсная карбидная структура за счет термообработки: закалки от температуры 1150–1200 °С на высоколегированный аустенит с последующим старением от температур 700–800 °С, вызывающих дисперсионное твердение. Аустенитные стали имеют технологические недостатки, т.к. плохо обрабатываются резанием, имеют пониженную твердость, теплопроводность, высокий коэффициент линейного расширения и, кроме того, это дефицитные и дорогостоящие стали.

## **6. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ**

6.1. Познакомиться с методическими указаниями и законспектировать основные теоретические положения.

6.2. На примере заданных марок сталей определить класс сталей по структуре.

6.3. Используя соответствующие ГОСТы, выписать в таблицу приложения вид упрочняющей термической обработки, свойства и область применения конструкционных сталей.

6.4. С помощью микроскопов изучить структуру легированных сталей в равновесном состоянии и после упрочняющей термической обработки. Зарисовать в таблицу отчета.

## **7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Как распределяются легирующие элементы в фазах?

2. Как меняют легирующие элементы положение критических температур, концентраций предельной растворимости твердых растворов, эвтектической и эвтектоидной реакций на диаграммах состояний?

3. Перечислите основные классы легированных сталей по структуре в равновесном состоянии.

4. Какие стали относятся к сталям перлитного, ферритного, аустенитного и карбидного класса?

5. Как подразделяются конструкционные стали по назначению?

6. Основные особенности маркировки конструкционных сталей общего и специального назначения.

7. Назовите основные виды типовых режимов упрочняющей термической обработки сталей общего и специального назначения: строительных, цементуемых, улучшаемых, пружинных, износостойких, автоматных, нержавеющей.

## **СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

5. Лахтин Ю. М. Материаловедение / Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева. – Москва: Металлургия, 1993. – 527 с.

6. Марочник сталей и сплавов / под ред. А. С. Зубченко. – Москва: Машиностроение, 2003. – 781 с.

7. Арзамасов Б. Н. Материаловедение / Б. Н. Арзамасов. – Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. – 648 с.

8. Гольдштейн М. И. Специальные стали: учеб. для вузов / М. И. Гольдштейн, С. В. Грачев, Ю. Г. Векслер. – Москва: Металлургия, 1985. – 408 с.

9. Конструкционные материалы : справочник / под ред. Б. Н. Арзамасова. – Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. – 688 с.

10. Материаловедение и технология материалов / Г. П. Фетисов и [и др.]. – Москва: Высш. шк., 2002. – 638 с.

11. Металлы и сплавы : справочник / под ред. Ю. П. Солнцева. – Санкт-Петербург : АНО НПО «Профессионал»; АНО НПО «Мир и Семья», 2003. – 1066 с.

12. Франценюк И. В. Альбом микроструктур чугуна, стали, цветных металлов и их сплавов. – Москва: ИКЦ «Академкнига», 2004. – 192 с.

Легированные стали

Марка стали	Структурный класс	Структура в равновесном состоянии	Способы упрочнения	Основные свойства после упрочнения	Структура после ТО	Применение
1	2	3	4	5	6	7
Стали общего назначения (ГОСТ 4543–71)						
Малоуглеродистые хромистые 15Х, 20Х, 20ХА	Перлитный	Ф+П	Цементация, полная закалка, неполная закалка, низкий отпуск	HRC 58–64 – поверхности на глубине до 2 мм; HB 179–250 – в сердцевине; $\sigma_b = 610–640$ МПа $\delta = 15–13$ %	M+K <sub>II</sub> – поверхности; С – в сердцевине	Поршневые пальцы, толкатели, крестовины карданного шарнира, распределительный вал и коромысла газораспределительного механизма двигателей
			Полная закалка, неполная закалка, низкий отпуск	$\sigma_b = 690–780$ МПа $\delta = 9–11$ %	М	

М – мартенсит;  
С – сорбит;  
K<sub>II</sub> – карбиды.  
Т – троостит;  
Б – бейнит

1	2	3	4	5	6	7
Хромомолибденовые, хромованадиевые 15ХФ, 15ХМ, 20ХМ	Перлитный	Ф+П	Цементация, полная закалка, неполная закалка, низкий отпуск	HRC 58–62 поверхности на глубине 1–1,5 мм; HB ≤ 250 сердцевины; $\sigma_B = 960–980$ МПа, $\delta = 9–12$ %	М+К <sub>П</sub> – поверхности; С – в сердцевине	Поршневые пальцы, толкатели, крестовины карданного шарнира, распределительный вал и коромысла газораспределительного механизма двигателей
Малоуглеродистые хромомарганцевые 18ХГТ, 25ХГТ, 30ХГТ, 25ХГМ			Полная закалка, низкий отпуск	HRC 35–45, $\sigma_B = 1000–1500$ МПа, $\delta = 9–10$ %	М	Цементуемые детали ответственного назначения, от которых требуется повышенная прочность и вязкость сердцевины, а также высокая поверхностная твердость, работающие под действием ударных нагрузок
Малоуглеродистые хромоникелевые 12ХН3А, 20ХН3А, 20Х2Н4А			Цементация, полная закалка, неполная закалка, низкий отпуск	HRC 58–62 поверхности на глубине 0,8–1,6 мм, HB ≥ 240 сердцевины, $\sigma_B = 900–1230$ МПа, $\delta = 10–12$ %	М+К <sub>П</sub> – поверхности; Б или М – в сердцевине	Конические шестерни главной передачи, крестовины дифференциала, шестерни и валы коробок передач большегрузных автомобилей, поршневые пальцы
			Полная закалка, низкий отпуск	HRC 35–40, $\sigma_B = 950–1270$ МПа, $\delta = 12÷9$ %	М	

1	2	3	4	5	6	7
Среднеуглеродистые хромистые 30X, 35X, 40X, 38XA	Перлитный	Ф+П	Улучшение	НВ 187–278, $\sigma_B = 680–980$ МПа, $\delta = 12–9$ %	С	Для осей, валиков, рычагов, болтов, гаек и других некрупных деталей
			Поверхностная закалка ТВЧ с низким отпуском после улучшения	HRC 54–62 поверхности, НВ $\leq 250$ сердцевины, $\sigma_B = 900–1000$ МПа, $\delta = 10–12$ %	М – на поверхности; С – в сердцевине	
Марганцевые стали 40Г2, 45Г2			Улучшение	НВ 210–240, $\sigma_B = 670–700$ МПа, $\delta = 11–12$ %	С	Шатуны, полуоси, вилки переключения передач, коленчатые и карданные валы, распределительные валы
Хромомолибденовые, хромованадиевые 30ХМА, 35ХМ, 40ХФА, 40ХМФА			Улучшение	НВ 270–300, $\sigma_B = 950–1050$ МПа, $\delta = 11–13$ %	С	Шатуны, полуоси, вилки переключения передач, коленчатые и карданные валы, распределительные валы, шпильки, гайки и другие детали, работающие при температуре 450–500 °С
Хромокремнемарганцевые (хромансилы) 30ХГСА, 35ХГСА			Улучшение	НВ 270–320, $\sigma_B = 1000–1100$ МПа, $\delta = 10$ %	С	Шатунные болты, болты маховика, шаровые пальцы, рычаги рулевого управления, поворотные цапфы

Продолжение приложения

1	2	3	4	5	6	7
Хромоникелевые 40ХН, 40ХГНМ, 40ХГНР, 30ХН2МА, 38Х2Н2МА	Перлитный	Ф+П	Улучшение	НВ 300–400, $\sigma_B = 1000–1200$ МПа, $\delta = 10\%$	С	Шатунные болты, болты маховика, шаровые пальцы, рычаги рулевого управления, поворотные цапфы
Хромоалюминиевые 38Х2Ю, 38Х2МЮА, 38ХМЮА, 38ХВФЮА			Азотирование после улучшения	НВ 850–1050 поверхности на глубине 0,5 мм, НВ 285–302 сердцевины, $\sigma_B = 930–1030$ МПа, $\delta = 12–15\%$	Азотированная зона на поверхности; С – в сердцевине	Штоки клапанов паровых турбин, работающие при температуре до 450 °С, плунжеры топливной аппаратуры, иглы форсунок
Стали специального назначения						
Автоматные стали (ГОСТ 1414–75)						
Углеродистые А11, А12, А20	Перлитный	Ф+П	Нормализация	НВ 207–217, $\sigma_B = 470–540$ МПа, $\delta = 7–10\%$	Ф+П	Болты, винты, пробки, сухари, ролики, валики привода спидометров и др.
Углеродистые А30, А35, А40Г, АС40			Нормализация	НВ 223–229, $\sigma_B = 550–650$ МПа, $\delta = 6–19\%$	Ф+П	Болты, винты, пальцы, оси, ходовые винты
Углеродистые АС14, АС20			Нормализация	НВ 207, $\sigma_B = 500$ МПа, $\delta = 10\%$	Ф+П	Шестерни спидометра, валы рулевого управления, поршни тормозных цилиндров и др.

1	2	3	4	5	6	7
Легированные АС12ХН, АС14ХГН, АС19ХГН, АС20ХГНМ	Перлитный	Ф+П	Цементация (нитроцементация), закалка, низкий отпуск	HRC 52–58 поверхности, HB 187–201 сердцевины, $\sigma_B = 650–1200$ МПа, $\delta = 7–10$ %	М – на поверхности; Б или М – в сердцевине	Муфты, гайки, храповина колленчатого вала, рычаги переключения передач, оси сателлитов, пальцы, валики, разные шестерни, распорные втулки и др.
			Закалка, низкий отпуск	HB 201–223, $\sigma_B = 650–1200$ МПа, $\delta = 7–10$ %	М	
Легированные АС35Г2, АС45Г2, АЦ40Х			Улучшение	HB 223–229, $\sigma_B = 650$ МПа, $\delta = 6–19$ %	С	Шестерни спидометра, валы рулевого управления, поршни тормозных цилиндров и др.
Легированные АС30ХМ, АС38ХГМ, АС40ХГНМ, АЦ30ХН			Улучшение	HB 229–262, $\sigma_B = 750–1000$ МПа, $\delta = 11–12$ %	С	Стопорные кольца подшипников, ролики вала сошки рулевого управления, тормозных колодок, шестерни спидометра, валы рулевого управления, поршни тормозных цилиндров и т.п.
Рессорно–пружинные стали (ГОСТ 14959–79)						
Легированные 55ГС, 55С2, 55С2А, 60С2Г	Перлитный	Ф+П	Закалка, средний отпуск	HB 285–321, $\sigma_B = 800–1325$ МПа, $\sigma_{0,2} = 800–1325$ МПа, $\delta = 6$ %	Т	Рессоры, конструктивные элементы тормозных шин, пружины задней и верхней подвески, рычаги привода регулятора давления задних тормозов и др.

Продолжение приложения

1	2	3	4	5	6	7
Легированные 50ХФА, 50ХСА	Перлитный	Ф+П	Закалка, средний отпуск	НВ 302, $\sigma_B = 1270\text{--}1325$ МПа, $\sigma_{0,2} = 1080\text{--}1180$ МПа, $\delta = 6\text{--}8$ %	T	Пружины пальцев торсионов, секционных колец поршней, клапанных пружин
Легированные 70С3А			Закалка, средний отпуск	НВ 302, $\sigma_B = 1470$ МПа, $\sigma_{0,2} = 1670$ МПа, $\delta = 6$ %	T	Тяжелонагруженные пружины ответственного назначения
Легированные 70ХГФА			Закалка, средний отпуск	НВ 302, $\sigma_B = 1700$ МПа, $\sigma_{0,2} = 1860$ МПа, $\delta = 5$ %	T	Клапанные пружины
Сложнолегиро- ванные 60С2ХВА, 60С2ХА, 65С2ВА, 70ХВА			Закалка, средний отпуск	НВ 320, $\sigma_B = 1470\text{--}1860$ МПа, $\sigma_{0,2} = 1325\text{--}1665$ МПа, $\delta = 5\text{--}6$ %	T	Для ответственных средне- и сильнонагруженных пружин
Износостойкие стали (ГОСТ 800–78)						
Подшипниковые ШХ4, ШХ9, ШХ15, ШХ15СГ	Перлитный	П+К <sub>ц</sub> зерн.	Закалка, средний отпуск	HRC 60–62, $\sigma_B = 2160\text{--}1860$ МПа, $\sigma_{0,2} = 1325\text{--}2550$ МПа, КСУ = 0,3–0,5 МДж/м <sup>2</sup>	M+K <sub>ц</sub>	Втулки плунжеров, плунжеры, нагнетательные клапаны, седла нагнетательных клапанов, роли- ки толкателей, кулачки, копиры, накладные направляющие и др.

1	2	3	4	5	6	7
Стали Гатфильда 110Г13Л, 300Г34, 370Х7Г7С	Аустенитный	А+К	Без термообработки, холодная пластическая деформация	НВ 186–220, $\sigma_b = 654–830$ МПа, $\sigma_{0,2} = 360–380$ МПа, $\delta = 34–53$ %	А+К	Зубья экскаваторов; траки гусениц тракторов, бульдозеров, экскаваторов; крестовины
Коррозионностойкие (нержавеющие) стали (ГОСТ 5632–72)						
12Х17, 15Х25Т	Ферритный	Ф	Без упрочняющей термообработки, ХПД	$\sigma_b = 400–450$ МПа, $\delta = 12–29$ %	Ф	Детали с повышенной пластичностью, подвергающиеся ударным нагрузкам; изделия, подвергающиеся действию слабоагрессивных сред при комнатной температуре
20Х13, 08Х13	Мартенсито- ферритный	С+Ф	Улучшение	НВ 270–285, $\sigma_b = 700–950$ МПа, $\sigma_{0,2} = 500–725$ МПа, $\delta = 20–14$ %	С	Втулки, валы, оси, болты, гайки, работающие в коррозионностойких средах
30Х13, 40Х13	Мартенситный	С или С+К <sub>II</sub>	Закалка, низкий отпуск	HRC $\geq 52$ , $\sigma_b = 1600–2000$ МПа, $\delta = 3–2$ %	М+К <sub>II</sub>	Пружины, рессоры, бандажи; карбюраторные иглы, детали подшипников, работающие в коррозионностойких средах

1	2	3	4	5	6	7
12X18H9T, 12X18H10T, 08X18H12Б, 10X14Г14Н14Т	Аустенитный	А+К	Без упрочняющей термообработки	НВ 200–250, $\sigma_B = 500–550$ МПа, $\sigma_{0,2} = 150–240$ МПа, $\delta = 40–60$ %	А+К	Сварные коррозионностойкие конструкции, выхлопные системы (глушители), детали печной аппаратуры
Жаропрочные стали						
40X9C2, 40X10C2M, 30X13H7C2, 10X13CЮ	Мартенситный	С+К <sub>П</sub>	Закалка на мартенсит, старение	$\sigma_1 = 40–90$ МПа при $T = 550$ °С	М+К <sub>П</sub>	Выпускные клапаны автомобильных моторов: с рабочей температурой 600÷650 °С, теплообменники, колосники, крепежные детали
45X14H14B2M, 55X20Г9АН4, 45X22H4M3, 45X15H8MC4, 45X14B2M, 10X11H20T3P, 10X14H35T2P	Аустенитный	А+К <sub>П</sub>	Закалка на аустенит, старение	$\sigma_1 = 30–40$ МПа при $T = 650–700$ °С	А	Выпускные клапаны с рабочей температурой 750÷900 °С, детали арматуры и трубопроводов

## ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА

Таблица

Марка стали	Класс стали	Микроструктура в равновесном состоянии	Упрочняющая термическая обработка	Микроструктура после термической обработки	Механические свойства			Назначение
					$\sigma_B$	$\delta, \%$	НВ	

# Лабораторная работа №8 «КЛАССИФИКАЦИЯ И МАРКИРОВКА СПЛАВОВ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ»

Составитель: Драчев В. В.

## 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение классификации, маркировки и области применения наиболее распространенных сплавов цветных металлов.

## 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

### 2.1. Алюминиевые сплавы

Алюминиевые сплавы по технологическому признаку разделяют на деформируемые, которые обрабатывают прокаткой, прессованием, ковкой и штамповкой, и литейные, предназначенные для фасонного литья. Деформируемые сплавы по способности упрочняться термической обработкой делят на сплавы, упрочняемые и не упрочняемые термообработкой (упрочняющей термической обработкой для алюминиевых сплавов являются закалка и старение – длительная выдержка при нормальной или повышенной температуре).

Деформируемые алюминиевые сплавы (табл. 1) изготавливают по ГОСТ 4784-97.

К сплавам, упрочняемым термической обработкой, относят:

1. Дуралюмины. Это сплавы системы Al-Cu-Mg. Их маркируют буквой Д и цифрой, обозначающей условный номер сплава.

*Например:* Д1, Д16.

Дуралюмины удовлетворительно обрабатываются резанием, хорошо свариваются точечной сваркой. Из них изготавливают обшивки, шпангоуты и лонжероны самолетов, силовые каркасы, строительные конструкции, кузова грузовых автомобилей и т.д.

2. Высокопрочные сплавы. К ним относят сплавы системы Al-Zn-Mg-Cu. Их маркируют буквой В и цифрой, обозначающей условный номер сплава.

*Например:* В93, В95.

Высокопрочные сплавы прочнее, чем дуралюмины, но пластичность их ниже. Они хорошо обрабатываются резанием и сва-

риваются точечной сваркой. Такие сплавы применяют в самолестроении для нагруженных конструкций.

3. Ковочные сплавы. Это сплавы системы Al-Cu-Mg-Si. Их маркируют буквами АК и цифрой, обозначающей условный номер сплава.

*Например:* АК6, АК8.

Такие сплавы обладают хорошей пластичностью и стойкостью к образованию трещин при горячей пластической деформации. Они хорошо обрабатываются резанием и удовлетворительно свариваются контактной сваркой. Ковочные сплавы используют для изготовления средненагруженных деталей сложной формы: подмоторных рам, фитингов, крыльчаток лопастей винтов вертолета и т.д.

К алюминиевым сплавам, не упрочняемым термической обработкой, относят:

1. Сплавы алюминия с марганцем. Примером такого сплава является сплав АМц, содержащий 1-1,5 % марганца.

2. Сплавы алюминия с магнием. Такие сплавы маркируют буквами АМг и цифрой, указывающей среднее содержание магния в сплаве.

*Например:* АМг2 – сплав алюминия с магнием, содержащий около 2 % магния.

Сплавы алюминия с марганцем и магнием легко обрабатываются давлением, хорошо свариваются и обладают высокой коррозионной стойкостью. Обработка резанием затруднена. Их применяют для сварных и клепаных конструкций, испытывающих небольшие нагрузки и требующих высокого сопротивления коррозии: емкости для жидкости, баки для бензина, трубопроводы, палубные надстройки, переборки судов и т.д.

Литейные алюминиевые сплавы (табл. 2) по ГОСТ 1583-93 маркируют буквами и цифрами. Первая буква А означает основу сплава (алюминий), последующие буквы – основные легирующие компоненты (К – кремний, М – медь, Ц – цинк, Мг – магний, Мц – марганец, Кд – кадмий), а цифры – среднее содержание компонентов в процентах. Отсутствие цифры означает, что данного компонента в сплаве около 1 %.

Таблица 1

Химический состав (ГОСТ 4784-97) и механические свойства некоторых деформируемых  
алюминиевых сплавов

Марка сплава	Содержание элементов (остальное Al), %				Вид полуфабриката, вид термической обработки	Механические свойства			
	Cu	Mg	Mn	прочие		$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	НВ
Д1	3,5– 4,5	0,4–0,8	0,4–1,0	–	Листы, закалка и старение	400	240	20	95
					Прессованные прутки, закалка и старение	480	320	14	–
Д16	3,8– 4,9	1,2–1,8	0,3–0,9	–	Листы, закалка и старение	440	330	18	105
					Прессованные прутки, закалка и старение	530	400	11	–
В95	1,4– 2,0	1,8–2,8	0,2–0,6	5–7 Zn, 0,10–0,25 Cr	Листы, закалка и старение	540	470	10	150
					Прессованные прутки, закалка и старение	600	560	8	150
АК6	1,8– 2,6	0,4–0,8	0,4–0,8	0,7–1,2 Si	Поковки, закалка и старение	400	299	12	100
АК8	3,9– 5,0	0,2–0,8	0,4–1,0	0,5–1,2 Si	Поковки, закалка и старение	480	380	9	135
АМц	–	–	1,0–1,5	–	Листы, отжиг	130	50	20	30
АМг2	–	1,7–2,4	0,1–0,5	–	Листы, отжиг	190	100	23	45
АМг6	–	5,8–6,8	0,5–0,8	0,02–0,10 Ti, 0,002–0,005Be	Листы, отжиг	340	170	20	70

Таблица 2

Химический состав (ГОСТ 1583-93) и механические свойства некоторых литейных  
алюминиевых сплавов

Марка сплава*	Содержание элементов (остальное Al), %					Способ литья, вид термической обработки	Механические свойства			
	Si	Mg	Cu	Mn	прочие		$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	НВ
							Не менее			
АК12 (АЛ2)	10–13	–	–	–	–	В песчаные формы, отжиг	180	80	6	50
АК9 (АЛ4)	8,0–10,5	0,17–0,30	–	0,2–0,5	–	В песчаные формы, закалка и старение	260	200	4	75
АК7 (АЛ9)	6–8	0,2–0,4	–	–	–	Под давлением, без т.о.	220	120	2	50
						В песчаные формы, закалка старение	220	160	3	75
АК8М (АЛ32)	7,5–9,0	0,3–0,5	1,0–1,5	0,3–0,5	0,1–0,3 Ti	Под давлением, без т.о.	270	160	3	80
АМ5 (АЛ19)	–	–	4,5–5,3	0,6–1,0	0,15–0,35 Ti	В песчаные формы, закалка и старение	360	250	3	100
АМг10 (АЛ27)	–	9,5–11,5	–	–	0,05–0,15 Be 0,05–0,20 Zr 0,05–0,15 Ti	В песчаные формы, закалка	360	180	15	75

\*В скобках приведено старое обозначение марки сплава.

*Например:* АК5М – алюминиевый сплав, содержащий около 5 % кремния и 1 % меди.

К литейным алюминиевым сплавам относят:

1. Сплавы алюминия с кремнием (силумины) марок АК12, АК9, АК7, АК8М и др. Силумины обладают высокими литейными свойствами, хорошо свариваются, сравнительно легко обрабатываются резанием. Их применяют для изготовления средних и крупных литых деталей ответственного назначения: корпусов компрессоров, картеров и блоков цилиндров двигателей и т.д.

2. Сплавы алюминия с медью марок АМ5, АМ4,5Кд. Эти сплавы обладают высокой прочностью при обычных и повышенных температурах, хорошо обрабатываются резанием и свариваются, но обладают низкими литейными свойствами. Их используют для отливки небольших деталей простой формы (арматуры, кронштейнов и т.д.)

3. Сплавы алюминия с магнием (магналии) марок АМг10, АМг5Мц и др. Такие сплавы обладают высокой коррозионной стойкостью, прочностью, вязкостью и хорошей обрабатываемостью резанием, но, как и сплавы системы Al – Cu, имеют невысокие литейные свойства. Их применяют для изготовления деталей, работающих в условиях высокой влажности в судостроении и авиации: деталей приборов, вилок шасси и хвостового оперения, штурвалов и т.д.

## 2.2. Магниевые сплавы

Магниевые сплавы, как и алюминиевые, по технологическому признаку делят на деформируемые и литейные, по способности упрочняться термической обработкой – на упрочняемые и не упрочняемые термообработкой (закалкой и старением).

Деформируемые магниевые сплавы (табл. 3) по ГОСТ 14957-76 разработаны на базе систем Mg-Mn, Mg-Al-Zn, Mg-Zn-Zr и Mg-Li. Их маркируют буквами МА и цифрой, обозначающей условный номер сплава.

*Например:* МА5, МА11.

Литейные магниевые сплавы (см. табл. 3) по ГОСТ 2856-79 изготавливают на базе систем Mg-Al-Zn, Mg-Zn-Zr и Mg-Nd. Эти

сплавы маркируют буквами МЛ и цифрой, обозначающей условный номер сплава.

*Например:* МЛ5, МЛ8.

Сплавы магния обладают малой плотностью, высокой удельной прочностью и удельной жесткостью. Они хорошо обрабатываются резанием, легко шлифуются и полируются, удовлетворительно свариваются дуговой и контактной сваркой. К недостаткам относятся меньшая, чем у алюминиевых сплавов, коррозионная стойкость, худшие литейные свойства, малый модуль упругости, склонность к газонасыщению, окислению и воспламенению при выплавке.

Магниевые сплавы широко применяются в самолетостроении (корпуса приборов, насосов, фонари и двери кабины и т.д.), ракетной технике (корпуса ракет, обтекатели, топливные и кислородные баки, стабилизаторы), конструкциях автомобилей, особенно гоночных (корпуса, колеса, помпы и т.д.), в приборостроении (корпуса и детали приборов).

### **2.3. Медные сплавы**

По химическому составу сплавы меди делят на две основные группы: латуни (сплавы меди с цинком) и бронзы (сплавы меди с другими элементами). Бронзы, в свою очередь, подразделяют на оловянные и безоловянные. По технологическому признаку медные сплавы делят на деформируемые и литейные, по способности упрочняться с помощью термической обработки – на упрочняемые и не упрочняемые термообработкой.

Сплавы меди маркируют буквами Л (латунь) или Бр (бронза), после чего следуют буквы и цифры, обозначающие составляющие сплав элементы и среднее содержание этих элементов в процентах. Условные обозначения элементов в медных сплавах: А – алюминий, Б – бериллий, Ж – железо, К – кремний, Мц – марганец, Н – никель, О – олово, С – свинец, Ф – фосфор, Х – хром.

Ц – цинк. Порядок букв и цифр различен для деформируемых и литейных сплавов.

В марках деформируемых латуней (табл. 4) по ГОСТ 15527-2004 первые две цифры после буквы Л обозначают среднее со-

держание меди в процентах. Цифры, указывающие содержание других элементов в сплаве, пишут через тире после всех букв, обозначающих эти элементы. Содержание цинка определяют по разности от 100 %.

**Например:** Л70 – латунь, содержащая около 70 % меди и  $100 - 70 = 30$  % цинка;

ЛО70-1 – латунь, содержащая 70 % меди, 1 % олова и  $100 - 70 - 1 = 29$  % цинка;

ЛАЖ60-1-1 – латунь, содержащая 60 % меди, 1 % алюминия, 1 % железа и  $100 - 60 - 1 - 1 = 38$  % цинка.

Деформируемые латуни хорошо поддаются холодной обработке давлением, обработке резанием, имеют высокую коррозионную стойкость.

Из них изготавливают радиаторные трубки, гильзы патронов и снарядов, сильфоны, втулки, тройники, штуцеры, токопроводящие детали электрооборудования и т.д.

В литейных латунях (см. табл. 4) по ГОСТ 17711-93 среднее содержание элемента в процентах ставят сразу после буквы, обозначающей данный элемент. Отсутствие цифры означает, что данного элемента в сплаве около 1 %. Содержание меди определяют по разности от 100 %.

**Например:** ЛЦ40С – латунь, содержащая 40 % цинка, 1 % свинца и  $100 - 40 - 1 = 59$  % меди;

ЛЦ40Мц3Ж – латунь, содержащая 40 % цинка, 3 % марганца, 1 % железа и  $100 - 40 - 3 - 1 = 56$  % меди.

Таблица 3

## Химический состав и механические свойства некоторых магниевых сплавов

Марка сплава	Содержание элементов (остальное Mg), %				Вид термической обработки	Механические свойства			
	Mn	Zn	Al	прочие		$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	НВ
						Не менее			
<b>Деформируемые сплавы (ГОСТ 14957–76)</b>									
МА5	0,15–0,50	0,2–0,8	7,8–9,2	–	Закалка и старение	320	220	14	55
МА11	1,5–2,5	–	–	2,5–3,5 Nd, 0,10–0,22 Ni	Закалка и старение	280	140	10	–
МА14	–	5–6	–	0,3–0,9 Zr	Закалка и старение	350	300	9	60
МА19	–	5,5–7,0	–	0,5–0,9 Zr, 0,2–1,0 Cd, 1,4–2,0 Nd	Закалка и старение	380	330	5	80
<b>Литейные сплавы (ГОСТ 2856–79)</b>									
МЛ5	0,15–0,50	0,2–0,8	7,5–9,0	–	Закалка и старение	255	120	6	25
МЛ8	–	5,5–6,6	–	0,7–1,1 Zr, 0,2–0,8 Cd	Закалка и старение	255	155	5	–
МЛ12	–	4–5	–	0,6–1,1 Zr	Закалка и старение	270	160	6	–
МЛ10	–	0,1–0,7	–	0,4–1,0 Zr, 2,2–2,8 Nd	Без т.о.	200	95	6	26
МЛ15	–	4–5	–	0,7–1,1 Zr, 0,6–1,2 La	Без т.о.	210	130	3	28

Литейные латуни обладают хорошей жидкотекучестью, коррозионной стойкостью и антифрикционными свойствами. Из них изготавливают втулки, сепараторы шариковых и роликовых подшипников, гребные винты и их лопасти и т.д.

В марках деформируемых бронз (табл. 5) содержание основного компонента – меди – не указывают, а определяют по разности от 100 %. Цифры, указывающие содержание элементов в сплаве, пишут через тире после всех букв, обозначающих эти элементы.

*Например:* БрОФ6,5-0,4 – бронза, содержащая 6,5 % олова, 0,4 % фосфора и  $100 - 6,5 - 0,4 = 93,1$  % меди.

Деформируемые оловянные бронзы (ГОСТ 5017-2006) обладают хорошими антифрикционными свойствами и коррозионной стойкостью. Их используют для изготовления плоских и круглых пружин, барометрических коробок, мембран, антифрикционных деталей.

К деформируемым безоловянным бронзам (ГОСТ 18175-78) относят:

1. Алюминиевые бронзы БрА5, БрА7, БрАЖ9-4 и др. Они отличаются высокими механическими, антикоррозионными и антифрикционными свойствами. Из них изготавливают втулки, фланцы, шестерни, червячные колеса и другие ответственные детали.

2. Бериллиевые бронзы БрБ2 и др. Они имеют высокую прочность, упругость, коррозионную стойкость, хорошо обрабатываются резанием и свариваются. Эти бронзы используют в приборостроении для изготовления ответственных пружин, мембран, кулачков, пружинящих контактов и т.д.

3. Кремнистые бронзы БрКМц3-1, БрКН1-3. Они характеризуются хорошими механическими, упругими и антифрикционными свойствами. Такие бронзы легко обрабатываются давлением, резанием и свариваются. Кремнистые бронзы используют вместо более дорогих оловянных для изготовления антифрикционных деталей, а также для замены бериллиевых бронз при производстве пружин, мембран и других упругих деталей, работающих в пресной и морской воде.

В марках литейных бронз (см. табл. 5), как и в литейных латунях, среднее содержание элемента в процентах ставят сразу после буквы, обозначающей этот элемент.

*Например:* БрОЗЦ12С5 – бронза, содержащая 3 % олова, 12 % цинка, 5 % свинца и  $100 - 3 - 12 - 5 = 80$  % меди.

Литейные оловянные (ГОСТ 613-79) и безоловянные (ГОСТ 493-79) бронзы обладают хорошей жидкотекучестью и малой усадкой, что позволяет применять их для изготовления сложных отливок, в частности художественного литья. Высокая коррозионная стойкость в атмосферных условиях, пресной и морской воде способствует их широкому использованию для изготовления пароводяной арматуры. Литейные бронзы являются также хорошим антифрикционным материалом, их применяют для изготовления подшипников.

#### 2.4. Цинковые сплавы

Промышленные цинковые сплавы разработаны на базе систем Zn-Al и Zn-Al-Cu. Поскольку цинк относительно плохо деформируется, детали из цинковых сплавов изготавливают литьем.

Литейные цинковые сплавы (табл. 6) по ГОСТ 25140-93 маркируют буквами и цифрами. Первая буква Ц означает основу сплава (цинк), последующие буквы – основные легирующие компоненты (А – алюминий и М – медь), а цифры – среднее содержание компонентов в процентах.

*Например:* ЦА4М3 – цинковый сплав, содержащий около 4 % алюминия и 3 % меди.

Таблица 4

## Химический состав и механические свойства некоторых латуней

Марка сплава	Содержание элементов (остальное Zn), %		Вид полуфабриката, вид термической обработки или способ литья	Механические свойства		
	Cu	прочие		$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	НВ
				Не менее		
<b>Деформируемые латуни (ГОСТ 15527–2004)</b>						
Л90	88–91	–	Листы, отжиг	230	36	60
Л63	62–65	–	Листы, отжиг	290	38	70
ЛО70–1	69–71	1,0–1,5 Sn	Трубы, отжиг	314	55	47
ЛА77–2	76–79	1,7–2,5 Al	Трубы, отжиг	300	23	–
ЛК80–3	79–81	2,5–4,0 Si	Прутки, отжиг	275	53	93
ЛАН59–3–2	57–60	2,5–3,5 Al, 2–3 Ni	Прутки, отжиг	440	40	108
<b>Литейные латуни (ГОСТ 17711–93)</b>						
ЛЦ40Мц3Ж	53–58	0,5–1,5 Fe, 3–4 Mn	В песчаные формы	441	18	90
ЛЦ38Мц2С2	57–60	1,5–2,5 Pb, 1,5–2,5 Mn	В песчаные формы	245	15	80
ЛЦ40С	57–61	0,8–2,0 Pb	В кокиль	215	20	80
ЛЦ30А3	66–68	2–3 Al	В песчаные формы	294	12	80
ЛЦ16К4	78–81	3,0–4,5 Si	В песчаные формы	294	15	100
ЛЦ14К3С3	77–81	2–4 Pb, 2,5–4,5 Si	В кокиль	294	15	100

Таблица 5

## Химический состав и механические свойства некоторых бронз

Марка сплава	Содержание элементов (остальное Cu), %				Вид полуфабриката, вид термической обработки или способ литья	Механические свойства		
	Sn	Pb	Zn	прочие		$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	НВ
						Не менее		
<b>Деформируемые оловянные бронзы (ГОСТ 5017–2006)</b>								
БрОФ6,5–0,4	6–7	–	–	0,26–0,40 P, 0,1–0,2 Ni	Полосы, отжиг	295	60	69
БрОЦ4–3	3,5–4,0	–	2,7–3,3	–	Полосы, отжиг	290	35	–
БрОЦС4–4–2,5	3–5	1,5–3,5	3–5	–	Полосы, отжиг	294	35	–
<b>Деформируемые безоловянные бронзы (ГОСТ 18175–78)</b>								
БрА5	–	–	–	4–6 Al	Листы, отжиг	274	33	–
БрАЖ9–4	–	–	–	8–10 Al, 2–4 Fe	Прутки прессованные	540	15	110
БрБ2	–	–	–	1,8–2,1 Be, 0,2–0,5 Ni	Прутки, закалка и старение	1080	2	320
БрКМц3–1	–	–	–	2,75–3,50 Si, 1,0–1,5 Mn	Полосы, отжиг	350	35	–
БрКН1–3	–	–	–	0,6–1,1 Si, 2,4–3,4 Ni, 0,1–0,4 Mn	Прутки, закалка и старение	620	5	–

Продолжение табл. 5

Марка сплава	Содержание элементов (остальное Cu), %				Вид полуфабриката, вид термической обработки или способ литья	Механические свойства		
	Sn	Pb	Zn	прочие		$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	НВ
<b>Литейные оловянные бронзы (ГОСТ 613–79)</b>								
БрО3Ц12С5	2,0–3,5	3–6	8–18	–	В кокиль	206	5	58
БрО5Ц5С5	4–6	4–6	4–6	–	В песчаные формы	147	6	58
БрО10Ц2	9–11	–	1–3	–	В песчаные формы	215,5	10	63
<b>Литейные безоловянные бронзы (ГОСТ 493–79)</b>								
БрА10Ж3Мц2	–	–	–	9–11 Al, 2–4 Fe, 1–3 Mn	В кокиль	490	12	117
БрА10Ж4Н4	–	–	–	9,5–11,0 Al, 3,5–5,5 Fe, 3,5–5,5 Ni	В кокиль	587	6	166
БрА11Ж6Н6	–	–	–	10,5–11,5 Al, 5,0–6,5 Fe, 5,0–6,5 Ni	В песчаные формы	587	2	245

Лучшими способами получения отливок из цинковых сплавов являются литье под давлением и литье в кокиль. Относительно низкая температура литья определяет легкие условия работы пресс-форм и кокилей, а высокая жидкотекучесть позволяет отливать тонкостенные детали сложной формы.

Наиболее широко литейные цинковые сплавы используют в автомобильной промышленности для отливки корпусов карбюраторов, насосов, спидометров, решеток радиаторов, деталей гидравлических тормозов, а также в других отраслях промышленности, бытовой технике для отливки деталей приборов, корпусов, арматуры и т.д.

Таблица 6

Химический состав (ГОСТ 25140-93) и механические свойства некоторых литейных цинковых сплавов

Марка сплава	Содержание элементов (остальное Zn), %				Способ литья	Механические свойства		
	Al	Cu	Mg	прочие		$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	НВ
ЦА4	3,5–4,5	–	0,02–0,06	–	Под давлением	256	1,2	70
ЦА4М1	3,5–4,5	0,7– 1,3	0,02–0,06	–	Под давлением	270	1,7	80
ЦА4М3	3,5–4,5	2,5– 3,7	0,02–0,06	–	Под давлением	290	1,5	90
ЦА8М1	7,1–8,9	0,7– 1,4	0,01–0,06	–	В кокиль	235	1,5	70
ЦА30М5	28,5–32,1	3,8– 5,6	0,01–0,08	0,01–0,50 Fe	В кокиль	435	8	115

## 2.5. Титановые сплавы

Титановые сплавы по технологии изготовления подразделяют на деформируемые и литейные; по способности упрочняться термической обработкой – на упрочняемые и неупрочняемые термообработкой; по структуре в отожженном состоянии – на  $\alpha$ - (имеют гексагональную кристаллическую решётку),  $\beta$ - (с кубической объёмно-центрированной решёткой) и  $(\alpha + \beta)$ -сплавы.

К  $\alpha$ -сплавам относятся сплавы титана с алюминием, а также сплавы дополнительно легированные оловом или цирконием. Они характеризуются средней прочностью при 20 °С, высокими механическими свойствами при пониженных и повышенных температурах. Такие сплавы обладают отличной свариваемостью и удовлетворительной обрабатываемостью резанием. Недостатки сплавов с  $\alpha$ -структурой – неупрочняемость термической обработкой и низкая технологическая пластичность.

Двухфазные  $(\alpha + \beta)$ -сплавы обладают лучшим сочетанием механических и технологических свойств. Они легированы в основном алюминием с добавками ванадия, молибдена, хрома, железа. Сплавы  $\alpha + \beta$  упрочняются термической обработкой – закалкой и старением. В отожжённом состоянии они имеют хорошую пластичность, а после закалки и старения – высокую прочность при 20 °С и при повышенных температурах. Двухфазные сплавы удовлетворительно свариваются и обрабатываются резанием.

Однофазные  $\beta$ -сплавы не имеют промышленного применения, так как обладают пониженной удельной прочностью и высокой стоимостью.

Маркировка деформируемых титановых сплавов (табл. 7) по ГОСТ 19807-91 отражает наименование организации-разработчика и порядковый номер разработки сплава. Так, марка ВТ означает «ВИАМ титан» (ВИАМ – Всероссийский институт авиационных материалов); марка ОТ означает «Опытный титан» – сплавы, разработанные совместно ВИАМом и заводом ВСМПО (г. Верхняя Салда, Свердловской области); марка ПТ означает «Прометей титан» – разработчик ЦНИИ КМ («Прометей», г. Санкт-Петербург).

Таблица 7

Химический состав (ГОСТ 19807-91) и механические свойства  
некоторых деформируемых титановых сплавов

Марка сплава	Содержание элементов (остальное Ti), %				Структура, вид термической обработки	Механические свойства			
	Al	V	Mo	прочие		$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %, не менее	КСУ, МДж/м <sup>2</sup> , не менее
BT5	4,5–6,2	1,2	0,8	0,3 Zr	$\alpha$ -сплавы, отжиг	700–950	660–850	10	0,5
BT5-1	4,3–6,0	1,0	–	2–3 Sn 0,3 Zr		750–950	650–850	10	0,4
OT4	3,5–5,0	–	–	0,8–0,2 Mn 0,3 Zr		700–900	550–650	12	0,5
BT6	5,3–6,8	3,5–5,3	–	0,3 Zr	$\beta$ -сплавы, закалка и старение	1100–1150	1000–1050	14	0,3
BT14	3,5–6,3	0,9–1,9	2,5–3,8	0,3 Zr		1150–1400	1080–1300	6	–
BT22	4,4–5,7	4,0–5,5	4,0–5,5	0,5–1,5 Cr 0,5–1,5 Fe 0,3 Zr		1100–1250	–	9	0,4

Литейные титановые сплавы специально не создавались. Для фасонного литья используют сплавы тех же составов (с несколько большим содержанием примесей), что и для производства деформируемых заготовок. В конце марки литейного сплава добавляют букву «Л» (например, ВТ20Л). Такие сплавы обладают более низкими механическими свойствами, чем деформируемые. Упрочняющая термическая обработка резко снижает пластичность литейных сплавов и поэтому не применяется.

Титановые сплавы получили широкое применение в авиации, ракетной технике, судостроении, химической и других отраслях промышленности. Их используют для обшивки сверхзвуковых самолетов, изготовления деталей реактивных авиационных двигателей, корпусов ракетных двигателей, баллонов для сжатых и сжиженных газов, обшивки морских судов, подводных лодок и т.д.

## **2.6. Антифрикционные сплавы**

Антифрикционные сплавы применяют для изготовления вкладышей подшипников скольжения. Эти сплавы должны иметь достаточную твердость, но не очень высокую, чтобы не вызвать сильного износа вала; сравнительно легко деформироваться под влиянием местных напряжений, т.е. быть пластичными; удерживать смазочный материал на поверхности; иметь малый коэффициент трения между валом и подшипником; обладать хорошей теплостойкостью для обеспечения интенсивного теплоотвода от поверхностей трения; быть устойчивыми к коррозии.

Для обеспечения этих свойств структура антифрикционных сплавов должна быть неоднородной и состоять из мягкой и пластичной основы с включениями твердых частиц (реже из твердой основы и мягких включений).

В качестве антифрикционных сплавов используют чугуны, сплавы на основе меди-бронзы и латуни, сплавы на оловянной, свинцовой, цинковой и алюминиевой основе.

Чугунные вкладыши изготавливают из серых чугунов СЧ15, СЧ20 (ГОСТ 1412-85) и легированных антифрикционных чугунов: серых АЧС-1, АЧС-2 и др.; высокопрочных АЧВ-1 и АЧВ-2; ковких АЧК-1 и АЧК-2 (ГОСТ 1585-85). Они предназначены для работы при значительных давлениях и малых скоростях

скольжения. К достоинствам чугунов можно отнести их невысокую стоимость, к недостаткам – плохую прирабатываемость, чувствительность к недостаточности смазочного материала и пониженную стойкость к воздействию ударных нагрузок.

Бронзы имеют лучшие, чем чугуны, антифрикционные свойства. Чаще всего используют оловянные и свинцовые бронзы БрО10Ф1, БрО5Ц5С5, БрО6Ц6С3 (ГОСТ 613-79), БрС30 (ГОСТ 493-79). Бронзы применяют для монолитных подшипников скольжения турбин, электродвигателей, компрессоров, работающих при значительных давлениях и средних скоростях скольжения.

Латуни применяют в качестве заменителей бронз для опор трения. Однако по антифрикционным свойствам они уступают бронзам. Латуни ЛЦ16К4, ЛЦ38Мц2С2, ЛЦ40Мц3А и др. (ГОСТ 17711-93) применяют при малых скоростях скольжения и невысоких нагрузках. Их часто используют для опор трения приборов.

Антифрикционные сплавы на оловянной или свинцовой основе называют баббитами (табл. 8). В соответствии с ГОСТ 1320-74 к сплавам на оловянной основе относят баббиты Б83 (содержит примерно 83 % олова), Б88 (88 % олова) и Б83С (83 % олова, со свинцом), на свинцовой основе – Б16 (16 % олова), БС6 (6 % олова, с сурьмой) и БН (с никелем). Другую группу образуют более дешевые свинцово-кальциевые баббиты (ГОСТ 1209-90) БКА (с кальцием и алюминием), БК2 (2 % олова, с кальцием) и др.

По антифрикционным свойствам баббиты превосходят все остальные сплавы, но значительно уступают им по сопротивлению усталости. Поэтому баббиты применяют только для тонкого (менее 1 мм) покрытия рабочей поверхности опоры скольжения. Наилучшими свойствами обладают оловянные баббиты. Их используют для подшипников ответственного назначения (дизелей, паровых турбин и т.п.), работающих при больших скоростях и нагрузках.

К антифрикционным цинковым сплавам по ГОСТ 21438-95 (см. табл. 8) относят ЦАМ10-5 (содержит 10 % алюминия и 5 % меди) и ЦАМ9-1,5 (9 % алюминия и 1,5 % меди). Отличаясь высокими антифрикционными свойствами и достаточной проч-

ностью при комнатной температуре, эти сплавы могут заменять бронзы для узлов трения, температура которых не превышает 100 °С. При более высоких температурах сплавы размягчаются и налипают на вал.

Алюминиевые антифрикционные сплавы изготавливают по ГОСТ 14113-78 (см. табл. 8). К ним относят АО6-1 (содержит 6 % олова и 1 % меди), АО9-2 (9 % олова и 2 % меди) и др. Алюминиевые сплавы обладают достаточно высокими антифрикционными свойствами, но по технологичности уступают баббитам. Их более высокая твердость требует обработки цапф с повышенной чистотой, а высокий коэффициент линейного расширения – более тщательной сборки с большими зазорами. Алюминиевые сплавы применяют вместо баббитов и свинцовой бронзы в подшипниках, работающих при высоких нагрузках и средних скоростях.

### **3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ**

1. Ознакомиться с классификацией, маркировкой, свойствами и областью применения сплавов цветных металлов.
2. Расшифровать марки цветных сплавов по варианту задания, взятому из приложения.

### **4. ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА**

Отчет должен содержать:

1. Наименование и цель лабораторной работы.
2. Краткое изложение основных теоретических положений.
3. Расшифровку марок заданных сплавов.

Таблица 8

## Химический состав некоторых антифрикционных сплавов

Марка сплава	Содержание элементов, %						
	Sn	Sb	Cu	Pb	Al	Ni	прочие
<b>Баббиты (ГОСТ 1320–74)</b>							
Б83	остальное	7,3–7,8	2,5–3,5	–	–	0,15–0,25	0,8–1,2 Cd
Б88	остальное	10–12	5,5–6,5	–	–	–	–
Б83С	остальное	9–11	5–6	1,0–1,5	–	–	–
Б16	15–17	15–17	1,5–2,0	остальное	–	–	–
БС6	5,5–6,5	5,5–6,5	0,1–0,3	остальное	–	–	–
БН	9–11	13–15	1,5–2,0	остальное	–	–	–
<b>Баббиты (ГОСТ 1209–90)</b>							
БКА	–	–	–	остальное	0,05–0,20	–	0,95–1,15 Ca, 0,7–0,9 Na
БК2	1,5–2,1	–	–	остальное	–	–	0,30–0,55 Ca, 0,2–0,4 Na, 0,06–0,11 Mg

Продолжение табл. 8

Марка сплава	Содержание элемента, %						
	Sn	Sb	Cu	Pb	Al	Ni	прочие
<b>Цинковые антифрикционные сплавы (ГОСТ 21438–95)</b>							
ЦАМ10–5	–	–	4,0–5,5	–	9–12	–	0,03–0,06 Mg остальное Zn
ЦАМ9–1,5	–	–	1–2	–	9–11	–	0,03–0,06 Mg остальное Zn
<b>Алюминиевые антифрикционные сплавы (ГОСТ 14113–78)</b>							
АО6–1	5–7	–	0,7–1,3	–	остальное	0,7–1,3	–
АО9–2	8–10	–	2,0–2,5	–	остальное	0,8–1,2	0,3–0,7 Si
АО20–1	17–23	–	0,7–1,2	–	остальное	–	–

## **5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. По каким признакам классифицируют алюминиевые сплавы?
2. Какие алюминиевые сплавы можно упрочнить термической обработкой?
3. Как маркируют деформируемые и литейные алюминиевые сплавы?
4. Назовите основные элементы, входящие в состав латуни.
5. Какие сплавы называют бронзами?
6. Как маркируют деформируемые латуни и бронзы?
7. Как маркируют литейные латуни и бронзы?
8. Как классифицируют титановые сплавы по структуре в отожженном состоянии?
9. Сплавы каких цветных металлов используют как антифрикционные?

## **СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Материаловедение / под ред. Б. Н. Арзамасова. – Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 648 с.
2. Лахтин Ю. М. Материаловедение / Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева. – Москва: Машиностроение, 1990. – 528 с.
3. Металлы и сплавы: справочник / под ред. Ю. П. Солнцева. – Санкт-Петербург: АНО НПО «Профессионал», АНО НПО «Мир и Семья», 2003. – 1066 с.

Приложение

Задание на расшифровку марок чугунов и цветных сплавов

Номер варианта	Сплавы
1	Д16; ЛК80-3; МА5
2	ЛН65-5; В95; ЦА4
3	АМг6; БрО3Ц12С5; МЛ5
4	ЛО62-1; АК8М; ЦАМ10-5
5	БрОЦС5-5-5; МА11; АМ5
6	ЛА77-2; БрА5; АМц
7	БрО4Ц4С17; МА14; ЦАМ9-1,5
8	ЛАН60-1-1; АМг3; МЛ8
9	БрБ2; Л63; ЦА30М5
10	ЛЖМц59-1-1; БрКН1-3; Д1
11	БрА7; ЛЦ30А3; МЛ10
12	Б88; Л90; БрА11Ж6Н6
13	БрАЖ9-4; ЦА4М3; ЛК80-3
14	АМг5; ЛЦ40С; БрОЦ4-3
15	БрО5ЦНС25; ЛАН59-3-2; МА14
16	ЛК80-3; АМг6; ЦА8М1
17	В95; ЛЦ40Мц3Ж; БрОЦС4-4-2,5
18	БрОФ4-0,25; ЛЦ40С; ЦА30М5
19	ЛА77-2; Д18; БрО3Ц12С5
20	БрОЦС5-5-5; ЛЦ16К4; АЧС-1
21	АМц; БрА10Ж3Мц2; МЛ12
22	ЛАН60-1-1; БрО10Ц2; ЦА4М1
23	АМг2; ЛЖМц59-1-1; МЛ15
24	БрБ2; ЛЦ38Мц2С2; МА19
25	Л90; Д18; БрА10Ж3Мц2
26	БрА7; ЛО70-1; АМг2
27	АЧК-1; ЛЦ30А3; БрАЖ9-4
28	БрА10Ж4Н4; ЛЦ40С; МЛ8
29	БрАЖМц10-3-1,5; МА14; Л63
30	АЧВ-2; ЛН65-5; БрО10Ц2

# Лабораторная работа №9 «ПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ. КЛАССИФИКАЦИЯ, СТРОЕНИЕ, СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ»

Составители: Петренко К. П., Додонова Е. М.

## 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение структуры, строения, классификации, свойств и области применения полимерных материалов.

## 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Полимерами называют вещества с большой молекулярной массой (от 5000 до 1000000), у которых молекулы состоят из *мономеров* – макромолекул с ковалентными связями.

### 2.1. Структура и строение полимеров

Под структурой полимеров понимают взаимное расположение в пространстве макромолекул, образующих полимер. Общая структура полимера складывается из молекулярной и надмолекулярной структур – взаимной укладки молекул в полимерном веществе.

**В соответствии с молекулярной структурой** полимеры делятся на три группы (рис. 1):

– *линейные полимеры* – соединения, макромолекулы которых представляют собой длинные цепи, связанные между собой Ван-дер-ваальсовыми силами молекулярного взаимодействия;

– *разветвленные (привитые) полимеры*, образованные цепями с боковыми ответвлениями (число ответвлений и их длина различны); к ним относятся гребнеобразные, звездообразные полимеры;

– «*сшитые*» (*сетчатые*) полимеры состоят из макромолекул, образующих пространственную сетку, охватывающую весь образец; среди них различают густо- и редкосшитые, резко различающиеся по своим свойствам; к сшитым относят лестничные полимеры.

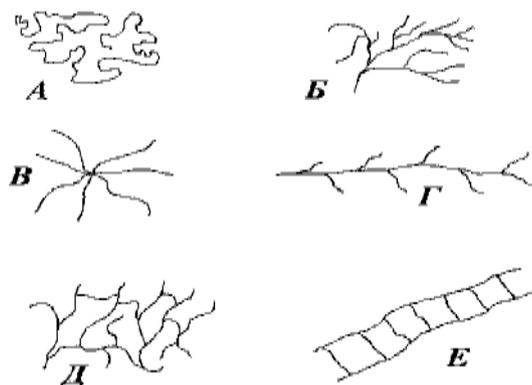


Рис. 1. Схематическое изображение макромолекул полимеров различной топологии: А – линейный полимер; Б, В, Г – разветвленные; В – звездообразный; Г – гребнеобразный; Д, Е – сшитые; Е – лестничный.

**Надмолекулярная структура** может быть:

- *кристаллической* (молекулы укладываются в порядке, соответствующем определённой кристаллической решётке);
- *пачечной* (на больших участках главные цепи соседних молекул располагаются параллельно).

**Строение полимеров.** В зависимости от размещения групп вдоль главной оси полимеры делятся:

- на *регулярные* (с упорядоченным расположением групп);
- *нерегулярные* (с неупорядоченным расположением групп).

## 2.2. Классификация полимеров

Существует несколько видов классификации полимерных материалов (рис. 2).

**По химическому составу** полимерные материалы делятся на органические, элементоорганические и неорганические.

*Органическими полимерами* являются смолы и каучуки. Молекулярная цепь этих материалов образована атомами углерода с возможными примесями серы, фосфора, хлора и др.

*Элементоорганические соединения* содержат в составе основной цепи неорганические атомы, сочетающиеся с органическими. К этой группе относятся кремнийорганические соединения.



Рис. 2. Общая классификация полимеров

К неорганическим полимерам принадлежат керамика, слюда, асбест, силикатные стёкла. Их основу составляют оксиды кремния, алюминия, магния, кальция и др.

**По фазовому состоянию** полимерные материалы подразделяются на аморфные и кристаллические.

*Аморфные полимеры* построены из цепных молекул, собранных в пачки или глобули (свёрнутые в клубки цепи), являющиеся структурными элементами.

*Кристаллические полимеры* образованы кристаллами правильной формы, которые получаются путём перестройки внутри пачки в определённом интервале температур.

**По механизмам поляризации молекул** полимеры делятся на полярные и неполярные (рис. 3).

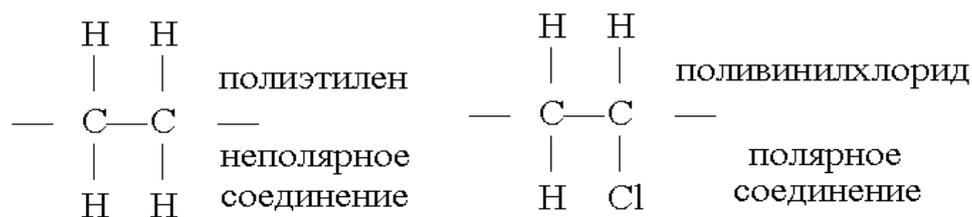


Рис. 3. Примеры молекул полярного и неполярного соединений

*Неполярные полимеры* (нейтральные диэлектрики) состоят из неполярных молекул, у которых центры тяжести положительного и отрицательного зарядов совпадают и их электрический момент равен нулю. Свойства этих материалов мало изменяются под воздействием температуры; они, как правило, морозоустойчивы. Примером практически неполярных диэлектриков, применяемых в качестве электроизоляционных материалов, являются углеводороды, нефтяные электроизоляционные масла, полиэтилен, полистирол и др.

*Полярные (дипольные) полимеры* состоят из полярных молекул, обладающих электрическим моментом. В таких молекулах из-за их асимметричного строения центры масс положительных и отрицательных зарядов не совпадают. При замещении в неполярных полимерах некоторой части водородных атомов другими атомами или неуглеводородными радикалами получаются полярные вещества. Полярные полимеры обладают повышенной жест-

костью и теплостойкостью, высокой адгезионной способностью, пониженной морозостойкостью. К ним относятся фенолформальдегидные и эпоксидные смолы, кремнийорганические соединения, хлорированные углеводороды и др.

**По физико-механическим свойствам** полимеры классифицируются на пластики (пластмассы) и эластики (эластомеры).

*Пластики* бывают жесткие, полужесткие и мягкие.

Жесткие пластики – твердые упругие материалы аморфной структуры с высоким модулем упругости (свыше 1000 МПа) и малым удлинением при разрыве, сохраняющие свою форму при внешних напряжениях в условиях нормальной или повышенной температуры.

Полужесткие пластики – твердые упругие материалы кристаллической структуры со средним модулем упругости (выше 400 МПа), высоким относительным и остаточным удлинением при разрыве, причем остаточное удлинение обратимо и полностью исчезает при температуре плавления кристаллов.

Мягкие пластики – мягкие и эластичные материалы с низким модулем упругости (около 20 МПа), высоким относительным удлинением и малым остаточным удлинением, причем обратимая деформация исчезает при нормальной температуре.

*Эластики* – мягкие эластичные материалы с низким модулем упругости (ниже 20 МПа), поддающиеся значительным деформациям при растяжении, причем вся деформация или большая ее часть исчезает при нормальной температуре с большой скоростью (практически мгновенно).

**По строению полимерной цепи** различают полимеры карбоцепные и гетероцепные.

*В карбоцепных полимерах* цепь состоит только из атомов углерода.

*В гетероцепных* в состав цепи кроме углерода входят кислород, азот и другие элементы.

**По отношению к нагреву** полимеры делят на термопластичные и терморезистивные.

*Термопластичные* способны многократно размягчаться при нагреве и твердеть при охлаждении без изменения свойств.

*Терморреактивные* при нагреве остаются твёрдыми вплоть до полного термического разложения.

### 2.3. Получение полимеров

Полимеры получают в результате реакций полимеризации и поликонденсации.

*Полимеризация* – процесс соединения друг с другом большего числа молекул мономера за счет кратных (C = C, C = O и др.) связей или раскрытия циклов, содержащих гетероатомы (O, N, S). При полимеризации обычно не происходит образования низкомолекулярных побочных продуктов, вследствие чего полимер и мономер имеют один и тот же элементный состав.

*Поликонденсация* – процесс соединения друг с другом молекул одного или нескольких мономеров, содержащих две и более функциональные группы (ОН, СО, СОС, NHS и др.), способные к химическому взаимодействию, при котором происходит отщепление низкомолекулярных продуктов. Полимеры, получаемые поликонденсационным способом, по составу не соответствуют исходным мономерам.

### 2.4. Пластмассы

**Пластические массы (пластмассы)** – это искусственные материалы, основой которых (связующим) являются полимеры. К особенностям пластмасс относят малую плотность, низкую теплопроводность, значительное тепловое расширение, хорошие электроизоляционные свойства, высокую химическую стойкость, фрикционные и антифрикционные свойства. Отличительной особенностью этих материалов являются хорошие технологические свойства.

#### **Классификация пластмасс.**

*По структуре* пластмассы делят на *гомогенные* (однородные) и *гетерогенные* (неоднородные). Структура пластмасс зависит от введения в их состав наряду с полимером других компонентов.

*По составу* пластики подразделяют на ненаполненные, газонаполненные, наполненные.

*Ненаполненные* пластмассы состоят из полимера, иногда из красителя, пластификатора и стабилизатора.

В *газонаполненные* кроме указанных материалов входят также воздух или другой газ путем использования добавок газообразующих или воздухововлекающих веществ.

*Наполненные пластики* состоят из полимера и наполнителя. Эти материалы наиболее часто используют для изготовления пластмассовых строительных материалов и изделий.

**По составу** пластики делятся на одно- и многокомпонентные. Состав *однокомпонентных* пластмасс представлен только полимером.

В состав *многокомпонентных* пластмасс входят:

– наполнитель – прерывистая фаза, прочно сцепленная со связующим (как правило, инертное вещество, которое вводят для повышения твёрдости и придания особых свойств); по виду наполнителя пластмассы подразделяют:

– на порошковые (наполнитель – древесная мука, графит, тальк и др.);

– волокниты (очёсы хлопка и льна, стекло- и асболокно);

– слоистые с листовым наполнителем (бумага – гетинакс, ткань – текстолит, асбо- и стеклоткань и др.);

– газонаполненные (пено-, поро- и сотопласты; наполнитель – воздух или нейтральные газы);

– связующее – матрица, объединяющая в единое целое все составные части: смолы, цемент, стекло;

– пластификаторы применяют для улучшения технологических и эксплуатационных свойств (стеарин, олеиновая кислота и др.);

– отвердители (сшивающие агенты) – амины – вводят с целью создания химических связей между молекулами полимера;

– катализаторы – перекисные соединения – вводят для отверждения, т. е. создания межмолекулярных связей;

– смазывающие вещества используют для увеличения текучести;

– стабилизаторы повышают стойкость к воздействию тепла, света, кислорода и т. д.

**По назначению** пластмассы подразделяют на группы:

- *конструкционные*, отличающиеся высокими механическими свойствами (полистирол, фенопласты, стеклопластики и др.);
- *электроизоляционные*, обладающие хорошими диэлектрическими свойствами (полиэтилены, полистирол, фторопласты, гетинакс, текстолит и др.);
- *химически стойкие* пластмассы (фторопласт-4, винипласт, асболокнители и др.);
- *фрикционные* пластмассы, обладающие в условиях сухого трения высокими значениями коэффициента трения и износостойкостью (асболокнители, асботекстолиты и др.);
- *антифрикционные*, имеющие малый коэффициент трения и высокую износостойкость (фторопласт-4, капрон, лавсан и др.);
- *тепло- и звукоизоляционные* пластмассы, отличающиеся низким коэффициентом теплопроводности и высокой звукопоглощающей способностью (пенополистирол, пенополиуретан и др.);
- *светотехнические и оптические*, устойчивые к действию света и обладают высокими оптическими свойствами (полиметилметакрилат и др.);
- *декоративные*, применяются для отделки мебели транспортных салонов и т. п. (гетинакс, полистирол и др.).

Данная классификация в значительной мере условна, т. к. одна и та же пластмасса может использоваться в разном качестве.

***В зависимости от отношения связующего к повторному нагреву*** пластмассы, подобно полимерам, делятся на *термопласты* (термопластичные пластмассы) и *реактопласты* (термоактивные пластмассы).

***По совокупности свойств*** пластические массы делятся: на термопласты, реактопласты, газонаполненные пластмассы и эластомеры (см. рис. 2).

#### **2.4.1. Термопласты**

Термопласты – это материалы, обладающие способностью размягчаться при повышении температуры, превращаясь в вязкую жидкость, и затвердевать при понижении температуры, сохраняя свои первоначальные свойства. В нагретом состоянии им придаётся под давлением определенная форма, сохраняемая при

охлаждении. Основа термопластов – полимеры с линейной или разветвлённой структурой.

Для большинства термопластов характерны следующие особенности: предел прочности составляет  $10\div 100$  МПа, температура эксплуатации не превышает  $60\div 200$  °С. Более прочными считаются кристаллические термопласты, помимо этого, они хорошо сопротивляются усталости, их долговечность выше, чем у металлов.

Термопластические пластмассы делят:

– **по совокупности** физических и технологических **свойств** – на термопласты общетехнического и инженерно-технического назначения;

– **по строению** – на полярные и неполярные (см. рис. 2).

**К неполярным термопластам** (см. рис. 2) относят полиэтилен высокого (ПЭВД) и низкого (ПЭНД) давления, полипропилен, полистирол и фторопласт-4.

*Полиэтилен* – продукт полимеризации бесцветного газа этилена, относящийся к кристаллизующимся полимерам. Молекулы полиэтилена имеют линейную структуру. Обладает весьма высокой химической стойкостью. Заготовки из этого материала получают методами формования (экструзией и раздувом) и литьём под давлением. Свойства и область применения приведены в табл. 1.

*Полипропилен* является продуктом полимеризации пропилена и представляет собой аморфно-кристаллический неполярный термопласт. Перерабатывается литьём под давлением и формованием. Хорошо сваривается. Физиологически нейтрален, что определило область его применения (см. табл. 1).

*Полистирол* получают путём полимеризации мономерного стирола. Это твёрдый аморфный полимер. Характеризуется высокими диэлектрическими показателями (см. табл. 1); устойчив по отношению к щелочам и кислотам, не растворяется в воде, спиртах, эфирах и др.; длительно сохраняет свойства при воздействии гамма-излучения. Заготовки получают литьём под давлением и экструзией.

*Фторопласт-4* (политетрафторэтилен) является аморфно-кристаллическим полимером. Стоек к действию кислот и щело-

чей; высококачественный диэлектрик (см. табл. 1). При переработке возникают трудности вследствие низкой пластичности.

**К полярным термопластам** (см. рис. 2) принадлежат: фторопласт-3, органическое стекло, полиформальдегид, поливинилхлорид и другие материалы.

*Фторопласт-3* (полимер трифтохлорэтилена) – линейный аморфно-кристаллический полимер белого цвета. Обладает повышенной плотностью, твёрдостью и высокими механическими свойствами (см. табл. 1), хорошей устойчивостью в агрессивных средах, легко перерабатывается методами прессования, литья под давлением и др.

*Органическое стекло* (полиметилакрилат) – аморфный бесцветный прозрачный полимер на основе сложных эфиров акриловой и метакриловой кислот. Отличается высокой атмосферостойкостью, устойчивостью к действию кислот; низкой поверхностной твёрдостью (см. табл. 1).

*Полиформальдегид* – простой полиэфир – линейный полимер, обладающий чрезвычайно плотной упаковкой кристаллов, вследствие чего имеет высокие твёрдость, ударную вязкость и упругость (см. табл. 1). Материал устойчив к воде, маслам, бензину.

*Поливинилхлорид (ПВХ)* (винипласт, пластикат) – линейный аморфный полимер. Имеет хорошие электроизоляционные характеристики, стоек по отношению ко многим средам: воде, кислотам, маслам и др.; обладает высокими прочностью и упругостью, однако, при длительной эксплуатации прочность снижается (см. табл. 1).

## 2.4. 2. Реактопласты

Термореактивные материалы (реактопласты) при нагревании переходят в неплавкое, нерастворимое твердое состояние и необратимо утрачивают свойства плавиться. Это многокомпонентные материалы, в состав которых входят смолы, наполнители, пластификаторы, ускорители или замедлители, отвердители, красители, растворители.

Основной компонент термореактивных пластмасс – смолы (высокомолекулярные органические соединения), вследствие чего реактопласты отличаются повышенной прочностью, способны работать при повышенных температурах до 350 °С.

В производстве используют следующие виды смол:

- фенолформальдегидные бакелитовые (резольные смолы и новолаки);
- эпоксидные;
- кремнийорганические (силиконы);
- полиэфирные (наиболее часто глифталевые).

Реактопласты классифицируют в зависимости от формы частиц наполнителя. Их подразделяют на порошковые, волокнистые и слоистые пластмассы (см. рис. 2).

### **Пластмассы с порошковыми наполнителями.**

Пластмассы этой группы изготавливают на основе новолачных, кремнийорганических и других смол в смеси с древесной мукой, асбестом, кварцем, слюдой, графитом. Готовые изделия получают методом прессования. Пресс-порошки отличаются изотропностью, удовлетворительными электроизоляционными свойствами, химической и водостойкостью, невысоким уровнем механических свойств (табл. 2).

Таблица 1

## Свойства и область применения термопластов

Наименование	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$T$ , °С	$\sigma_B$ , МПа	$\rho_1$ , Ом · м	Область применения
ПЭВД	920÷930	-130÷110	10÷17	$10^{18}$	Трубы, литые и прессованные несилловые детали, плёнки; защитные покрытия
ПЭНД	949÷955	-160÷100	18÷45	$10^{18}$	
Полипропилен	920÷930	-20÷150	30÷35	$10^{17} \div 10^{18}$	Аналогично полиэтиленам, также в бытовой технике: контейнеры, посуда и др.
Полистирол	1050÷1080	-20÷90	37÷48	$10^{16} \div 10^{18}$	Товары бытового назначения: игрушки, панели приборов и т. п.; в электротехнике – в производстве конденсаторов
Фторопласт-4	1900÷2200	-270÷250	15÷35	$10^{19}$	Электрорадиотехнические детали, трубы, вентили, манжеты и др.
Фторопласт-3	2090÷2160	-195÷150	30÷45	$1,2 \cdot 10^{16}$	Трубы, клапаны, шланги, защитные покрытия металлов, низкочастотные диэлектрические изделия
Поливинилхлорид	1350÷1430	-40÷90	40÷120	$10^{13} \div 10^{15}$	Уплотнители пневмо- и гидросистем, изоляция проводов, кабелей и др.
Полиформальдегид	1470	-60÷130	70	$10^{12}$	Зубчатые колёса, подшипники, клапаны и другие детали машин
Полиметилакрилат (оргстекло)	1200	-60÷60	63÷120	$10^{11} \div 10^{12}$	В авиационной технике: стёкла вертолётов и др., светотехнические детали, линзы и т. п.

Примечание:  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup> – плотность;  $T$ , °С – рабочая температура;  $\sigma_B$ , МПа – предел прочности на растяжение;  $\rho_1$ , Ом · м – удельное электросопротивление.

### **Пластмассы с волокнистыми наполнителями.**

Материалы представляют собой композиции из связующего – смолы и волокнистого материала. В зависимости от этого различают: волокниты, асбо- и стекловолокниты.

*Волокниты* состоят из волокнистого наполнителя в виде очёсов хлопка, пропитанного фенолформальдегидным связующим. Пресс-материал волокнита является грубой и жесткой массой, из которой нельзя прессовать мелкогабаритные, тонкостенные детали. Свойства и применение приведены в табл. 2.

*Асбоволокниты* содержат наполнитель – асбест – волокнистый минерал, расщепляющийся на тонкое волокно; связующим служит, как правило, фенолформальдегидная смола. Преимуществом асбоволокнитов является повышенная теплостойкость (см. табл. 2), ударопрочность, устойчивость к кислым средам и фрикционные свойства; как диэлектрики их применяют для низкочастотных токов.

*Стекловолокниты* – это композиция, состоящая из связующего – синтетической смолы и стекловолокнистого наполнителя. Стекловолокно получается путем продавливания расплавленной стекломассы через фильеры (отверстия в дне электропечи).

Стекловолокно негорюче, устойчиво к действию ультрафиолетовых лучей, химически стойко, стабильных размеров. Наполнитель является армирующим элементом и воспринимает основные нагрузки при работе стеклопластика. Свойства этих материалов (см. табл. 2) зависят от длины волокна и состава стекла.

### **Слоистые пластики.**

Слоистые пластики состоят из связующего и листового наполнителя, что определяет их слоистую структуру и анизотропию свойств. Материалы выпускают в виде труб, листов, плит и других заготовок, из которых механической обработкой производят детали. Слоистые пластики получили широкое применение как силовые конструкционные материалы. В эту группу входят: текстолит, гетинакс, древеснослоистые пластики, асбо- и стекло-текстолит, СВМ.

Таблица 2

## Свойства и область применения реактопластов

Наименование	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$T_{\text{пред}}$ , °С	$\sigma_{\text{в}}$ , МПа	$\delta$ , %	Область применения
Порошковые	1400	110	50÷100	0,5	Несилловые изделия электротехнического назначения; ремонт изношенных деталей путём заливки смолой
Волокнит	1400	110	30÷60	2	Детали общетехнического назначения: втулки, фланцы, направляющие и т. п.
Асбоволокнит	1950	200	–	3	Тормозные устройства, кислотоупорные ванны, трубы и др.
Стекловолокнит	1800	280	80÷500	2	Силовые электротехнические детали, детали машин: золотники, уплотнения и т. д.
Гетинакс	1350	150	80÷100	2	Облицовка транспортных средств: вагонов, кабин; электротехнические изделия
Текстолит	1400	125	65÷100	2	Детали машин: корпусные, шестерни, подшипники и др.
Асботекстолит	1600	190	55	–	Теплоизоляционный материал; лопатки бензонасосов, фрикционные диски, накладки, тормозные колодки и др.
ДСП	1350	200	180÷300	–	Аналогично текстолитам
Стеклотекстолит	1750	300	250÷600	–	Крупные детали машин, применяемые в судо-, авиастроении и радиотехнике
СВАМ	1900	200	350÷1000		Силовые изделия и несилловые изделия: корпуса, трубы, кожухи, ограждения и др.

Примечание:  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup> – плотность;  $T_{\text{пред}}$ , °С – предельная рабочая температура;  $\sigma_{\text{в}}$ , МПа – предел прочности на растяжение;  $\delta$ , % – относительное остаточное удлинение.

*Текстолит* изготавливают на основе фенолформальдегидных смол с наполнителем из листов хлопчатобумажной ткани (шифон, бязь и др.). Материал обладает хорошей способностью поглощать вибрационные нагрузки. Текстолит имеет низкий коэффициент трения, высокую износостойкость. Недостатком является низкая рабочая температура (см. табл. 2).

*Гетинакс* – это материал, представляющий собой бумагу разных сортов, пропитанную модифицированными фенолформальдегидными смолами. Устойчив к действию химикатов, растворителей, пищевых продуктов, что определило область его применения (см. табл. 2). Различают электротехнический и декоративный гетинакс.

*Асботекстолит* производят на основе кремнийорганических смол с наполнителем из асбестовых тканей. Выдерживает кратковременно высокие температуры, поэтому применяется в качестве теплоизоляционного материала. Асботекстолит обладает хорошими антифрикционными и механическими свойствами (см. табл. 2).

*Древеснослоистые пластики (ДСП)* изготавливают из древесного шпона, пропитанного терморезистивным связующим, спрессованного в виде плит. ДСП имеют высокие физико-механические свойства (см. табл. 2), низкий коэффициент трения и применяются в узлах трения вместо деталей из цветных металлов. Недостатком является гигроскопичность.

В *стеклотекстолитах* в качестве наполнителя применяют стеклянные ткани, которые по виду ткацкого переплетения подразделяются на полотняные или гарнитуровые, сатиновые или атласные и кордовые ткани. Для связующего используют все виды смол (см. п. 5.4.). При получении изделий усиленные нити основы укладываются в направлении, совпадающем с деформацией, и воспринимают растягивающие нагрузки. При многослойной перекрестной укладке пропитанных тканей можно получить равнопрочный стеклопластик. Свойства и применение приведены в табл. 2.

*СВАМ* – *стекловолоконистый анизотропный материал*, в котором стеклянные нити сразу по выходе из фильер склеиваются между собой в виде стеклянного шпона и затем укладываются, как в фанере. Связующие могут быть различными. СВАМ является конструкционным материалом с высокими механиче-

скими свойствами (см. табл. 2). Стеклопластики обладают высокой демпфирующей способностью, хорошо работают при вибрационных нагрузках.

### 2.4.3. Газонаполненные пластмассы

Структура газонаполненных пластмасс (вспененных полимеров) состоит из двух фаз: связующей и газовой. Связующая фаза представляет пластмассу, которая образует стенки ячеек и пор. Газовая фаза является наполнителем. Такое строение обеспечивает особые свойства этих материалов: высокую тепло- и звукоизолирующую способность, весьма низкую плотность.

Получение вспененных материалов осуществляется как путём вспенивания полимерной заготовки в состоянии высокоэластичной деформации, так и введением в исходную композицию заполненных газом сферических частиц (порофоров) из стекла, полимеров, керамики и др. В производстве используют термопласты (полистирол, поливинилхлорид, полиэтилен и др.) и реактопласты (фенолформальдегидную, эпоксидную, кремнийорганическую и другие смолы).

Газонаполненные пластмассы широко применяют для звуко- и теплоизоляции приборов, кабин, контейнеров, холодильников; используются в транспортном машиностроении для заполнения сидений и т. п.

Среди вспененных полимеров выделяют: пено-, поро- и со-топласты (свойства приведены в табл. 3).

Таблица 3

Свойства газонаполненных пластиков

Наименование	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$T_{\text{раб.}}$ , °С	$\sigma_{\text{в}}$ , МПа
Пенополистирол	25÷200	– 60÷60	0,7÷4,2
Пенополивинилхлорид	50÷200	– 60÷60	–60÷60
Пенополиуретан	60÷200	– 60÷200	1,8÷2,8
Поролон	30÷70	– 40÷100	0,1
Пенофенопласт	200	– 60÷150	1,2÷2
Пенополиэпоксид	1000÷200	– 60÷200	–

Примечание:  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup> – кажущаяся плотность;  $T_{\text{раб.}}$ , °С – рабочая температура;  $\sigma_{\text{в}}$ , МПа – предел прочности на растяжение.

*Пенопласты* представляют собой материалы с замкнутой пористой ячейкой, в которых газообразный наполнитель, находящийся в ячейках, изолирован от атмосферы. Замкнутоячеистая структура обеспечивает хорошую плавучесть и высокие теплоизоляционные свойства. Прочность пенопластов невелика и зависит от плотности материала.

*Поропласты* – губчатые материалы с открытопористой структурой, вследствие чего присутствующие в них газопористые включения свободно сообщаются друг с другом и с окружающей атмосферой. Выпускаются эластичными. Отличаются высокой водопоглощающей способностью – до 700 %.

*Сотопласты* изготавливают из тонких листов, которые первоначально гофрируют, а затем склеивают в виде пчелиных сот. Материалом для них служат ткани, пропитанные связующим на основе смол. Отличаются повышенной тепло- и, особенно, звукоизоляцией.

## 2.5. Эластомерные материалы

Эластомерными материалами (эластомерами) называют полимеры, обладающие способностью к значительным обратимым (высокоэластичным) деформациям. К ним относятся каучуки и резины (см. рис. 2).

*Каучуки* представляют собой гибкоцепные полимеры различной химической природы. Существуют *натуральные* каучуки, получаемые из млечного сока каучуконосных деревьев – латекса, и *синтетические* каучуки, среди которых выделяют: бутадиеновый, бутадиен-стирольный, бутилкаучук, хлорпреновый, бутадиен-нитрильный, кремнийорганический каучуки.

Эти материалы имеют низкие прочностные свойства и значительную долю необратимой составляющей в общей деформации, в связи с чем в чистом виде в качестве технических изделий не применяются, а используются в качестве исходного сырья для получения резины.

*Резины* – продукты вулканизации каучуков, являющиеся многокомпонентными материалами. *Вулканизация* – это процесс химического взаимодействия каучука с серой. В процессе вулканизации между макромолекулами образуются поперечные связи

различной природы («сшивание»), и формируется единая пространственная сетка, обеспечивающая высокий уровень прочностных и эластичных свойств (резинам свойственна обратимая деформация до 1000 %).

В зависимости от количества вводимой серы получается различная частота сетки полимера. При введении 1÷5 % S образуется редкая сетка, и резина получается высокоэластичной. С увеличением процентного содержания серы сетчатая структура становится более частой, резина – более твёрдой, а при максимально возможном насыщении (до 30 %) получают эбонит.

В состав резины, помимо каучука, входят:

– *вулканизирующие агенты* (основной вулканизирующий элемент – сера, кроме того, тиурам, оксиды цинка или магния и др.);

– *наполнители* (сажа, тальк, мел и др.);

– *противостарители – мягчители* (стеарин, парафин, воск и др.);

– *красители* (охра, ультрамарин и т. п.) и др.

Технология изготовления резины включает в себя следующие операции:

– подготовка ингредиентов;

– смешивание ингредиентов;

– получение полуфабриката (сырой резины);

– изготовление заготовок требуемой формы методами пресования и литья под давлением;

– вулканизация.

В процессе эксплуатации резиновые изделия подвержены различным видам *старения*, в результате которого происходят необратимые изменения свойств. Наиболее сильно ухудшают свойства колебания температуры, ионизирующее и ультрафиолетовое излучение, воздействие вакуума.

***Резины классифицируются по эксплуатационным признакам*** на две группы (см. рис. 2): общего и специального назначения (табл. 4).

К группе ***резин общего назначения*** относят вулканизаты неполярных каучуков – натурального, бутадиенового, бутадиенстирольного, изопренового и их комбинаций. Эти материалы работают в обычных условиях окружающей среды. Из них изготов-

ливают транспортёрные ленты, амортизаторы, обувь и другие изделия бытового назначения. Свойства приведены в табл. 4.

Таблица 4

Свойства некоторых резин

Наименование	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$T_{\text{раб.}}$ , °C	$\sigma_{\text{в}}$ , МПа	$\delta$ , %
Общего назначения	900÷944	-77÷150	13÷34	10÷40
Маслобензостойкие	943÷2140	-60÷60	3,2÷33	10÷40
Теплостойкие	1700÷1200	250÷325	35÷80	4
Износостойкие	–	<130	21÷60	2÷10

Примечание:  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup> – плотность;  $T_{\text{раб.}}$ , °C – рабочая температура;  $\sigma_{\text{в}}$ , МПа – предел прочности на растяжение;  $\delta$  – относительное остаточное удлинение.

Среди *резин специального назначения* различают: морозотеплостойкие; износо-, маслобензо-, светоозоностойкие; электротехнические и др.. В состав каждой из резин вводятся компоненты, обеспечивающие определённый комплекс свойств в заданных условиях эксплуатации (см. табл. 4).

*Износостойкие резины*, получаемые на основе полиуретановых каучуков, обладают высокой прочностью, эластичностью, сопротивлением к истиранию, стойкостью к атмосферному воздействию. Из них делают автомобильные шины, конвейерные ленты и т. п.

*Электротехнические резины*, используемые для изготовления изоляции токопроводящей жилы проводов и кабелей, специальных перчаток и обуви, изготавливают на основе неполярных каучуков.

*Маслобензостойкие резины* получают на основе хлоропренового, полисульфидного и бутадиеннитрильного каучуков. Изделия из этих материалов работают в контакте с бензином, топливом, маслами в интервале температур от -30 °C до + 130 °C. Из них делают рукава, уплотнительные прокладки, манжеты и другие изделия.

*Морозостойкие резины* изготавливаются на основе каучуков, имеющих низкие температуры стеклования, например, бутадиенстирольного. Устойчивость резин к повышенным темпера-

турам зависит от состава вулканизатора. Наибольшей термостойкостью обладают резины со смоляной вулканизирующей системой. *Морозо-* и *теплостойкие резины* наиболее часто используются в качестве уплотнителей.

*Светоозоностойкие резины* вырабатывают на основе насыщенных каучуков – фторсодержащих, бутилкаучука и др. Помимо устойчивости к атмосферным влияниям эти материалы хорошо сопротивляются истиранию, воздействию масел и топлива, имеют высокую термостойкость. Широко распространены в изделиях авто- и авиапромышленности.

### **3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ**

Студенты выполняют работу по индивидуальным заданиям, приведённым в приложении. Содержание работы заключается в следующем:

- ознакомиться с методическим указанием, изучить строение, классификацию и свойства полимеров;
- используя методическое указание и справочную литературу, определить свойства заданных полимерных материалов;
- указать область применения данных полимеров;
- занести данные в таблицу (см. приложение);
- оформить отчет;
- ответить на контрольные вопросы.

### **4. ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЁТА**

Отчёт должен содержать:

- наименование и цель лабораторной работы;
- краткие теоретические положения;
- таблицу (см. приложение), заполненную в соответствии с заданием.

### **5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Дайте определение полимеров.
2. Как классифицируются полимеры в соответствии с молекулярной и надмолекулярной структурой?

3. Чем отличаются регулярные полимеры от нерегулярных?
4. Дайте определение пластмасс и приведите их классификацию по назначению.
5. Какие материалы называются реактопластами? Приведите примеры.
6. Какие материалы называются термопластами? Приведите примеры.
7. Назовите особенности вспененных полимеров. Какие материалы принадлежат к этой группе?
8. Дайте определение эластомеров. На какие группы делятся эти материалы?
9. Какие виды резин Вы знаете? Опишите технологию получения резин. Приведите примеры.
10. Как классифицируют резины по назначению? Приведите примеры резин специального назначения, опишите их свойства.

## **6. СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Фетисов, Г. П. Материаловедение и технология металлов : учеб. для вузов / Г. П. Фетисов [и др.]. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Высш. шк., 2005. – 862 с.
2. Ржевская, С. В. Материаловедение : учеб. для вузов / С. В. Ржевская. – Москва: Унив. б-ка, 2006. – 424 с.
3. Материаловедение и технология конструкционных материалов : учеб. для вузов / под ред. В. Б. Арзамасова и А. А. Черепашина. – Москва: Академия, 2007. – 448 с.
4. Справочник по конструкционным материалам / под ред. Б. Н. Арзамасова, Т. В. Соловьевой. – Москва: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. – 640 с.

Варианты заданий

№	Наименование полимера
1	Полиэтилен высокого давления (ПЭВД)
2	Полистирол
3	Маслобензостойкая резина
4	Волокнит
5	Асбололокнит
6	Стекловолокнит
7	Гетинакс
8	Текстолит
9	Полиметилакрилат (оргстекло)
10	ДСП
11	Стеклотекстолит
12	СВАМ
13	Полиэтилен низкого давления (ПЭНД)
14	Пенополистирол
15	Пенополивинилхлорид
16	Пенополиуретан
17	Поролон
18	Теплостойкая резина
19	Пенополиэпоксид
20	Полипропилен
21	Полистирол
22	Фторопласт-4
23	Фторопласт-3
24	Поливинилхлорид
25	Полиформальдегид

Оформление отчёта

Наименование	Группа по назначению	Свойства		Метод получения	Применение
		физико-механические	специальные		

# Лабораторная работа №10 «МАТЕРИАЛЫ ВЫСОКОЙ ПРОВОДИМОСТИ. МАРКИРОВКА, КЛАССИФИКАЦИЯ, СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ».

Составитель: Додонова Е. М.

## 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Цель – изучение классификации, маркировки, свойств и области применения проводниковых материалов.

## 2. КЛАССИФИКАЦИЯ, МАРКИРОВКА, СВОЙСТВА И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ ВЫСОКОЙ ПРОВОДИМОСТИ

### 2.1. Общие положения

Проводниковый материал с удельным электрическим сопротивлением  $\rho_1$  при нормальных условиях не более  $0,1 \times 10^6$  Ом·м называют материалом высокой проводимости (ГОСТ 22265 – 76).

Основными показателями проводников являются: высокая удельная электрическая *проводимость*, малое удельное электрическое *сопротивление*; *температурный коэффициент* удельного электрического сопротивления и *работа выхода* электрона из проводника (ГОСТ 19880 – 74).

Наименьшим удельным электросопротивлением обладают *чистые металлы*. Примеси – металлические и неметаллические – повышают  $\rho_1$ , что объясняется искажением кристаллической решетки основного металла даже небольшим их количеством.

Помимо примесей искажает решетку и пластическая деформация при растяжении, сжатии, и т. п., что объясняется явлением *наклёпа*. В частности, в процессе производства проводов имеет место всестороннее обжатие – *нагартовка*. Восстанавливают первоначальное сопротивление металла, как правило, с помощью *отжига*.

Кроме малого удельного электрического сопротивления металлы высокой проводимости должны обладать высокими меха-

ническими свойствами, стойкостью против окисления, хорошо свариваться и паяться для получения соединения высокой надёжности и электрической проводимости.

К группе материалов высокой проводимости относят золото, платину, иридий, магний и др., однако, практическое применение имеют медь, алюминий, железо и, реже, серебро.

Таблица 1

Усреднённые физические свойства металлов

Металл	Температура плавления, °С	Плотность, кг/м <sup>3</sup> × 10 <sup>-3</sup>	Удельное электросопротивление, мкОм·м	Удельная теплоёмкость, Дж/(кг·К)	Работа выхода электронов, эВ
Платина	1770,0	21,4	0,105	134	–
Железо	1535,0	7,87	0,098	452	4,5
Медь	1083,0	8,94	0,017	385	4,3
Золото	1063,0	19,3	0,024	126	4,8
Серебро	961,0	10,5	0,016	234	4,4
Алюминий	657,0	2,7	0,028	922	4,3

## 2.1. Медь

Медь – самый распространённый проводниковый материал – принято считать эталоном электропроводности, т. е. её электропроводность принята за 100 % (ГОСТ 859-2001). В качестве проводникового материала применяют как чистую медь, так и сплавы на её основе.

**2.1.1. Технически чистая медь** имеет наибольшую электрическую проводимость. Химический состав и свойства нормированы ГОСТ 859 – 2001.

Все *примеси*, входящие в твердый раствор, снижают электропроводность меди, но наиболее сильно фосфор, мышьяк, алюминий, олово. На механические и технологические свойства влияют висмут, свинец, сера и, в особенности, кислород. Поэтому медь *получают* переплавом электролитически очищенной меди в вакууме или переработкой катодной меди методами порошковой металлургии.

Маркируется медь буквой «М», остальные обозначения указывают степень чистоты и метод очистки:

- к – катодная,
- б – бескислородная,
- р – раскисленная,
- у – уточнение всех примесей,
- ф – ужесточение содержания фосфора,
- ВЧ – высокая чистота меди.

Например, МООб – бескислородная медь с суммарным содержанием примесей 0,01 %.

Медь *поставляют*:

- в твердом (нагартованном, обжатие более 35 %);
- в полутвердом (полунагартованном, обжатие 10–30 %);
- в мягком (отожженном) состоянии.

Холодная пластическая деформация повышает сопротивление усталостному разрушению, пределы прочности и текучести, одновременно снижая пластичность, поэтому медные полуфабрикаты подвергают двум видам *термической обработки*:

- рекристаллизационному отжигу;
- отжигу для уменьшения (снятия) остаточных напряжений.

Температурный режим и время выдержки зависят от размеров полуфабриката и назначения отжига – промежуточного между операциями пластической деформации или окончательного. Как правило, для промежуточного (рекристаллизационного) отжига назначают температуру 480–650 °С, для окончательного (отжига для снятия остаточных напряжений) – 100–230 °С.

При низких температурах в меди повышаются прочностные характеристики, пластичность и ударная вязкость. В частности, при температуре – 269 °С предел прочности повышается до 510 МПа, условный предел текучести до 460 МПа, а относительное остаточное удлинение составляет 40 %. Признаков хладноломкости технически чистая медь не имеет, что позволяет использовать её в криогенной технике.

Отожженную медь используют для обмоточных проводов и кабельных изделий, нагартованную – для подвесных токонесущих и контактных проводов, коллекторных пластин.

Таблица 2

## Характеристики основных физико-механических свойств меди

Свойства	Отожженная	Нагартованная
Удельное электросопротивление $\rho_1 \cdot 10^8$ , Ом·м при 20–100 °С	1,724	
Предел прочности $\sigma_B$ , МПа	190–215	280–360
Предел текучести $\sigma_T$ , МПа	60–75	280–340
Относительное остаточное удлинение $\delta$ , %	60	6
Твёрдость по Бринеллю НВ	45	110
Ударная вязкость КСУ, Дж/см <sup>2</sup>	630–470	

**2.1.2. Сплавы на основе меди** находят широкое применение благодаря лучшим по сравнению с технически чистой медью механическим свойствам. Они используются для изделий, от которых требуется прочность выше 400 МПа, поскольку обеспечивают большие прочность и износостойкость, чем медь при некоторой потере электрической проводимости.

По химическому составу сплавы меди делят на две основные группы: *латуни* (сплавы меди с цинком) и *бронзы* (сплавы меди с другими элементами). Бронзы, в свою очередь, подразделяют на оловянные и безоловянные. По технологическому признаку медные сплавы делят на деформируемые и литейные.

Сплавы меди *маркируют* буквами Л (латунь) или Бр (бронза), после чего следуют буквы и цифры, обозначающие составляющие сплав элементы и среднее содержание этих элементов в процентах. Условные обозначения элементов в медных сплавах: А – алюминий, Б – бериллий, Ж – железо, К – кремний, Мц – марганец, Н – никель, О – олово, С – свинец, Ф – фосфор, Х – хром, Ц – цинк. Порядок букв и цифр различен для деформируемых и литейных сплавов.

В марках *деформируемых латуней* по ГОСТ 15527–70 первые две цифры после буквы Л обозначают среднее содержание меди в процентах. Цифры, указывающие содержание других элементов в сплаве, пишут через тире после всех букв, обозначаю-

щих эти элементы. Содержание цинка определяют по разности от 100 %.

Например: Л70 – латунь, содержащая около 70 % меди и  $100 - 70 = 30$  % цинка; ЛО70-1 – латунь, содержащая 70 % меди, 1 % олова и  $100 - 70 - 1 = 29$  % цинка; ЛАЖ60-1-1 – латунь, содержащая 60 % меди, 1 % алюминия, 1 % железа и  $100 - 60 - 1 - 1 = 38$  % цинка.

Деформируемые латуни хорошо поддаются холодной обработке давлением, обработке резанием, имеют высокую коррозионную стойкость.

В *литейных латунях* по ГОСТ 17711–93 среднее содержание элемента в процентах ставят сразу после буквы, обозначающей данный элемент. Отсутствие цифры означает, что данного элемента в сплаве около 1 %. Содержание меди определяют по разности от 100 %.

Например: ЛЦ40С – латунь, содержащая 40 % цинка, 1 % свинца и  $100 - 40 - 1 = 59$  % меди; ЛЦ40МцЗЖ – латунь, содержащая 40 % цинка, 3 % марганца, 1 % железа и  $100 - 40 - 3 - 1 = 56$  % меди.

Литейные латуни обладают хорошей жидкотекучестью, коррозионной стойкостью и антифрикционными свойствами.

В марках *деформируемых бронз* содержание основного компонента – меди – не указывают, а определяют по разности от 100 %. Цифры, указывающие содержание элементов в сплаве, пишут через тире после всех букв, обозначающих эти элементы.

Например: БрОФ6,5-0,4 – бронза, содержащая 6,5 % олова, 0,4 % фосфора и  $100 - 6,5 - 0,4 = 93,1$  % меди.

Деформируемые оловянные бронзы (ГОСТ 5017-74) обладают хорошими антифрикционными свойствами и коррозионной стойкостью. Их используют для изготовления плоских и круглых пружин, барометрических коробок, мембран, антифрикционных деталей.

К деформируемым безоловянным бронзам (ГОСТ 18175–78) относят:

4. Алюминиевые бронзы БрА5, БрА7, БрАЖ9-4 и др. Они отличаются высокими механическими, антикоррозионными и антифрикционными свойствами.

5. Бериллиевые бронзы БрБ2, БрБ2.5 и др. Они имеют высокую прочность, упругость, коррозионную стойкость, хорошо обрабатываются резанием и свариваются. Эти бронзы используют в приборостроении для изготовления ответственных пружин, мембран, кулачков, пружинящих контактов и т.д.

6. Кремнистые бронзы БрКМц3-1, БрКН1-3. Они характеризуются хорошими механическими, упругими и антифрикционными свойствами. Такие бронзы легко обрабатываются давлением, резанием и свариваются.

В марках *литейных бронз*, как и в литейных латунях, среднее содержание элемента в процентах ставят сразу после буквы, обозначающей этот элемент.

Например: БрОЗЦ12С5 – бронза, содержащая 3 % олова, 12 % цинка, 5 % свинца и  $100 - 3 - 12 - 5 = 80$  % меди.

Литейные оловянные (ГОСТ 613–79) и безоловянные (ГОСТ 493-79) бронзы обладают хорошей жидкотекучестью и малой усадкой и коррозионной стойкостью.

Из всего многообразия существующих **бронз** в качестве материалов высокой проводимости наиболее часто применяются бериллиевые, кадмиевые, магниевые, серебряные и др. бронзы.

Бериллиевые бронзы – это сплавы меди с бериллием. Оптимальными свойствами обладают бронзы, содержащие 2–2,5 % Ве (табл. 3). В качестве легирующих элементов применяют никель, кобальт, магний и, чаще других, титан, который позволяет уменьшить содержание дефицитного бериллия и получить более однородную структуру.

Таблица 3

Химический состав бериллиевых бронз

Марка	Ве, %	Ni, %	Ti, %	Al, %	Fe, %	Si, %	Pb, %
БрБ2	1,8–2,1	0,2–0,5		0,15	0,15	0,15	0,005
БрБ2,5	2,3–2,6	0,2–0,5		0,15	0,15	0,15	0,005
БрБНТ1,7	1,6–1,85	0,2–0,4	0,1–0,25	0,15	0,15	0,15	0,05
БрБНТ1,9	1,85–2,1	0,2–0,4	0,1–0,25	0,15	0,15	0,15	0,05

Примечание. Остальное – медь.

*Типовой режим термической обработки* бериллиевых бронз включает в себя *закалку* при температуре 760–800 °С и

*старение* при 300–350 °С. В некоторых случаях эти материалы подвергают низкотемпературной термообработке (НТМО), которая состоит в применении пластической деформации между операциями закалки и старения, что обеспечивает получение более высоких упругих свойств. После закалки применяют глубокую вытяжку и прессование тонкостенных пружинящих деталей, холодную прокатку ленты, навивку пружин. Механические свойства приведены в табл.4.

Бериллиевые бронзы хорошо свариваются, паяются и обрабатываются резанием в том числе после термообработки. Они мало склонны к хладноломкости и могут работать в интервале температур от –200 °С до +250 °С, что позволяет использовать их в криогенной технике.

К недостаткам относят высокую стоимость и дефицитность бериллия, а также его токсичность при производстве и пайке.

Таблица 4

Механические свойства бериллиевых бронз

Марка бронзы	Полуфабрикат	Диаметр или толщина	Состояние	Мех. свойства		
				$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	Твердость
БрБ2	Проволока	1,1–5,0	Мягкое	390–590	25	-
		0,55–5,00	Твердое	735–980	-	-
БрБНТ1,7	Полоса, лента	1,0–12,0	Состаренное	1080	1,0	-
		0,15–0,25	Мягкое	390–590	20,0	130НВ
БрБНТ1,9	Полоса, лента	0,25	Состаренное*	1180–1570	1,5	360НВ

Примечание. \*после закалки и деформации на 30–40 %; НВ – твёрдость по Бринеллю; HV – твёрдость по Виккерсу.

Применяют бериллиевые бронзы для изготовления плоских и витых токоведущих пружин, щеткодержателей, скользящих искробезопасных контактов, пружинящих деталей электронных приборов.

Кадмиевые, магниевые и серебряные бронзы обладают наиболее высокой электропроводностью и прочностью среди медных сплавов. Упрочняются, как и медь, только *пластической*

деформацией; электропроводность при этом не снижается. Химический состав приведён в табл. 5.

Таблица 5

Химический состав магниевых, кадмиевых и серебряных бронз

Марка	Cd, %	Mg, %	Ag, %	Примеси, %
БрКд1	0,9–1,2	–	–	$\Sigma \leq 0,3$
БрMg0,3	–	0,2–0,5	–	$\Sigma \leq 0,2$
БрСр0,1	–	–	0,08–0,12	$\Sigma \leq 0,1$

Примечание: остальное – медь.

Применяют кадмиевые и магниевые бронзы в качестве проволоки, прутков, полос, листов, коллекторных пластин электродвигателей, контактных проводов электрифицированного транспорта, деталей машин контактной сварки; серебряные – в качестве профилей, прутков, полос, коллекторных колец, обмотки роторов турбогенераторов, коммутаторов.

**Латуни** по сравнению с технически чистым металлом обладают достаточно высоким относительным остаточным удлинением и пределом прочности при растяжении. Это даёт латуням технологические преимущества перед медью при обработке штамповкой, глубокой вытяжкой и т. п.

В электротехнической промышленности чаще других применяют двойные латуни – томпак Л90 и полутомпак Л85. Состоят эти сплавы из 84–91 % меди, 10–15 % цинка, остальное – примеси (свинец, железо, фосфор и др.). Томпаки очень пластичны, легко деформируются в горячем и холодном состоянии. Подвергаются полному отжигу при 650–720 °С и отжигу для снятия остаточных напряжений. Механические свойства в мягком состоянии (после отжига) составляют: для латуни Л85: предел прочности: 235–295 МПа; относительное остаточное удлинение: 43–55 %; твёрдость по Бринеллю: 490–590НВ; для Л90 эти свойства соответственно:  $\sigma_B = 235–275$  МПа;  $\delta = 44–52$  %; 490–610 НВ.

Применяют названные латуни в виде токопроводящей проволоки.

## 2.2. Алюминий

Наряду с медью, алюминий широко применяется в электротехнике. И, хотя по электрической проводимости уступает меди (характеристики этих свойств оцениваются в 60%), по сравнению с ней он гораздо дешевле, менее дефицитен. Кроме того, плотность алюминия почти в три раза меньше меди; этот металл стоек к окислению.

**2.2.1. Технически чистый алюминий** получают из алюминиевых руд (бокситов, нефелинов и др.), содержащих окись алюминия. Технологический процесс включает в себя два периода: отделение глинозёма ( $Al_2O_3$ ) от руды и электролиз для получения алюминия.

Большим *преимуществом* алюминия является возможность анодного оксидирования (анодирования), при котором на его поверхности возникает слой оксидной изоляции, выдерживающей температуру выше температуры плавления алюминия.

К *недостаткам* алюминия относятся склонность к электрической коррозии и невысокая механическая прочность (на 30 % меньше, чем у меди). Помимо этого, он относительно трудно паяется из-за оксидной плёнки.

Основные примеси – железо и кремний – приводят к снижению пластичности, одновременно с этим увеличивая прочность.

*Марки и химический состав* первичного алюминия нормированы ГОСТ 11069–74. В маркировке буква «А» обозначает алюминий, последующие цифры указывают десятые, сотые и тысячные доли процента содержания алюминия или номер по ГОСТу. Например, А995 содержит 99,995 % Al; А6 – 99,6 % Al; А0 – 99,0 % Al.

В зависимости от химического состава выделяют первичный алюминий:

- особой чистоты (А999);
  - высокой чистоты (А995, А99, А97, А95);
  - технической чистоты (А85, А8, А7, А7Е, А6, А5Е, А5, А0).
- Технически чистый алюминий *поставляют*:
- в отожженном (М);
  - в полунагартованном (Н2) или нагартованном (Н) – обжатие 40–60 %;
  - в горячекатаном (ГК) состоянии.

*Термической обработкой* алюминий не упрочняется. Для полного разупрочнения нагартованного алюминия применяют *отжиг* при температуре 300–500 °С на воздухе или в воде, для частичного снятия упрочнения – *отжиг* при 150–300 °С.

Технически чистый алюминий *применяют* для проводов воздушных линий электропередачи, в распределительных устройствах, для кабелей, обмоток трансформаторов и электрических машин, электромагнитов и т.п. Используют его и как защитный материал в качестве обмоток кабелей.

Таблица 6

Характеристика основных физико-механических свойств алюминия

Свойства	Отожженный	Нагартованный
Удельное электросопротивление, $\rho_1 \cdot 10^8$ , Ом·м при 20 °С	2,7	
Предел прочности, $\sigma_b$ , МПа	60	130
Относительное остаточное удлинение, $\delta$ , %	28	5
Твёрдость по Бринеллю, НВ	250	

### 2.2.2. Сплавы на основе алюминия

Алюминиевые сплавы классифицируют по технологическому признаку: их разделяют на *деформируемые*, которые обрабатывают прокаткой, прессованием, ковкой и штамповкой, и *литейные*.

Деформируемые сплавы по способности упрочняться термической обработкой делят на сплавы, упрочняемые и не упрочняемые термообработкой (упрочняющей термической обработкой для алюминиевых сплавов являются закалка и старение – длительная выдержка при нормальной или повышенной температуре). Деформируемые алюминиевые сплавы изготавливают по ГОСТ 4784–97.

К сплавам, упрочняемым термической обработкой, относят:

3. Дуралюмины. Это сплавы системы Al – Cu – Mg. Их маркируют буквой Д и цифрой, обозначающей условный номер сплава.

Например: Д1, Д16.

4. Высокопрочные сплавы. К ним относят сплавы системы Al – Zn – Mg – Cu. Их маркируют буквой «В» и цифрой, обозначающей условный номер сплава.

Например: В95, В96.

5. Ковочные сплавы. Это сплавы системы Al – Cu – Mg – Si. Их маркируют буквами «АК» и цифрой, обозначающей условный номер сплава.

Например: АК6, АК8.

К алюминиевым сплавам, не упрочняемым термической обработкой, относят:

3. Сплавы алюминия с марганцем. Примером такого сплава является сплав АМц, содержащий 1–1,5 % марганца.

4. Сплавы алюминия с магнием. Такие сплавы маркируют буквами АМг и цифрой, указывающей среднее содержание магния в сплаве.

Например: АМг2 – сплав алюминия с магнием, содержащий около 2 % магния.

*Литейные алюминиевые сплавы* по ГОСТ 1583–93 маркируют буквами и цифрами. Первая буква «А» означает основу сплава (алюминий), последующие буквы – основные легирующие компоненты (К – кремний, М – медь, Ц – цинк, Мг – магний, Мц – марганец, Кд – кадмий), а цифры – среднее содержание компонентов в процентах. Отсутствие цифры означает, что данного компонента в сплаве около 1 %.

Например: АК5М – алюминиевый сплав, содержащий около 5 % кремния и 1 % меди.

К литейным алюминиевым сплавам относят:

4. Сплавы алюминия с кремнием (силумины) марок АК12, АК9, АК7, АК8М и др. Силумины обладают высокими литейными свойствами, хорошо свариваются, сравнительно легко обрабатываются резанием.

5. Сплавы алюминия с медью марок АМ5, АМ4,5. Эти сплавы обладают высокой прочностью при обычных и повышенных температурах, хорошо обрабатываются резанием и свариваются, но обладают низкими литейными свойствами.

6. Сплавы алюминия с магнием (магналии) марок АМг10, АМг5Мц и др. Такие сплавы обладают высокой коррозионной стойкостью, прочностью, вязкостью и хорошей обрабатываемо-

стью резанием, но, как и сплавы системы Al – Cu, имеют невысокие литейные свойства.

Из приведённого перечня алюминиевых сплавов в качестве материалов высокой проводимости используют, в основном сплавы Al-Mg-Si-Fe и Al-Mg-Si-Fe-Zn.

Сплавы алюминия с магнием и кремнием имеют немного пониженную электрическую проводимость ( $\rho_1 = 0,032$  мкОм), чем технически чистый металл, но более высокую прочность и коррозионную стойкость. Сплавы системы Al-Mg-Si в отожжённом и естественно состаренном состоянии имеют высокую пластичность, что позволяет подвергать их штамповке, вытяжке и другим операциям со значительными степенями деформации.

*Упрочняются* сплавы *закалкой* (нагрев до 510–535 °С с последующим охлаждением в холодной воде) и естественным (в течение 10–15 суток) или искусственным (при 160–170 °С в течение 10–12 часов) *старением*.

Сплавы этой группы *используют* для токонесущих проводов воздушных линий электропередачи с большими расстояниями между опорами.

Применяются также сплавы алюминия с магнием, кремнием и железом. Примером такого сплава является *альдрей*, содержащий 0,3–0,5% Mg, 0,4–0,7% Si и 0,2–0,3% Fe, остальное – алюминий. Плотность сплава  $\rho = 2,7$  кг/м<sup>3</sup>, т. е. близка к технически чистому алюминию. Альдрей подвергают особой обработке: *закалке* катанки с охлаждением в воде при 510–550 °С, *волочению* с последующей выдержкой при 150 °С. Механические свойства альдрея:  $\sigma_B = 350$  МПа;  $\delta = 6,5\%$ ; электросопротивление  $\rho_1 = 0,0317$  мкОм·м. Таким образом, практически сохраняя лёгкость алюминия и, будучи близким ему по электропроводности, в то же время по механической прочности альдрей приближается к твёрдотянутой меди, что позволяет изготавливать из него токоведущие провода. Существуют также аналогичные сплавы Al-Mg-Si-Fe, не требующие термообработки.

Сплавы системы Al-Cu-Mg-Si также широко применяются в электротехнике. Наиболее типичен сплав АК6 ГОСТ 11069–74. Химический состав: Cu = 1,8–1,2 %, Mg = 0,4–0,8 %, Si = 0,7–1,2 %, остальное – алюминий и примеси. АК6 – высокотехнологичный сплав средней прочности, хорошо деформируется в горя-

чем и холодном состоянии. Деформация при 505–525 °С с непосредственной закалкой в воде и последующее старение (ВТМО) приводят к повышению прочности:  $\sigma_B=375\text{--}430$  МПа;  $\delta=10\%$ .

АК6, АК8 и другие сплавы этой группы *используют* в качестве короткозамкнутых обмоток роторов асинхронных машин.

**2.3. Железо (сталь)** по проводимости значительно уступает меди (характеристики электропроводимости по отношению к стандартной меди составляют 17 %), но имеет большую прочность, поэтому в некоторых случаях его применяют в качестве проводникового материала. Кроме того, в целях экономии цветных металлов токоведущие части нередко выполняют из стали.

В качестве проводникового материала применяют мягкую (отожжённую) сталь с содержанием углерода 0,10–0,15 %. Маркировка и основные механические свойства – см. МУ "Микроструктура, свойства и маркировка углеродистых сталей", значения удельного электросопротивления приведены в табл. 7.

Таблица 7

Значения удельного электрического сопротивления углеродистых сталей

Марка стали	Удельное электросопротивление $\rho_1$ , НОм·м, при температуре испытаний	
	20 °С	100 °С
08кп, 08пс	147	178
10пс	-	190
15пс	-	233
20кп, 20пс	-	219
25	169	219

Стали *используют* для изготовления проводов воздушных линий электропередачи небольших мощностей, для шин, рельсов трамваев, электрических железных дорог. Поверхность стальных проводов покрывают цинком с целью защиты их от коррозии. В качестве токопроводящей жилы в кабелях используют углеродистую качественную проволоку оцинкованную и без покрытия. Проволоку изготавливают из низкоуглеродистой стали по ГОСТ 1050–88 и ГОСТ 4543–71. Временное сопротивление разрыву для

проволоки всех диаметров не менее 363 МПа (для проволоки без покрытия). Выбор сечения определяется не электропроводностью, а механической прочностью.

**2.4. Биметалл** – это сталь, покрытая снаружи слоем меди горячим или электролитическим способом. Содержание меди, как правило, не менее 50 %. Такая конструкция позволяет уменьшить электрические потери, связанные с ферромагнетизмом железа, и расход дефицитной меди. Проводимость определяет металл наружного слоя, сердцевина из стали воспринимает силовую нагрузку. Наружный медный слой предохраняет железо от атмосферной коррозии. В некоторых случаях медь заменяют алюминием.

Согласно ГОСТ 3822-79 сталемедную проволоку изготавливают двух марок: БСМ1 и БСМ2. Предел прочности этого материала не менее 750 МПа, относительное удлинение – 1 %, электросопротивление для БСМ1 не превышает 47,3 Ом/км, БСМ2 – 32 Ом/км (для проволоки диаметром 1,2–1,6 мм).

Используют сталемедную биметаллическую проволоку в линиях связи и электропередачи при передаче переменных токов повышенной частоты. Кроме этого, из биметаллического материала изготавливают шины для распределительных устройств, различные токопроводящие части электрических аппаратов. В частности, в условиях завода «Кузбассэлектромотор» сталемедную проволоку применяют для деталей реле.

Согласно техническим условиям выпускают также алюмомедную электротехническую проволоку, которая представляет из себя алюминиевый сердечник, покрытый слоем меди. Предел прочности составляет не менее 93 МПа, относительное удлинение – 10 %, электросопротивление – не более  $0,0270 \cdot 10^{-6}$  Ом м (для мягкой проволоки диаметром 2,5–4,0 мм).

**2.5. Серебро** имеет наименьшее удельное электрическое сопротивление из группы металлических проводников (физические свойства – см. табл.1), но является остродефицитным и дорогостоящим материалом. Предел прочности серебряной проволоки:  $\sigma_{\text{в}}=200\text{МПа}$ , относительное остаточное удлинение  $\delta=50\%$ . Серебро *используют* в виде микропроводников, гальванических покры-

тий в ответственных ВЧ- и СВЧ-устройствах, слаботочных контактах.

### **3 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ**

1. Изучить и законспектировать основные теоретические положения методического указания.

2. Используя справочную литературу, разобрать по одной марке из каждой группы в следующей последовательности:

- расшифровать марку материала;
- определить химический состав;
- дать характеристику свойств;
- указать метод получения, термической обработки;
- указать область применения;
- занести данные в таблицу (прил. 1).

3. Выполнить индивидуальное задание по варианту в прил.

4. Ответить на контрольные вопросы

### **4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Дайте определение материалов высокой проводимости. Назовите их основные показатели.

3. Охарактеризуйте технически чистую медь как материал высокой проводимости (назовите метод получения, маркировку, типовые режимы термообработки, основные свойства, область применения).

4. Охарактеризуйте бронзы и латуни как материалы высокой проводимости (назовите метод получения, типовые режимы термообработки, основные свойства, область применения). Каковы преимущества и недостатки медных сплавов как материалов высокой проводимости по сравнению с технически чистой медью?

5. Сравните технически чистые металлы – алюминий и медь – как проводниковые материалы. Назовите преимущества и недостатки каждого.

8. Охарактеризуйте технически чистый алюминий как материал высокой проводимости (назовите метод получения, марки-

ровку, типовые режимы термообработки, основные свойства, область применения).

9. Какие алюминиевые сплавы применяются в качестве материалов высокой проводимости? Охарактеризуйте их свойства, назовите типовые режимы термообработки и область применения.

10. В каких случаях производят замену медных и алюминиевых проводов на стальные? Какие стали используют в качестве проводниковых материалов?

11. Дайте характеристику биметаллических проводов.

## **СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Арзамасов Б. И. Материаловедение / Б. И. Арзамасов, В. И. Макарова. – Москва: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2002. – 646 с.

2. Лахтин Ю. М. Материаловедение / Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева. – Москва: Машиностроение, 1990. – 528 с.

3. Готман П. Е. Электротехнические материалы: справочник / П. Е. Готман, В. Б. Березин, А. М. Хайкин. – Москва: Энергия, 1969. – 544 с.

4. Корицкий Ю. В. Электротехнические материалы: учеб. для техникумов. – Москва: Энергия, 1976. – 320 с.

5. Богородский Н. П. Электротехнические материалы: учеб. для вузов / Н. П. Богородский, В. В. Пасынков, Б. М. Тареев. – Ленинград: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1985. – 304 с.

6. Электротехнические материалы: справочник / В. Б. Березин, Н. С. Прохоров, Г. А. Рыков, А. М. Хайкин. – Москва: Энергоатомиздат, 1983. – 504 с.

7. Алиев И. И. Электротехнический справочник. – Москва: ИП РадиоСофт, 2000. – 384 с.

8. Металлы и сплавы: справочник / под ред. Ю. П. Солнцева. – Санкт-Петербург: АНО НПО «Профессионал», АНО НПО «Мир и Семья», 2003. – 1066 с.

Лабораторная работа №11 «**МАГНИТОМЯГКИЕ МАТЕРИАЛЫ. МАРКИРОВКА, КЛАССИФИКАЦИЯ, СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ**».

Составитель: Додонова Е. М.

## 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Цель – изучение классификации, маркировки, свойств и области применения магнитомягких материалов.

## 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

**Магнитомягкими** называют магнитные материалы с коэрцитивной силой по индукции не более 4 кА/м, имеющие высокое значение начальной магнитной проницаемости (ГОСТ 19693–74). Среди магнитомягких материалов выделяют (рис. 1):

- железо;
- стали;
- прецизионные сплавы;
- ферримагнитные материалы.

Отдельную группу составляют магнитомягкие диэлектрики.

**По области применения** магнитомягкие материалы делят на низко- и высокочастотные.

**Низкочастотные**, в свою очередь, подразделяются на материалы с высокой индукцией насыщения (железо, легированные и нелегированные стали) и с высокой магнитной проницаемостью (пермаллои и другие прецизионные сплавы).

К **высокочастотным** относятся ферримагнитные и магнитодиэлектрические материалы.

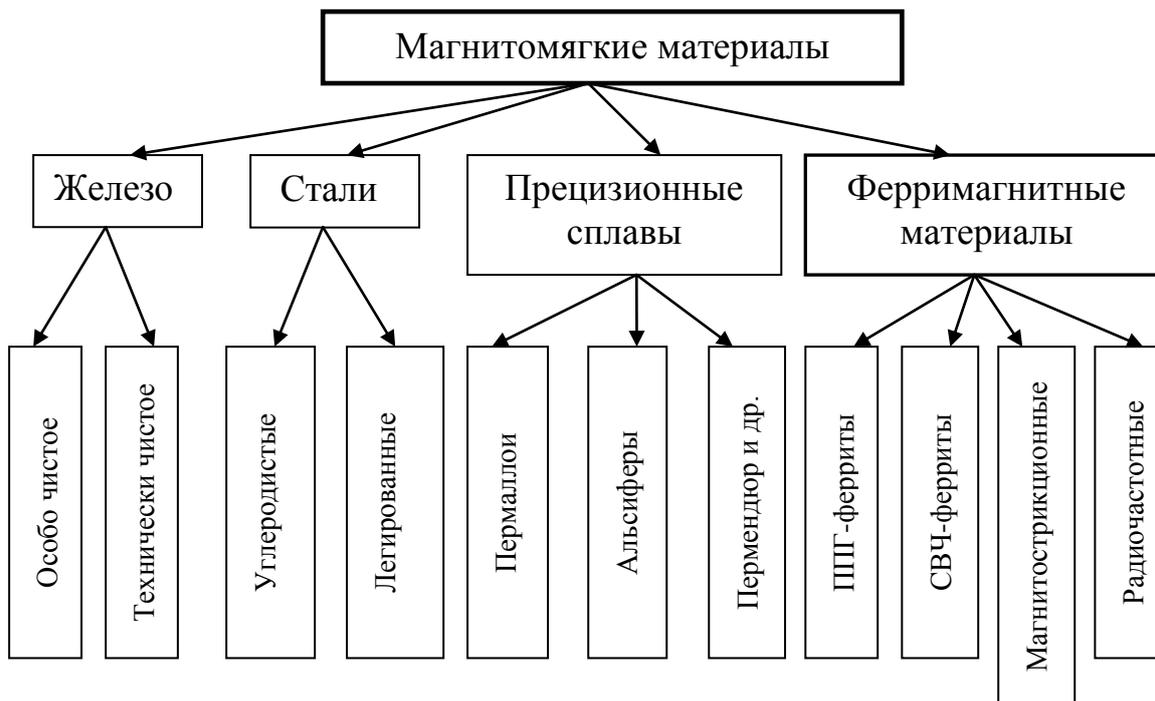


Рис. 1. Общая классификация магнитомягких материалов

## 2.1. Железо

В этой группе материалов выделяют: особо чистое железо и технически чистое железо. Материалы не маркируются.

**Особо чистое железо** содержит очень низкий процент примесей (менее 0,03 %). К этой группе относят электролитическое, карбонильное железо и монокристаллы особо чистого железа (табл. 1).

Применяют в виде порошка в качестве прессованных высокочастотных магнитных сердечников, в магнитодиэлектриках, а также в виде листов различной толщины.

*Электролитическое железо* получают электролизом раствора сернокислого или хлористого железа, после чего подвергают переплавке или отжигу в вакууме.

*Карбонильное железо* получают термическим разложением пентакарбоксила железа  $\text{Fe}(\text{CO})_5$ . Образовавшийся порошок отжигают в среде водорода для удаления вредных примесей.

*Монокристаллы чистейшего железа* подвергают отжигу в среде водорода особо тщательно.

**Технически чистое железо** («армко железо» – «American Rolling Mill Company») – это железо с суммарным содержанием примесей до 0,1 % (табл. 1).

Применяется технически чистое железо в аппарато- и приборостроении в качестве сердечников и полюсных башмаков электромагнитов и деталей реле, измерительных приборов, магнитных экранов и т. п.

Для восстановления магнитных свойств после пластической деформации его подвергают рекристаллизационному отжигу.

Таблица 1

Состав и магнитные свойства электролитического, карбонильного и технически чистого железа

Железо	Содержание примесей		Магнитные свойства	
	углерод, %	кислород, %	$\mu_{\max}$	$H_c$ , А/м
Электролитическое	0,020	0,010	15000	28,0
Карбонильное	0,005	0,005	21000	6,4
Монокристалл чистейшего железа	–	–	1430000	0,8
Технически чистое	0,020	0,060	7000	64,0

Примечание:  $\mu_n$  – относительная максимальная магнитная проницаемость;  $H_c$  – коэрцитивная сила.

## 2.2. Стали

**Электротехнические нелегированные стали** содержат помимо железа и постоянных примесей: 0,04 % углерода, 0,3 % кремния, 0,3 % марганца. Подразделяются на тонколистовые и сортовые электротехнические стали.

**Тонколистовые электротехнические нелегированные стали** ГОСТ 3836–83 маркируют в виде пятизначного числа:

– *первая цифра* – класс по структурному состоянию (1 – горячекатаная изотропная, 2 – холоднокатаная изотропная);

– *вторая цифра* – тип по содержанию кремния (0 – ненормированная, 1 – нормированная по коэффициенту старения);

– *третья цифра* – группа по основной нормируемой характеристике (8 – коэрцитивная сила  $H_c$ );

– *четвертая и пятая цифры* – количественное значение коэрцитивной силы в амперах на метр (А/м).

Выпускают электротехническую сталь в виде горяче- и холоднокатаных листов и лент. Холоднокатаную листовую сталь поставляют без термообработки, нагартованной; горячекатаную – с травленной поверхностью. Магнитные свойства (табл. 2) электротехнических сталей определяют после отжига при 950 °С. Для регулирования значений коэрцитивной силы стали некоторых марок подвергают старению.

Таблица 2

Магнитные свойства некоторых марок электротехнических нелегированных сталей

Марка стали	$H_c$ , А/м, не более	$\mu_{max}$
10895; 20895; 11895; 21895	95	3000
10880; 20880; 11880; 21880	80	4000
10832; 20832; 11832; 21832	32	5000

Примечание:  $\mu_{max}$  – относительная максимальная магнитная проницаемость;  $H_c$  – коэрцитивная сила.

**Сортовые электротехнические нелегированные стали** маркируют аналогично тонколистовым, отличие лишь в первой цифре, указывающей класс по виду обработки давлением (1 – горячекатаная и кованая, 2 – калиброванная) (ГОСТ 11036–75). Сталь поставляется без термообработки, магнитная индукция составляет (1,32÷1,6) Тл.

Применяют как тонколистовую, так и сортовую электротехническую сталь в магнитных цепях электрических аппаратов и приборов.

**Электротехнические легированные стали** представляют собой сплавы железа с углеродом и кремнием (0,5÷5 %), который образует с железом твердый раствор (ГОСТ 21427–75). Введение кремния уменьшает коэрцитивную силу, потери на вихревые токи и гистерезис, увеличивает удельное сопротивление материала и др. Сплавы содержат также 0,1÷0,3 % марганца, в качестве ле-

гирующей добавки электротехнические стали могут содержать до 0,5 % алюминия.

Поставляют кремнистые электротехнические стали в отожженном и неотожженном (полуготовом) состоянии в виде листов, ленты и т. п.

В соответствии с технологией производства электротехнические стали подразделяют на холоднокатаные (изотропные или анизотропные; содержащие до 3,3 % Si) и горячекатаные (изотропные; содержащие до 4,5 % Si). При холодной прокатке возникают деформации, вызывающие преимущественную ориентацию кристаллических зерен. Отжиг при  $900 \div 1000$  °C снимает внутренние напряжения и сопровождается интенсивной рекристаллизацией (укрупнением зерен), в результате которой кристаллические зерна ориентируются вдоль направления проката: получается ребровая текстура, что приводит к значительному улучшению свойств. Текстурированная сталь анизотропна по свойствам (табл. 3).

Условно электротехнические стали разделяют на динамные ( $0,8 \div 2,5\%$  Si) и трансформаторные ( $3 \div 4,5\%$  Si).

Маркировка этих сталей состоит из четырех цифр:

– *первая цифра* – структурное состояние (1 – горячекатаная изотропная, 2 – холоднокатаная изотропная, 3 – холоднокатаная анизотропная с кристаллографической текстурой направления);

– *вторая цифра* – содержание кремния в процентах:

0 – менее 0,4 %;

1 –  $0,4 \div 0,8$  %;

2 –  $0,8 \div 1,8$  %;

3 –  $1,8 \div 2,8$  %;

4 –  $2,8 \div 3,8$  %;

5 –  $3,8 \div 4,8$  %;

– *третья цифра* – основная нормируемая характеристика, определяющая потери на гистерезис и тепловые потери;

– *четвертая цифра* – тип стали и уровень нормируемой характеристики (1 – нормальный, 2 – повышенный, 3 – высокий).

Таблица 3

**Значения магнитной индукции  
некоторых кремнистых электротехнических сталей**

Марка стали	Толщина листа, мм	Магнитная индукция $B$ , Тл, при коэрцитивной силе	
		$H_c > 2,5$ кА/м	$H_c > 30$ кА/м
Горячекатаная изотропная			
1311	0,5	1,48	1,95
1400	0,5	1,46	1,94
1511	0,5	1,46	1,90
Холоднокатаная изотропная			
2011	0,65	1,60	2,02
2111	0,65	1,58	2,00
2411	0,65	1,49	1,96
Холоднокатаная анизотропная			
3411	0,5	1,75	–
3416	0,28	1,90	–

Стали этой группы выпускают горяче- и холоднокатаными (95 % составляет тонколистовая сталь), с защищенной и незащищенной покрытиями поверхностью. Виды покрытий обозначаются в конце марки буквами: Т – термостойкие; Н – нетермостойкие; Э – электроизоляционные. Для сталей улучшенной штампуемости в конце марки дополнительно указывается буква Ш. Например, 2313ТШ – изотропная холоднокатаная среднелегированная (1,8÷2,8 % кремния) электротехническая сталь с высоким уровнем магнитной индукции и потерь (ГОСТ 21427–75) с термостойким покрытием, улучшающим штампуемость.

Электротехнические стали относятся к самым массовым магнитомягким материалам. Они используются для работы в сравнительно сильных переменных магнитных полях силовых трансформаторов всех типов, электромашин, дросселей, электромагнитных реле и др.

### 2.3. Прецизионные сплавы

Прецизионные сплавы – это высоколегированные сплавы со специальными физическими и физико-механическими свойствами.

ми, уровень которых определяется точным химическим составом, специальной технологией выплавки и специальной термообработкой. В зависимости от уровня магнитных свойств поставляют сплавы трех классов:

- 1 класс – с нормальными магнитными свойствами (получают выплавкой в открытых печах);
- 2 класс – с повышенными магнитными свойствами (получают методом отбора или выплавкой в вакуумных печах);
- 3 класс – с высокими магнитными свойствами (получают выплавкой в вакуумных индукционных печах с последующим переплавом).

К этой группе материалов относятся пермаллои, альсиферы и другие сплавы на основе железа, отличающиеся высокой магнитной проницаемостью.

Марка сплава содержит число, указывающее среднее содержание основного элемента (кроме железа), и букву, обозначающую этот элемент. Обозначение легирующих элементов аналогично легированным сталям (К, М, Х, С, Ф – соответственно кобальт, молибден, хром, кремний, ванадий); дополнительно введены следующие обозначения: Ж – железо, И – рений, Л – бериллий, Ч – редкоземельные металлы. Массовые доли других легирующих элементов не указывают, а приводят их буквенные обозначения. В конце марки могут стоять буквы А (повышенное качество сплава), П (прямоугольность петли гистерезиса) или У (улучшенные свойства).

Например, 79НМ – пермаллой, содержащий 79 % Ni, легированный Мо; 50НП – пермаллой, содержащий 50 % Ni, имеющий прямоугольную петлю гистерезиса.

**Пермаллои** (ГОСТ 10160–75) – это сплавы на железоникелевой основе. Для улучшения технологических и электромагнитных свойств, в особенности магнитной проницаемости, их легируют хромом, молибденом, медью, кремнием и марганцем. Легирование молибденом уменьшает чувствительность к деформациям; медь стабилизирует магнитную проницаемость в определенных интервалах напряженности, а хром, кремний, марганец и молибден увеличивают удельное электрическое сопротивление, что позволяет использовать пермаллои в переменных полях.

Пермаллои разделяют на две группы:

– *низконикелевые* (45÷50 % Ni), имеющие высокую магнитную проницаемость при индукции насыщения 1,5 Тл;

– *высоконикелевые* (79÷83 % Ni), имеющие более высокую магнитную проницаемость при индукции насыщения 0,75 Тл.

Пермаллои очень чувствительны к деформациям (наклепу) в результате чего ухудшаются их первоначальные магнитные характеристики, поэтому особое значение придаётся термической обработке, направленной на получение крупного зерна и уменьшение содержания вредных примесей. Она заключается в медленном нагреве до 1100÷1150 °С в среде, защищающей от окисления (вакууме, сухом водороде), выдержке в течение 3–6 часов, медленном охлаждении до 600 °С и дальнейшем быстром охлаждении. В процессе термообработки неупорядоченный твердый раствор переходит в упорядоченный, обладающий меньшей магнитной проницаемостью. Используется также термомагнитная обработка, при которой охлаждение производится в продольном магнитном поле, что даёт возможность получить высокие значения магнитной проницаемости. Магнитные свойства этих сплавов меняются под воздействием даже слабых напряжений, поэтому термообработке подвергаются окончательно изготовленные детали (табл. 4). Большим достоинством является пластичность, что облегчает технологию получения холоднокатаных тонких листов толщиной до нескольких микрометров, ленты и проволоки.

Таблица 4

Магнитные свойства некоторых пермаллоев

Марка сплава	$H_c$ , А/м	$B_s$ , Тл
79НМ	2,4	0,75
81НМА	0,64	0,5
45Н	16	1,5
50Н	14	1,5
50НХС	13	1,0

Примечание:  $B_s$  – индукция насыщения;  $H_c$  – коэрцитивная сила.

Пермаллои применяют в радиотехнике и телефонии. Высоконикелевые пермаллои используют при изготовлении транс-

форматоров промышленных и звуковых частот тока, магнитных усилителей и др. Из низконикелевых изготавливают сердечники трансформаторов и катушки индуктивности

**Альсиферы** – это сплавы Fe-Al-Si, не содержащие дорогих легирующих элементов. Сплав оптимального состава: 9,6 % Si, 5,4 % Al, остальное – железо. Альсиферы имеют удельное сопротивление  $0,81 \cdot 10^{-6}$  Ом·м, магнитную индукцию около 1,76 А/м, магнитную проницаемость до 11700.

Получают сплавы методами литья или прессования из порошков. Они обладают хорошими литейными свойствами, поэтому применяются для изготовления фасонных тонкостенных отливок, которые в последствии подвергают отжигу.

Применяют альсиферы для изготовления магнитных экранов, корпусов приборов, деталей магнитопроводов для работы в меняющемся магнитном поле. Широкому практическому применению препятствует высокая твердость и хрупкость, что делает их недеформируемыми. Перспективно их использование для получения тонких порошков при изготовлении магнитодиэлектриков и сердечников.

**Пермендюр** (30÷50 % кобальта, 1,5÷2 % ванадия, остальное – железо) имеет высокие значения магнитной индукции. Этот сплав обладает наивысшей из всех известных ферромагнетиков индукцией насыщения (до 2,43 Тл). К недостаткам относится малое удельное электрическое сопротивление, которое приводит к значительным потерям на вихревой ток. Пермендюр применяется для изготовления мембран телефонов, а также в измерительных приборах, микрофонах и т. п.

**Перминвар** (25 % Co, 45% Ni, остальное – Fe) отличается постоянством значений магнитной проницаемости. Магнитная проницаемость перминвара после специальной термической обработки в вакууме становится равной 300 А/м, индукция насыщения – до 1,55 Тл. Применение перминвара ограничивается сложностью технологии получения и высокой стоимостью, в связи с чем сплав используется в высокочастотной многоканальной электросвязи, трансформаторах тока, некоторых измерительных приборах и др.

**Изоперм** – сплав на железо-никелевой основе, легированный 13÷15 % меди и 4÷5 % алюминия. Сплав отличается невысо-

ким значением удельного сопротивления, высокой магнитной проницаемостью  $\mu = 30 \div 80$ , имеющей стабильные значения в магнитных полях до  $H = 500$  А/м. Применяется аналогично перминвару.

## 2.4. Ферримагнитные материалы

Ферримагнитные материалы (ферриты) представляют собой магнитную керамику, получаемую спеканием оксидов железа с оксидами других металлов (никеля, марганца, цинка).

Ферриты имеют индукцию насыщения менее 0,4 Тл, высокое удельное сопротивление ( $10^3 \div 10^{11}$  Ом·м), относительно большую коэрцитивную силу (до 180 А/м).

Изготавливают методами порошковой металлургии, включающей следующие операции:

- синтезирование ферритового порошка из исходных компонентов (оксидов, солей);
- формование, прессование заготовок в специальной форме;
- высокотемпературное спекание.

Эти сплавы обладают всеми свойствами керамики: твердые, хрупкие, при спекании дают большую усадку, чувствительны к остаточным напряжениям. Свойства зависят от различных технологических факторов (размер и однородность порошков оксидов, температура спекания, режим охлаждения и др.). Обработываются только алмазным инструментом.

Ферриты делят на четыре класса:

- ферриты для радиочастот (Ni-Zn и Mn-Zn основа);
- ферриты с прямоугольной петлей гистерезиса (ППГ-ферриты);
- магнитострикционные ферриты;
- сверхвысокочастотные ферриты (СВЧ-ферриты).

**Ферриты для устройств, применяемых на радиочастотах**, – это сплавы на основе Mn-Zn и Ni-Zn.

В маркировке этих сплавов на первом месте стоит число, соответствующее относительной начальной магнитной проницаемости  $\mu'_H$ ; на втором – буквы, определяющие частотный диапазон: Н – низкочастотные (0,1÷20 МГц), ВЧ – высокочастотные (30÷300 МГц); на третьем – буква, обозначающая химический со-

став соответственно: Н – никель-цинковый, М – марганцево-цинковый феррит. Для высокочастотных ферритов легирующий элемент не указывается.

Например, 30ВЧ2 – высокочастотный феррит, разновидность 2, относительная магнитная проницаемость 30.

**Марганцево-цинковые ферриты** обладают высокой магнитной проницаемостью, но имеют относительно небольшое удельное электрическое сопротивление ( $10^3 \div 10^5$  Ом·м), что ограничивает их использование при высоких частотах (ГОСТ 14208–77, ГОСТ 17141–76). Применяют в магнитопроводах для трансформаторов и дросселей, катушек индуктивности и других изделий для работы в элементах радиоэлектронной аппаратуры (табл. 5).

**Никель-цинковые ферриты** (ГОСТ 11082–75) отличаются высоким (до  $10^{11}$  Ом·м) удельным электрическим сопротивлением, малыми потерями на перемагничивание и вихревые токи; поэтому их используют при более высоких частотах. Применяют в качестве сердечников в магнитных антеннах радиовещательных приёмников (табл. 5).

Таблица 5

Свойства некоторых магнитомягких ферритов для радиочастот

Группа	Феррит	$\mu'_n$	$\rho$ , Ом·м
1	4000НМ	4000	$10^3$
2	1000НМЗ	1000	$10^5$
2	400НН	400	$10^6$
3	30ВЧ2	30	$10^{11}$

Примечание:  $\mu'_n$  – относительная начальная магнитная проницаемость;  $\rho$  – удельное электросопротивление.

**Ферриты с прямоугольной петлей гистерезиса – ППГ-ферриты** (ГОСТ 23618–79) характеризуются отношением остаточной индукции к максимальной индукции на предельной статической петле гистерезиса не менее 0,85. По химическому составу разделяют на пять групп: Li-Na, Mg-Mn-Ca, Li-Mg-Mn, Mg-Mn, Mg-Mn-Zn-Ca.

Маркируют ППГ-ферриты буквами ВТ или П в зависимости от состава; цифра в марке указывает значение коэрцитивной силы  $H_c$  в амперах на метр (А/м).

В настоящее время ППГ-ферриты имеют широкое распространение, что объясняется относительно простой и экономичной технологией их производства, обеспечивающей комплекс свойств (табл. 6). Наибольшее применение получили ферриты из оксидов Mg и Mn. Сердечники из ферритов ППГ с малой коэрцитивной силой ( $H_c < 40$  А/м) применяют, как правило, в переключающих и накопительных элементах и магнитных усилителях, сердечники с большой коэрцитивной силой ( $H_c > 40$  А/м) – в оперативных запоминающих устройствах, кроме того их используют в магнитных запоминающих устройствах вычислительной и импульсной техники, логических устройствах и системах управления.

Таблица 6

Электромагнитные свойства некоторых ППГ-ферритов

Феррит	$H_c$ , А/м	$B_r$ , Тл	$H_r/H_c$	$\rho_1$ , Ом·м, не менее
Ферриты системы Li–Na				
100П	143–1194	0,2–0,28	0,75	$1 \cdot 10^6$
101П	143–1194	0,2–0,28	0,75	$1 \cdot 10^6$
104П	143–1194	0,24–0,32	0,75	$5 \cdot 10^5$
Ферриты системы Mg–Mn–Ca				
300П	12–56	0,19–0,27	0,75	$2 \cdot 10^3$
Ферриты системы Li–Mg–Mn				
3ВТ	223–227	0,19–0,27	0,75	$5 \cdot 10^5$
5ВТ	346–450	0,18–0,26	0,75	$1 \cdot 10^6$
Ферриты системы Mg–Mn				
2,1ВТ	151–199	0,16–0,23	0,72	$5 \cdot 10^4$
1,3ВТ	92–123	0,18–0,26	0,75	$5 \cdot 10^2$
Ферриты системы Mg–Mn–Zn–Ca				
0,9ВТ	64–80	0,20–0,30	0,75	$2 \cdot 10^2$
0,3ВТ	20–28	0,17–0,25	0,70	$1 \cdot 10^4$
0,27ВТ	17–25	0,16–0,23	0,72	$2 \cdot 10^3$
0,16ВТ	10–16	0,16–0,23	0,72	$5 \cdot 10^2$
0,12ВТ	7,9–11,0	0,16–0,23	0,65	$6 \cdot 10^4$

Примечание:  $B_r$  – остаточная магнитная индукция;  $H_r/H_c$  – отношение напряженности поля после трогания к коэрцитивной силе;  $H_c$  – коэрцитивная сила;  $\rho_1$  – удельное электросопротивление.

**Сверхвысокочастотные ферриты (СВЧ-ферриты)** характеризуются малыми значениями магнитной кристаллографической анизотропии и коэрцитивной силы, очень высоким удельным электрическим сопротивлением  $10^4 \div 10^{12}$  Ом·м.

Магнитные свойства (табл. 7) зависят от плотности и кристаллографической анизотропии. СВЧ-ферриты имеют сложный состав из четырех и более оксидов лития, бария, кобальта, железа и др. Для увеличения плотности ферриты изготавливают не спеканием, а сплавлением порошков в монокристалл.

Таблица 7

Свойства некоторых СВЧ-ферритов

Феррит	$B_s$ , Тл	$H_c$ , А/м	$\rho \cdot 10^3$ , кг/м <sup>3</sup>	$\rho_1$ , Ом·м
Иттриевые ферриты-гранаты				
10СЧ6	0,175	56	5,02	$1,2 \cdot 10^{10}$
90СЧ	0,021	40	4,88	-
Литиевый феррит				
10СЧ9	0,070	80	4,89	$3,0 \cdot 10^8$
Магниеые ферриты				
2СЧ1	0,222	320	4,05	$5,0 \cdot 10^6$
3СЧ	0,178	400	4,1	$5,5 \cdot 10^6$
Никелевые ферриты				
1СЧ2	0,290	320	4,95	$1,7 \cdot 10^7$
4СЧ10	0,220	320	5,10	$7,8 \cdot 10^7$
Магниеые ферроалюминаты				
4СЧ1	0,100	400	3,20	$4,0 \cdot 10^5$
Никелевые и магниеые феррохромиты				
10СЧ1	0,065	320	3,20	$6,8 \cdot 10^5$
10СЧ8	0,065	128	3,80	$5,8 \cdot 10^5$

Примечание:  $B_s$  – индукция насыщения,  $H_c$  – коэрцитивная сила;  $\rho$  – плотность;  $\rho_1$  – удельное электросопротивление.

В марке ферритов для СВЧ на первом месте ставится цифра, указывающая значение длины волны в сантиметрах, при которой используется данный феррит. Например, 3СЧ4 – это феррит для работы в полях с длиной волны 3 см, разновидность 4.

СВЧ-ферриты по химическому составу и основному диапазону длин волн разделяют на шесть групп. В соответствии с классификацией в табл. 7 представлены свойства ферритов этих

групп. Применяют эти материалы в сверхвысокочастотных устройствах: вентилях, фазовращателях, циркуляторах и т. д. Ферриты для СВЧ выбирают с учетом типа устройства, частотного диапазона, уровня мощности и климатических условий.

**Магнитострикционные ферриты** имеют сильно выраженную магнитострикцию (от «strictio» – сжатие, натягивание – изменение формы и размеров тела при намагничивании) в слабых переменных магнитных полях. Их изготавливают на основе никелевых ферритов с различными малыми присадками, наиболее эффективна добавка  $\text{CoO}$ . Свойства магнитострикционных никель-кобальтовых ферритов приведены в табл. 8.

Таблица 8

Свойства некоторых магнитострикционных ферритов

Феррит	Коэффициент механической связи $K_{\text{св}}$ , %
610С	13,0
602С	12,0
605С	12,0
606С	10,5

Способность ферритового материала преобразовывать магнитную энергию в упругую оценивают с помощью коэффициента магнитомеханической связи  $K_{\text{св}}$ , определяющего соотношение энергии, превращенной в упругую ко всей подведенной магнитной энергии:  $K_{\text{св}}^2 = W_{\text{упр}}/W_{\text{магн}}$ .

Применяют эти материалы в прецизионных электромеханических фильтрах, в качестве преобразователей колебаний магнитного поля в механические (продольные или крутильные) и наоборот, преобразовательной ультразвуковой технике, работающей в диапазоне частот до 600 кГц, стабилизаторах частоты генераторов и др.

## 2.5. Магнитодиэлектрические материалы

Магнитодиэлектриком называют магнитный материал, в котором связкой является диэлектрик, наполнителем – магнитомягкий металлический или ферритовый порошок, что обеспечивает заданный комплекс свойств. Сплавы маркируют буквами в зави-

симости от применяемой основы ГОСТ 23618–79: ВЧ или ТЧ – на основе прессованного порошкообразного альсифера; Р или ПС – на основе карбонильного железа; П – на основе пермаллоя (табл. 9).

Производят эти материалы по технологии, аналогичной технологии получения пластмасс. Изделия получают путём холодного прессования под давлением 600÷2000 МПа с последующей термической обработкой для снятия напряжений и стабилизации магнитных свойств. В качестве ферромагнетика наиболее часто используют альсифер, карбонильное железо, пермаллой, в качестве связки – бакелит, полистирол, шеллак, жидкое стекло, стеклоэмали и другие материалы. Электроизоляционная плёнка, создаваемая специальной технологией нанесения на ферромагнитные частицы органического материала, снижает потери на вихревые токи магнитодиэлектрических композиционных материалов. По сравнению с ферритами имеют более стабильные свойства, но по ряду электромагнитных параметров уступают им.

Таблица 9

Магнитные свойства некоторых магнитодиэлектриков

Материал	$\mu_{эф}$	Магнитные потери, м/А, не более		
		$\delta_r$	$\delta_v \cdot 10^3$	$\delta_p \cdot 10^3$
Сердечники из прессованного порошкообразного альсифера				
ТЧ90	79-91	$1,1 \cdot 10^4$	-	3,0
ВЧ32	28-33	$0,38 \cdot 10^4$	-	1,2
Магнитодиэлектрики на основе карбонильного железа				
Р-10	13-15	$(3-5) \cdot 10^6$	2,0-3,5	0,15-0,25
Р-20	12-14	$(1-2) \cdot 10^6$	2,0-3,0	0,05-0,1
Магнитодиэлектрики на основе пермаллоя				
П250	230	$8,2 \cdot 10^5$	1000	3
П140	140	$6,3 \cdot 10^6$	450	2

Примечание:  $\mu_{эф}$  – эффективная магнитная проницаемость;  $\delta_r$ ,  $\delta_v$ ,  $\delta_p$  – углы потерь на гистерезис, вихревые токи и последствие соответственно.

Магнитодиэлектрические материалы используют для изготовления деталей, работающих при высоких частотах (до сотен мегагерц при высокой стабильности магнитных свойств), в ка-

тушках индуктивности и трансформаторах для аппаратуры проводной связи и радиосвязи, в радиоэлектронных устройствах.

### **3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ**

1. Изучить и законспектировать основные теоретические положения методического указания.

2. Используя справочную литературу, выполнить индивидуальное задание по варианту, приведённому в приложении, в следующем порядке:

- определить группу сплава по назначению;
- дать характеристику магнитных свойств;
- предложить метод получения заготовки и вариант термообработки для улучшения магнитных свойств;
- занести данные в таблицу (см. приложение);
- оформить отчет.

3. Ответить на контрольные вопросы.

### **4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Какие материалы называют магнитомягкими?

2. Приведите общую классификацию магнитомягких материалов.

3. Какие сплавы относятся к магнитомягким низкоуглеродистым нелегированным сталям? Назовите основные свойства, методы получения и область их применения.

4. Как маркируются нелегированные электротехнические стали?

5. Какие сплавы относятся к магнитомягким легированным сталям? Как они маркируются? Назовите основные свойства, режимы термообработки и область применения.

6. Дайте характеристику прецизионных магнитомягких сплавов. Как они маркируются? Назовите основные свойства, режимы термообработки и назначение.

7. Дайте характеристику четырех классов ферромагнитных материалов. Как они маркируются? Назовите основные свойства и область применения.

8. Дайте характеристику магнитодиэлектрикам. Опишите метод получения и основные принципы маркировки.

## **5. СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Колесов, С. Н. Материаловедение и ТКМ: учебник / С. Н. Колесов, И. С. Колесов. – Москва: Высш. шк., 2004. – 520 с.

2. Материаловедение: учебник / Б. Н. Арзамасов, В. И. Макаров, Г. Г. Мухина [и др.]. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – 647 с.

3. Фетисов, Г. П. Материаловедение и технология металлов: учебник для ВУЗов / Г. П. Фетисов [и др.]. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва: Высш. шк., 2005. – 862 с.

4. Справочник по конструкционным материалам: справочник / под ред. Б. Н. Арзамасова, Т. В. Солнцевой. – Москва: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. – 537 с.

Приложение

## ВАРИАНТЫ КОНТРОЛЬНЫХ ЗАДАНИЙ

№ варианта	Сплавы
1	10895; 3407; 79НМ; 5000МТ; 10СЧ6; Р-100Ф.
2	20895; 3425; 80НХС; 500НТ; 30СЧ3; Р-10.
3	11895; 3424; 83НФ; 300ВНС; 40СЧ2; ТЧ90.
4	10880; 3422; 81НМА; 200ВНС; 40СЧ4; ПК60.
5	21864; 3421; 50НХС; 90ВНС; 40СЧ5; ВЧК22.
6	20880; 3406; 45Н; 50ВНС; 60СЧ; ВЧ22.
7	11880; 3414; 59Н; 300ННИ; 80СЧ; ПК60.
8	21880; 3413; 50НП; 3000НМС1; 90СЧ; ПК100.
9	10864; 3412; 68НМП; 2500НМС1; 10СЧ9; П60.
10	20864; 3411; 34НКМП; 20000НМ; 2СЧ1; П100.
11	11864; 2413; 35НКХСП; 10000НМ; 3СЧ; П140.
12	20880; 2112; 68НМП; 100ВН; 3СЧ1; П140.
13	21864; 2412; 65НМ; 1500НМ3; 3СЧ2; П250.
14	10848; 2411; 27КХ; 1000НМ3; 3СЧ5; П60.
15	20848; 2312; 49КФ; 100ВН; 3СЧ6; Р-100Ф.
16	11848; 2311; 49К2ФА; 50ВН; 3СЧ7; Р-100.
17	21848; 2311; 49К2Ф; 30ВН; 3СЧ9; Р-20.
18	10832; 2212; 47НК; 20ВН; 3СЧ15; Р-10.
19	209832; 2211; 47НКХ; 7ВН; 3СЧ15; ВЧ22.
20	11832; 2112; 64Н; 100ВН; 4СЧ3; ВЧК22.
21	21832; 2111; 78Н3М; 1000НМ; 4СЧ4; ВЧ22.
22	21864; 2014; 16Х; 1000НН; 4СЧ5; ВЧ32.
23	11880; 2013; 36КНМ; 600НН; 4СЧ11; ТЧК55.
24	20895; 2012; 49К2ФА; 400НН; 10СЧ9; ТЧ60.
25	20848; 2011; 40НКМП; 10НН; 90СЧ; ТЧ90.

### ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА

Марка сплава	Группа по назначению	Хим-состав	Метод получения, термообработка	Магнитные свойства	Область применения

# Лабораторная работа №12 «МАГНИТОТВЕРДЫЕ МАТЕРИАЛЫ. МАРКИРОВКА, КЛАССИФИКАЦИЯ, СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ».

Составитель: Додонова Е. М.

## 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Цель – изучение классификации, маркировки, свойств и области применения магнитотвердых материалов.

## 2. КЛАССИФИКАЦИЯ, МАРКИРОВКА, СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ МАГНИТОТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

Магнитотвёрдыми называют сплавы с коэрцитивной силой по индукции не менее 4 кА/м (ГОСТ 19693-74). Эти материалы, предназначенные для изготовления постоянных магнитов, должны иметь высокие значения коэрцитивной силы  $H_c$ , остаточной индукции  $B_r$  и максимальной удельной магнитной энергии  $W_{max}$ .

Среди магнитотвердых сплавов выделяют (рис. 1):

- стали;
- литые сплавы;
- деформируемые сплавы;
- порошковые сплавы;
- сплавы на основы благородных и редкоземельных металлов.

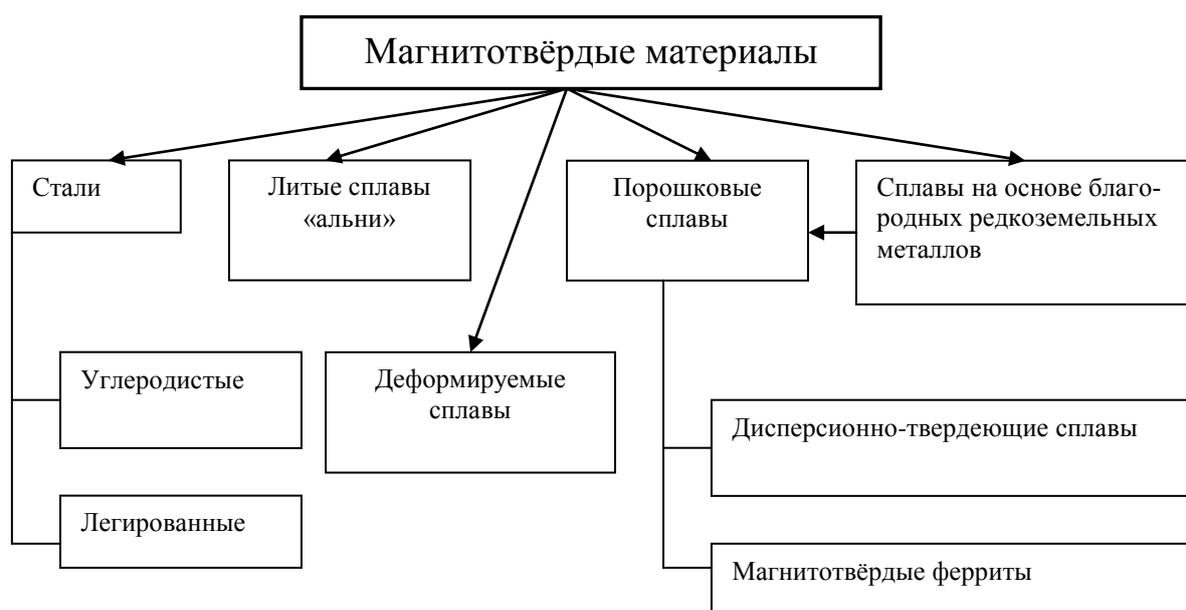


Рис. 1. Общая классификация магнитотвёрдых материалов

## 2.1. Магнитотвердые стали

К магнитотвёрдым относятся углеродистые и легированные стали. Высокая коэрцитивная сила обеспечивается повышенным содержанием углерода и карбидообразующих элементов, а также термообработкой на неравновесную мартенситную структуру с включениями карбидов. Большое количество дефектов строения в мартенситной структуре (дислокаций, блоков, границ зёрен) является источником искажения кристаллической решётки и внутренних напряжений, что способствует улучшению магнитных свойств. Стали не обладают высокими магнитными свойствами, но, в силу относительно невысокой стоимости и хорошей обрабатываемости резанием, применяются для изготовления неотвечественных магнитов.

**2.1.1. Углеродистые стали (ГОСТ 1435-74) У10; У11; У12** содержат 1...1,2 % углерода соответственно. С целью получения структуры мартенсита с мелкодисперсными неферромагнитными включениями цементита их подвергают неполной закалке с низкотемпературным отпуском. После термообработки имеют структуру мартенсита с карбидными включениями и твердость 60-65HRC. Такая структура обеспечивает относительно неплохие магнитные свойства (остаточная индукция составляет (0,8-0,85) Тл), хотя в целом эти материалы уступают по магнитным свойствам легированным мартенситным сталям, вследствие чего применяются ограниченно.

**2.1.2. Легированные мартенситные стали** содержат 0,9÷1,05 % углерода. Основными легирующими элементами являются: хром (2,8÷10,0 %), кобальт (5,15÷16,5 %), вольфрам (5,2÷6,2 %); молибден (1,2÷1,7 %); кремний (0,17÷0,4 %); никель (0,3÷0,6 %). Легирующие элементы повышают коэрцитивную силу, остаточную индукцию, улучшают магнитные свойства, температурную стабильность и стойкость к механическим ударам. Наличие хрома увеличивает прокаливаемость, а легирование кобальтом и молибденом – магнитные свойства.

Маркируются мартенситные магнитотвердые стали аналогично конструкционным (ГОСТ 19693-74): буква Е указывает на то, что сталь магнитотвердая, остальные буквы обозначают легирующий элемент и процент его содержания. Например, сталь

EX6 содержит около 1 % углерода, около 6 % хрома, остальное – железо и примеси.

Как правило, упрочняющая термообработка этих сталей аналогична углеродистым, т. е. заключается в неполной закалке с последующим низким отпуском. Её особенностью является проведение нормализации перед закалкой с целью растворения крупных включений карбидных фаз. Отпуск немного снижает коэрцитивную силу, но стабилизирует её величину во времени. Перед отпуском рекомендуется обработка холодом для устранения парамагнитного остаточного аустенита. В отдельных случаях эти материалы дополнительно подвергают структурной стабилизации в кипящей воде. Типовые режимы термообработки и гарантируемые магнитные свойства (ГОСТ 6863-71) приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные характеристики некоторых магнитотвердых сталей

Стали	Термообработка, °С		Магнитные свойства, не менее		Механические свойства	
	нормализация	закалка	$B_r$ , Тл	$H_c$ , кА/м	НВ	$\sigma_b$ , МПа
EX3	1050	840–860	0,95	4,8	≈ 260	2060
EX5K5	1150–1200	930–950	0,85	8	≈ 310	2060
EX9K15M2	1200–1230	1030–1050	0,8	13,6	≈ 320	2060

Примечание:  $B_r$  – остаточная магнитная индукция;  $H_c$  – коэрцитивная сила; НВ – число твёрдости по Бринеллю,  $\sigma_b$  – предел прочности.

Легированные стали по магнитным свойствам превосходят углеродистые, кроме того, они отличаются лучшей технологичностью в отношении горячей обработки давлением и резанием.

Из магнитотвёрдых сталей изготавливают постоянные магниты. Поставляют в виде горячекатаных или кованных прутков как в термообработанном состоянии (прямоугольные прутки толщиной до 25 мм и шириной 50 мм), так и без термообработки (с диаметром прутка или стороной квадрата до 70 мм).

## 2.2. Литые магнитотвёрдые материалы

К этой группе материалов относятся сплавы типа «альни» (ЮНДК) на основе Fe-Al-Ni, Fe-Al-Ni-Co (ГОСТ 17809-72). Для улучшения магнитных свойств они могут быть легированы дополнительно медью, титаном, ниобием, магнием.

Маркировка этих сплавов содержит буквы Ю и Н, которые соответственно обозначают алюминий (как правило, около 8 %) и никель (как правило, около 14 %); затем проставляются буквы, обозначающие легирующие элементы: Д – медь, К – кобальт, С – кремний, Т – титан, Н – ниобий. Цифра, стоящая после буквы, указывает процентное содержание данного элемента. Буквы АА в конце маркировки означают, что сплав имеет монокристаллическую структуру, А и БА – столбчатую структуру. Например, сплав ЮНД4 содержит приблизительно 8 % алюминия, 14 % никеля и 4 % меди.

Наряду с этим, сохраняются принятые ранее наименования этих сплавов. Например, сплав альни с добавкой кремния называется альсини, с добавкой кобальта – альнико; сплав альнико с магнием – магнико.

Высокие магнитные свойства (табл. 2) этих сплавов получают в результате термообработки – закалки с нагревом до температур 1200–1300°С в магнитном поле (магнитная индукция более 120 кА/м) и отпуска при 580–600°С. Такая термообработка обеспечивает получение высококоэрцитивного состояния сплавов за счет наличия в пересыщенном твердом растворе высокодисперсной анизотропной фазы с ориентированными магнитными свойствами.

Таблица 2

Химический состав и основные свойства некоторых литых магнитотвердых сплавов на основе железа

Сплав	Содержание элементов, %					Магнитные свойства	
	Ni	Al	Co	Cu	другие элементы	H <sub>св</sub> , кА/м	B <sub>r</sub> , Тл
ЮН14ДК25А	13,5–14,5	8–9,5	24–26	3,5–4,0	≥ 0,03 Ti	52	1,35
ЮНДК40Т8АА	14–14,5	7,2–7,7	39–40,6	3–4	7–8 Ti; 0,1–0,2 Si	145	0,90
ЮНДК35Т5БА	14–14,5	6,8–7,2	34,5–35,5	3,3–3,7	0,8–1,1 Nb; 4,7–4,5 Ti; 0,05–0,1 Ce	110	1,02
ЮНДК35Т5АА	14–14,5	7–7,8	34–35	2,5–3,0	5,0–5,5 Ti; 0,1–0,2 Si	115	1,05

Примечание: H<sub>св</sub> – коэрцитивная сила по индукции; B<sub>r</sub> – остаточная магнитная индукция.

Сплавы ЮНДК имеют технологические недостатки. Их используют только в литом состоянии. Имея высокую твердость, низкую пластичность и вязкость, они не обрабатываются давлением, резанием. Литые заготовки только шлифуют. В целом, свойства этих материалов существенно зависят от параметров процесса литья, точности соблюдения режима термомагнитной обработки и др.

По магнитным свойствам литые сплавы превосходят стали, и применяются для магнитов измерительных приборов, автоматических акустических устройств, электрических машин, магнитных муфт, опор, тормозов.

### **2.3. Деформируемые магнитотвёрдые материалы**

К этой группе относятся сплавы на различных металлических основах: Fe, Co, Cu, Cr типа викаллой (Fe-Co-V), кунико (Co-Ni-Cu), комоль (Fe-Co-Mo), хромко (Fe-Cr-Co), кунифе (Fe-Ni-Co) и т. д. Химический состав, сортамент и магнитные свойства нормированы ГОСТ 24897-81 (табл. 3).

В маркировке отражен химический состав, например, сплав 52КФ13 состоит из 51–53 % Co, 11–13 % V, остальное – Fe. Буква А в конце условного обозначения указывает на наличие магнитной анизотропии.

Сплавы этой группы приобретают магнитные свойства только после пластической деформации (прокатки для листов и волочения для проволоки) и последующей термообработки. Для большинства сплавов рекомендуется отжиг, для некоторых (например, для хромко) – закалка со старением.

Сплавы достаточно технологичны, что позволяет изготавливать заготовки из них литыми (Л), горячекатаными (ГК), холоднокатаными (ХК) в виде круглых и квадратных прутков, полос, труб, колец и цилиндров, а также в качестве магнитов в виде тонких лент и проволоки.

Из деформируемых магнитотвёрдых сплавов изготавливают очень мелкие магнитные изделия сложной формы, постоянные магниты для активной части роторов гистерезисных электродвигателей, для элементов памяти систем управления, для носителей магнитной записи информации. Размеры магнитов ограничены: толщина не более 50 мм, диаметр не более 100 мм. В настоящее

время выпуск этих материалов ограничен, поскольку они заменяются более качественными магнитотвёрдыми материалами.

Таблица 3

Химический состав некоторых деформируемых магнитотвердых сплавов

Наименование сплава	Марка сплава	Состав, %	H <sub>с</sub> , кА/м	B <sub>r</sub> , Тл
Хромко	30ХК25	Fe – 45; Cr – 30; Co – 25	56	0,8
Викаллой	52К13Ф	Co – 52; Fe – 37; V – 11	28	0,6
Кунико	-	Cu – 30; Ni – 25; Co – 45	36	0,53
Кунифе	-	Cu – 60; Ni – 20; Fe – 20	47	0,55

Примечание: H<sub>св</sub> – коэрцитивная сила по индукции; B<sub>r</sub> – остаточная магнитная индукция.

## 2.4. Порошковые магнитотвёрдые материалы

**2.4.1. Дисперсионно-твердеющие сплавы систем Fe-Al-Ni и Fe-Al-Ni-Co (ГОСТ 13596-68)** маркируют буквами ММК, что обозначает «магнит металлокерамический», цифра – порядковый номер.

Сплавы получают методами порошковой металлургии, используя прессование и спекание порошков металлов в вакууме или в атмосфере аргона при температуре 1200-1300°С в течение 1–5 часов. Порошковые магнитные сплавы по химическому составу близки к литым (табл. 2). Благодаря использованию порошковой технологии, магниты имеют мелкозернистую структуру, однородные магнитные свойства и превышают по прочности литые (табл. 4). Они более технологичны (деформируются, обрабатываются резанием, шлифуются), но несколько уступают литым по магнитным свойствам. Их главный недостаток – относительно высокая стоимость.

Термообработка аналогична литым магнитотвердым сплавам, т. е. направлена на получение двухфазной структуры с наличием мелкодисперсной магнитоориентированной вторичной фазы. Недостаток – зависимость магнитных свойств от температуры и пониженная механическая прочность.

Применяют сплавы типа ММК в узлах, работающих в условиях ударных и вибрационных нагрузок для изготовления, как правило, мелких и точных по размерам магнитов.

Таблица 4

Свойства некоторых магнитотвёрдых материалов  
после термообработки

Марка сплава	$B_r$ , Тл	$H_c$ , кА/м	$W_{max}$ , кДж/м <sup>3</sup>	$\sigma_{сж}$ , Мпа	$\sigma_{и}$ , МПа	Магнитная анизотропия
ММК1	0,6	24	3	2000	400	-
ММК 6	0,65	44	5	1700	300	
ММК7	0,95	44	10,5	1200	250	+

Примечание:  $H_c$  – коэрцитивная сила;  $B_r$  – остаточная магнитная индукция;  $W_{max}$  – максимальная удельная магнитная энергия;  $\sigma_{сж}$  – предел прочности при сжатии;  $\sigma_{и}$  – предел прочности при изгибе.

**2.4.2. Магнитотвердые ферриты** из порошков оксидов FeO, BaO, CoO (ГОСТ 24063-80) маркируются следующим образом: цифра, стоящая в марке на первом месте, определяет значение удвоенной магнитной энергии –  $2W_{max}$ ; буква указывает металл в оксиде; буквы И или А соответственно означают: изо- или анизотропный феррит; последние три цифры в марке равны коэрцитивной силе  $H_c$ , определенной по намагниченности. Марки некоторых ферритов приведены в табл. 5.

Изготавливают ферриты методом прессования порошков оксидов с последующим спеканием. В процессе прессования может накладываться магнитное поле для создания магнитной анизотропии. Таким образом формируется структура ферритов из однодоменных неравновесных частиц оксидов.

По своим магнитным свойствам магнитотвердые ферриты уступают литым, но, будучи диэлектриками, имеют более высокое значение коэрцитивной силы, что позволяет использовать их в качестве постоянных магнитов в высокочастотных полях без тепловых потерь.

Применяют ферриты в качестве постоянных магнитов в электро- и радиотехнике, станко- и автомобилестроении для создания магнитных сепараторов, муфт, вентиляей.

Таблица 5

Магнитные свойства некоторых магнитотвердых ферритов

Марка феррита	$B_r$ , Тл	$H_{cb}$ , кА/м	$W_{max}$ , кДж/м <sup>3</sup>
4БИ1145	0,17	95	2,0
9БА205	0,24	135	4,5
21СА320	0,34	240	10,5
25РА150	0,38	145	12,5
11КА135	0,24	130	5,5

Примечание:  $H_{cb}$  – коэрцитивная сила по индукции;  $B_r$  – остаточная магнитная индукция;  $W_{max}$  – максимальная удельная магнитная энергия.

В этой группе материалов выделяют *металлопластичные и металлоэластичные магниты*. Металлопластичные магниты получают смешением металлических порошков с диэлектриком при помощи прессования или обжига при 120-180 °С. Механические свойства этих материалов в несколько раз выше, чем у литых, в то же время магнитные свойства невысоки. Металлоэластичные магниты изготавливают на резиновой основе в виде шнура, лент, и полос. В качестве наполнителя используют феррит бария, сплавы кобальта а редкоземельными металлами и другие высококоэрцитивные порошки.

### 2.5. Сплавы на основе благородных и редкоземельных металлов

Маркируют эти сплавы согласно ГОСТ 21559-76: кобальт обозначается буквой К, самарий – С, празеодим – П; цифры соответствуют среднему содержанию самария или суммарному содержанию самария и празеодима. Буква А в конце маркировки указывает на улучшенную структуру. Например, сплав КС37 содержит 37 % самария, остальное – празеодим и примеси. Эти материалы отличаются высокими магнитными свойствами (табл. 6), однако их применение ограничено особо точными постоянными магнитами очень малых размеров из-за высокой стоимости.

К этой же группе относятся сплавы на основе Ag-Mn-Al, Pt-Co, Pt-Fe, Pt-Pd-Co и др., нормируемые техническими условиями и отраслевыми стандартами. Например, сплав ПлК-78 содержит 72 % кобальта, остальное – платина и примеси. Сплавы на основе благородных металлов применяются ещё более ограниченно.

Материалы этой группы используются как в литом состоянии, так и с применением порошковой металлургии. Порошковые сплавы на основе благородных и редкоземельных металлов обладают самой большой коэрцитивной силой, характеризуются высокой стабильностью магнитных свойств. Сплавы технологичны, они легко подвергаются холодной деформации, а после закалки легко обрабатываются резанием.

Таблица 6

Магнитные свойства некоторых магнитотвердых сплавов на основе редкоземельных металлов

Марка сплава	$B_r$ , Тл, не менее	$H_{cb}$ , кА/м, не менее
КС37	0,77	540
КС37А	0,82	560
КСП37	0,85	520
КСП 37А	0,9	500

Примечание:  $H_{cb}$  – коэрцитивная сила по индукции;  $B_r$  – остаточная магнитная индукция.

### 3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Изучить и законспектировать основные теоретические положения методического указания.

2. Используя справочную литературу, выполнить индивидуальное задание по варианту, приведённому в приложении, в следующем порядке:

- определить группу сплава по назначению;
- дать характеристику магнитных свойств;
- предложить метод получения заготовки и вариант термообработки для улучшения магнитных свойств;
- занести данные в таблицу (см. приложение);
- оформить отчет.

3. Ответить на контрольные вопросы.

## 4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие материалы называют магнитотвёрдыми?
2. Приведите общую классификацию магнитотвёрдых материалов.
3. Какие сплавы относятся к магнитотвёрдым нелегированным сталям? Назовите основные свойства, методы получения и область их применения. Как они маркируются?
4. Какие сплавы относятся к магнитотвёрдым легированным сталям? Как они маркируются? Назовите основные свойства, режимы термообработки и область применения.
5. Что представляют собой деформируемые магнитотвёрдые сплавы по составу и свойствам? Как они маркируются и называются?
6. Охарактеризуйте дисперсионно-твердеющие магнитотвёрдые материалы. Как они маркируются?
7. Какие сплавы относятся к магнитотвёрдым ферритам? Что представляют собой магнитопластичные и магнитоэластичные материалы?
8. Дайте характеристику сплавов на основе редкоземельных и благородных металлов. Опишите метод получения и основные принципы маркировки.

## 5. СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колесов, С. Н. *Материаловедение и ТКМ: учебник* / С. Н. Колесов, И. С. Колесов. – Москва: Высш. шк., 2004. – 520 с.
2. *Материаловедение: учебник* / Б. Н. Арзамасов, В. И. Макаров, Г. Г. Мухина [и др.]. – Москва: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – 647 с.
3. Фетисов, Г. П. *Материаловедение и технология металлов: учебник для вузов* / Г. П. Фетисов [и др.]. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва: Высш. шк., 2005. – 862 с.
4. *Справочник по конструкционным материалам: справочник* / под ред. Б. Н. Арзамасова, Т. В. Солнцевой. – Москва: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. – 537 с.

Приложение

**ВАРИАНТЫ КОНТРОЛЬНЫХ ЗАДАНИЙ**

№	Сплавы
1	EX3; ЮНДК35Т5АА; 28Х10К; ММК-1; 4БИ145; КСП37; У10А
2	ЕВ6; ЮНДК38Т7; 32Х12КДТ; ММК-2; 25БА170; КС37;У10
3	EX5К5; ЮНДК15; 28Х10КА; ММК-3; 65БИ240; КС37А; У11
4	EX9К15М2; ЮНД4; 23Х13К3ФА; ММК4; 28БА170; КСП37;У12
5	EX3; ЮНДК35Т5БА; 25Х15К; ММК-5; 7БИ215;КСП37А;У12А
6	ЕВ6; ЮНДК35Т5; 25Х12К2БА;ММК-6; 28БА190; КС37А; У10А
7	EX5К5; ЮНДК34Т5; 25Х15КА; ММК-7; 7БИ300; КС37;У10
8	EX9К15М2; ЮНД8; 23Х15КА; ММК-8; 21СА320; КС37А;У12
9	EX3; ЮНД13К25А; 23Х15К5ФА; ММК-9; 9БА205; КСП37; У10А
10	ЕВ6; ЮН13ДК24С; 22Х15КА; ММК-10; 24СА200; КСП37А; У10
11	EX5К5;ЮН14ДК24; 30Х23К; ММК-11; 14БА255; КС37А; У12
12	EX9К15М2; ЮНТС; 30Х23КА; ММК-1; 27СА220; КС37 ;У10А
13	EX3; ЮН14ДК25А; 28Х10К; ММК-2; 28СА250; КС37А; У11А
14	ЕВ6; ЮНДК40Е8АА; 32Х12КДТ; ММК-3; 25РА150; КСП37А;У11
15	EX5К5; ЮНДК18; 28Х10КА; ММК-4; 25РА170; КС37А; У10А
16	EX9К15М2; ЮН15ДК24; 23Х14К3ФА; ММК-5; 28РА180; КС-37; У12А
17	EX3; ЮНДК35Т5БА; 25Х15К; ММК-6; 11КА137; КС37А; У12А
18	ЕВ6; ЮНДК35Т5Б; 25Х12К2БА; ММК-7; 14КА135; КСП37;У10А
19	EX5К5; ЮНДК40Т8АА; 25Х15КА; ММК-8; 25БА210; КСП37А;У11А
20	EX3; ЮНДК38Т7; 23Х15КА; ММК-9; 25БА150; КСП37А; У10
21	EX5К5; ЮНДК35Т5Б; 28Х10КА; ММК-4; 25РА170; КС37А; У12А
22	EX9К15М2; ЮН15ДК24; 25Х15К; ММК-8; 28РА180; КСП-37А; У12А
23	EX3; ЮНДК35Т5БА; 32Х12КДТ; ММК-6; 25РА150; КС37А; У12А
24	ЕВ6; ЮНДК35Т5Б; 25Х12К2БА; ММК-9; 25РА150; КСП37;У10А
25	EX5К5; ЮНТС; 25Х15КА; ММК-3; 25БА210; КСП37А; У11А

**ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА**

Марка сплава	Группа по назначению	Хим-состав	Метод получения, термообработка	Магнитные свойства	Область применения

# Лабораторная работа №13 «ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ. КЛАССИФИКАЦИЯ, СВОЙСТВА, ПРИМЕНЕНИЕ».

Составитель: Додонова Е. М.

## 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Цель – изучение классификации, маркировки, свойств и области применения диэлектрических материалов.

## 2. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

*Диэлектрик (изоляционный материал)* – это материал, основным электрическим свойством которого является способность поляризоваться в электрическом поле (ГОСТ 19880–74). Согласно ГОСТ 21515 – 76 эти материалы предназначены для использования их диэлектрических свойств. Существуют *газообразные, жидкие и твёрдые* диэлектрики.

Все диэлектрические материалы имеют *молекулярный или ионный тип связи*. Суммарный заряд всех отрицательно и положительно заряженных частиц, образующих диэлектрик, равен нулю. Идеальный диэлектрик не содержит свободных заряженных частиц, в реальных диэлектриках кроме связанных частиц имеются свободные заряды, которые способны перемещаться на относительно большие расстояния вне действия электромагнитного поля. Под действием приложенного внешнего электрического поля в реальных диэлектриках возникает *электропроводность* (перемещение имеющегося ничтожно малого количества свободных зарядов и их разряжение на электродах) и *поляризация* (перемещение практически всех связанных заряженных частиц и ориентация диполей, образующих результирующий дипольный момент). Способность диэлектриков поляризоваться под действием приложенного электрического поля является их фундаментальным свойством.

*Пробоем* называют такое состояние, когда диэлектрик под действием некоторого значения напряженности электрического поля утрачивает свои электроизоляционные свойства, и в нем образуется канал проводимости. Следствием пробоя является воз-

никновение тока короткого замыкания, приводящего к образованию проплавленного отверстия. Различают три вида пробоя:

- полный (канал образуется по всей толщине проводника от одного электрода к другому);
- частичный (пробой только в газовых или жидкостных включениях твёрдой изоляции);
- неполный (канал проводимости не достигает одного из электродов).

### 3. СВОЙСТВА И ХАРАКТЕРИСТИКИ

#### 3.1. Характеристики диэлектриков:

– *диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$*  характеризует способность изоляционного материала поляризоваться в электрическом поле; является постоянной величиной для данного диэлектрика;

– *диэлектрические потери* – часть энергии приложенного электрического поля, которая рассеивается в диэлектрике за единицу времени; характеризуются углом диэлектрических потерь, тангенс которого,  **$\text{tg}\delta$** , равен отношению активного и реактивного токов или отношению мощности потерь к реактивной мощности;

– *диэлектрическая прочность  $E_{\text{пр}}$*  – минимальное значение напряжённости приложенного электрического поля, при котором наступает пробой; определяется как отношение пробивного напряжения  $U_{\text{пр}}$  к толщине диэлектрика в месте пробоя  $h$ ; эта величина, позволяет оценить способность диэлектрика противостоять разрушению его электрическим напряжением.

– *удельное электросопротивление  $\rho$*  – величина, дающая возможность оценить электрическое сопротивление материала при протекании через него постоянного тока;

– *поверхностное электросопротивление  $\rho_s$*  даёт представление об электрическом сопротивлении материала при протекании постоянного тока по его поверхности между электродами.

#### 3.2. Свойства диэлектриков

Свойства диэлектриков условно подразделяются на четыре группы:

- механические;
- тепловые;

- влажностные;
- химические.

### 3.2.1. Механические свойства

Диэлектрики, как и конструкционные материалы, характеризуются *прочностью, твёрдостью, пластичностью, ударной вязкостью*.

Наряду с этим, они имеют специфические характеристики.

*Эластичность* – свойство материала проявлять упругую деформацию без разрушения под воздействием внешних сил. Эластичность – свойство, обратное пластичности.

*Вязкость (коэффициент внутреннего трения)* жидких диэлектриков подразделяется:

- на динамическую  $\eta$  (коэффициент внутреннего трения жидкости);

- кинематическую  $\nu$  (отношение динамической вязкости к плотности жидкости); за единицу кинематической вязкости принят Стокс –  $1 \text{ Ст} = 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$  (чаще используется сантистокс:  $1 \text{ сСт} = 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с} = 1 \text{ мм}^2/\text{с}$ ).

Вязкость дает возможность оценить текучесть электроизоляционных жидкостей (масел, лаков и др.).

### 3.2.2. Влажностные свойства

*Гигроскопичность* – это равновесная влажность  $\psi_p$  при  $20^\circ \text{С}$  в воздухе с относительной влажностью 100 %.

*Влагопроницаемость* характеризует способность материала пропускать через себя влагу, характеризуется коэффициентом влагопроницаемости  $\Pi$ , измеряемым в секундах.

*Водопоглощаемость* — это количество воды, поглощенной диэлектриком после пребывания его в дистиллированной воде в течение суток при температуре  $20^\circ \text{С}$  и выше. Величина водопоглощаемости указывает на пористость материала и наличие в нем водорастворимых веществ.

### 3.2.3. Тепловые свойства

*Температура хрупкости  $T_{хр}$* , – такое значение температуры, ниже которого механические свойства резко ухудшаются. Как

правило, характеризует устойчивость изоляционного материала к воздействию низких температур.

*Нагревостойкость* – это способность материала без недопустимого ухудшения эксплуатационно-технических характеристик выдерживать кратковременное и длительное воздействие высоких температур и термоудары. ГОСТ 8865 – 93 определяет классы и максимальная температура, до которой (включительно) можно эксплуатировать электротехнические длительно, в течение ряда лет.

Таблица 1

Классификация диэлектриков по нагревостойкости

Класс нагревостойкости	У	А	Е	В	Ф	Н	С
Наибольшая допустимая температура, °С	90	105	120	130	155	180	>180

К классам нагревостойкости У, А, Е относят текстильные материалы (на основе хлопка, натурального шёлка), целлюлозные (картон, фибра), лакоткани, натуральные смолы; к классам В, Ф, Н и С – материалы на основе щипаной слюды, волокнистого стекла, асбеста, кремнийорганические лаки и смолы, керамику и асбестоцемент. Наибольшей нагревостойкостью обладают неорганические диэлектрики: слюда, керамика и др.

*Холодостойкость* – способность материала работать без ухудшения эксплуатационных свойств при температурах ниже – 60° С.

### 3.2.4. Химические свойства

*Химическая стойкость* – способность изоляционного материала, не разрушаясь и не вызывая коррозии металлов, с которыми он соприкасается, сохранять свои свойства при работе в среде, загазованной химически агрессивными веществами. Характеристикой является кислотное число – количество миллиграммов едкого калия, необходимое для нейтрализации свободных кислот, содержащихся в одном грамме диэлектрика. Кислотное число определяется у жидких диэлектриков, компаундов и лаков. Эта величина позволяет оценить количество свободных кислот в диэлектрике, а значит, степень их воздействия на органические ма-

териалы. Наличие свободных кислот ухудшает электроизоляционные свойства диэлектриков.

*Тропикостойкость* – это устойчивость материала к одновременному воздействию повышенной влажности 100 % и температуры воздуха 30–40° С. При таких условиях часто образуется плесень, резко ухудшающая изоляционные свойства материала.

*Радиационная стойкость* – способность материала работать, не ухудшая своих основных свойств, в условиях интенсивного ионизирующего излучения.

*Светостойкость* – это устойчивость изоляционного материала к действию ультрафиолетовых лучей.

*Растворимость* – стойкость твёрдого диэлектрика к действию различных жидкостей, с которыми он может соприкасаться при изготовлении изоляции и в процессе эксплуатации. Это свойство необходимо учитывать при подборе растворителей для лаков и пластификаторов.

#### **4. ГАЗООБРАЗНЫЕ ДИЭЛЕКТРИКИ**

Самым распространённым газообразным диэлектриком является сухой воздух. Кроме того, в этом качестве могут использоваться газы:

- водород (применяется в крупных генераторах);
- азот и углекислый газ (используются для изготовления конденсаторов, в т. ч. эталонных);
- элегаз (для заполнения кабелей, конденсаторов);
- фреон (в холодильных установках);
- гелий (в криогенных генераторах);
- инертные газы: аргон, криптон, неон, ксенон (для заполнения газоразрядных ламп).

#### **5. ЖИДКИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ**

К жидким диэлектрическим материалам относятся различные масла и синтетические жидкости (рис. 1). Применяются они, как правило, для повышения электрической прочности твёрдой изоляции и гашения электрической дуги в масляных выключателях. Их электрические свойства зависят, в основном, от степени очистки.



Рис. 2. Классификация жидких диэлектрических материалов

### 5.1. Нефтяные электроизоляционные масла

Слабовязкие жидкости желтого цвета. Представляют собой смесь различных углеводородов парафинового, нафтенового и ароматического рядов с небольшим (до 1 %) количеством присадок. Доступные и недорогие жидкие диэлектрики, обладающие, при хорошей очистке, достаточно высокими электроизоляционными свойствами – малой величиной  $\text{tg}\delta$  и высокой  $E_{\text{пр}}$ . К недостаткам можно отнести: пожаро- и взрывоопасность, невысокую стойкость к тепловому и электрическому старению, гигроскопичность. В этой группе материалов выделяют следующие виды масел:

- *трансформаторное* (кинематическая вязкость 17–18 сСт при 20 °С и 6,5–6,7 сСт при 50 °С);
- *конденсаторное* ( $\epsilon = 2,1\text{--}2,3$ ;  $\text{tg}\delta \leq 2 \cdot 10^{-3}$  при 20 °С;  $\rho \geq 10^{12}$  Ом·м при 20 °С;  $E_{\text{пр}} \geq 20$  кВ/мм);

– кабельное ( $\text{tg}\delta \geq 0,03$  при  $100\text{ }^\circ\text{C}$  и частоте  $50\text{ Гц}$ ;  $E_{\text{пр}} \geq 20\text{ кВ/мм}$ ).

Применяются нефтяные масла в высоковольтных трансформаторах и вводах, масляных выключателях, для пропитки силовых бумажных конденсаторов.

## 5.2. Синтетические жидкие диэлектрики

Обладают более высокими электроизоляционными характеристиками, чем масла. К ним относят: *совол* (полихлордифенил), *совтол* (раствор совола в трихлорбензоле), *кремнийорганические* и *фторорганические жидкости*. Их основные свойства приведены в таблице 2.

Таблица 2

Свойства жидких синтетических диэлектриков

Наименование	$\epsilon$	$\rho$ , Ом·м	$\text{tg}\delta$	$E_{\text{пр}}$ , кВ/мм
Совол	5	–	$(5-10) \cdot 10^{-3}$	15
Кремнийорганические жидкости	2,4–2,8	$10^{11}-10^{12}$	$(1-3) \cdot 10^{-4}$	14–18
Фторорганические жидкости	2,2–2,5	$10^{12}-10^{14}$	$\leq (1-2) \cdot 10^{-4}$	12–19

## 5.3. Растительные масла

К этой группе жидких диэлектриков принадлежат «высыхающие» масла и касторовое масло. «Высыхающие» масла (льняное, тунговое, конопляное) применяют в качестве плёнкообразующих в лаках, эмалях и красках. «Высыхание» масел – это процесс, связанный с окислительной полимеризацией. *Касторовое* масло имеет высокую нагревостойкость до  $240\text{ }^\circ\text{C}$ . Его используют, главным образом, как пластификатор и для пропитки бумажных конденсаторов.

## 6. ТВЁРДЫЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Классификация твердых диэлектрических материалов приведена на рис. 2.

**6.1. Пластические массы** – это искусственные материалы, основой которых являются полимеры. Пластмассы – самый большой класс электроизоляционных материалов. Их строение, способ получения и механические свойства описаны в методическом указании «Полимерные материалы. Классификация, строение, свойства и применение». Электроизоляционные свойства и область применения пластических масс в качестве диэлектриков приведены в табл. 3. В среднем электрические свойства этих материалов составляют:

$$\begin{aligned}\varepsilon &= 6-8; \rho = 10^8-10^{14} \text{ Ом}\cdot\text{м}; \\ \text{tg}\delta &\approx (2-10) \cdot 10^{-2}; E_{\text{пр}} = 8-33 \text{ кВ/мм}.\end{aligned}$$

### 6.2. Резины (эластомеры)

Эластомеры, как и пластмассы, относятся к полимерам. Механические свойства и технология производства этих материалов описаны в вышеназванном методическом указании. Из *резины* изготавливают изоляцию для проводов и кабелей, а также средства индивидуальной защиты от поражения током: перчатки, коврики и т. п. Недостатком является низкая стойкость к ультрафиолетовому излучению, действию тепла, кислорода и т. п. В тех случаях, когда необходимо это избежать, применяются тиурамовая резина и резина, содержащая сажу.

В зависимости от того, какие каучуки используются при производстве резин, их делят на синтетические и натуральные. *Натуральный каучук* получают из латекса; его электрические свойства следующие:  $\varepsilon = 3-7$ ;  $\rho = 10^{13} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ;  $\text{tg}\delta \approx 0,02-0,1$ ;  $E_{\text{пр}} = 20-30 \text{ кВ/мм}$ . *Синтетические каучуки* наиболее широко применяются в технике. К этой группе относятся: бутадиеновый, бутадиен-стирольный, бутилкаучук, хлоропреновый и другие. Они более стойки к действию масел, бензина, окислителей, тепловому воздействию, менее газопроницаемы. Электрические свойства:  $\varepsilon = 8-10$ ;  $\rho = 10^8 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ;  $\text{tg}\delta \approx 0,3$ ;  $E_{\text{пр}} = 12-22 \text{ кВ/мм}$ .



Рис. 2. Классификация твёрдых диэлектрических материалов

Таблица 3. Электроизоляционные свойства и назначение пластических масс

Наименование	$\sigma_{в}$ , МПа	$\delta$ , %	$\epsilon$ при 20 °С и 100 Гц	$\rho$ , Ом·м при 20 °С	$\text{tg}\delta \cdot 10^4$ при 20 °С	$E_{пр}$ , кВ/мм, при 50 Гц	Назначение
Неполярные термопласты							
Полиэтилены	10–33	200–800	2,2–2,4	$10^{15}$ – $10^{16}$	2–4	45–60	Производство высококачественных кабелей
Полипропилены	30–35	200–800	2,0–2,2	$10^{14}$ – $10^{16}$	2–5	30–35	Производство конденсаторов
Полиизобутилен	2–4,4	550–1000	2,2–2,3	$10^{14}$ – $10^{15}$	3–5	16–23	Входит в состав клеев, кабельного полиэтилена; пропитка бумажных конденсаторов,
Полистирол	35–41	1,5	2,5–2,6	$10^{17}$ – $10^{18}$	1–3	25–35	Панели электронных ламп, изоляция кабелей, входит в состав лаков, компаундов.
Политетрафторэтилен (тефлон)	14–35	250–500	1,9–2,2	$10^{15}$ – $10^{16}$	2–2,5	40	Изоляция проводов, пластин, дисков, прокладок
Полярные термопласты							
Политрихлорэтилен	30–40	70–200	2,5–2,7	$10^{14}$ – $10^{15}$	100	20–25	Производство кабелей, конденсаторов и сложных по форме радиодеталей
Поливинилхлорид (винипласт)	40–60	5–100	3,5–4,5	$10^{17}$ – $10^{18}$	150–180	35–45	Изоляция проводов, защитная оболочка кабе-

Наименование	$\sigma_{в}$ , МПа	$\delta$ , %	$\epsilon$ при 20 °С и 100 Гц	$\rho$ , Ом·м при 20 °С	$\text{tg}\delta \cdot 10^4$ при 20 °С	$E_{пр}$ , кВ/мм, при 50 Гц	Назначение
							лей.
Полиамиды	54–108	100–150	4–6	$10^{15}–10^{18}$	220–300	20–25	Установочные и несущие элементы радиоаппаратуры; входят в состав лаков, компаундов.
Полиимиды	160–180	65	3,5	$10^{15}–10^{16}$	6–16	160–200	Пазовая и обмоточная изоляция электромашин, производство кабелей, обмоточных проводов и др.
Полиэтилентерефталат (лавсан)	150–200	70	3,1–3,5	$10^{13}–10^{15}$	20–200	30	Межслойная изоляция обмоток трансформаторов, дросселей и др., производство конденсаторов.
Поликарбонаты (дифлоны)	65–80	50–110	3,0	$10^{14}–10^{15}$	6–20	30	Изготовление каркасов катушек индуктивности плёнок, производство стеклотекстолитов.
Полиуретаны	50–60	500–1000	4,5–5,0	$10^{12}$	200–300	26	Входят в состав клеев, лаков, плёнок, компаундов, обладающих атмосферостойкостью.

Наименование	$\sigma_{в}$ , МПа	$\delta$ , %	$\epsilon$ при 20 °С и 100 Гц	$\rho$ , Ом·м при 20 °С	$\text{tg}\delta \cdot 10^4$ при 20 °С	$E_{пр}$ , кВ/мм, при 50 Гц	Назначение
Реактопласты (смолы)							
Феноло– и кре- золофор– мальдегидные	49–56	1,0–1,5	4,5–5,0	$10^9–10^{11}$	150–300	12–16	Производство пресс- порошков, волокнитов, слоистых пластмасс, компаундов и клеев.
Анилинофор– мальдегидные	60–70	–	3,5–3,6	$10^{12}–10^{13}$	20–60	20	СВЧ – техника
Глифталевые и пентафталевые	21–28	–	6,0–6,5	$10^{12}$	550	12–16	Входят в состав различ- ных лаков
Эпоксидные	20–50	–	3,6–4,0	$10^{14}–10^{15}$	40–180	16–18	Электро- и радиотехника; входят в состав компаун- дов.

**6.3. Природные смолы** (табл. 4) представляют собой органические вещества растительного (канифоль) и органического (шеллак) происхождения, а также ископаемые смолы (янтарь и др.).

Таблица 4

Электроизоляционные свойства природных смол

Наименование	$\epsilon$	$\rho$ , Ом·м	$\text{tg}\delta$	$E_{\text{пр}}$ , кВ/мм,	Применение
Канифоль	2,8	$10^{13}-10^{14}$	$3-10^{-3}$	10–15	Пропитка бумажной изоляции, добавка к маслам и лакам
Шеллак	3,5	$10^{13}-10^{14}$	$10^{-2}-10^{-3}$	20–30	Производство лаков и миканитов
Янтарь	2,8	$10^{15}-10^{17}$	$10^{-3}$	–	Вводы ответственных электроизмерительных изделий

#### 6.4. Эфиры целлюлозы

*Целлюлоза* – природный полимер, твёрдое неплавкое вещество, растворимое в некоторых растворителях; разрушается при 150 °С. В качестве диэлектриков применяются сложные соединения на основе целлюлозы – эфиры, являющиеся термопластами. Электрические свойства следующие:  $\epsilon = 3 - 5$ ;  $\rho = 10^{12} - 10^{14}$  Ом·м;  $\text{tg}\delta = (2 - 7) \cdot 10^{-3}$ ;  $E_{\text{пр}} = 30 - 80$  кВ/мм. В этой группе материалов выделяют: *триацетат целлюлозы* (используется для изоляции секций обмоток электромашин), *древесину* (наполнитель в пресс-порошках и древеснослоистых пластиках) и *трианэтилцеллюлозу* (применяется в производстве конденсаторов).

**6.5. Воскообразные диэлектрики** представляют собой смесь алифатических углеводородов, имеют выраженное кристаллическое строение. Их получают путём переработки нефти или её продукта – озокерита. Применяют при изготовлении конденсаторов и в кабельном производстве. В качестве диэлектрических материалов применяются: *парафин, церезин и вазелин* ( $\epsilon = 2,1-2,2$ ;  $\rho = 10^{13}-10^{16}$  Ом·м;  $\text{tg}\delta = (3-7) \cdot 10^{-3}$ ;  $E_{\text{пр}} = 20-30$  кВ/мм).

**6.6. Лаки, эмали, компаунды** – это твердеющие диэлектрики, представляющие собой многокомпонентные материалы, находящиеся при изготовлении изоляции в жидком состоянии, а готовом виде – в твёрдом.

*Лаки* – это смолы, битумы, высыхающие растительные масла, разбавленные органическими растворителями. При высыхании растворитель улетучивается, и на поверхности образуется плёнка, которая обеспечивает электроизоляционные свойства, механическую прочность, а также стойкость к атмосферным и другим воздействиям. В зависимости от природы плёнкообразующего вещества лаки делятся на *смоляные, масляные, битумные, масляно–битумные, масляно–смоляные, эфиروцеллюлозные*. По режиму сушки электроизоляционные лаки делятся на лаки *холодной сушки* (20 °С) и *горячей сушки* (выше 70 °С), обладающие более высокими электрическими и механическими свойствами. По назначению лаки делятся на *пропиточные, покровные и клеящие*. Один и тот же лак может применяться в разных качествах.

*Компаунды* – это пропиточные и заливочные составы из смол, битумов, масел др., не содержащие растворителя. При изготовлении изоляции они находятся в жидком состоянии, а затем затвердевают в результате охлаждения или химических процессов. Для улучшения механических свойств в состав компаундов вводят пластификаторы, отвердители и наполнители: тальк, кварцевую муку и др. По механизму отверждения компаунды делятся на *термопластичные* и *термореактивные*. По назначению их подразделяют на *пропиточные, заливочные* и применяемые *при напылении изоляции*. Применяются эти материалы для пропитки обмоток электрических машин, трансформаторов, дросселей, заливки радиосхем и приборов, герметизации узлов, изготовления литой изоляции и т. п.

**6.7. Волокнистые материалы** могут иметь как природное происхождение, так и быть получены синтетическим путём из полимеров путём вытягивания их расплавов или растворов. К ним относятся ацетатный и медноаммиачный шёлк и стеклянные волокна. В этой группе выделяют: *электроизоляционные бумаги и картон, текстильные электроизоляционные материалы* (натуральный и синтетический шёлк, хлопчатобумажные ткани и во-

локна, стеклоткань и стекловолокно), *пропитанные волокнистые диэлектрики* (лакоткани, лакобумаги, электроизоляционные ленты).

Лакированные ткани представляют собой гибкие материалы, состоящие из ткани, пропитанной лаком или каким-либо электроизоляционным составом. Пропиточный лак или состав после отвердевания образует гибкую пленку, которая обеспечивает хорошие электроизоляционные свойства лакоткани. В зависимости от тканевой основы лакоткани делятся на хлопчатобумажные, шелковые, капроновые и стеклянные (стеклоткани).

Волокнистые материалы имеют ряд достоинств: высокие значения прочности и пластичности, дешевизна, хорошая обрабатываемость резанием. Наряду с этим есть и недостатки: низкие теплопроводность и электрическая прочность, гигроскопичность. Волокнистые диэлектрики

### 6.8. Неорганические стёкла

Стекло – это аморфное тело, полученное путём переохлаждения расплава (независимо от его химического состава), приобретающее хрупкость ниже температуры стеклования. По химическому составу стёкла представляют собой сложную систему окислов. Электрические свойства стёкол зависят от химического состава и наличия ликваций, которые составляют более 60 % от объёма. В среднем они составляют:  $\varepsilon = 3,8–16,2$ ;  $\rho = 10^6–10^{15}$  Ом·м;  $\operatorname{tg}\delta = (2–100) \cdot 10^{-4}$ . Электрическая прочность этих материалов колеблется в интервале от 40 до 500 кВ/мм. Одним из важнейших параметров является температурный коэффициент линейного расширения, значение которого находится в пределах  $(5,5–150) \cdot 10^{-7}$ ,  $\text{K}^{-1}$ .

В зависимости от химического состава и области применения различают несколько типов электротехнических стёкол: *электровакуумные, изоляторные, конденсаторные, стеклоэмали, стекловолокна, ситаллы* («силикат» + «металл»).

### 6.9. Минеральные диэлектрики

К минеральным электроизоляционным материалам относятся горные породы: слюда, асбест, мрамор, шифер, талькохлорит, базальт, тальк, каолин. Минеральные диэлектрики отличаются

высокой стойкостью к электрической дуге и обладает достаточно высокими механическими характеристиками. Эти материалы (кроме базальта и слюды) поддаются механической обработке, за исключением нарезания резьбы. Однако невысокие электроизоляционные свойства обусловили их ограниченное применение:  $\varepsilon = 8-10$ ,  $\rho = 10^5-10^9$  Ом·м,  $\text{tg}\delta = (5-10) \cdot 10^{-3}$ ,  $E_{\text{пр}} = 2,5$  кВ/мм. Так, *мел и каолин* используют в качестве наполнителя для кабельных резин, тальк – при изготовлении высоковольтной стеатитовой керамики. Электроизоляционные изделия из *мрамора, шифера и талькохлорита* производят в виде досок для панелей и электроизоляционных оснований для рубильников и переключателей низкого напряжения.

*Асбест* – название группы минералов волокнистого строения. В электроизоляционной технике применяют хризотилковый (серпентинный) асбест, представляющий собой волокнистую разновидность минерала хризотила – водного силиката магния. Основное достоинство диэлектриков на основе асбеста – нагревостойкость до 450–700 °С, однако, электроизоляционные свойства невысоки:  $\rho = 10^8 \cdot 10^{10}$  Ом·м,  $E_{\text{пр}} = 2-6$  кВ/мм. Из этого минерала изготавливают *асбоцемент, асбопласт и электронит*. Электроизоляционные изделия из асбестоцемента и асбопласта представляют собой доски, основания, перегородки и дугогасительные камеры.

*Слюда* – это кристаллическое вещество, с хорошими электрическими свойствами и нагревостойкостью. Различают природную и синтетическую слюду (табл. 5).

*Природная слюда* при переработке проходит несколько этапов: забойный сырец (извлечённая из жилы и очищенная от посторонних минералов); щепаная слюда (расщеплённая вручную на отдельные пластинки с обрезанными дефектными краями); конденсаторная слюда (лучшие сорта щепаной слюды, штампованные в виде прямоугольных пластинок).

По химическому составу различные разновидности слюды представляют из себя водные алюмосиликаты, важнейшие из которых: *мусковит и флогопит*.

*Синтетическая слюда* – фторфлогопит – имеет более высокую нагревостойкость – до 1000 °С, обладает более высокими

электрическими свойствами и химической устойчивостью, чем природная слюда.

Таблица 5

## Свойства природной и синтетической слюды

Вид слюды	$\rho$ , Ом·м при 20 °С,	Е	$\text{tg}\delta \cdot 10^4$	$E_{\text{пр}}$ , кВ/мм
		при частоте 50 Гц		
Мусковит	$10^{12}-10^{14}$	6,1–8,4	4–80	100–250
Флогопит	$10^{11}-10^{12}$	5–7	6–150	70–150
Фторфлогопит	$10^{12}-10^{14}$	6,1–7,5	–	100–400

На основе слюды изготавливается большое количество изоляционных материалов. *Слюдиниты и слюдопласты* – это слюдяные бумаги, получаемые из измельченной слюды путем прессования и пропитки эпоксидной или другой смолой. *Миканиты* представляют собой листовые и рулонные материалы, склеенные из отдельных пластинок щепаной слюды с помощью клеящего лака или смолы. *Микалексы* получают горячим прессованием (при температуре 600 °С) молотого мусковита и стекла.

### 6.10. Керамические диэлектрики

Основой большинства видов керамики являются глинистые вещества. Технология получения керамических изделий состоит из трёх этапов:

- приготовление керамической массы;
- формование, прессование, выдавливание и т. д. изделия;
- сушка, глазурирование и обжиг при 1300 – 1400 °С.

Выделяют несколько групп керамических диэлектриков: *низкочастотная установочная, низкочастотная конденсаторная, высокочастотная установочная, корундовая высокоглинозёмистая, высокочастотная конденсаторная керамика* (табл. 6).

Таблица 6. Свойства и назначение керамических диэлектрических материалов

Наименование вида керамики	$\epsilon$	$\rho$ , Ом·м	$\text{tg}\delta$	$E_{\text{пр}}$ , кВ/мм,	Назначение
Низкочастотная установочная: – электрофарфор – стеатитовая высоковольтная; – стеатитовая высоковольтная;	5–7 5–7,5 –	$10^{11}$ – $10^{12}$ $10^{12}$ $10^{12}$	0,12–0,15 0,002–0,003 –	– – 10–20	Низко- и высоковольтные изоляторы, установочные детали для низкочастотных цепей: патроны, вилки и т.п.
Низкочастотная конденсаторная	900–9800	–	$(0,2\text{--}0,5)\cdot 10^{-2}$	4–15	Конденсаторы для цепей пост. тока, и низкочастотные конденсаторы
Высокочастотная установочная	5–9,8	$10^{14}$ – $10^{17}$	$(1\text{--}20)\cdot 10^{-4}$	20–45	Корпуса п/п приборов, интегральных схем; установочные детали.
Корундовая высокоглиноземистая	10,5	$10^{14}$ – $10^{17}$	$1\cdot 10^{-4}$	28–30	Нагревостойкие подложки микросхем; линзы; колбы галогенных ламп
Высокочастотная конденсаторная	14–250	$10^{10}$ – $10^{11}$	$(3\text{--}5)\cdot 10^{-4}$	6–35	Контурные, разделительные и термокомпенсирующие конденсаторы

## 7. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Изучить и законспектировать основные теоретические положения методического указания.
2. Выполнить индивидуальное задание по варианту прил. 2 в следующей последовательности:
  - определить к какой группе относится материал;
  - описать его метод получения;
  - используя справочную литературу, занести данные о свойствах и области применения материала в таблицу (прил. 2).
3. Ответить на контрольные вопросы.

## 8. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие материалы называют диэлектрическими? Приведите их общую классификацию.
2. Какими свойствами обладают изоляционные материалы?
3. Какие материалы относятся к жидким диэлектрикам? Опишите методы получения, свойства и область их применения.
4. Что представляют собой термо- и реактопласты? Где применяются эти материалы, как их получают? Опишите их свойства.
5. На какие группы делятся и где применяются эластомеры? Приведите их свойства.
6. Каковы особенности природных смол и минеральных диэлектриков? Опишите свойства и область применения.
7. Охарактеризуйте воскообразные диэлектрики (метод получения, свойства, применение).
8. Чем отличаются волокнистые материалы? Где их применяют?
9. В чём особенность твердеющих диэлектриков – лаков, эмалей, компаундов? Опишите их классификацию и область применения.
10. Где применяют неорганические стёкла? Как их получают?
11. Кратко опишите технологию получения керамических изоляционных материалов. Приведите их свойства и область применения.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Материаловедение и ТКМ: учебник / С. Н. Колесов, И. С. Колесов. – Москва: Высш. шк., 2004. – 520 с.

2. Материаловедение: учебник / Б. Н. Арзамасов, В. И. Макаров, Г. Г. Мухина [и др.]. – Москва: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – 647 с.

3. Справочник по конструкционным материалам: Справочник / под ред. Б. Н. Арзамасова, Т. В. Солнцевой. – Москва: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. – 537 с.

Приложение 1

### Оформление отчета

№ п\п	Наименование материала	Группа по назначению	Состав	Метод получения	Основные свойства

Приложение 2

Варианты контрольных заданий

№ варианта	Наименование материала
1	Нефтяное трансформаторное масло, полиэтилен, целлюлоза.
2	Нефтяное конденсаторное масло, полипропилен, парафин.
3	Нефтяное кабельное масло, полиизобутилен, электрофарфор.
4	Кремнийорганические жидкости, полистирол, флогопит.
5	Совтол, политетрафторэтилен, конденсат. бумага, мусковит.
6	Совол, полихлорэтилен, стеатитовая керамика.
7	Фторорганические жидкости, поливинилхлорид, микалекс.
8	Касторовое масло, полиамид, неорганическое стекло.
9	Растительные масла, полиэтиленрефталат, асбест.
10	Нефтяное трансформаторное масло, полиимид, высокочастотная установочная керамика.
11	Нефтяное конденсаторное масло, поликарбонат
12	Нефтяное кабельное масло, полиуретан, фторфлогопит.
13	Совтол, фенолформальдегидная смола, тефлон.
14	Касторовое масло, анилиноформальдегидная смола, гетинакс.
15	Кремнийорганические жидкости, глифталевая смола, микалекс.
16	Совтол, пентафталева смола, низкочастотная конденсаторная керамика.
17	Растительные масла, эпоксидная смола, винипласт.
18	Нефтяное трансформаторное масло, гетинакс, кордиеритовая керамика.
19	Нефтяное конденсаторное масло, текстолит, кордиеритовая керамика.
20	Нефтяное кабельное масло, янтарь, лавсан.
21	Совтол, натуральный каучук, стеатитовая высоковольтная керамика.
22	Кремнийорганические жидкости, дифлон, конденсаторная бумага.
23	Совол, синтетический каучук, корундовая высокоглиноземистая керамика.
24	Касторовое масло, канифоль, неорганическое стекло.
25	Растительные масла, шеллак, слоистые пластики.

# Лабораторная работа №14 «ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ СО СПЕЦИАЛЬНЫМИ СВОЙСТВАМИ».

Составитель: Додонова Е. М.

## 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Цель – изучение классификации, маркировки, свойств и области применения электротехнических материалов со специальными свойствами.

## 2. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

*Полупроводник* – это материал, основным свойством которого является сильная зависимость его электрической проводимости от воздействия внешних факторов, таких, как температура, электрическое поле, свет и т. д. Полупроводниковый материал предназначен для использования его полупроводниковых свойств (ГОСТ 22622-77).

Одним из важнейших *параметров* является ширина запрещённой зоны ( $E_g$ ). К группе полупроводников относятся те материалы, для которых  $E_g$  имеет величину от 0,05 до 3 эВ. Удельное сопротивление  $\rho$  при 20 °С для них должно быть больше, чем у проводников, но меньше, чем у диэлектриков.

Приняты два вида *классификации* полупроводниковых материалов – *по типу носителя заряда и химическому составу*.

**2.1. Носителями заряда** в полупроводниках, обуславливающими электрическую проводимость, являются *дырки* проводимости и *электроны*. Величина и тип электропроводности этих материалов зависят от природы примеси и её концентрации. По этому признаку полупроводники делятся:

- на *собственные* – не содержащие легирующих добавок;
- *примесные* – содержащие донорную или акцепторную примесь.

Электропроводность *собственного* полупроводника в равновесном состоянии обусловлена как дырками, так и электронами проводимости, причем их концентрации равны.

У *примесного* полупроводника электропроводность определяется в основном примесями, у дырочного – в основном перемещением дырок проводимости, у электронного – в основном электронами проводимости.

**2.2. По химическому составу** полупроводники делятся:

– на *простые* (основной состав образован атомами одного химического элемента);

– *химические соединения* (основной состав образован атомами двух или большего числа химических элементов);

– *полупроводниковые комплексы* (многофазные материалы).

**2.2.1. К простым полупроводникам** относятся девять химических элементов: бор, кремний, германий, фосфор, мышьяк, сера, селен, теллур, йод. На практике в настоящее время применяются германий, кремний, реже – селен. Как правило, они используются в виде монокристаллических слитков.

*Кремний* (табл.1) имеет кубическую кристаллическую решетку, атомы образуют *ковалентные связи*. Кристаллический кремний твёрд, хрупок, тёмно-серого цвета с характерным металлическим блеском. *Технология получения* из кремнезёма монокристаллических слитков заключается в последовательном проведении следующих операций:

– восстановление технически чистого кремния из кремнезёма в электрических печах с использованием кокса;

– высокотемпературная очистка порошкообразного технически чистого кремния методом хлорирования;

– сплавление порошкообразного кремния в поликристаллические слитки;

– глубокая очистка поликристаллического кремния методом бестигельной зонной плавки;

– выращивание монокристаллов тем же методом или по методу Чохральского («вытягиванием» из расплава). Размеры получаемых кристаллов – от 25 до 80 мм.

В процессе получения кристаллов кремний, как правило, легируют. Акцепторными примесями являются бор, алюминий, реже – галлий, индий и таллий; донорными – фосфор, мышьяк, сурьма, висмут; амфотерными – золото и цинк. Промышленность выпускает большое количество марок монокристаллического кремния и германия, отличающихся по назначению, типу элект-

тропроводности, природе легирующей примеси и т. д. Не все марки нормируются ГОСТами, например, монокристаллический кремний, полученный по методу Чохральского, предназначенный для эпитаксильных слоёв, выпускают трёх марок и четырнадцати групп. *Марка состоит* из трёх букв: ЭКБ, ЭКЭС, ЭКЭФ, которые означают: Э – эпитаксильный, К – кремний, Д – дырочная проводимость, Э – электронная проводимость, Б, С, Ф, – легированный бором, сурьмой или фосфором соответственно. Кроме букв могут указываться цифры, указывающие номинал удельного сопротивления ( $\text{Ом} \times \text{см}$ ) и номер партии. Монокристаллический кремний *используют* для изготовления дискретных полупроводниковых приборов, а также в производстве твердотельной электроники и микросхем.

Таблица 1

Свойства кремния и германия

Свойства	Кремний	Германий
Относительная атомная масса	28,0855	72,60
Плотность, $\text{Мг/м}^3$	2,329	5,327
Температура плавления, $^{\circ}\text{C}$	1417	936
Ширина запрещенной зоны, эВ	1,12	0,72
Постоянная решётки, нм	$0,543072 \pm 1 \cdot 10^{-6}$	$0,565754 \pm 1 \cdot 10^{-6}$
Удельное электросопротивление, $\text{Ом} \times \text{м}$	$2,3 \cdot 10^3$	0,68
Концентрация собственных носителей, $\text{м}^{-3}$	$3 \cdot 10^{16}$	$2,5 \cdot 10^{19}$
Диэлектрическая проницаемость (статическая)	$-0,13 \cdot 10^{-4}$	$-0,12 \cdot 10^{-6}$

Германий (табл. 1), как и кремний, кристаллизуется с образованием кубической кристаллической решётки с ковалентными связями. Имеет характерный металлический блеск, твёрд, хрупок, серовато-белого цвета. Монокристаллический германий производят из отходов переработки полиметаллических руд и продуктов сгорания углей – золы и сажи. *Технология получения* включает в себя:

– хлорирование и кислотная обработка сырья с получением тетрахлорида германия  $\text{GeCl}_4$ ;

– очистка тетрахлорида германия  $\text{GeCl}_4$  методом дистилляции и получение двуокиси германия путём гидролиза;

- восстановление порошкообразного германия с применением водорода или паров цинка;
- сплавление в поликристаллические слитки с помощью кислот;
- глубокая очистка поликристаллического кремния методом бестигельной зонной плавки;
- выращивание монокристаллов по методу Чохральского.

Как и кремний, германий на последнем этапе легируют. В качестве акцепторных связей применяют галлий, индий, алюминий, донорных – мышьяк, сурьму, висмут, литий, фосфор; амфотерными примесями являются многие элементы I, II, VI, VII групп таблицы Д. И. Менделеева.

*Маркировка* монокристаллического германия для полупроводниковых приборов состоит из трёх заглавных букв. Например, ГЭС, ГДГ, которые обозначают Г – германий, Э – электронная проводимость, С – легированный сурьмой, Д – дырочная проводимость, Г – легированный галлием. Кроме заглавных букв могут быть проставлены цифры и прописные буквы, которые указывают номинал удельного сопротивления, величину его разброса, группу по плотности дислокаций, кристаллографическую ориентацию и другие параметры.

Германий *используют* для изготовления диодов, транзисторов, оптических и фоточувствительных приборов, фототранзисторов, фотодиодов, модуляторов света коротких радиоволн, датчиков ЭДС Холла, работающих в температурном интервале от – 60 °С до + 70 °С.

Селен существует в нескольких аллотропных модификациях: моноклинной и *гексагональной* (используемой в производстве полупроводниковых приборов), а также в стеклообразном (аморфном) состоянии. Гексагональный селен серого цвета, со слабым металлическим блеском, при комнатной температуре не взаимодействует с кислородом воздуха, устойчив к действию кислот. Основными источниками получения селена являются анодные шламы, образующиеся при электролитическом рафинировании меди и отходы производства соляной кислоты. *Технология* получения монокристаллического селена включает в себя:

- нагревание сырья с целью возгонки – получение технически чистого селена;

- предварительная химическая очистка;
- окончательная очистка дистилляцией в вакууме;
- выращивание кристаллов из расплава или осаждение из газовой среды осаждением на алюминиевую или стальную плёнку.

*Применяют селен* в производстве фоторезисторов и фотоэлементов, оптоэлектронных устройств, в ксерографии.

**2.2.2. Полупроводниковые химические соединения** имеют общие формулы:  $A^{IV}B^{IV}$ ,  $A^{III}B^V$ ,  $A^{II}B^{VI}$  и оксиды металлов.

В группе полупроводниковых материалов, имеющих формулу  $A^{IV}B^{IV}$  наиболее типичен *карбид кремния SiC*. Кристаллизуется в кубической и гексагональной модификациях, *тип связи – ковалентный*. Имеет высокую твёрдость, хорошую термическую, химическую и радиационную стойкость. *Получают* поликристаллический карбид кремния в электропечах путём восстановления двуоксида кремния, а затем из него методом сублимации выращивают монокристаллы. *Применяется* в производстве нелинейных резисторов (варисторов), кроме того, на основе порошкообразного SiC производят светодиоды, солнечные элементы, высокотемпературные нагреватели и др.

Для образования полупроводниковых химических соединений, имеющих формулу  $A^{III}B^V$  в качестве элемента А используются бор, алюминий, галлий, индий, в качестве элемента В – фосфор, мышьяк, сурьма, азот. Наиболее широкое применение нашли *арсениды галлия GaAs и индия InAs, антимониды InSb, и галлия GaSb, фосфид галлия GaP* (табл. 2). Эти соединения имеют кристаллическую решётку сфалерита, подобную алмазу. Химическая *связь* в них смешанная – *ковалентная и частично ионная*. Они отличаются высокой химической стойкостью, не взаимодействуют с водой и кислородом. *Получают* их методом прямого или косвенного синтеза. В качестве исходных веществ используются компоненты в элементарном виде, которые затем сплавляют в тигле. После этого из них по методу Чохральского выращивают монокристаллы. В качестве легирующих добавок используются медь, магний, цинк, бериллий, серебро, золото, железо и другие элементы. Соединения этого типа *используют* в производстве полупроводниковых приборов различного назначения: светодиоды, фоторезисторы, лазеры, приёмники инфракрасного излучения, туннельные диоды, дозиметры рентгеновского излучения, термоэлектрические генераторы, микроволновые датчики и др.

Группа химических соединений, имеющих общую формулу  $A^{II}B^{VI}$ , называется *халькогенидами*. Практическое применение нашли *сульфиды свинца  $PbS$ , висмута  $Bi_2S_3$ , ртути  $HgS$ , цинка  $ZnS$  и кадмия  $CdS$ , селениды цинка  $ZnSe$ , кадмия  $CdSe$  и ртути  $HgSe$ , теллуриды цинка  $ZnTe$  и кадмия  $CdTe$* . Как и соединения  $A^{III}B^V$ -типа они имеют *ковалентно-ионный тип связей*, но ионная составляющая в них выше. В качестве полупроводниковых материалов используют как моно-, так и поликристаллические халькогениды. Поликристаллические *получают* методом осаждения из водных растворов или сплавлением исходных компонентов. Монокристаллические – направленной кристаллизацией из расплава или газовой среды. Халькогениды мало растворимы в воде и кислотах, обладают высокой чувствительностью к излучению в области от инфракрасной до рентгеновской. Кроме того, у них в значительной мере проявляются люминесцентные и фоторезистивные свойства, некоторые (например,  $ZnS$ ) обладают пьезоэлектрическим эффектом. В связи с этим, их *применяют* для изготовления входных окон и линз в оптико-электронных устройствах, в акустических приборах, в производстве фоторезисторов и люминофоров, термоэлементов, инфракрасных фильтров и др.

Сложные полупроводники типа А-В промышленно выпускают в широком ассортименте. Для характеристики отдельных *марок* используют буквенно-цифровые обозначения. Первые две буквы обозначают собственно полупроводник: АГ – арсенид галлия, ФГ – фосфид галлия, ГС – антимонид галлия, ИМ – арсенид индия, ФИ – фосфид индия, ИС – антимонид индия и т. д. Далее добавляется буква, обозначающая тип проводимости: Э – электронный, Д – дырочный. Для арсенида галлия после АГ добавляется буква Н для слитков, полученных горизонтальной направленной кристаллизацией, или Ч – для слитков, полученных по методу Чохральского, и буква, обозначающая легирующую примесь: Т – теллур, О – олово, Ц – цинк, Г – германий, К – кремний, Х – хром, М – марганец. После набора прописных букв идут цифры и строчные буквы, характеризующие различные параметры материала. Расшифровка значений марок дана в соответствующих технических условиях.

Таблица 2

Некоторые свойства полупроводников

Соединение	Плотность, Мг/м <sup>3</sup>	Постоянная решетки, нм	Температура плавления	Диэлектрическая проницаемость	Ширина запре- щённой зоны, эВ
Фосфиды					
AlP	2,42	0,544	2550	9,8	2,45
GaP	4,13	0,545	1467	2,2	2,2
Арсениды					
AlAs	3,60	0,566	1750	10,9	2,16
GaAs	5,32	0,565	1238	13,8	1,43
Антимониды					
AlSb	4,22	0,614	1060	11,21	1,62
GaSb	5,62	0,610	712	15,69	0,70
Сульфиды					
ZnS	4,15	–	1830	8÷8,5	3,6÷3,7
CdS	4,82	–	1750	9,0	2,4÷2,6
Теллуриды					
ZnTe	5,68	–	1295	10,0	2,1÷2,3
CdTe	5,86	–	1098	9,6÷11	1,3÷1,6
Оксиды					
ZnO	5,67	–	2250	8,5	3,2
Cu <sub>2</sub> O	5,90	–	1230	–	1,5

**К оксидным полупроводникам** относят химические соединения металлов переходной группы таблицы Д. И. Менделеева (Ti, V, Cr, Mn, Fe, Cu, Ni, Co, Zn) с кислородом, а также более сложные системы:  $ZnFeO_4$ ,  $MnCr_2O_4$  и др. Соединения этой группы имеют *ионный тип связи*. На их свойства сильное влияние оказывают примеси. Как правило, спечённые образцы этих материалов *получают* методами порошковой металлургии. Наибольшее применение нашли *закись меди  $Cu_2O$  и оксид цинка  $ZnO$* . Так, оксид цинка используют в качестве светочувствительного слоя электронографических бумаг, для изготовления варисторов в вентиляльных разрядниках. Часто изготавливают смеси оксидов, на основе которых делают терморезисторы, варисторы, выпрямители и другие приборы.

**2.2.3. К полупроводниковым комплексам** относят *многофазные материалы* с полупроводящей или проводящей фазами, например, карбид кремния, графита и т. п., сцепленных глинистой, стеклянной или другой связками (титрид, вилит, силит); *органические* (антрацен, полинафталин, полиацетилен и др.); *стеклообразные и жидкие*.

*Неорганические стеклообразные полупроводники* обладают чисто электронной проводимостью. Они подразделяются:

– на кислородосодержащие стёкла, получаемые сплавлением оксидов металлов с переменной валентностью – Ti, V, Fe, Co, Ni, Cu и др. (например, ванадийфосфатные стёкла  $V_2O_5 - P_2O_5 - ZnO$ );

– бескислородные халкогенидные стёкла, которые получают сплавлением халкогенидов – S, Se, Te с элементами III, IV и V групп периодической системы Д. И. Менделеева.

Стеклообразные полупроводники окрашены и непрозрачны в толстых слоях.

**2.3. Применение полупроводниковых материалов.** Изготовленные из полупроводниковых материалов приборы обладают значительными преимуществами, такими как:

- длительный срок службы;
- малые габариты и масса;
- простота и надёжность конструкции;
- механическая прочность;
- малые мощность и инерционность;

- отсутствие цепей накала;
- экономичность при массовом производстве.

Подбор материалов для изготовления приборов осуществляется с учетом влияния состава и структуры материала, а также рабочих условий прибора на уровень и стабильность необходимых свойств. Так, для изготовления диодов и транзисторов широко применяются кремний и германий, реже – арсенид галлия и другие соединения, для подложек используют ситаллы, кремний, сапфир.

Кроме того, полупроводниковые материалы применяют для изготовления контактных и электродных материалов. К контактными материалам предъявляются специальные требования: сплав должен обладать минимальной в коэффициентах теплового расширения по сравнению с полупроводником; хорошо смачивать поверхность расплавом; обладать высокой теплопроводностью для эффективного отвода тепла из активной области прибора и др. По указанным причинам электродные и контактные материалы являются сложными и многокомпонентными. Электродные материалы на основе германия легируют оловом, индием, свинцом. Их соответственно используют при температурах плавления  $+300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $+450\div 550\text{ }^{\circ}\text{C}$  и выше  $+550\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Для приборов на основе кремния, рабочая температура которых выше, наиболее часто применяют олово и золото.

Широкое применение полупроводниковые материалы нашли в приборах для преобразования энергии из тепловой (в том числе от ядерного реактора) в электрическую. Различают три группы этих материалов:

- низкотемпературные ( $100\div 600\text{ }^{\circ}\text{K}$ );
- среднетемпературные ( $600\div 950\text{ }^{\circ}\text{K}$ );
- высокотемпературные ( $950\div 1800\text{ }^{\circ}\text{K}$ ).

В качестве активных веществ их используют в оптических квантовых генераторах (лазерах), непосредственно преобразующих энергию электрического тока в энергию когерентного излучения. В зависимости от источника возбуждения выделяют три группы квантовых генераторов: с оптическим возбуждением, с электронным возбуждением и инжекторные лазеры (на p-n переходе).

### 3. СВЕРХПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

**Сверхпроводимость** – это явление, заключающееся в том, что электросопротивление некоторых материалов исчезает при уменьшении температуры ниже некоторых значений, зависящих от материала и магнитной индукции. **Сверхпроводник** – это вещество, основным свойством которого является способность при определенных условиях быть в состоянии сверхпроводимости. Сущность этого явления заключается в сверхтекучести «электронной жидкости», образованной валентными электронами. Благодаря взаимодействию электронов проводимости с колебаниями кристаллической решетки (фононами) между электронами возникает напряжение, которое может превзойти силу кулоновского отталкивания.

Сверхпроводники характеризуются параметрами:

– *критическая температура  $T_k$* , – температура, при которой происходит переход из нормального состояния в сверхпроводящее;

– *критическая магнитная индукция  $B_c$  (напряжённость магнитного поля  $H_c$ )* – параметры магнитного поля, при которых разрушается сверхпроводимость материала (чем выше эти значения, тем лучше эксплуатационные свойства; при превышении  $T_k$  или  $H_k$  происходит скачкообразное восстановление электросопротивления и магнитное поле проникает в металл);

– *критическая плотность тока  $j_c$* , – плотность протекающего через материал тока, при превышении которой происходит разрушение сверхпроводимости;

– *граничная частота  $f_k$*  – частота электромагнитного поля, при которой исчезает сверхпроводимость материала.

**3.1.** Известно более 1000 сверхпроводящих сплавов и соединений, и число их постоянно растет. Для систематизации сверхпроводящих соединений их классифицируют по группам с однотипными кристаллическими структурами, поскольку этот фактор является одним из фундаментальных. Известные сверхпроводящие соединения принадлежат более чем к пятидесяти структурным типам.

Укрупненно сверхпроводники делятся на группы:

– **I рода** – все чистые сверхпроводящие металлы, кроме переходных металлов;

– **II рода** – чистые переходные металлы, сплавы и соединения на их основе, исключая «жесткие» сверхпроводники;

– **III рода** – сверхпроводники II рода, имеющие примеси и дефекты решётки;

– **высокотемпературные сверхпроводники.**

Группа **сверхпроводников I рода** включает в себя *технически чистые сверхпроводящие материалы*, за исключением технеция, ванадия и ниобия. В сверхпроводящее состояние они переходят скачкообразно. Данные по этим материалам собираются и уточняются, но в настоящее время практического применения они не получили из-за того, что имеют весьма низкие значения критической магнитной индукции (табл. 2), что существенно ограничивает плотность тока, препятствуя их использованию.

Таблица 2

Свойства некоторых сверхпроводников I и II рода

Сверхпроводники	$T_c, ^\circ\text{K}$	$B_c, \text{Тл}$	$H_{\text{кр}2}, \text{кА/м}$
<b>I рода</b>			
Иридий	0,14	0,002	–
Алюминий	1,20	0,010	–
Олово	3,70	0,031	–
Ртуть	4,20	0,046	–
Тантал	4,50	0,083	–
<b>II рода</b>			
Ниобий	9,42	–	155
Ванадий	5,43	–	109
Технеций	7,80	–	112

**Сверхпроводники II рода** – это *технически чистые технеций, ванадий, ниобий и их сплавы и соединения*. Как и сверхпроводники I рода, они характеризуются температурой перехода в сверхпроводящее состояние, но имеют два критических поля. Ниже нижнего критического магнитного поля  $H_{\text{кр}1}$  материал ведёт себя как проводник, затем наступает переходное состояние, а выше  $H_{\text{кр}2}$  наблюдается сверхпроводимость. Поэтому основной ха-

рактической для них служит  $H_{кр2}$ . (табл. 2). Сверхпроводники этой группы обладают высокими значениями  $T_k$  и  $H_{кр2}$ , но небольшой плотностью тока, что является существенным недостатком. Их свойства очень сильно зависят от степени чистоты и технологии получения.

**Сверхпроводники III рода («жесткие»)** – это сверхпроводники II рода, имеющие крупные неоднородности – дефекты решетки и примеси, количество которых значительно возрастает при пластической деформации, в результате чего критическая плотность тока возрастает на несколько порядков. К этой группе принадлежат сплавы на основе ниобия и ванадия (табл. 3). Характеризуются высокими значениями критических плотностей токов и, следовательно, высокими критическими значениями магнитных полей.

К наиболее распространенным «жестким» сверхпроводящим материалам относится сплав Nb – 46,5 % Ti (по массе), отличающийся высокой технологичностью. Из него обычными методами плавки, обработки давлением и термической обработки можно изготавливать проволоку, кабели, шины. Как правило, его применяют при  $B_k = 8$  Тл. В более сильных полях, когда плотность тока существенно падает, используют соединение  $Nb_3Sn$ .

Таблица 3

Свойства некоторых сверхпроводников III рода

Сплав	$T_k$ , К	$H_{кр2}$ , МА/м	$J_{кр}$ . ГА/м <sup>2</sup>
Nb – Ti	10	8	0,5
V – Ga	14,2	18	$\geq 1,6$
Nb – Ge	23,2	–	1

Для снижения критической плотности тока сверхпроводящих материалов после механической обработки проводят *отжиг*, приводящий к уменьшению концентрации центров пиннинга (дефектов различного вида, превышающих атомные размеры: скоплений дислокаций, границ зерен, включений другой фазы и др.).

**Высокотемпературные сверхпроводники** – это керамические материалы, имеющие температуру перехода в критическое состояние выше 30 К (табл. 4). Разработано большое количество ма-

териалов, переходящих в сверхпроводящее состояние при 250 °К и даже при комнатной температуре.

Таблица 4

Свойства некоторых керамических сверхпроводников

Наименование материала	$T_{кз}$ , °К
Лантановая керамика	56
Иттриевая керамика	91
Висмутовая керамика	115
Таллиевая керамика	119
Ртутная керамика	135

Керамические системы состоят из сверхпроводящих гранул, которые характеризуются высокими значениями критической плотности тока, однако, межгранульное пространство имеет невысокие значения  $J_{кр}$ . Это приводит к затруднениям при использовании керамических сверхпроводников. Значительная часть существующих материалов отличается хрупкостью и нестабильностью. В настоящее время технология получения керамических сверхпроводников остаётся на уровне научных разработок.

Перспективными материалами являются сверхпроводящие *металлические стекла*, которые получают быстрой закалкой из жидкого состояния. Эти материалы обладают высокой прочностью и определенной степенью деформируемости. Максимальная  $t_k = -269$  °С.

### 3.2. Применение сверхпроводниковых материалов.

Сверхпроводниковые материалы обладают теми же преимуществами, что и полупроводники. Наряду с этим, одним из главных их качеств является возможность достижения высоких плотностей тока, позволяющих изготавливать компактные и лёгкие приборы. Высокая  $J_{кр}$  позволяет также снизить капитальные и эксплуатационные расходы установок на сверхпроводниках.

В настоящее время сверхпроводящие магниты используют для исследований в области физики высоких энергий, создания мощных магнитных кольцевых ускорителей частиц, систем управления движением пучков частиц на выходе из ускорителя и

др. Мощные сверхпроводящие магниты получили широкое применение в термоядерной энергетике. С помощью магнитодинамических генераторов (МГД-генераторов) осуществляется прямое преобразование тепловой энергии в электрическую. Широкое применение нашли эти материалы на транспорте. Использование эффекта сверхпроводимости позволяет создать поезда без колёс «на магнитной подушке», обеспечивающие скорость до 500 км/ч. Область применения сверхпроводящих материалов постоянно расширяется.

#### 4. АКТИВНЫЕ ДИЭЛЕКТРИКИ

Активными диэлектриками называют материалы, свойствами которых можно управлять с помощью внешнего энергетического воздействия: напряжённости электрического или магнитного поля, светового потока, температуры, механического напряжения и др.

**4.1. Сегнетоэлектрики** обладают регулируемыми электрическими характеристиками. Характерная особенность этих материалов – наличие самопроизвольной (спонтанной) поляризации наряду с поляризацией, вызываемой внешними воздействиями. Следствием этого является появление весьма высокой диэлектрической проницаемости и её резкой зависимости от температуры и напряжённости приложенного электрического поля, а также диэлектрического гистерезиса.

Сегнетодиэлектрики *классифицируют* в зависимости от *структуры* элементарной ячейки и *механизма спонтанной поляризации*:

– на ионные (типа смещения) – титанат бария  $\text{BaTiO}_3$ , титанат кадмия  $\text{CdTiO}_3$ , йодат калия  $\text{KIO}_3$  и др.

– дипольные (упорядочивющиеся) – сегнетова соль  $\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \times 4\text{H}_2\text{O}$ , нитрид натрия  $\text{NaN}_3$ , дигидрофосфат калия  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  и др.

В зависимости от значений коэрцитивной силы сегнетодиэлектрики делятся:

- на сегнетомягкие ( $E_c \leq 0,1$  МВ/м);
- сегнетотвёрдые ( $E_c \leq 0,1$  МВ/м).

Номенклатура выпускаемых изделий достаточно велика, в качестве примера можно привести сегнетокерамический материал на основе титанита бария с добавкой окислов циркония и висмута, имеющий следующие свойства:  $\varepsilon = 3000 \div 4000$ ,  $\rho = 10^9 \div 10^{10}$  Ом·м,  $\text{tg}\delta \leq 0,03$ ,  $E_{\text{пр}} \geq 4$  МВ/мм.

Сегнетоэлектрики используют для изготовления варикондодов («вариация» + «конденсатор»), емкость которых изменяется в зависимости от напряженности поля и других активных элементов электросхем, а также применяют для модуляции лазерного излучения.

**4.2. Пьезоэлектриками** называют диэлектрики с явно выраженным пьезоэлектрическим эффектом (образованием на поверхности материала электрического заряда под воздействием механического напряжения или деформации). Известно более тысячи соединений, обладающих названным свойством, но на практике применяется ограниченное количество. Выделяют три группы этих материалов: пьезокерамика, полимерные и монокристаллические пьезоэлектрики.

*Монокристаллические пьезоэлектрики*, как правило, получают из монокристаллического кварца выпиливанием, шлифованием, полированием с последующим нанесением металлических электродов методами напыления, химического осаждения или вжигания. При подаче напряжения возникает резонанс, вызывающий механические колебания, после чего пластина является мощным излучателем сверхзвуковой частоты. Используются в технике качестве стабилизаторов частоты, а также в медицине, биологии.

Для получения *пьезокерамики* сегнетокерамику текстурируют – выдерживают в сильном постоянном электрическом поле ( $E = 2 \div 4$  МВ/м) при  $100 \div 150$  °С в течение часа. При этом материал из изотропного состояния переходит в анизотропное, что сопровождается появлением пьезоэффекта. Наиболее широко в этом качестве используют керамику, изготовленную на основе твёрдых растворов цирконата-титаната свинца  $\text{PbZrO}_3\text{-PbTiO}_3$ . Применяют пьезокерамические изделия для изготовления малогабаритных микрофонов, датчиков давлений, вибраций, детонаторов и т. п.

**Полимерные пьезоэлектрики** представляют собой плёнки, полученные путём вытяжки и приобретения пьезоэффекта после поляризации в постоянном сильном электрическом поле. Примером такого материала может служить поливинилдендентофторид (ПВДФ). Применяют их в производстве пьезоэлектрических преобразователей.

**4.3. Электрооптические материалы.** Принцип действия основан на электрооптическом эффекте, заключающемся в изменении диэлектрической проницаемости, показателя преломления и рассеяния света под действием электрического напряжения. Эти материалы применяют в производстве модуляторов, предназначенных для изменения основных параметров излучения в оптическом диапазоне с помощью внешнего поля. В зависимости от *вида протекающего электрооптического эффекта различают материалы с линейным, квадратичным и динамическим электрооптическими эффектами.*

К *материалам с линейным эффектом* относятся: кристаллический дигидрофосфат калия, его аналоги и другие кристаллы, не имеющие центра симметрии (теллурид кадмия, сульфид цинка).

Кристаллы, имеющие центр симметрии (группа петровски-тов, прозрачная сегнетокерамика), принадлежат к *материалам с квадратичным электрооптическим эффектом.* К этому типу принадлежат также жидкости: нитробензол сероуглерод и др.

*Материалами с динамическим электрооптическим эффектом* являются жидкие кристаллы – органические соединения, находящиеся в промежуточном состоянии между твёрдой и жидкой фазой (мезофаза). В зависимости от расположения молекул их разделяют на три класса:

- нематические (НЖК);
- холестерические (ХЖК);
- смектические (СЖК).

Практическое применение получили жидкие кристаллы двух первых классов. У НЖК оптические свойства изменяются под действием приложенного электрического поля. К ним принадлежат сложные ароматические эфиры, азоксисоединения и их эвтектические смеси. У ХЖК – под действием давления, тепलो-

го поля и др. К этому классу относятся производные холестерина и их смеси.

Жидкие кристаллы нашли широчайшее применение в электронике, медицине и других областях науки и техники, в первую очередь в производстве малогабаритных устройств – часов, гаджетов и т.п.

**4.4. Электретами** называются твёрдые диэлектрические материалы, длительно сохраняющие поляризованное состояние. Аналогично постоянным магнитам они создают в окружающем пространстве электростатическое поле в отсутствие внешнего энергетического воздействия. К этим материалам принадлежат как органические, так и неорганические соединения:

- *природные диэлектрики*: воск, парафин, шеллак, канифоль, слюда и др.;
- *синтетические полимеры*: полистирол, поликарбонаты, полипропилен и др.;
- *неорганические материалы*: сера, ситаллы, сульфид цинка и др.;
- *керамические титаносодержащие материалы* на основе  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{BaTiO}_3$ ,  $\text{CaTiO}_3$  и других материалов;
- *органические соединения ароматического ряда*: нафталин  $\text{C}_{10}\text{H}_8$  и др.

В зависимости от *технологии получения* эти материалы делят на восемь групп:

- термоэлектреты, получаемые путём нагрева до температуры плавления кристаллических или размягчения аморфных тел в сильном электрическом поле;
- электроэлектреты – воздействием сильным постоянным электрическим полем в течение нескольких часов;
- короноэлектреты – воздействием коронного разряда;
- фотоэлектреты – одновременным воздействием света и постоянного электрического поля;
- хемоэлектреты – воздействием электрическим полем (электризацией) в процессе химических превращений;
- радиоэлектреты – воздействием пучком заряженных частиц высокой энергии;
- механоэлектреты – механическими нагрузками, сопровождающимися контактной электризацией;

– трибоэлектреты – воздействием трением, сопровождающимся контактной электризацией.

Электреты применяются в качестве датчиков сигналов и преобразователей: электретные конденсаторные микрофоны, датчики давления, вибродатчики, тахометры и т. п. Кроме того, их используют в дозиметрах проникающей радиации, барометрах, гигрометрах и др.

#### **4.5. Люминофоры**

К этой группе относятся материалы с эффектом люминесценции. Суть эффекта – поглощение энергии извне, перевод части атомов в возбуждённое состояние и возвращение в нормальное состояние, сопровождаемое излучением фотонов (свечением). По ширине запрещённой зоны они находятся между диэлектриками и полупроводниками. В связи с этим в качестве люминофоров используют полупроводниковые материалы с большой шириной запрещённой зоны: сульфиды цинка, кальция, стронция ( $ZnS$ ,  $CaS$ ,  $SrS$ ), оксиды щелочноземельных металлов – кальция и цинка ( $ZnO$ ,  $CaO$ ), оксидные соединения ( $CaWO_4$ ,  $Zn_2SiO_4$ ). Для усиления эффекта свечения их легируют серебром золотом, медью и марганцем.

Люминофоры нашли широчайшее применение в технике: их используют для изготовления электронно-лучевых трубок и люминесцентных ламп.

### **5. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ**

1. Изучить и законспектировать основные теоретические положения методического указания.

2. Выполнить индивидуальное задание по варианту прил. 1 в последовательности:

- определить к какой группе относится материал;
- описать метод его получения;
- используя справочную литературу, занести данные о свойствах и области применения материала в таблицу (прил. 2).

3. Ответить на контрольные вопросы.

## 5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

### 6.

1. Какие материалы называют полупроводниковыми? По каким признакам они классифицируются?
2. Каковы свойства, технология получения и область применения простых полупроводниковых материалов – кремния, германия и селена?
3. Какие материалы относятся к полупроводниковым химическим соединениям? Как их получают и где применяют?
4. Что представляют собой полупроводниковые комплексы?
5. Какие материалы называются сверхпроводниковыми? Какими параметрами они характеризуются?
6. Почему сверхпроводники I и II рода не имеют широкого практического применения?
7. Где применяются и какими свойствами обладают «жесткие» сверхпроводники?
8. Что представляют собой высокотемпературные сверхпроводниковые материалы?
9. Какие материалы называют сегнетоэлектриками? Где их применяют?
10. На какие группы делятся пьезоэлектрики? Укажите область их применения.
11. Как классифицируются и где применяются электрооптические материалы?
12. Какие материалы принадлежат к электретами? Назовите область их применения.
13. Что представляют собой и где используются люминофоры?

## СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Материаловедение и ТКМ: учебник / С. Н. Колесов, И. С. Колесов. – Москва: Высш. шк., 2007. – 519 с.
2. Материаловедение и технология конструкционных материалов: / под ред. Б. Р. Арзамасова, А. А. Черепахина. – Москва: Академия, 2007. – 448 с.

3. Материаловедение специальных отраслей машиностроения. [Электронный ресурс] : [учеб. пособие] / Ю. П. Солнцев. – Санкт-Петербург: Химиздат, 2007. – 784 с.

4. [www.bibliociub.ru/98341\\_Materialovedenie\\_spetsialnykh\\_otrasley\\_mashinostroeniya\\_Uchebnoe\\_posobie.html](http://www.bibliociub.ru/98341_Materialovedenie_spetsialnykh_otrasley_mashinostroeniya_Uchebnoe_posobie.html)

5. Материаловедение и ТКМ: учебник / А. М. Пейсахов, А. М. Кучер. – Санкт-Петербург: Изд-во Михайлова В. А., 407 с.

6. Материаловедение: учебник / под ред. Ю. П. Солнцева. – Санкт-Петербург: Химиздат, 2004. – 736 с.

7. Справочник по конструкционным материалам: справочник / под ред. Б. Н. Арзамасова, Т. В. Соловьёвой. – Москва: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. – 640 с.

Варианты контрольных заданий

№ варианта	Наименование материала
1	SiC, лантановая керамика, BaTiO <sub>3</sub>
2	GaAs, висмутовая керамика, KJO <sub>3</sub>
3	InAs, таллиевая керамика, NaNO <sub>2</sub>
4	InSb, Nb – Ti, CdTiO <sub>3</sub>
5	InSb, иттриевая керамика, KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>
6	GaP, V – Ga, сегнетова соль
7	Si, висмутовая керамика, BaTiO <sub>3</sub>
8	PbS, таллиевая керамика, NaNO <sub>2</sub>
9	Bi <sub>2</sub> S <sub>3</sub> , Nb – Ge, CdTiO <sub>3</sub>
10	Ge, V – Ga, сегнетова соль
11	ZnS, лантановая керамика, KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>
12	CdS, Nb – Ti, KJO <sub>3</sub>
13	ZnSe, Nb – Ge, NaNO <sub>2</sub>
14	SiC, иттриевая керамика, BaTiO <sub>3</sub>
15	HgSe, Nb – Ge, сегнетова соль
16	ZnTe, таллиевая керамика, KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>
17	CdTe, V – Ga, сегнетова соль
18	Cu <sub>2</sub> O, лантановая керамика, NaNO <sub>2</sub>
19	ZnO, ртутная керамика, KJO <sub>3</sub>
20	Se, ртутная керамика, NaNO <sub>2</sub>
21	Ge, висмутовая керамика, ZnS
22	HgS, Nb – Ti, KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>
23	SiC, иттриевая керамика, CaS
24	CdSe, V – Ga, SrS
25	Si, Nb – Ge, сегнетова соль

## Оформление отчета

№ п/п	Наимено- вание мате- риала	Группа по назна- чению	Состав	Метод получе- ния	Основные свойства	Область применения