

4044



Министерство образования  
Республики Беларусь

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

---

Кафедра «Вакуумная и компрессорная техника»

# МАТЕРИАЛЫ ВАКУУМНОЙ И КОМПРЕССОРНОЙ ТЕХНИКИ

Лабораторные работы

Минск  
БНТУ  
2011

Министерство образования Республики Беларусь  
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

---

Кафедра «Вакуумная и компрессорная техника»

# МАТЕРИАЛЫ ВАКУУМНОЙ И КОМПРЕССОРНОЙ ТЕХНИКИ

Лабораторные работы  
для студентов специальности  
1-36 20 04 «Вакуумная и компрессорная техника»

Минск  
БНТУ  
2011

621.5

~~УДК 620.22~~

~~ББК 30.3~~

М 34

Составители:

*И.И. Вегера, И.А. Иванов*

Рецензенты:

*В.И. Молочко, Е.Е. Петюшик*

М34      Материалы вакуумной и компрессорной техники: лабораторные работы для студентов специальности 1-36 20 04 «Вакуумная и компрессорная техника» / сост.: И.И. Вегера, И.А. Иванов. – Минск: БНТУ, 2011. – 103 с.

Методические указания содержат лабораторные работы по дисциплине «Материалы вакуумной и компрессорной техники», читаемой на третьем курсе для студентов специальностей 1-36 20 04 «Вакуумная и компрессорная техника». Содержание лабораторных работ соответствует требованиям рабочей учебной программы дисциплины и включает практическое освоение студентами методик определения прочностных характеристик сплавов, проведения металлографического анализа, а также определения таких важных характеристик вакуумных масел, как упругость паров, температура кипения, краевой угол смачивания.

## Содержание

Лабораторная работа № 1	
Исследование структуры и свойств меди и ее сплавов.....	4
Лабораторная работа № 2	
Исследование структуры и свойств алюминия и его сплавов.....	14
Лабораторная работа № 3	
Исследование структуры и свойств коррозионно-стойких сталей ..	31
Лабораторная работа № 4	
Полимеры и пластмассы .....	46
Лабораторная работа № 5	
Маркировка, структура и свойства антифрикционных материалов.....	69
Лабораторная работа № 6	
Определение упругости паров и температуры кипения вакуумных масел.....	77
Лабораторная работа № 7	
Определение кинематической и расчет динамической вязкости масел.....	86
Лабораторная работа № 8	
Определение краевого угла смачивания.....	93

# Лабораторная работа № 1

## Исследование структуры и свойств меди и ее сплавов

### Цель работы

1. Изучить микроструктуру, свойства, маркировку и область применения меди и ее сплавов.
2. Освоить методики проведения металлографического анализа и испытания механических свойств меди и ее сплавов.

### Задачи работы

1. Сформировать представление о микроструктуре, свойствах, маркировке и области применения меди и ее сплавов.
2. Ознакомиться с методикой приготовления микрошлифов, их травления и исследования структуры под микроскопом.
3. Освоить методику измерения твердости по Бринеллю и Роквеллу.

### Оборудование и материалы

1. Набор металлических образцов меди, латуни и бронзы.
2. Машина шлифовально-полировальная.
3. Бумага шлифовальная, алмазная паста, полировальная смесь, травитель.
4. Микроскоп металлографический МИ-1.
5. Твердомер Импульс-2М.

### Общие сведения о меди и ее сплавах

#### 1. Медь

Медь является одним из основных конструкционных материалов для изготовления деталей многих вакуумных и компрессорных систем. Широкое применение меди в производстве данного оборудования обусловлено благоприятным сочетанием ее свойств – высокой электропроводности, теплопроводности, пластичности и удовлетворительными прочностными характеристиками, низкой температурой

плавления, коррозионной стойкостью, хорошей обрабатываемостью давлением. Медь по ГОСТ 859–78 выпускается в виде катодов, слитков, полос, лент, труб, проволоки, поковок, листов. В производстве вакуумного и компрессорного оборудования применяется медь различных марок (М00, М0, М1, М2, М3, Моб, МВ, МВК), которые отличаются друг от друга по количеству содержащихся примесей и физико-химическими свойствами. В зависимости от чистоты различают следующие марки меди: М00 (99,99 % Cu); М0 (99,95 % Cu); М1 (99,9 % Cu); М2 (99,7 % Cu); М3 (99,5 % Cu); М4 (99,0 % Cu).

В вакуумной технике в основном используются специальные марки меди: М00, М0, Моб (бескислородная медь), МВ и МВК (медь вакуумной плавки), содержащие минимальное количество примесей, что обусловлено специфическими условиями эксплуатации материалов.

Ниже приведены некоторые физико-механические и другие свойства меди (табл. 1.1):

Таблица 1.1

Основные свойства меди

Плотность, кг/м <sup>3</sup>	$(8,3-8,96) \cdot 10^3$	
Теплопроводность $\lambda$ , Вт/(м·К)	при 20 °С	$3,940 \cdot 10^2$
	при 100 °С	$3,768 \cdot 10^2$
	при 700 °С	$3,517 \cdot 10^2$
Температурный коэффициент линейного расширения $\alpha$ , 1/°С	при 20 °С	$16,5 \cdot 10^{-6}$
Временное сопротивление разрыву $\sigma_b$ , МПа	литая	160–200
	отожженная	200–250
	холоднокатаная	400–490
Относительное удлинение $\delta$ , %	литая	25–15
	отожженная	50–30
	холоднокатаная	14–4
Предел текучести $\sigma_{0,2}$ , МПа	отожженная	59

Механические свойства меди в большой степени зависят от содержащихся в ней примесей, которые можно разделить на три группы:

- 1) примеси Zn, Sb, Sn, As, Fe, Ni и другие, образующие с медью твердые растворы;
- 2) примеси Pb, Be и другие, образующие легкоплавкие эвтектики;
- 3) примеси S и O<sub>2</sub>, образующие хрупкие химические соединения.

Наиболее вредными примесями являются примеси второй группы, которые, располагаясь по границам зерен, при нагревании оплавляются, что приводит к резкому снижению механических свойств при повышенных температурах ( $> 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Присутствие примесей третьей группы также нежелательно ( $\text{Cu}_2\text{O}$  и  $\text{CuS}$  – хрупкие соединения). Присутствие в меди примесей первой группы практического влияния на ее свойства не оказывает.

Медь обладает очень высокой пластичностью и поэтому хорошо куется, прокатывается в прутки, ленту, фольгу, протягивается в проволоку, причем в большинстве случаев обработку меди можно вести в холодном состоянии с промежуточными отжигами для снятия внутренних напряжений, возникающих при ее деформации. Межоперационные отжиги меди Моб проводят при  $600\text{--}650\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а меди МВ при  $400\text{--}450\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Время отжига определяется в зависимости от массы и конфигурации деталей.

В зависимости от способа получения и обработки микроструктура меди может иметь вид, показанный на рис. 1.1. В литом состоянии (рис. 1.1, а) медь имеет полиэдрическую зернистую структуру. Микроструктура холоднодеформированной меди (рис. 1.1, б) представляет собой зерна, вытянутые вдоль направления прокатки. После рекристаллизационного отжига форма зерен восстанавливается, а в теле зерна появляются двойники (рис. 1.1, в).

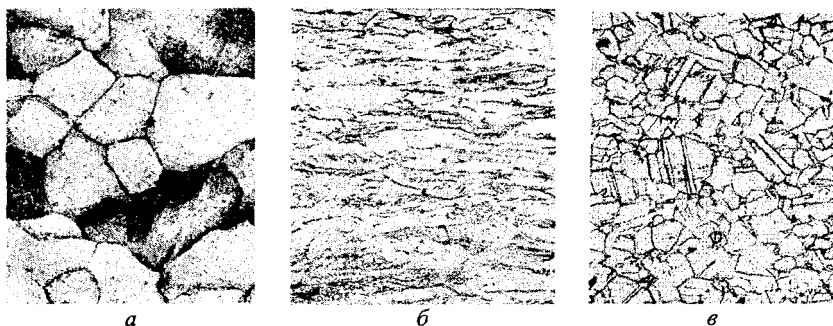


Рис. 1.1. Микроструктура меди

**Применение.** Широкое применение меди в промышленности обусловлено рядом ее ценных свойств, более 50 % меди используется для изготовления проводов, кабелей, шин, токопроводящих частей электрических установок. Из меди изготавливают теплообмен-

ную аппаратуру (вакуумные испарители, подогреватели, холодильники). Более 30 % меди применяют в виде сплавов, важнейшие из которых – бронзы, латуни, мельхиор и др.

## 2. Латунь

**Латуни** – двойные многокомпонентные медные сплавы с основным легирующим элементом – цинком. По сравнению с медью обладает более высокой прочностью и коррозионной стойкостью.

Система Cu-Zn (медь-цинк) относится к случаю ограниченной растворимости компонентов в твердом состоянии (рис. 1.2). Сложная на первый взгляд диаграмма построена из пяти простых диаграмм третьего рода с перитектическим превращением. Компоненты образуют шесть различных твердых растворов электронного типа, указываемых в порядке увеличения содержания цинка  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ -,  $\delta$ -,  $\epsilon$ -,  $\eta$ -твердыми растворами, где

$\alpha$ -фаза – твердый раствор цинка в меди с кристаллической решеткой меди ГЦК;

$\beta$ -фаза – твердый упорядоченный раствор на основе электронного соединения  $\text{CuZn}$  (3/2);

$\gamma$ -фаза – твердый с ОЦК решеткой раствор  $\text{Cu}_5\text{Zn}_8$  (21/13);

$\epsilon$ -фаза – твердый раствор  $\text{CuZn}_3$  (7/4).

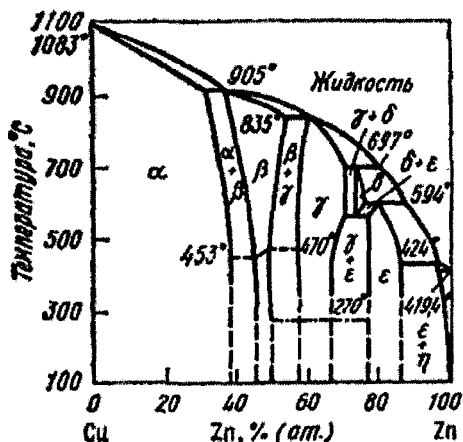


Рис. 1.2. Диаграмма состояния Cu-Zn

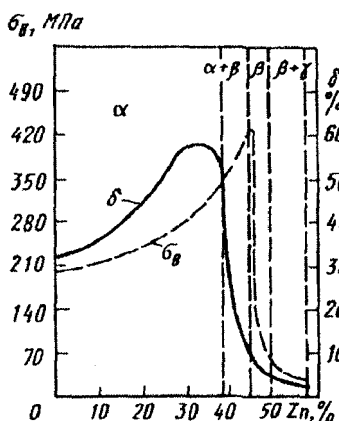


Рис. 1.3. Механические свойства латуни



Структура и свойства двойной латуни изменяются в зависимости от процентного содержания цинка (рис. 1.3).

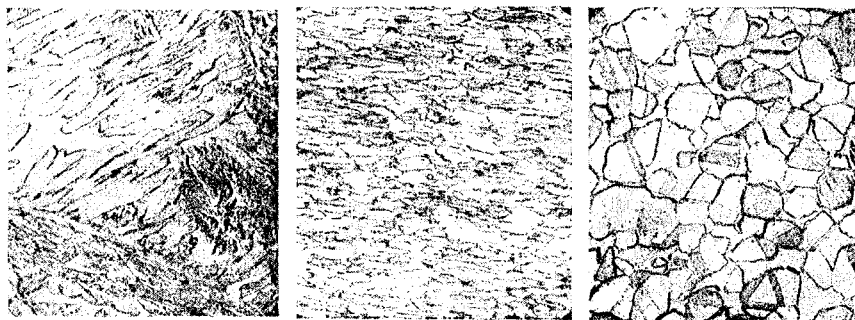
При содержании цинка до 39 % в сплаве образуется твердый раствор цинка в меди –  $\alpha$ -фаза, которая обладает хорошей пластичностью, увеличивающейся с повышением концентрации цинка. Максимальную пластичность сплав имеет при содержании цинка около 37 %. Микроструктура литой однофазной латуни имеет дендритное строение (рис. 1.4, а). После обработки давлением в холодную зерна  $\alpha$ -фазы вытягиваются в направлении прокатки, образуя полосчатую структуру (рис. 1.4, б). Последующий рекристаллизационный отжиг восстанавливает зернистую структуру латуни, в зернах  $\alpha$ -фазы отмечается наличие двойников (рис. 1.4, в).



Рис. 1.4. Микроструктура однофазной латуни Л68

При увеличении содержания цинка от 37 % до 45 % избыток его начинает реагировать с медью, образуя соединение  $\text{CuZn}$ . В результате в сплавах появляется новая  $\beta$ -фаза (примерно до 45 % цинка). При этом пластичность падает, а прочность возрастает, поэтому данные сплавы обрабатываются лишь в горячем состоянии.

Микроструктура литой двухфазной  $\alpha+\beta$ -латуни состоит из темных зерен  $\alpha$ -фазы на светлом фоне  $\beta$ -фазы (рис. 1.5, а). При деформации происходит сильная ориентация зерен  $\alpha$ -фазы в направлении прокатки вследствие ее большей пластичности (рис. 1.5, б). После отжига в результате медленного охлаждения происходит выделение и рост зерен  $\alpha$ -фазы с двойниками в  $\beta$ -матрице (рис. 1.5, в).



а б в  
Рис. 1.5. Микроструктура двухфазной  $\alpha+\beta$ -латуни Л59

При большем содержании цинка (свыше 45 %) полностью исчезает  $\alpha$ -фаза и латунь становится опять однофазной, имея структуру  $\beta$ -твердого раствора. Переход латуни в однофазное состояние вызывает резкое снижение прочности. В технике используются сплавы с содержанием цинка до 45 %.

Максимальную пластичность имеет латунь, содержащая около 32 % Zn ( $\delta = 55$  %), а максимальную прочность – латунь, содержащая около 43 % Zn ( $\sigma_b = 350$  МПа).

Латуни, за исключением свинцовосодержащих, легко поддаются обработке давлением в холодном и горячем состоянии. Все латуни хорошо паяются твердыми и мягкими припоями.

По технологическому признаку латуни подразделяют на деформируемые (обрабатываемые давлением) и литейные. Литейные латуни обладают хорошими литейными свойствами, малой склонностью к ликвации, хорошей жидкотекучестью и др.

Деформируемые латуни маркируют буквой Л и цифрой, показывающей среднее содержание меди в процентах: Л96, Л90, Л85, Л69. Для обозначения многокомпонентных латуней, обрабатываемых давлением, за буквой Л ставятся другие буквы, указывающие на наличие легирующих элементов (А – алюминий, Б – бериллий, Ж – железо, К – кремний, Мц – марганец, Н – никель, О – олово, С – свинец, Ц – цинк, Ф – фосфор) и через тире после содержания меди указывают содержание легирующих элементов в процентах. Например, латунь марки ЛА77-2 имеет следующий состав: 77 % меди, 2 % алюминия, остальное – цинк. Марки и применение латуней приведены в табл. 1.2.

## Марки латуней

Марка	Применение
Простые латуни	
Л96	Трубки радиаторные, листы, ленты
Л80	Трубки, лента, проволока
Л68	Листы, ленты для глубокой вытяжки
ЛС59-1	Листы, трубы, литье
Сложные латуни	
ЛА77-2	Трубы в морском и общем машиностроении
ЛО70-1	Трубы подогревателей
ЛА67-2,5	Отливки в машиностроении
ЛМцЖ55-3-1	Массивное литье
ЛмцОС58-2-2-2	Шестерни, зубчатые колеса
ЛЦ38Мц2С2	Антифрикционные детали
ЛЦ16К4	Арматура, работающая в морской воде
Сложнолегированные латуни повышенной прочности и коррозионной стойкости	
ЛАН59-3-2	Трубы, тяжело нагруженные детали в моторо- и судостроении
ЛАЖ60-1-1	

Литейные латуни (ЛЦ40С, ЛЦ30А3, ЛЦ40АЖ) содержат те же элементы, что и деформируемые, но, как правило, в большем количестве. В марках литейных латуней указывается содержание цинка, а количество каждого легирующего элемента ставится непосредственно за буквой, обозначающей его название. Например, латунь ЛЦ40Мц3А содержит 40 % цинка, 3 % марганца, около 1 % алюминия, остальное – медь.

### 3. Бронза

Бронзами называют медные сплавы с алюминием, оловом, свинцом, кремнием, цинком и другими элементами, в которых цинк не является основным легирующим элементом. По сравнению с латунями бронзы обладают более высокой прочностью, коррозионной стойкостью и антифрикционными свойствами. Они весьма стойки

на воздухе, в морской воде, растворах большинства органических кислот, углекислых растворах.

Бронзы подразделяются на деформируемые и литейные. Деформируемые бронзы маркируют буквами Бр, за которыми следуют буквы, обозначающие название легирующих элементов, а затем цифры, показывающие их содержание в процентах. Например, бронза БрОЦС4-2-2,5 содержит 4 % олова, 4 % цинка, 2,5 % свинца, остальное – медь. В марках литейных бронз содержание каждого легирующего элемента ставится сразу же после буквы, обозначающей его название. Например, бронза БрО10Ц2 содержит 10 % олова, 2 % цинка, остальное – медь.

Литая двухфазная бронза имеет дендритную структуру, состоящую из светлых участков  $\alpha$ -фазы (твердого раствора легирующего элемента в меди) и темных участков эвтектоидной смеси  $\alpha$ -фазы и химического соединения (рис. 1.6, а). Микроструктура деформированной (рис. 1.6, б) и отожженной (рис. 1.6, в) двухфазной бронзы аналогична описанным выше структурам двухфазной латуни.

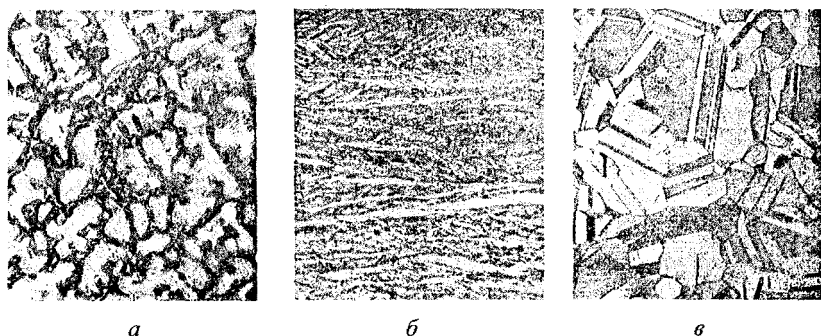


Рис. 1.6. Микроструктура алюминиевой бронзы

Бронзы в зависимости от содержания основных элементов подразделяются на алюминиевые, кремнистые, бериллиевые, оловянные и свинцовистые.

Алюминиевые бронзы БрА5, БрА7, БрАМц9-2 применяют для изготовления лент, полос труб. Бронзы БрАЖН10-4-4, БрАЖН11-6-6 применяют для фасонного литья. Марганцовистая бронза БрМц5 сохраняет свои механические свойства при повышенных температурах (400–450 °С) и применяется для изготовления направляющих втулок,

седел клапанов, выпускных клапанов и др. Свинцовистая бронза БрС-30 обладает высокими антифрикционными свойствами и применяется для сильно нагруженных подшипников с большими удельными давлениями (например, коренные подшипники турбин). Бериллиевая бронза БрБ-2 после закалки (820 °С) и старения (300 °С) имеет следующие свойства: НВ 400,  $\sigma_b = 1200-1300$  МПа и применяется для изготовления пружин, мембран и инструментов. Марки и применение бронз приведены в табл. 1.3.

Таблица 1.3

### Марки бронз

Марка	Применение
Оловянные бронзы	
БрОФ6,5-0,15	Ленты, мембраны, пружины, детали работающие на трение
БрОЦ4-3	
БрОЦ10-2	Шестерни, втулки, подшипники
БрОФ10-1	Те же детали, пластичность сплавов выше
БрОНС11-4-3	Те же детали, изделия, работающие при нагреве (втулки клапанов)
Алюминиевые бронзы	
БрА5	Ленты, полосы, пружины
БрАЖ9-4	Шестерни, втулки, арматура, детали, работающие в морской воде
БрАЖН10-4-4	Те же детали, работающие при больших давлениях и трении
Кремнистые бронзы	
БрКМц3-1	Пружины, втулки, детали авиации и химической промышленности
БрКН1-3	Втулки, клапаны, болты
Бериллиевые бронзы	
БрБ2	Высокопрочные и токоведущие пружины, мембраны, сильфоны
БрБНГ1,7	
БрБНГ1,9	
БрБНГ1,9Мг	

### Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с краткими сведениями о меди и ее сплавах.
2. В соответствии с методикой металлографического анализа исследовать и зарисовать микроструктуру меди и ее сплавов под микроскопом.

3. В соответствии с методикой измерения твердости провести испытание меди и ее сплавов.

4. Составить отчет.

### Содержание отчета

1. Название, цель и задачи работы.
2. Применяемое оборудование и материалы.
3. Краткое описание сведений о меди и ее сплавах.
4. Зарисовка микроструктуры образца и ее описание.
5. Заполненная таблица с результатами измерения твердости.

### Контрольные вопросы

1. Какие марки меди используются в компрессорной и вакуумной технике?
2. Медь какой марки (М0 или М4) имеет больше примесей?
3. Какими благоприятными свойствами обладает медь?
4. Какую структуру имеет литая, деформированная и отожженная медь?
5. Какие сплавы называются латунями?
6. Как влияет цинк на свойства и фазовый состав латуней?
7. Как классифицируются латуни по технологическому признаку?
8. Как маркируют деформируемые латуни?
9. Как маркируют литейные латуни?
10. Какую структуру имеет литая, деформированная и отожженная однофазная латунь?
11. Чем отличается структура двухфазных и однофазных латуней?
12. Какие сплавы называются бронзами?
13. Как классифицируются бронзы по технологическому признаку и по содержанию легирующих элементов?
14. Как маркируют деформируемые бронзы?
15. Как маркируют литейные бронзы?
16. Какую структуру имеет литая, деформированная и отожженная бронза?
17. Где применяется медь, латунь и бронза?
18. Расшифруйте сплав Л86, ЛЦ38Мц2С2, БрА5, БрО5Ц5С5, БрОНС11-4-3.

## Лабораторная работа № 2

### Исследование структуры и свойств алюминия и его сплавов

#### Цель работы

1. Изучить микроструктуру, свойства, маркировку и область применения алюминия и его сплавов.
2. Освоить методики проведения металлографического анализа и испытания механических свойств алюминия и его сплавов.

#### Задачи работы

1. Сформировать представление о микроструктуре, свойствах, маркировке и области применения алюминия и его сплавов.
2. Ознакомиться с методикой приготовления микрошлифов, их травления и исследования структуры под микроскопом.
3. Освоить методику измерения твердости по Бринеллю и Роквеллу.

#### Оборудование и материалы

1. Набор металлических образцов алюминия и его сплавов.
2. Машина шлифовально-полировальная.
3. Бумага шлифовальная, алмазная паста, полировальная смесь, травитель.
4. Микроскоп металлографический МИ-1.
5. Твердомер Импульс-2М.

#### Общие сведения об алюминии и его сплавах

##### 1. Алюминий

Алюминий (лат. Aluminium) – химический элемент III группы периодической системы, обозначается символом Al, имеет атомный номер 13 и атомную массу 26,98154. Температура его плавления составляет 660 °С.

Алюминий обладает следующими свойствами: малой плотностью (2,7 г/см<sup>3</sup>), сравнительно высокими прочностными характери-

стиками, хорошей тепло- и электропроводностью, технологичностью, высокой коррозионной стойкостью, нетоксичностью. Совокупность этих свойств позволяет отнести алюминий к числу важнейших технических материалов.

В табл. 2.1 приведены физико-механические и другие свойства алюминия.

Таблица 2.1

Основные свойства алюминиевых сплавов

Плотность, кг/м <sup>3</sup>	2,7·10 <sup>3</sup>
Температура плавления $T$ , °C	660
Теплопроводность, Вт/(м·К)	1,24·10 <sup>-3</sup>
Температурный коэффициент линейного расширения при 20 °C $\alpha$ , 1/°C	24,58·10 <sup>-6</sup>
Временное сопротивление разрыву $\sigma_{\text{в}}$ , МПа	отожженного 50–80 холоднокатаного 115–170
Относительное удлинение $\delta$ , %	отожженного 30–50 холоднокатаного 2–8
Предел текучести $\sigma_{0,2}$ , МПа	отожженного 20–40 холоднокатаного 110–140
Твердость по Бринеллю, НВ	отожженного 17–25 холоднокатаного 27–40
Удельное электросопротивление, мкОм·м	0,0265

В настоящее время металлургическая промышленность выпускает полуфабрикаты из алюминия самого различного назначения (табл. 2.2).

Таблица 2.2

Полуфабрикаты из алюминия и их назначение

Марка сплава	Содержание примесей	Применение
Особая чистота		
сплав А999	0,001	Электротехническая промышленность
Химическая чистота		
сплав А995	0,005	Электротехническая промышленность
сплав А99	0,01	
сплав А97	0,03	
сплав А95	0,05	



Марка сплава	Содержание примесей	Применение
Техническая чистота		
сплав А85	0,15	Электротехническая промышленность
сплав А8	0,2	
сплав А7	0,3	
сплав А6	0,4	
сплав А5	0,5	
сплав А0	1,0	
сплав А	1,0	
сплав АЕ	0,5	
Полуфабрикатный технический алюминий		
сплав АД	1,2	Для изготовления полуфабрикатов (листов, лент, полос, плит, профилей, панелей, прутков, труб, проволоки, штамповок и поковок) методом горячей или холодной деформации, а также слитков и слябов
сплав АД0	0,5	
сплав АД00	0,3	
сплав АД000		
сплав АД00Е		
сплав АД0Е		
сплав АД1	0,7	
сплав АДоч		
сплав АДс		
сплав АДч		

В зависимости от содержания примесей различают марки алюминия особой, химической и технической чистоты. Кроме того, промышленность выпускает полуфабрикатный технический алюминий, обозначаемый буквами АД и цифрами в зависимости от содержания примесей. Основными примесями алюминия являются железо, кремний, медь, цинк, титан и т. д., они оказывают вредное влияние на его свойства и структуру (рис. 2.1).

В микроструктуре алюминия с примесями наблюдаются выделения хрупких интерметаллических фаз (рис. 2.1, б), снижающих его физико-механические свойства. Чем алюминий чище, тем выше его коррозионная стойкость, пластичность, электро- и теплопроводность и тем ниже прочность и твердость. Так, литой алюминий высокой чистоты марки А955 (суммарное количество примесей 0,005 %) имеет предел прочности при растяжении 50 МПа, относительное удлинение 45 %, твердость по Бринеллю 15 НВ. У алюминия марки

А0 (сумма примесей 1 %) те же характеристики равны соответственно 90 МПа, 30 % и 25 НВ.

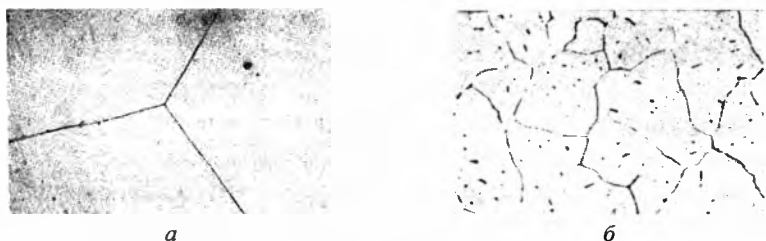


Рис. 2.1. Микроструктура слитков алюминия различной чистоты:  
*а* – высокой; *б* – технической

Из алюминия методами горячей или холодной деформации изготавливают различные полуфабрикаты (лист, лента, полоса, плита, профиль, пруток, труба, проволока и т. д.).

В зависимости от способа производства полуфабрикаты из алюминия могут быть в горячекатаном (рис. 2.2, *а*), отожженном (рис. 2.2, *б*) и нагартованном (рис. 2.2, *в*) состоянии. Микроструктура горячекатаного и нагартованного алюминия имеет вид вытянутых в направлении прокатки зерен твердого раствора с вкраплениями интерметаллидных фаз. После отжига в результате рекристаллизации происходит восстановление формы зерен и их рост, причем чем чище алюминий, тем интенсивнее происходит этот процесс.

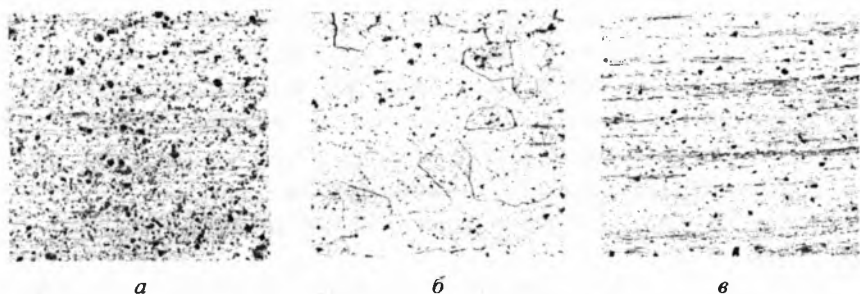


Рис. 2.2. Микроструктура алюминия:  
*а* – лист горячекатанный; *б* – лист отожженный; *в* – лист нагартованный

Алюминий и сплавы на его основе находят все более широкое применение в машиностроении при изготовлении различного рода элементов и конструкций. Алюминий в вакуумной технике приме-

няется в тех случаях, когда должно отсутствовать катодное распыление металла, для изготовления катодов ионных рентгеновских трубок и катодных осциллографов, для электродов высоковольтных разрядников, для катодов трубок Гейслера (трубки для контроля вакуума), осветительных ламп и выпрямителей тлеющего разряда. Алюминий из-за малого веса и незначительного рентгеновского излучения при электронной бомбардировке используют в высоковольтных электронно-лучевых приборах для изготовления отклоняющих пластин и диафрагм. Благодаря малому поглощению рентгеновского излучения алюминиевая фольга или жесть используется для изготовления окошек разборных рентгеновских трубок.

## 2. Сплавы алюминия

В настоящее время алюминиевые сплавы являются важнейшими конструкционными материалами, применяемыми в различных областях техники.

В качестве основных легирующих элементов в алюминиевых сплавах применяют Cu, Mg, Si, Mn, Zn, несколько реже используют Ni, Li, Ti, Be, Zr и др.

Промышленные алюминиевые сплавы базируются на ряде многокомпонентных систем: Al-Si, Al-Mg, Al-Cu, Al-Cu-Mg, Al-Cu-Mn, Al-Cu-Li, Al-Mg-Si, Al-Be-Mg, Al-Zn-Mg-Cu, Al-Mg-Si-Cu и др.

Для физико-химического взаимодействия алюминия с легирующими элементами (за исключением Zn) характерна низкая растворимость их в алюминии, зависящая от температуры. В условиях равновесия сплавы состоят из низколегированного твердого раствора и интерметаллидных фаз типа:  $\text{CuAl}_2$  ( $\theta$ -фаза),  $\text{Al}_2\text{Mg}_3\text{Zn}_3$  (T-фаза),  $\text{Al}_2\text{CuMg}$  (S-фаза),  $\text{Mg}_2\text{Si}$ ,  $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  и других.

Алюминиевые сплавы классифицируются:

- 1) по технологии изготовления (деформируемые, литейные, порошковые);
- 2) способности к упрочнению термической обработкой (упрочняемые и неупрочняемые);
- 3) физико-механическим свойствам (коррозионно-стойкие, жаропрочные, высокопрочные, ковочные, герметичные и др.).

Разделение сплавов по технологии изготовления и способности к упрочнению термической обработкой происходит в зависимости от

содержания легирующих элементов в сплаве. Данная зависимость описывается диаграммой состояния «алюминий – легирующий элемент» (рис. 2.3).

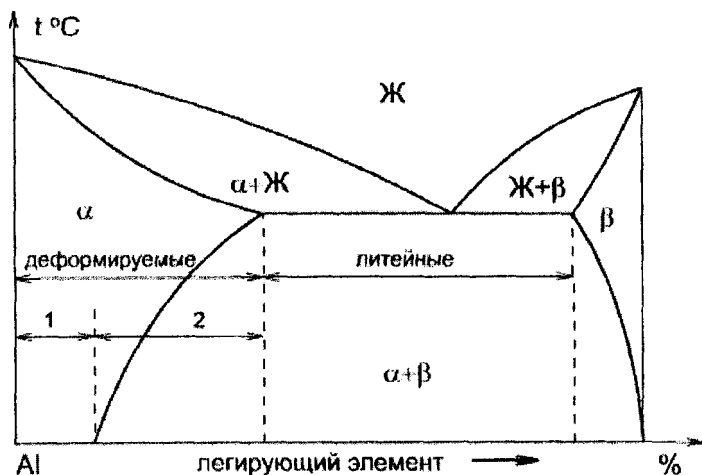


Рис. 2.3. Диаграмма «алюминий – легирующий элемент»: 1 – сплавы неупрочняемые; 2 – упрочняемые термической обработкой

### Маркировка алюминиевых сплавов

В настоящее время применяется сложная буквенно-цифровая система маркировки алюминиевых сплавов.

Деформируемые сплавы маркируются следующим образом:

АД – деформируемый алюминий, например АД0;

Д – дуралюмины, например Д1;

АК – ковочные алюминиевые сплавы, например АК6;

АМг – сплавы алюминия с магнием, например АМг6;

АМц – сплавы алюминия с марганцем;

АВ – авиали;

В – высокопрочные сплавы, например В95.

Литейные сплавы маркируются буквами АЛ, например АЛ33.

Цифры, следующие за буквами в маркировке дуралюминов, высокопрочных сплавов и деформируемого алюминия, обозначают систему легирования. В сплавах АМц, АМг цифры указывают на содержание легирующего элемента в процентах. Дополнительная

цифра в обозначениях сплавов типа АК6-1 обозначает, что это новый сплав близкий по модификации к старому АК6.

Кроме того, в маркировке сплавов после цифрового обозначения применяется дополнительная буквенная символика, указывающая на технологические свойства сплава, например:

– содержание примесей обозначается буквами «пч» (повышенной чистоты), «ч» (чистый), «оч» (очень чистый);

– состояние деформируемых сплавов отражается следующими обозначениями: М – мягкий, отожженный; Т – закаленный и естественно состаренный; Т1 – закаленный и искусственно состаренный на максимальную прочность; Н – нагартованный (деформация 1–7 %); Н1 или НН – усиленно нагартованный (деформация 20 %); ТН – закаленный, естественно состаренный и нагартованный;

– состояние литейных сплавов отражается следующими обозначениями: З – литье в песчаные формы; В – литье по выплавляемым моделям; О – литье в оболочковые формы; К – литье в кокили; Д – литье под давлением; М – модифицированное литье; Т1 – старение; Т2 – отжиг; Т4 – закалка; Т5 – закалка и частичное старение; Т6 – закалка и полное старение; Т7 – закалка и стабилизирующий отпуск; Т8 – закалка и смягчающий отпуск.

В последние годы начинает широко применяться единая международная четырехцифровая система маркировки сплавов. Единица, стоящая в начале марки, характеризует основу сплава – алюминий. Вторая цифра обозначает систему легирования сплава. Третья цифра – содержание легирующих элементов. Четвертая цифра обозначает: если стоит нечетное число или ноль, то сплав деформируемый; четная цифра – литейный сплав; цифра 7 – проволочный сплав; 9 – спеченный сплав. Опытные сплавы обозначаются цифрой 0, ставящейся в начале марки, перед единицей.

### **3. Деформируемые алюминиевые сплавы**

По физико-химическим и технологическим свойствам все деформируемые алюминиевые сплавы можно разделить на следующие группы:

1) малолегированные, термически не упрочняемые коррозионно-стойкие сплавы на основе систем Al-Mn и Al-Mg;

2) сплавы системы Al-Cu-Mg, дуралюмины (Д1, Д9, Д16 и др.);

- 3) жаропрочные сплавы системы Al-Mg-Ni-Cu-Fe (AK4-1);
- 4) сплавы систем Al-Mg-Si; Al-Mg-Si-Cu-Mn (AB, AK6, AK8);
- 5) высокопрочные сплавы системы Al-Zn-Mg-Cu (B95).

*Малолегированные коррозионно-стойкие сплавы* на основе систем Al-Mn (магналий) и Al-Mg.

Марганец, в отличие от остальных элементов, не только не ухудшает коррозионной стойкости алюминиевого сплава, но даже несколько повышает ее. Магний является полезным легирующим элементом. Не считая повышения коррозионного сопротивления, магний уменьшает удельный вес алюминиевого сплава (так как он легче алюминия), повышает прочность, не снижая пластичности. Поэтому алюминиевые сплавы получили распространение как более прочные и легкие, чем чистый алюминий.

Сплавы типа АМц, АМг2, АМг6 не упрочняются термической обработкой. Они отличаются высокой пластичностью, хорошей свариваемостью и высокой коррозионной стойкостью. Обрабатываемость резанием улучшается с увеличением степени легирования сплавов. Сплавы используются в отожженном, нагартованном и полунангартованном состояниях.

Применяются для изделий, получаемых глубокой вытяжкой, сваркой, от которых требуется высокая коррозионная стойкость. В качестве конструкционных материалов используются для изготовления вакуумных камер, корпусов вакуумной запорной арматуры, вакуумных трубопроводов и др.

*Дуралюмины* (сплавы системы Al-Cu-Mg-Mn) Д1, Д16, Д18, Д19, ВД17. Упрочняются термической обработкой. Характеризуются хорошим сочетанием прочности и пластичности. Применяются: Д1 – для лопастей винтов, узлов креплений, строительных конструкций; Д16 – для силовых элементов конструкций самолетов, кузовов грузовых автомобилей, буровых труб и др.; Д19 – для тех же деталей, что и из сплава Д16, но работающих при нагреве до 200–250 °С; В65, Д18 – для заклепок; ВД17 – для лопаток компрессора двигателей, работающих при температуре до 250 °С. Сплавы Д1, Д16 в искусственно состаренном состоянии имеют улучшенную коррозионную стойкость, которая не снижается при повышенных температурах эксплуатации деталей, и более высокие прочностные свойства. Все дуралюмины удовлетворительно обрабатываются резанием в закаленном и состаренном состояниях.

**Термическая обработка дуралюминов.** Большинство промышленных дуралюминов содержат около 4 % Cu, до 2,5 % Mg, менее 1 % Mn. Кроме того, в сплавах присутствуют небольшие количества постоянных примесей – Fe и Si. Структура дуралюминов в отожженном состоянии представлена  $\alpha$ -твердым раствором легирующих элементов в Al и включениями интерметаллических фаз:  $\text{CuAl}_2$  ( $\theta$ -фаза),  $\text{CuMgAl}_2$ ,  $\text{Cu}_2\text{AlFe}$ ,  $\text{Mg}_2\text{Si}$  и других.

Поскольку в дуралюминах медь является главным легирующим элементом для обоснования фазовых и структурных превращений, протекающих в сплавах при термообработке, можно использовать диаграмму состояния Al-Cu (рис. 2.4).

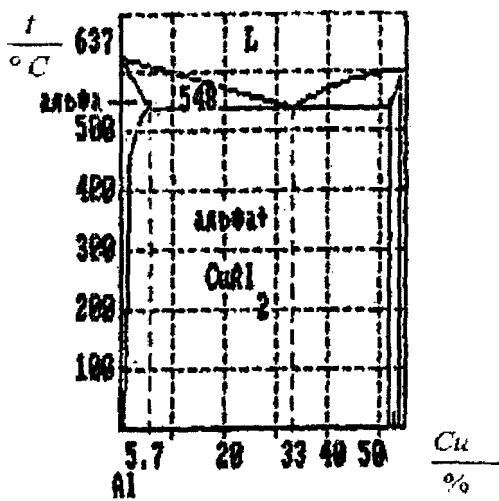


Рис. 2.4. Диаграмма состояния «алюминий – медь»

Из диаграммы видно, что растворимость меди в алюминии зависит от температуры и меняется от 0,5 % при 20 °C до 5,7 % при температуре эвтектики (548 °C). Поэтому при нагреве дуралюминов до температур закалки ( $500 \pm 5$  °C) вторичные фазы  $\text{CuAl}_2$ ,  $\text{CuMgAl}_2$  растворяются в алюминии и сплав переходит в однофазное состояние ( $\alpha$ -твердый раствор) и фиксируется при быстром охлаждении. Свежие закаленные дуралюмины имеют невысокую твердость и прочность, но повышенную пластичность, несколько ниже чем в отожженном состоянии.

Сформировавшийся пересыщенный  $\alpha$ -твердый раствор является метастабильным и при длительном пребывании в области нормальных температур (естественном старении) или при сравнительно непродолжительном нагреве (искусственном старении) изменяет свое состояние, приближаясь к равновесному. Превращения при старении приводят к значительным изменениям свойств сплава: возрастают прочность и твердость при заметном понижении пластичности (рис. 2.5).

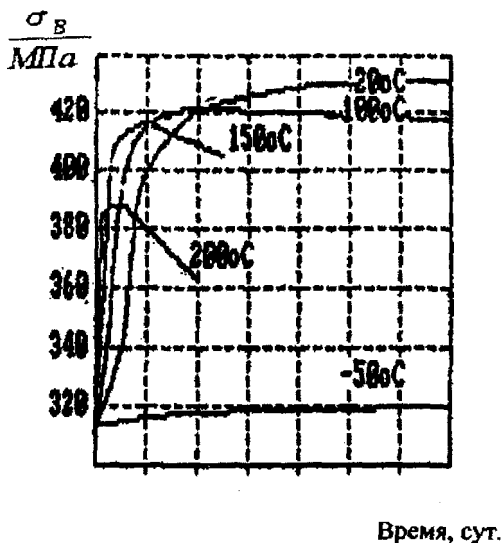


Рис. 2.5. Изменение прочности сплавов системы Al-Cu в зависимости от температуры и продолжительности старения

В процессе старения, на его начальной стадии, атомы легирующих элементов (в сплавах системы Al-Cu — атомы меди), расположенные в свежезакаленном сплаве случайно, собираются в определенных местах кристаллической решетки, образуя участки с резко повышенной концентрацией растворенного компонента, называемые зоны Гинье-Престона (зоны Г-П).

В результате естественного старения образуются зоны толщиной от 0,5 до 1 мм и протяженностью от 3 до 6 нм (их называют зоны Г-П-1), вызывая упрочнение сплава.

Если естественно состаренный сплав подвергнуть кратковременному нагреву до температуры 250–270 °С, то зоны Г-П растворятся



и сплав возвратится в свежезакаленное состояние с характерными для него свойствами (низкой твердостью и высокой пластичностью). Это явление получило название возврат. После возврата сплав может быть вновь упрочнен при естественном или искусственном старении.

При искусственном старении зоны Г-П укрупняются, достигая от 1 до 4 нм по толщине и от 20 до 30 нм по протяженности (зоны Г-П-2). Концентрация меди в них приближается к стехиометрическому соотношению в соединении  $\text{CuAl}_2$ .

Дальнейшее развитие процессов искусственного старения приводит к преобразованию зон Г-П-2 в частицы промежуточной  $\theta$ -фазы с кристаллической решеткой, когерентно связанной с  $\alpha$ -твердым раствором. При дальнейшем повышении температуры  $\theta$ -фаза обособливается от твердого раствора и коагулирует.

Скорость искусственного старения сильно зависит от температуры, ее повышение ускоряет процесс, но при этом невозможно достичь максимальной прочности. Наибольшее упрочнение получают при естественном старении.

**Жаропрочные сплавы** типа АК4-1 системы Al-Cu-Mg-Fe-Ni по химическому и фазовому составам весьма близки к дуралюминам, но вместо марганца в качестве легирующих элементов содержат железо и никель. Жаропрочность достигается за счет легирования путем затормаживания диффузионных процессов и образования сложнлегированных мелкодисперсных упрочняющих фаз, устойчивых к коагуляции при нагреве. Сплавы хорошо деформируются в горячем состоянии; коррозионная стойкость удовлетворительная. Сплавы отличаются высокой износостойкостью (низкий коэффициент трения).

Сплав АК4-1 используется для изготовления деталей реактивных двигателей (крыльчатые насосы, колеса, компрессоры, заборники, диски, лопатки).

**Сплавы системы Al-Mg-Si** (АВ, АД31, АД33), упрочняемые закалкой и искусственным старением. Эти сплавы вне зависимости от состояния материала не склонны к коррозионному растрескиванию под напряжением. Они удовлетворительно обрабатываются резанием в закаленном и состаренном состоянии, а также свариваются с помощью точечной, шовной и аргонодуговой сварки.

Ковочные сплавы АК6, АК8 системы Al-Mg-Si-Cu обладают хорошей пластичностью и стойкостью к образованию трещин при го-

рячей пластической деформации. Сплав АК6 применяют для изготовления сложных штамповок (компрессоров реактивных двигателей, крепежных деталей).

**Высокопрочные сплавы** В95, В93, В96Ц1 системы Al-Zn-Mg-Cu отличаются высоким временным сопротивлением 600–700 МПа и близким к нему по значениям пределом текучести.

Микроструктура деформируемых алюминиевых сплавов в зависимости от обработки показана на рис. 2.6.

В литом состоянии (рис. 2.6, а) структура алюминия представляет собой дендриты твердого раствора на основе алюминия и залегающие между их ветвями прослойки из различных интерметаллических соединений. С целью получения более однородной структуры и повышения пластичности алюминиевые слитки подвергают гомогенизирующему отжигу. При этом происходит выравнивание концентрации твердого раствора по зерну, растворение упрочняющих фаз и частичная коагуляция нерастворимых соединений (рис. 2.6, б).

Микроструктура алюминиевых сплавов в горячекатаном (рис. 2.6, в), отожженном (рис. 2.6, г) и полунагартованном (рис. 2.6, д) состоянии аналогична структуре чистого алюминия за исключением более сильной дисперсности зерен.

В закаленном состоянии (рис. 2.6, е) деформируемые алюминиевые сплавы имеют однофазное состояние ( $\alpha$ -твердый раствор) иногда с остатками нерастворившихся интерметаллидных включений.

#### 4. Литейные алюминиевые сплавы

Для изготовления фасонных деталей применяют литейные алюминиевые сплавы, которые имеют низкую плотность и высокую удельную прочность.

По назначению конструкционные литейные алюминиевые сплавы можно условно разбить на следующие группы:

1) сплавы, отличающиеся высокой герметичностью АЛ2, АЛ4, АЛ9, ВАЛ8, АЛ9-1, АЛ34 (ВАЛ5), АЛ4М, АЛ32;

2) высокопрочные жаропрочные сплавы АЛ19, АЛ3, АЛ5, АЛ5-1, АЛ33;

3) коррозионно-стойкие сплавы АЛ8, АЛ22, АЛ24, АЛ27, АЛ27-1.

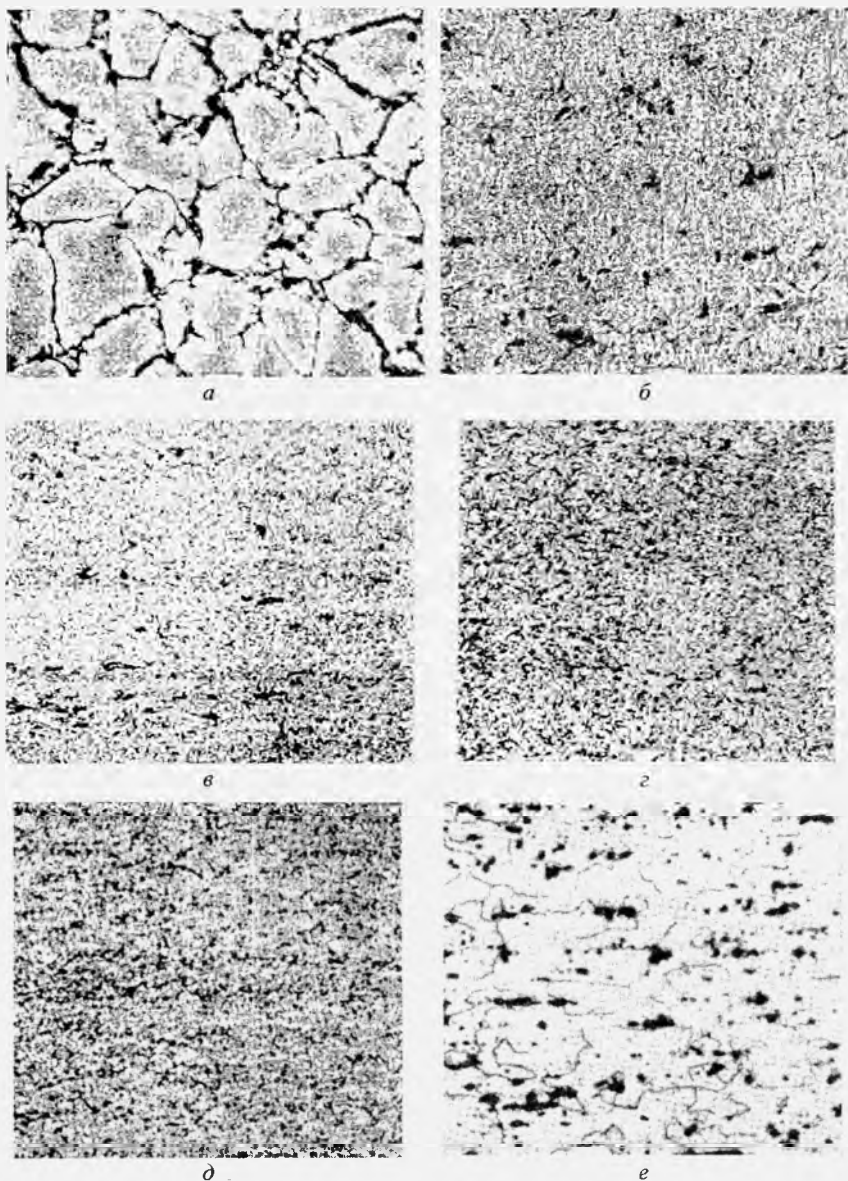


Рис. 2.6. Микроструктура деформируемых сплавов алюминия:  
*a* – литой; *б* – после гомогенизирующего отжига; *в* – горячекатаный;  
*г* – отожженный; *д* – полунагартованный; *е* – закаленный

Прочность большинства литейных алюминиевых сплавов можно повысить термической обработкой. Механические свойства литейных алюминиевых сплавов зависят не только от содержания легирующих компонентов, но и от содержания примесей. Важное значение в технологии приготовления и повышения свойств сплавов на основе системы Al-Si имеет процесс модифицирования, вызывающий повышение прочностных и особенно пластических свойств сплавов. Качество литейных алюминиевых сплавов определяется не только механическими свойствами, но и технологическими характеристиками: жидкотекучестью, степенью изменения механических свойств в зависимости от сечения отливки, герметичностью, склонностью к горячим трещинам и др.

**Конструкционные герметичные сплавы.** Сплавы АЛ2, АЛ4, АЛ9, АЛ34 на основе систем Al-Si и Al-Si-Mg силумины отличаются высокими литейными свойствами и герметичностью изготовленных из них отливок. Двойные сплавы Al-Si (АЛ2) не упрочняются термической обработкой; единственным способом повышения механических свойств является модифицирование. Легированные силумины (АЛ4, АЛ9) подвергаются термической обработке. У силуминов удовлетворительная коррозионная стойкость. Сплав АЛ2 рекомендуется для изготовления герметичных деталей, однако образование концентрированных усадочных раковин вызывает трудности при литье крупногабаритных и сложных по форме деталей. Сплавы АЛ4, АЛ9 применяют для средних и крупных литых деталей ответственного назначения: корпусов компрессоров, картеров двигателей внутреннего сгорания, турбинных колес турбохолодильников, вентиляторов и т. п.

Сплав АЛ34 относится к системе Al-Si-Mg, превосходит АЛ4 и АЛ9 по прочности на 25–50 %, имеет хорошие литейные свойства и отличается высокой герметичностью. Предназначен для литья крупных корпусных деталей, сложных по конфигурации и работающих под большим внутренним давлением газа или жидкости.

Микроструктура литых доэвтектических силуминов (рис. 2.7, а) состоит из светлых дендритов  $\alpha$ -твердого раствора Si в Al и двойной эвтектики  $\alpha$ +Si-игольчатого типа. Сплав эвтектического состава (рис. 2.7, б) имеет эвтектическую  $\alpha$ +Si-микроструктуру, которая

при обычном способе литья обладает грубым строением, а Si в ней находится в виде крупных игл.

Завзвтектические силумины (рис. 2.7, *в*) обладают эвтектической  $\alpha$ +Si-структурой с вкраплением частиц светло-серого цвета первичных многогранных кристаллов Si. Выделения кремний из-за своей хрупкости снижают механические свойства силуминов, поэтому чтобы предотвратить образование грубой эвтектики и первичных кристаллов Si, силумины модифицируют натрием, кальцием, бором. В результате модифицирования силумины завзвтектического состава, содержащие 11,7–15 % Si, становятся дозвтектическими, и в их структуре вместо первичных хрупких кристаллов кремния имеются дендриты пластического  $\alpha$ -твердого раствора, а эвтектика имеет мелкозернистую структуру (рис. 2.7, *г*).

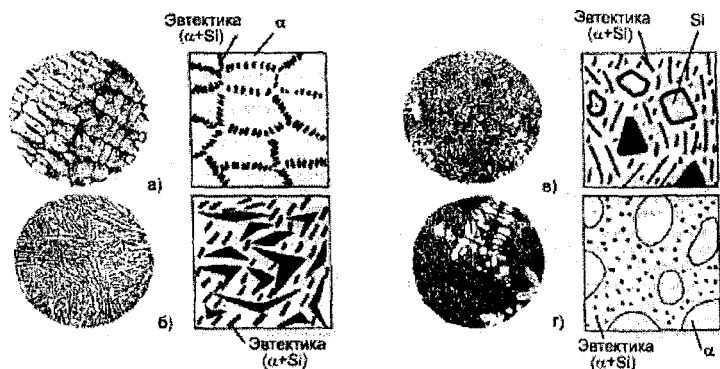


Рис. 2.7. Микроструктура силуминов:

*а* – дозвтектический; *б* – эвтектический; *в* – завзвтектический; *г* – модифицированный

### **Конструкционные высокопрочные и жаропрочные сплавы.**

Сплав АЛ19 относится к системе Al-Cu-Mn с добавкой титана до 0,35 %. Сплав характеризуется высокими механическими свойствами при температуре 20 °С и хорошей жаропрочностью, которая может быть повышена одновременным легированием церием (0,2 %) и цирконием (0,2 %). Сплав предназначен для крупногабаритных отливок, получаемых в основном литьем в песчаные формы, а также для изготовления ответственных деталей, работающих в условиях повышенных статических и ударных нагрузок при низких и повышенных температурах до 300 °С.

Сплав АЛ33 системы Al-Cu-Mn-Ni характеризуется высокой жаропрочностью при 300 °С, значительно превышающей жаропрочность отечественных и зарубежных литейных алюминиевых сплавов. Сплав предназначен для изготовления деталей, длительно работающих при температурах до 350 °С.

**Конструкционные коррозионно-стойкие сплавы.** Сплавы АЛ8, АЛ27, АЛ27-1 на основе системы Al-Mg обладают малой плотностью, высокой коррозионной стойкостью в атмосферных условиях, морской воде, в щелочных растворах, агрессивных средах на основе азотной кислоты, в растворах хлористых солей. Коррозионная стойкость этих сплавов выше, чем других литейных алюминиевых сплавов. Недостатком сплавов АЛ8, АЛ27 и АЛ27-1 является их низкая жаропрочность – уровень рабочих температур не должен превышать 80 °С. Сплавы применяют для изготовления силовых деталей, работающих при температурах от –60 до +60 °С, а в ряде случаев они могут быть использованы вместо дефицитных бронз, латуни, коррозионно-стойких сталей, для деталей, работающих в различных климатических условиях, включая воздействие морской воды и тумана.

### **Порядок выполнения работы**

1. Ознакомиться с краткими сведениями об алюминии и его сплавах.
2. В соответствии с методикой металлографического анализа исследовать и зарисовать микроструктуру алюминия и его сплавов под микроскопом.
3. В соответствии с методикой измерения твердости провести испытание алюминия и его сплавов.
4. Составить отчет.

### **Содержание отчета**

1. Название, цель и задачи работы.
2. Применяемое оборудование и материалы.
3. Краткое описание сведений об алюминии и его сплавах.
4. Зарисовка микроструктуры образца и ее описание.
5. Заполненная таблица с результатами измерения твердости.

## Контрольные вопросы

1. Какие марки алюминия вы знаете?
2. Алюминий какой марки (А999 или А95) имеет больше примесей?
3. Какими благоприятными свойствами обладает алюминий?
4. По каким признакам классифицируются сплавы алюминия?
5. Как маркируют деформируемые алюминиевые сплавы?
6. Как маркируют литейные алюминиевые сплавы?
7. Как классифицируются деформируемые алюминиевые сплавы?
8. Какой термообработке подвергают дуралюмины?
9. Что такое старение?
10. Чем отличается искусственное и естественное старение?
11. Что такое возврат?
12. Как классифицируются литейные алюминиевые сплавы?
13. Какие сплавы называют силуминами?
14. Что такое модифицирование и для чего его применяют?
15. Какая структура у деформируемых алюминиевых сплавов?
16. Какая структура у литейных алюминиевых сплавов?
17. Где применяется алюминий и его сплавы?

# Лабораторная работа № 3

## Исследование структуры и свойств коррозионно-стойких сталей

### Цель работы

1. Изучить микроструктуру, свойства, маркировку и область применения коррозионно-стойких сталей.
2. Освоить методики проведения металлографического анализа и испытания механических свойств коррозионно-стойких сталей.

### Задачи работы

1. Сформировать представление о микроструктуре, свойствах, маркировке и области применения коррозионно-стойких сталей.
2. Ознакомиться с методикой приготовления микрошлифов, их травления и исследования структуры под микроскопом.
3. Освоить методику измерения твердости по Бринеллю и Роквеллу.

### Оборудование и материалы

1. Набор металлических образцов коррозионно-стойких сталей.
2. Машина шлифовально-полировальная.
3. Бумага шлифовальная, алмазная паста, полировальная смесь, травитель.
4. Микроскоп металлографический МИ-1.
5. Твердомер Импульс-2М.

### Общие сведения о коррозионно-стойких сталях

Стали, устойчивые к электрохимической коррозии, называются коррозионно-стойкими (нержавеющими). Устойчивость стали к коррозии достигается введением в нее элементов, образующих на поверхности плотные, прочно связанные с основой защитные пленки, препятствующие непосредственному контакту стали с агрессивной средой, а также повышающие ее электрохимический потенциал в данной среде. Кроме того, нержавеющие стали всегда содержат элементы, сопутствующие железу в его сплавах (С, Si, Mn, S, P).



Коррозионная стойкость стали может быть повышена, если содержание углерода свести до минимума и ввести легирующий элемент, образующий с железом твердые растворы в таком количестве, при котором скачкообразно повысится электродный потенциал сплава (рис. 3.1). Таким основным легирующим элементом для нержавеющей стали является Cr.

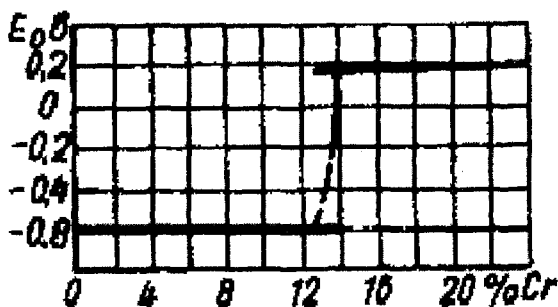


Рис. 3.1. Влияние хрома на электродный потенциал сплавов Fe-Cr

В зависимости от содержания Cr в стали изменяются ее коррозионные свойства, так при содержании Cr более 12 % сплавы являются коррозионно-стойкими в обычных условиях и в слабоагрессивных средах, более 17 % – коррозионно-стойкими в агрессивных окислительных и других средах, например, в азотной кислоте концентрацией до 50 %. Другие легирующие элементы, вводимые в сталь, могут улучшать или ухудшать антикоррозионные свойства сталей. Значительно улучшает антикоррозионные свойства нержавеющей стали никель, его добавляют в сплавы с присадками Mo, Cu, Si в различных сочетаниях. Такие сложно легированные материалы применяются для работы в сильных кислотах (серной, соляной, плавиковой, фосфорной) и их смесях в том числе и при повышенных температурах.

Марганец вводится в нержавеющие стали взамен никеля (полностью или частично) для обеспечения аустенитной структуры, придает стали несколько меньшую стойкость к коррозии, чем никель.

Для повышения сопротивления сталей межкристаллитной коррозии в нее вводят элементы-стабилизаторы (титан, ниобий и др.), которые образуют с углеродом более стойкие высокотемпературные карбиды. Количество стабилизаторов должно повышаться с ростом содержания углерода в стали и обеспечить связывание всего угле-

рода в карбиды типа TiC или NbC (практически содержание титана должно быть в пять раз, а ниобия – в девять раз выше, чем содержание углерода). При сварке отмечается угар титана, поэтому для изготовления сварных конструкций применяют стали с ниобием.

Таким образом, общей особенностью нержавеющей сталей является повышенная стойкость к различным коррозионным средам. Многообразие этих сред и условий работы в них (температура, концентрация среды, давление и т. д.) привело к созданию широкого сортамента нержавеющей сталей. Физические свойства нержавеющей сталей приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Физические свойства нержавеющей сталей

Плотность, кг/м <sup>3</sup>	7,93·10 <sup>3</sup>
Температура плавления $T$ , °C	1400–1430
Теплопроводность, Вт/(м·K)	0,1633 при 20 °C 0,2135 при 500 °C
Температурный коэффициент линейного расширения $\alpha$ , 1/°C	16,9·10 <sup>-6</sup> при 0–100 °C 17,8·10 <sup>-6</sup> при 100–300 °C 18,7·10 <sup>-6</sup> при 300–650 °C
Временное сопротивление разрыву $\sigma_b$ , МПа	закалка 450–800
Относительное удлинение $\delta$ , %	закалка 35–45
Предел текучести $\sigma_{0,2}$ , МПа	закалка 160–400
Удельное электросопротивление, мкОм·м	0,7
Магнитная проницаемость, Гл·м/А	1003

Сочетание повышенного электросопротивления с пониженной температурой плавления благодаря присутствию никеля оказывает благоприятное влияние на свариваемость этих сталей. Чисто аустенитные стали вплоть до минусовых температур немагнитны.

Кроме антикоррозионного свойства у нержавеющей стали следует отметить следующие качества: разнообразие полуфабрикатов (лист, труба, профиль, прутки, уголок, сетка); большой выбор видов поверхности (шлифованная, полированная, матовая); множество марок, обладающих различными качествами; легкий процесс обработки; долговечность материала.

## *Маркировка коррозионно-стойких сталей*

В настоящее время существует широкий сортамент выпускаемых сталей и сплавов, изготавливаемых в различных странах, однако единой системы их маркировки нет. В СНГ принята разработанная ранее в СССР буквенно-цифровая система обозначения марок сталей и сплавов. Стали нержавеющей, согласно ГОСТ 5632-72, маркируют буквами и цифрами, в начале марки две цифры обозначают содержание углерода в сотых долях процента. Далее следует буквенное обозначение системы легирования (А – азот, Б – ниобий, В – вольфрам, Г – марганец, Д – медь, Е – селен, К – кобальт, Н – никель, М – молибден, П – фосфор, Р – бор, С – кремний, Т – титан, Ф – ванадий, Х – хром, Ц – цирконий, Ч – редкоземельные элементы, Ю – алюминий), после каждой буквы указывается примерное содержание соответствующего элемента, однако при его содержании менее 1,5 % цифра после соответствующей буквы не ставится (например, 08Х18Н10Т или 16Х18Н12С4ТЮЛ).

Стали нержавеющей, нестандартные опытных партий обозначают буквами-индексами завода-производителя и порядковыми номерами. Буквы ЭИ, ЭП или ЭЖ присваивают сталям, впервые выплавленным заводом «Электросталь», ЧС – сталям выплавки Челябинского завода «Мечел», ДИ – сталям выплавки завода «Днепроспецсталь», например, ЭИ-435, ЧС-43 и др. Для обозначения способа выплавки доводки названия ряда сталей дополняют буквами (например, 13Х18Н10-ВИ), что означает вакуумно-индукционная выплавка.

Европейская система обозначений стали регламентирована стандартом EN 100 27. Первая часть этого стандарта определяет порядок наименования сталей, а вторая часть регламентирует присвоение сталям порядковых номеров.

В Японии наименование марок стали, как правило, состоит из нескольких букв и цифр. Буквенное обозначение определяет группу, к которой относится данная сталь, а цифры – ее порядковый номер в группе и свойства.

В США существует несколько систем обозначения металлов и их сплавов. Это объясняется наличием нескольких организаций по стандартизации, к ним относятся AMS, ASME, ASTM, AWS, SAE, ACJ, ANSI, AJS.

До настоящего времени международные организации по стандартизации не выработали единую систему маркировки сталей. В табл. 3.2 приведены примеры марок нержавеющей стали отечественного производства и области их применения.

Таблица 3.2

Коррозионно-стойкие стали отечественного производства

Марка стали	Применение
08X13	Детали с повышенной пластичностью, подвергающиеся ударным нагрузкам, а также изделия, подвергающиеся действию слабоагрессивных сред (атмосферные осадки, водные растворы солей органических кислот при комнатной температуре и др.). Сталь коррозионно-стойкая и жаростойкая ферритного класса
12X13	Детали с повышенной пластичностью, подвергающиеся ударным нагрузкам, а также изделия, подвергающиеся действию слабоагрессивных сред при $T$ до 450–500 °С. Сталь коррозионно-стойкая, жаропрочная и жаростойкая мартенситно-ферритного класса
20X13	Детали с повышенной пластичностью, подвергающиеся ударным нагрузкам, а также изделия, подвергающиеся действию слабоагрессивных сред при $T$ до 450–500 °С. Сталь коррозионно-стойкая, жаропрочная мартенситного класса
30X13	Режущий, мерительный и хирургический инструмент, пружины, клапанные пластины компрессоров
40X13	Режущий, мерительный инструмент, пружины, клапанные пластины компрессоров и прочие, работающие при $T$ до 450–500 °С и в коррозионных средах. Сталь коррозионно-стойкая мартенситного класса
10X14AG15	Для немагнитных деталей, работающих в слабоагрессивных средах. Сталь коррозионно-стойкая аустенитного класса
12X17	Крепежные детали, валики, втулки и другие детали аппаратов и сосудов, работающих в разбавленных растворах азотной, уксусной, лимонной кислоты, в растворах солей, обладающих окислительными свойствами. Сталь коррозионно-стойкая и жаропрочная до 850 °С, ферритного класса

Марка стали	Применение
08X17T	Изделия, работающие в окислительных средах, атмосферных условиях, кроме морской, в которой возможна точечная коррозия. Теплообменники и трубы. Сварные конструкции, не подвергающиеся действию ударных нагрузок и работающие при температуре не ниже $-20^{\circ}\text{C}$ . Сталь коррозионно-стойкая, жаростойкая ферритного класса
95X18	Для деталей высокой твердости, работающих в условиях износа (втулки, оси, стержни, шариковые и роликовые подшипники). Сталь коррозионно-стойкая мартенситного класса
15X25T	Для сварных конструкций, не подвергающихся действию ударных нагрузок при температуре эксплуатации не ниже $20^{\circ}\text{C}$ для работы в более агрессивных средах по сравнению со средами, для которых рекомендуется сталь марки 08X17T. Трубы для теплообменной аппаратуры, работающей в агрессивных средах. Аппаратура, детали, чехлы термопар, электроды искровых зажигательных свечей, теплообменники. Сталь жаростойкая до $1100^{\circ}\text{C}$ , коррозионно-стойкая ферритного класса
15X28	Для сварных конструкций, не подвергающихся действию ударных нагрузок при температуре эксплуатации не ниже $20^{\circ}\text{C}$ ; спай со стеклом; аппаратура, детали, трубы пиролизных установок, теплообменники; трубы для теплообменной аппаратуры, работающей в агрессивных средах. Сталь жаростойкая коррозионно-стойкая ферритного класса
13X11H2B2MФ	Ответственные нагруженные детали, работающие при температуре $600^{\circ}\text{C}$ . Сталь жаропрочная мартенситного класса
45X14H14B2M	Детали арматуры и трубопроводов, клапаны моторов, крепеж для работы на длительные сроки при $T$ до $600^{\circ}\text{C}$ и для работы с ограниченными сроками до $650^{\circ}\text{C}$ . Сталь жаропрочная аустенитного класса

Марка стали	Применение
14X17H2	Для различных деталей химической и авиационной промышленности (рабочие лопатки, диски, валы, втулки, фланцы, крепежные и другие детали). Детали компрессорных машин, работающие на нитро-ном газе либо в агрессивных средах при пониженных $T$ . Сталь коррозионно-стойкая, жаропрочная мартенситно-ферритного класса
12X18H9	Применяется в виде холоднокатаного листа и ленты повышенной прочности для различных деталей и конструкций, свариваемых точечной сваркой, а также для изделий, подвергаемых термической обработке (закалке). Сталь коррозионно-стойкая и жаростойкая аустенитного класса
17X18H9	Применяется в виде холоднокатаного листа и ленты повышенной прочности для различных деталей и конструкций, свариваемых точечной сваркой; для изготовления труб и других деталей. Сталь коррозионно-стойкая и жаростойкая аустенитного класса
08X18H10	Трубы, детали печной арматуры, муфели, теплообменники, реторты, патрубки, коллекторы выхлопных систем, электроды искровых зажигательных свечей, сварные аппараты и сосуды химического машиностроения, работающие при $T$ от $-196$ до $600^{\circ}\text{C}$ в средах средней активности. Сталь коррозионно-стойкая, жаропрочная, аустенитного класса
12X18H9T	Трубы, сварная аппаратура, детали печной арматуры, муфели, теплообменники, детали выхлопных систем, листовые и сортовые детали; аппараты и сосуды, работающие при $T$ от $-196$ до $600^{\circ}\text{C}$ под давлением, а при наличии агрессивных сред – до $350^{\circ}\text{C}$ . Сталь коррозионно-стойкая, жаростойкая, аустенитного класса
12X18H10T	Детали, работающие до $600^{\circ}\text{C}$ ; сварные аппараты и сосуды, работающие в разбавленных растворах азотной, уксусной, фосфорной кислот, растворах щелочей и солей, и другие детали, работающие под давлением при температуре от $-196$ до $600^{\circ}\text{C}$ , а при наличии агрессивных сред – до $350^{\circ}\text{C}$ . Сталь коррозионно-стойкая аустенитного класса

Марка стали	Применение
08X18H10T	Сварная аппаратура, работающая в средах повышенной агрессивности, теплообменники, муфелы, трубы, детали печной арматуры, электроды искровых зажигательных свечей. Сталь коррозионно-стойкая и жаростойкая аустенитного класса
12X18H12T	Различные детали, работающие при $T$ от $-196$ до $600$ °С в агрессивных средах. Сталь коррозионно-стойкая, жаростойкая и жаропрочная аустенитного класса

### *Классификация коррозионно-стойких сталей*

Коррозионно-стойкие стали согласно ГОСТ 5632–72 можно разделить на следующие группы: хромистые, хромоникелевые и никелевые, хромомарганцевые и хромомарганцево-никелевые.

**Хромистые стали.** Хромистые коррозионно-стойкие стали применяют трех типов: с 13, 17 и 27 % Cr, при этом в сталях с 13 % Cr содержание углерода может изменяться в зависимости от требований в пределах от 0,08 до 0,40 %. Структура и свойства хромистых сталей зависят от количества хрома и углерода.

В соответствии со структурой, получаемой при нормализации, хромистые стали подразделяют на следующие классы: ферритный (стали 08X13, 12X17, 15X25T, 15X28), мартенситно-ферритный (12X13) и мартенситный (20X13, 30X13, 40X13).

Стали ферритного класса с низким содержанием углерода (08X13, 12X13) пластичны, хорошо свариваются и штампуются. Их подвергают закалке в масле ( $1000-1050$  °С) с высоким отпуском при  $600-800$  °С и применяют для работы в слабоагрессивных средах при температурах до  $450$  °С (длительная работа) и до  $550$  °С (кратковременно). Значительным недостатком ферритных хромистых сталей является повышенная хрупкость из-за крупнокристаллической структуры. Эти стали склонны к межкристаллитной коррозии из-за обеднения хромом границ зерен. Для избежания этого в них вводят небольшое количество титана. Из-за склонности к росту зерна ферритные стали требуют строгих режимов сварки и интенсивного охлаждения зоны сварного шва.

Стали мартенситного класса 20X13, 30X13, 40X13. После закалки и отпуска при 180–250 °С стали 30X13, 40X13 имеют твердость 50–60 HRC и используются для работы при температуре 400–450 °С.

Высокохромистые стали ферритного класса (12X17, 15X25Т и 15X28) обладают более высокой коррозионной стойкостью по сравнению со сталями, содержащими 13 % Cr. Эти стали термической обработкой не упрочняются.

**Применение.** Хромокремнистые (сильхромы) и клапанные стали типа 4X9С2, 4X10С2М, 3X13Н7С2, 4X14Н14В2М и 4X14Н14СВ2М применяются как жаростойкий материал в клапанах авиа- и автодвигателей, в рекуператорах, теплообменниках. Эти стали имеют высокую прочность и твердость при рабочих температурах, хорошо сопротивляются действию теплосмен и усталости. Обладают высоким сопротивлением газовой коррозии в атмосфере воздуха и в конденсате продуктов сгорания бензина.

Наиболее широкое применение в технике получили нержавеющей стали с 12–17 % Cr мартенситного и полумартенситного классов (0X13, 1X13, 2X13, 3X13, 4X13, X14, 1X12СЮ, 1XГ7Н2, 1X13НЗ и др.) с содержанием 0,16–0,45 % С. Эти стали удовлетворительно сопротивляются окислению до 700–800 °С и служат в аппаратуре для переработки сернистой нефти. Из них изготавливают лопатки паровых турбин и компрессоров, клапаны гидравлических прессов (при работе до 475 °С), режущий, мерительный инструмент и т. п. Хромистые стали (14–17 % Cr), дополнительно легированные никелем (1,5–3 %), применяются в более тяжело нагруженных деталях, например, в лопатках спрямляющего аппарата компрессора, в дисках компрессоров.

В связи с повышением рабочих температур паросиловых установок и силовых компрессоров газотурбинных установок созданы и получили широкое распространение сложнотермостойкие 12%-е хромистые нержавеющие и жаропрочные стали (1X11МФ, 1X12ВНМФ, 1X12В2МФ, 2X12ВМБФР, 1X12В4МФ, 13X14Н2ВФР, 1X12Н2ВМФ, 21X15НЗМА, 1X16Н4Б и др.). Дополнительное легирование хромистых сталей молибденом, вольфрамом, ванадием, ниобием, бором позволило наряду с сохранением нержавеющей свойств, высокой прокаливаемости, способности к закалке на воздухе, невысокого коэффициента расширения обеспечить более вы-



сокие жаропрочные свойства (сохранение прочности при 550–600 и до 650 °С при кратковременных сроках службы).

Хромистые стали полуферритного и ферритного классов (X17, 0X17T, 0X18T1, X25, X25T, X28 и др.) применяются для теплообменников, баков для кислот, трубопроводов и для изделий, которые не несут больших нагрузок, особенно ударных.

Ферритные железохромалюминиевые сплавы (X13Ю4, 0X23Ю5, 0X27Ю5А, 0X27Ю5, 1X25Ю5 и др.) нашли широкое применение в виде проволоки и ленты для нагревательных элементов, так как они обладают высоким электросопротивлением и окалиностойкостью.

**Хромоникелевые и никелевые стали.** Стали этой группы имеет самое широкое применение в промышленности. Сортамент хромоникелевых сталей в последние годы пополнился новыми марками с более сложным легированием, с карбидным и интерметаллидным упрочнением.

Данные стали можно подразделить на следующие подгруппы:

а) хромоникелевые аустенитные стали с малым содержанием углерода, в том числе стабилизированные титаном или ниобием;

б) хромоникелевые кислотостойкие аустенитные стали с присадкой молибдена и меди;

в) хромоникелевые окалиностойкие стали с высоким содержанием хрома и никеля;

г) хромоникелевые стали аустенитно-мартенситного класса (с неустойчивым аустенитом);

д) хромоникелевые стали аустенитно-ферритного класса.

Основными хромоникелевыми сталями являются аустенитные стали типа 18-8, например, 0X18Н10, X18Н9, 2X18Н9 и стали стабилизированные титаном X18Н9Т и ниобием 0X18Н10Б и др. Стали этого типа отличаются различным содержанием углерода, влияющим на их коррозионную стойкость. Хромоникелевые аустенитные стали широко используются для аппаратуры в химической промышленности в виде печной арматуры, теплообменников, патрубков. Стали, стабилизированные титаном, используются в средах высокой агрессивности, а также для изделий, работающих при температурах до 600 °С. Стабилизированные ниобием рекомендуются для использования в средах высокой агрессивности, а также как присадочный материал для сварки хромоникелевых сталей. Стали аустенитного класса в результате закалки (950–1150 °С) приобретают аустенитную

структуру и характеризуются высокой пластичностью, умеренной прочностью, хорошей коррозионной стойкостью в окислительных средах. При этом чем выше температура закалки сталей, тем меньше их прочность и твердость и выше пластичность. При холодной деформации в зависимости от степени обжатия происходит значительный рост предела прочности, текучести и твердости, пластические свойства снижаются, но сохраняются на достаточно высоком уровне. При нагреве стали до 400–700 °С происходит выделение карбидов по границам зерен их коагуляция, что существенно влияет на механические и антикоррозионные свойства.

Хромоникелевые окалиностойкие стали с повышенным содержанием хрома и никеля, а также с добавкой кремния и бора (X23H13, 1X25H25TP, X25H20C2) применяются в виде литья, проката, поковок, листа, ленты и в виде сварочной проволоки для изготовления деталей, жаростойких изделий и аппаратуры, работающих при 800–1000 °С. По структуре эти стали могут быть аустенитными (например, X23H18), аустенитно-мартенситными и аустенитно-ферритными (X23H13).

Стали аустенитно-мартенситного класса получили широкое применение в основном как высокопрочные. Они хорошо свариваются, устойчивы к атмосферной коррозии. С целью обеспечения достаточной прочности и одновременно повышенной коррозионной стойкости сталь подвергается следующей термической обработке: закалке на аустенит (925–975 °С) с последующей обработкой холодом (–70 °С, для полноты распада аустенита) и старением (350–380 °С). Механические и физические свойства этих сталей определяются количеством аустенита, перешедшего в мартенсит, и дополнительными процессами карбидного и интерметаллидного упрочения. Стали аустенитно-ферритного класса после закалки в воде с 1000–1100 °С имеют структуру, состоящую из равномерно распределенных между собой зерен аустенита и феррита с содержанием последнего порядка 40–60 %. Прочность и твердость их может быть повышены за счет старения при 500–750 °С. Эти стали применяют в химическом и пищевом машиностроении, судостроении, авиации, медицине.

**Хромомарганцевые и хромомарганцево-никелевые стали.** Нержавеющие стали, в которых никель полностью или частично заменен другим аустенитообразующим элементом — марганцем, на-

шли свое применение в областях, где предъявлялись к металлу повышенные требования по износостойкости и прочности. В связи с меньшей эффективностью марганца (как аустенитообразующего элемента), чем никеля, он должен вводиться в сталь в больших количествах (почти в два раза).

В зависимости от состава, структуры и свойств эти стали подразделяются на несколько подгрупп:

а) аустенитные стали с 12–14 % Cr и различным содержанием марганца и никеля;

б) аустенитные стали с 17–19 % Cr, различным содержанием марганца и никеля с добавкой азота;

в) аустенитно-мартенситные стали с 12–18 % Cr и присадками марганца и никеля;

г) аустенитно-ферритные стали с 16–18 % Cr с различным содержанием марганца.

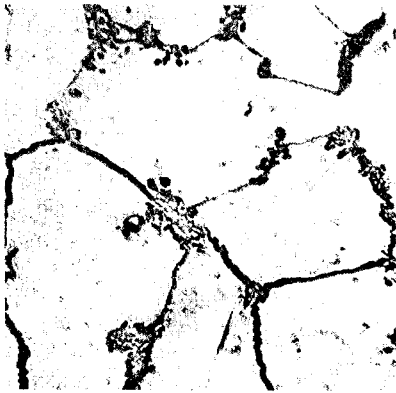
При содержании в хромомарганцевой стали свыше 15 % Cr для получения аустенитной структуры наряду с марганцем нужно вводить никель. При увеличении содержания никеля в стали аустенитная область значительно расширяется, а при увеличении содержания марганца более 6 % (при 15–20 % Cr) наблюдается небольшое сужение аустенитной области.

Одна из распространенных нержавеющей хромомарганцево-никелевых сталей 2Х13Н4Г9 обладает в исходном состоянии после закалки на аустенит более высокими механическими свойствами, чем аустенитные хромоникелевые стали, и используется в виде холоднокатаной ленты для изготовления высокопрочных и легких конструкций с соединениями точечной или роликовой сварки. Аустенитная сталь Х14Г14Н3Т имеет повышенную прочность и пластичность, не склонна к межкристаллитной коррозии и применяется в химической промышленности. В последние годы получили распространение хромомарганцево-никелевые стали с азотом типа 17-8-4-N, которые применяются в качестве коррозионно-стойкого, а также нержавеющей и теплостойкого материала для высокопрочных конструкций.

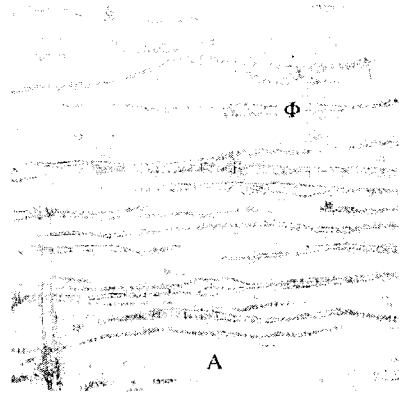
Для изделий, изготовленных из данных марок сталей и подвергаемых сварке, желательно иметь низкое содержание углерода (0,03–0,05 %) и строго контролировать процесс сварки во избежания появления в сварных соединениях склонности к межкристаллитной коррозии.

**Микроструктура коррозионно-стойких сталей.** В зависимости от вида обработки нержавеющие стали могут быть в литом, деформированном или термически обработанном состоянии. В литом состоянии сталь имеет зернистую микроструктуру с выделениями эвтектики либо второй фазы по границам зерен, так, например, (рис. 3.2, а) структура стали 20Х23Н18 представляет собой зерна аустенита и эвтектики (аустенит + карбиды). При деформации структура стали принимает полосчатый вид, все фазы вытягиваются в направлении приложения деформации. На (рис. 3.2, б) показана структура горячекатаной стали 08Х18Н10Т, имеющая аустенитно-ферритное строение. В процессе термообработки стали могут иметь различную структуру в зависимости от содержания углерода и легирующих элементов. Например, сталь 20Х13 после закалки имеет мартенситно-ферритную структуру (рис. 3.2, в), сталь 12Х18Н10Т – аустенитную структуру (рис. 3.2, г), сталь Х25 ферритную структуру (рис. 3.2, д), сталь 12Х18Н12Т при деформации или переохлаждении имеет аустенитно-мартенситную структуру (рис. 3.2, е).

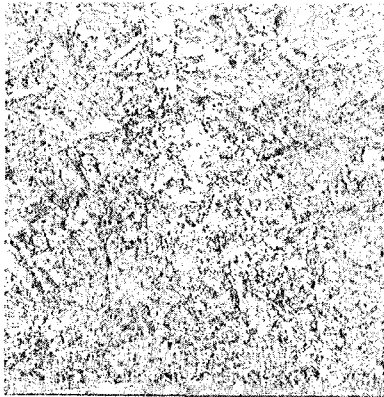
**Применение в вакууме.** Благоприятное сочетание коррозионной стойкости с механическими, технологическими, магнитными и другими свойствами обеспечило нержавеющим сталям широкое применение в вакуумной технике. Наибольшее применение в вакуумной технике нашли хромоникелевые аустенитные стали, особенно широко применяются три марки сталей этого класса: 03Х18Н12, 08Х18Н12Т и 12Х18Н10Т. Из сталей этих марок для вакуумных приборов изготавливаются штоки, оболочки, держатели, колпачки, фланцы, вакуумные камеры и другие детали. По многообразию и количеству деталей, изготавливаемых из этих марок сталей, они являются одними из самых применяемых материалов.



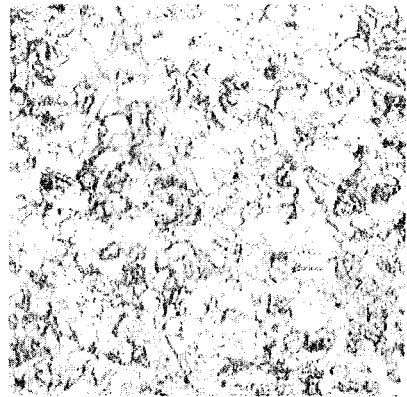
*a*



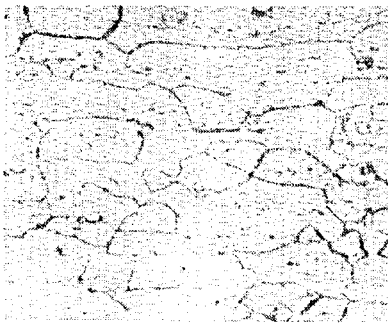
*б*



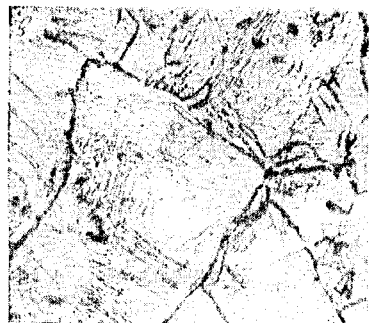
*в*



*г*



*д*



*е*

Рис. 3.2. Микроструктура коррозионно-стойких сталей

## **Порядок выполнения работы**

1. Ознакомиться с краткими сведениями о коррозионно-стойких сталях.
2. В соответствии с методикой металлографического анализа исследовать и зарисовать микроструктуру коррозионно-стойких сталей под микроскопом.
3. В соответствии с методикой измерения твердости провести испытание коррозионно-стойких сталей.
4. Составить отчет.

### **Содержание отчета**

1. Название, цель и задачи работы.
2. Применяемое оборудование и материалы.
3. Краткое описание сведений о коррозионно-стойких сталях.
4. Зарисовка микроструктуры образца и ее описание.
5. Заполненная таблица с результатами измерения твердости.

### **Контрольные вопросы**

1. Какие стали называются коррозионно-стойкими?
2. Какими благоприятными свойствами обладают коррозионно-стойкие стали?
3. Как маркируют коррозионно-стойкие стали?
4. Где применяют коррозионно-стойкие стали?
5. Какая структура у коррозионно-стойких сталей?

## Лабораторная работа № 4 Полимеры и пластмассы

### Цель работы

Изучить классификацию, свойства и область применения полимеров и пластмасс.

### Задачи работы

1. Сформировать представление о полимерах и пластмассах.
2. Ознакомиться с классификацией, свойствами и областями применения полимеров и пластмасс.

### Оборудование и материалы

Набор образцов полимерных материалов и пластмасс с различным видом наполнителей.

### Общие сведения о полимерах и пластмассах

Полимерные материалы включают в себя три большие группы синтетических материалов: полимеры, пластмассы и их морфологическую разновидность – полимерные композиционные материалы или армированные пластики. Общей составной частью всех этих материалов является полимерная составляющая, которая определяет основные их физико-механические и технологические свойства. Полимерная составляющая представляет собой органическое высокомолекулярное вещество, полученное в результате химической реакции между молекулами исходных низкомолекулярных веществ – мономеров.

### 1. Полимеры

*Полимерами* называются высокомолекулярные соединения, молекулы которых состоят из большого числа повторяющихся мономерных или элементарных звеньев. Вещество принято считать полимером, если его молекулярная масса ( $M$ ) превышает 5000. Значение молеку-

лярной массы зависит от условий получения полимера (температуры, давления и т. д.), кроме того оно влияет на его свойства. Полимеры состоят из макромолекул, которые имеют цепное строение, при котором их длина в несколько раз превышает поперечные размеры.

Полимеры получают синтезом низкомолекулярных веществ методами *полимеризации* или *поликонденсации*.

В процессе *полимеризации* происходит последовательное присоединение мономеров к растущей полимерной цепи, при этом элементный состав получаемого полимера не отличается от состава исходных веществ.

К полимеризационным полимерам относятся полиэтилен, полипропилен, полистирол, поливинилхлорид и т. д. Макромолекулы этих веществ имеют линейное или разветвленное строение.

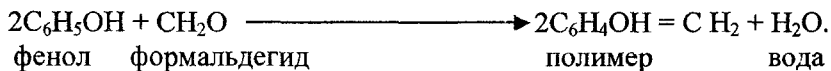
Например, образование полиэтилена протекает по следующей схеме:



В процессе *поликонденсации* в результате реакций замещения или обмена между реагентами образуются высокомолекулярные полимерные соединения, причем реакция сопровождается образованием побочных низкомолекулярных продуктов (вода, аммиак, углекислый газ и т. д.).

К поликонденсационным полимерам относятся эпоксидные, карбамидные, фенолоформальдегидные и другие смолы, имеющие пространственную структуру.

Например, фенолформальдегидный полимер образуется при реакции взаимодействия формальдегида с фенолом, кроме того образуется побочный продукт – вода:

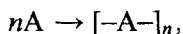


Помимо строения макромолекул на свойства полимерного материала влияет расположение молекул в пространстве (надмолекулярная структура). Многие полимеры могут *кристаллизоваться*, т. е. обладать упорядоченной структурой. Однако процесс кристал-



лизации полимеров всегда остается незавершенным, поэтому они имеют кристаллически-аморфное двухфазное строение с различным соотношением фаз. Увеличение количества кристаллической фазы приводит к повышению плотности, твердости, прочности и стойкости материала, однако при этом снижается гибкость и пластичность.

Исходными веществами для синтеза полимеров служат низкомолекулярные вещества – мономеры (табл. 4.1). Схематически получение полимера из мономера имеет следующий вид:



где  $A$  – молекула мономера;

$A$  – элементарное звено макромолекулы полимера;

$n$  – степень полимеризации (число элементарных звеньев в макромолекуле).

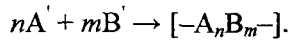
Таблица 4.1

Исходные низкомолекулярные вещества-мономеры

Наименование полимера	Элементарные звенья	Исходный мономер
Полиэтилен (ПЭ)	$-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$	$\text{H}_2\text{C}=\text{CH}_2$ этилен
Полипропилен (ПП)	$-\text{CH}_2-\text{CH}-$   $\text{CH}_3$	$\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}_3$ пропилен
Полиизобутилен (ПИБ)	$-\text{C}(\text{CH}_3)_2-\text{CH}_2-$	$(\text{CH}_3)_2\text{C}=\text{CH}_2$ изобутилен
Полистирол (ПС)	$-\text{CH}_2-\text{CH}-$   $\text{C}_6\text{H}_5$	$\text{CH}_2=\text{CH}-\text{C}_6\text{H}_5$ стирол
Политегтрафторэтилен (фторопласт-4)	$-\text{CF}_2-\text{CF}_2-$	$\text{F}_2\text{C}=\text{CF}_2$ тетрафтор-этилен
Политрифторхлорэтилен (фторопласт-3)	$-\text{CF}_2-\text{CFCl}-$	$\text{F}_2\text{C}=\text{CFCl}$ трифторхлор-этилен
Поливинилхлорид	$-\text{CH}_2-\text{CHCl}-$	$\text{CH}_2=\text{CHCl}$ винилхлорид
Полиметилметакрилат (оргстекло)	$\text{CH}_3$   $-\text{CH}_2-\text{C}-$   $\text{COOH}$	$\text{CH}_2=(\text{CH}_3)\text{C}(\text{COOH})$ метилме-такрилат

Наименование полимера	Элементарные звенья	Исходный мономер
Натуральный каучук	$-CH_2 - C = CH - CH_2 -$ $ $ $CH_3$	$-CH_2 - C(CH_3)CH =$ $CH - CH_2$
Поликапролактам (полиамид)	$-C - (CH_2)_5 - N -$ $   \quad  $ $O \quad H$	$OC - (CH_2)_5 - NH$

Если макромолекула образована из молекул мономеров разных видов, например, А' и В', то образующийся полимер называется *сополимером*, а его получение описывается следующей реакцией:



Полимеры классифицируют по различным признакам, основными из которых являются: состав и структура макромолекул, полярность, отношение к нагреву (табл. 4.2).

Таблица 4.2

## Классификация полимеров

Классификационный признак полимеров	Тип полимеров	Примеры
Состав	1. Органические	Полиолефины
	2. Элементоорганические	Полититаноксаны
	3. Неорганические	Керамика
Структура макромолекул	1. Линейные	Полиамиды
	2. Разветвленные	Полиизобутилен
	3. Ленточные	Полисилоксаны
	4. Пространственные (сетчатые)	Резины
Надмолекулярная структура	1. Аморфные	Поливинилхлорид
	2. Кристаллические	Полиэтилен
Полярность	1. Полярные	Пентапласт
	2. Неполярные	Полистирол
Отношение к повторному нагреву	1. Термопластичные	Органическое стекло
	2. Терморективные	Фенолформальдегидная смола

## 1.1. Состав и структура полимеров

По составу наибольшую группу соединений составляют органические полимеры. Сырьем для получения синтетических органических полимеров служат мономеры – продукты переработки нефти, газа, кокса, целлюлозы и другие вещества. Элементоорганические полимеры содержат в молекулярных цепях кроме органических мономеров атомы Si, Ti, Al и других элементов. Основу неорганических полимеров (силикатные стекла, керамика, асбест, слюда) составляют оксиды кремния, магния, алюминия, кальция и др.

Молекулярная цепь полимера может состоять из одинаковых атомов, тогда полимер называется гомоцепным, в случае если молекулярная цепь состоит только из атомов углерода – карбоцепным (полиэтилен, поливинилхлорид). Если наряду с углеродом в основной молекулярной цепи присутствуют атомы кислорода, азота, фосфора и других элементов, оказывающих существенное влияние на свойства вещества, то такие полимеры называют гетероцепными (полиуретан, полиамид). Неорганические элементы, находящиеся в молекулярных цепях полимеров, придают материалу специфические свойства, так, например, кислород повышает эластичность материала, фосфор и хлор – огнестойкость, сера уменьшает газопроницаемость.

По строению макромолекул полимеры подразделяются на линейные, разветвленные, ленточные и пространственные. Макромолекулы линейных полимеров имеют вид длинных изогнутых в пространстве цепочек (рис. 4.1, а). У разветвленных полимеров макромолекулы основной цепи имеют боковые ответвления, которые короче основной цепи (рис. 4.1, б). Ленточные полимеры состоят из двух молекулярных цепей, соединенных между собой химическими связями (рис. 4.1, в). Пространственные полимеры образуются путем соединения различных молекулярных цепей поперечными связями, образованными из атомов или групп атомов.

Полимеры с линейной и разветвленной структурой имеют слабые межмолекулярные связи, поэтому они эластичны, имеют низкую твердость и при нагревании размягчаются и плавятся, растворяются во многих растворителях. В полимерах с пространственной структурой макромолекулы соединены не только межмолекулярными, но и поперечными ковалентными связями, которые достаточно сильные. Это приводит к уменьшению пластичности, повы-

шению прочности и твердости, данные полимеры не растворяются в обычных растворителях, при нагревании не размягчаются, а разлагаются.

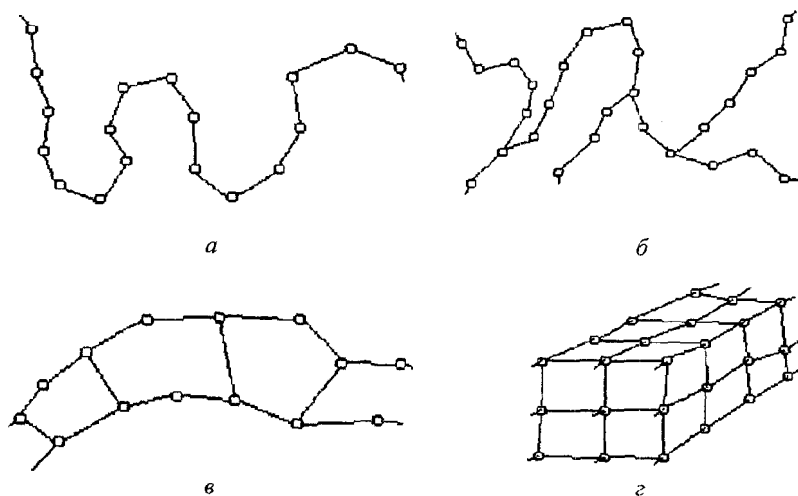


Рис. 4.1. Строение макромолекул полимера:  
*a* – линейные; *б* – разветвленные; *в* – ленточные; *г* – пространственные

## 1.2. Полярность полимеров

Полимеры в зависимости от их химического состава, строения и структуры по электрическим и физическим свойствам могут быть полярными и неполярными. Неполярные полимеры состоят из макромолекул, центры тяжести разноименных зарядов которых совпадают. У полярных полимеров центры тяжести электронов макромолекул сдвинуты в сторону более электроотрицательного атома, поэтому центры тяжести разноименных зарядов не совпадают.

Неполярные полимеры имеют симметричное строение, в результате чего дипольные моменты связей атомов взаимно компенсируются (рис. 4.2, *a*). Они являются хорошими диэлектриками, и их свойства мало изменяются при понижении температуры.

Полярные полимеры имеют несимметричное строение макромолекул либо в их структуре присутствуют полярные связи атомов Cl, F, OH (рис. 4.2, *б*). Данные материалы обладают повышенной жест-

костью и теплостойкостью, высокой адгезионной способностью, пониженной морозостойкостью.

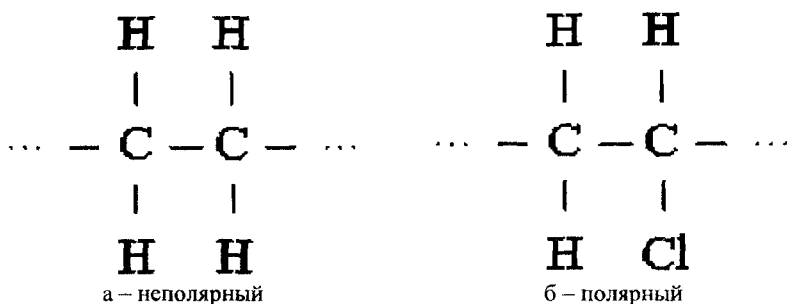


Рис. 4.2. Структура полимеров

### 1.3. Отношение полимеров к нагреву

По отношению к нагреву полимеры могут быть термопластичными (термопласты) и термореактивными (реактопласты). Термопластичные полимеры обладают линейной или разветвленной структурой макромолекул, при нагревании они легко размягчаются и затем при определенной температуре переходят в вязкотекучее состояние. После охлаждения полимер затвердевает, при этом никаких химических реакций в процессе нагрева и охлаждения не происходит. Процесс нагрева и охлаждения, сопровождающийся переходом полимера из одного состояния в другое, полностью обратим и может протекать многократно без изменения структуры и свойств материала. К термопластичным относятся полимеризационные полимеры аморфного и аморфно-кристаллического строения. Они эластичны и растворимы в характерных для них растворителях. В вязкотекучем состоянии из них изготавливают изделия методами экструзии, литья, штамповки и т. д.

Термореактивные полимеры при нагреве легко переходят в вязкотекучее состояние. Последующая выдержка при повышенной температуре сопровождается прохождением химических реакций, в результате которых макромолекулы изменяют свою первоначальную линейную структуру на пространственную. В результате охлаждения полимер необратимо затвердевает, при последующем нагреве в вязкотекучее состояние не переходит, а горит или обугливается. К тер-

мореактивным относятся поликонденсационные полимеры, изделия из которых получают методом горячего прессования.

#### 1.4. Агрегатные состояния полимеров

Макромолекулы полимеров, их фрагменты и звенья находятся в тепловом движении, при этом чем ниже температура, тем меньше их подвижность. В зависимости от температуры аморфные полимеры могут находиться в трех состояниях: стеклообразном, высокоэластичном и вязкотекучем. Стеклообразное и высокоэластичное относятся к твердому агрегатному состоянию, вязкотекучее – к жидкому. Температурные области существования этих состояний определяются по зависимости деформации полимера от температуры (рис. 4.3).

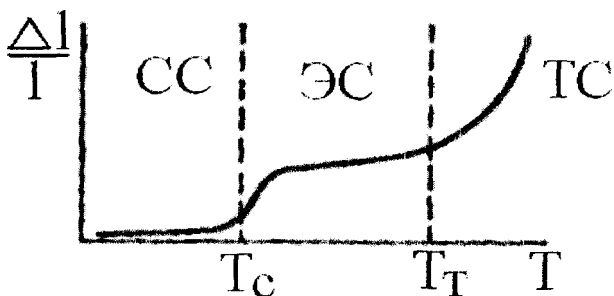


Рис. 4.3. Зависимость удлинения аморфного полимера от температуры:  $CC$  – стеклообразное,  $ЭС$  – высокоэластичное,  $ТС$  – вязкотекучее состояние

В интервале температур до температуры стеклования  $T_c$  полимер находится в стеклообразном состоянии (участок  $CC$  на рис. 4.3), при этом перемещение макромолекулы в результате деформации практически отсутствует незначительно меняются лишь расстояния между атомами в ней (рис. 4.4, а). В стеклообразном состоянии полимер имеет высокую твердость и хрупкость, деформации малы даже при больших нагрузках.

В интервале температур  $T_c$ – $T_T$  полимер находится в высокоэластичном состоянии (участок  $ЭС$  на рис. 4.3). В результате приложения нагрузки отдельные участки макромолекулы приобретают подвижность, а сама цепь – способна распрямляться (рис. 4.4, б). В этой

области полимер обладает высокой эластичностью и при небольших механических нагрузках возникают значительные обратимые деформации.

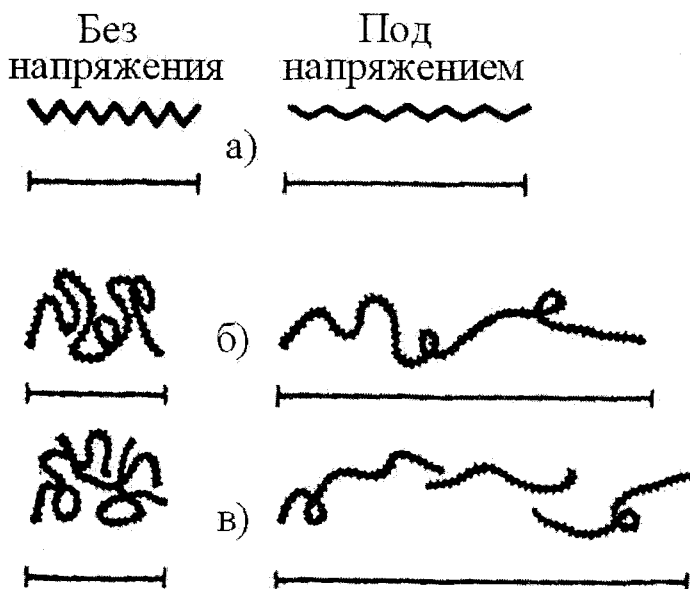


Рис. 4.4. Изменение структуры макромолекулы аморфного полимера в результате приложения нагрузки:  
*а* – стеклообразное; *б* – высокоэластичное, *в* – вязкотекучее состояние

При температуре выше температуры текучести  $T_T$  (участок ТС на рис. 4.3) полимер переходит в вязкотекучее состояние. Это приводит к разрыву межмолекулярных связей (рис. 4.4, *в*), и в результате перемещения макромолекул друг относительно друга образуются необратимые деформации.

Вид термомеханической кривой зависит от химического состава и структуры полимера. Так, например, для кристаллического полимера на термомеханической кривой вырождается область ЭС, а точки  $T_c$  и  $T_T$  стягиваются в одну –  $T_{пл}$ , называемую температурой плавления. У пространственных полимеров вырождается область ТС. В полимерах с высокой плотностью пространственной сетки отсутствуют области ЭС и ТС.

## 1.5. Методы изготовления изделий из полимеров

Методами изготовления изделий из полимеров служат экструзия, компрессионное и литьевое прессование, литье под давлением, пневматическое и вакуумное формование. Отделку и доводку деталей, нарезание резьбы, сверление отверстий и прочее выполняют механической обработкой резанием. Для получения неразъемных соединений используют сварку и склеивание.

Под влиянием различных внешних факторов (температуры, электрического поля, излучения, механических воздействий, агрессивных сред и т. д.) может происходить изменение эксплуатационных свойств полимеров, так называемый процесс старения. Основными причинами старения полимеров являются деструкция и структурирование макромолекул. Деструкция – это процесс, при котором происходит разрыв главной цепи макромолекулы с образованием нескольких новых макромолекул с меньшей молекулярной массой, в результате чего уменьшается прочность и твердость, снижается температура текучести, увеличивается тангенс угла диэлектрических потерь. Структурирование – процесс образования пространственной сетки из линейных или разветвленных макромолекул. Оно приводит к повышению хрупкости и твердости полимера, в результате чего он крошится и расслаивается.

## 1.6. Примеры полимеров и их свойства

**Полиэтилен (ПЭ)** – продукт полимеризации этилена. Термопластичный, неполярный аморфно-кристаллический, химически инертный полимер. В зависимости от давления, при котором происходит полимеризация, различают полиэтилен высокого ПЭВД ( $P > 100$  МПа) и низкого давления ПЭНД ( $P \approx 4$  МПа). ПЭВД имеет разветвленную структуру макромолекул ( $M \approx 4 \cdot 10^4$ ), низкую плотность, высокую прочность и гибкость, хорошую теплостойкость. ПЭНД имеет линейную структуру макромолекул ( $M \approx 10^6$ ), по сравнению с ПЭВД более высокую плотность, прочность и меньшую гибкость.

Для замедления старения ПЭ обычно выпускают в стабилизированном виде. Светостабилизаторами служит газовая сажа, термостабилизаторами – амины. ПЭ применяют для изготовления высо-



кочастотной и сверхвысокочастотной арматуры, труб, изоляции проводов и кабелей, антикоррозионных покрытий и т. д.

**Политетрафторэтилен** (Фторопласт-4, Ф-4) – продукт полимеризации тетрафторэтилена, кристаллический неполярный полимер с линейной структурой макромолекул ( $M$  до  $10^7$ ). Наиболее химически стойкий из всех известных полимеров (по химической стойкости превосходит платину), не растворяется ни в одном растворителе, не горит, разлагается с выделением газообразных продуктов при температуре выше  $400\text{ }^\circ\text{C}$ , имеет низкий коэффициент трения, очень высокие диэлектрические свойства. Недостатками Ф-4 является его высокая стоимость, низкая теплопроводность, хладотекучесть при незначительных нагрузках, переработка методом спекания из-за очень высокой вязкости расплава. Применяют Ф-4 для изготовления уплотнительных изделий, сильфонов, вентилях, кранов, труб, подшипников скольжения, антифрикционных и антиадгезионных покрытий, деталей машин, электроизоляционных и конденсаторных материалов, работающих в агрессивных средах и в условиях высоких и низких температур в полях ВЧ и СВЧ.

**Полипропилен** (ПП) – продукт полимеризации пропилена. Термопластичный аморфно-кристаллический неполярный полимер с линейным строением макромолекул ( $M \approx 5 \cdot 10^5$ ), имеет низкие теплопроводность, адгезию, устойчивость к УФ-излучению (поэтому в состав ПП вводят светостабилизаторы); высокие механическую прочность, возрастающую с ростом  $M$ , износостойкость, диэлектрические свойства и влагостойкость. При такой же, как у ПЭ, плотности, ПП имеет более высокую нагревостойкость, но хрупок при низких температурах.

Его применяют для изготовления антиадгезионных покрытий, мелких деталей машин, труб, электроизоляционных и конденсаторных материалов, работающих в агрессивных средах.

**Полистирол** (ПС) – продукт полимеризации стирола. Термопластичный аморфный, неполярный, прозрачный полимер ( $M \approx 2 \cdot 10^5$ ), имеет высокие диэлектрические свойства, влаго- и радиационную стойкость, высокую механическую прочность, но низкую эластичность и нагревостойкость, легко окрашивается в различные цвета. Применяют ПС как конструкционный материал (панели приборов и т. д.), для изготовления пленочной изоляции и конденсаторов, большое значение имеет пенополистирол.

**Полиизобутилен (ПИБ)** – продукт полимеризации изобутилена. Аморфный, неполярный полимер. В зависимости от молекулярной массы может существовать в виде вязких жидкостей ( $M \approx 2 \cdot 10^4$ ) или аморфных каучукоподобных продуктов ( $M \approx 2 \cdot 10^5$ ), имеет низкую механическую прочность, но высокие диэлектрические свойства, эластичность и адгезию к различным материалам (клеящие свойства), хорошо окрашивается. Применяют для электроизоляционных антикоррозионных покрытий, для производства изоляционной ленты, в качестве уплотнительного материала, входит в состав некоторых клеев и герметиков.

**Поливинилхлорид (ПВХ)** – продукт полимеризации винилхлорида. Преимущественно аморфный термопластичный полярный полимер белого цвета с линейным строением макромолекул, химически стоек, прочен, но малопластичен. Его свойства можно модифицировать смешением с другими полимерами. Диэлектрические свойства ПВХ сильно зависят от изменений температуры и частоты приложенного электрического поля, но не зависят от влажности. ПВХ и материалы на его основе широко применяются для различных целей и, в первую очередь, для изоляции монтажных проводов для низких частот.

**Полифторхлорэтилен (Фторопласт-3, Ф-3)** – продукт полимеризации фторхлорэтилена. Ф-3 – полярный линейный термопластичный кристаллизующийся полимер белого цвета ( $M \approx 2 \cdot 10^5$ ). Ф-3 химически инертен, негорюч, имеет высокие механические и диэлектрические свойства, хотя и ниже, чем у Ф-4. В отличие от Ф-4 характеризуется низкой хладотекучестью. Используют как изоляционный и конденсаторный материал, работающий в агрессивных средах и при высоких температурах, для изготовления установочных изделий (катушек, цоколей и т. д.), специальных слоистых пластиков, пленки Ф-3 используют в производстве пленочных конденсаторов и печатных плат. Низкомолекулярный Ф-3 применяют в качестве смазочных и нагревостойких гидравлических жидкостей.

**Полиметилметакрилат (ПММА, оргстекло, плексиглас)** – продукт полимеризации метилметакрилата – жесткий, оптически прозрачный пластик, легко обрабатывается резанием, шлифуется и полируется, имеет низкую нагревостойкость, используется как конструкционный материал, для изготовления линз, смотровых окон, в качестве изоляции высоковольтных переключателей и разрядников

благодаря его дугогасящим свойствам (выделению при разложении  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}_2$ , не поддерживающих горение дуги). Из-за сильной полярности и низкой нагревостойкости не применяется на высоких частотах и при высоких температурах.

**Полиэтилентерефталат** (лавсан, ПТФЭ) – сложный эфир терефталевой кислоты и этиленгликоля. Аморфно-кристаллический полимер ( $M \approx 4 \cdot 10^4$ ), имеет широкий интервал рабочих температур ( $-70$ – $170$  °С). В зависимости от условий получения может быть непрозрачным (кристаллическим) и прозрачным (аморфным). Наивысшую механическую и электрическую прочность имеет кристаллический полимер, из которого изготавливают пленки и нити. Лавсан имеет высокие диэлектрические характеристики до  $180$  °С, высокую радиационную и химическую стойкость. Применяется в качестве нагревостойкой изоляции электрических машин, кабелей, для производства пленочных конденсаторов, лент магнитной записи, киноплёнок, нити используют для изготовления приводных ремней, корда и т. д.

**Полиамиды** (капрон, нейлон) – большая группа термопластичных полимеров, содержащих амидные группы  $-\text{CO}-\text{NH}-$  в главной цепи с линейным строением макромолекул ( $M \approx 2 \cdot 10^4$ ). Имеют высокую механическую прочность и эластичность (особенно нити и пленки), химическую стойкость и стойкость к истиранию, хорошо обрабатываются резанием и горячим прессованием. Применяют для изготовления установочных и несущих деталей в радиоаппаратуре, уплотнительных изделий, деталей машин (шестерен, подшипников, втулок), в качестве электроизоляционных материалов с высокой масло- и бензостойкостью в кабельной, авиационной и химической промышленности, входят в состав клеев и компаундов, низкомолекулярные полиамиды используются в качестве отвердителей для эпоксидных смол.

**Полиформальдегиды** (полиметиленоксиды) – продукты полимеризации формальдегида. Термопластичные, преимущественно кристаллические полимеры, имеющие низкую плотность, очень высокую механическую прочность, твердость, тепло-, износо- и коррозионную стойкость, но низкую стойкость к УФ-излучению и высокую стоимость. Применяют для замены цветных металлов и сплавов в машиностроении при изготовлении втулок, зубчатых ко-

лес, пружин, мелких деталей машин, корпусов приборов, деталей переключателей.

**Поликарбонаты** – сложные эфиры угольной кислоты, термопластичные, оптически прозрачные, прочные и химически стойкие материалы с высокими диэлектрическими свойствами и нагревостойкостью, применимы при высоких и низких температурах. Используют их для изготовления печатных плат, каркасов, панелей, электротехнической арматуры.

**Полиэфирные смолы** – термореактивные полимеры и сополимеры малеинового ангидрида и малеиновой кислоты, имеющие высокую нагревостойкость (до 200 °С) и механическую прочность, которые возрастают с увеличением молекулярной массы и плотности сшивки при образовании пространственной структуры, высокие диэлектрические характеристики; оптическую прозрачность, но низкую тепло- и износостойкость. Применяют в качестве связующих в композиционных материалах, входят в состав клеев, компаундов, электроизоляционных лаков, эмалей.

**Эпоксидные смолы** – исходные материалы для получения термореактивных поликонденсационных полимеров. Эпоксидные смолы не отвердевают сами по себе, но благодаря наличию эпоксидных групп, обладающих высокой активностью, способны вступать в реакцию с веществами (отвердителями), содержащими аминогруппу, в результате чего получается твердый полимер. Он обладает высокой прочностью, твердостью и химической стойкостью, хорошей адгезией ко многим материалам. Эпоксидные смолы используют как основу электроизоляционных лаков, эмалей, клеев, герметиков, компаундов, пенопластов, связующих для получения высокопрочных композиционных материалов.

**Фенолоформальдегидные смолы (ФФС)** – продукты поликонденсации фенолов с формальдегидом. В зависимости от условий получения образуются резольные (термореактивные) или новолачные (термопластичные) полимеры. Резольные смолы получают при избытке формальдегида, в них даже при комнатной температуре продолжают протекать реакции конденсации, что может привести со временем к старению материала. Новолачные смолы образуются при избытке фенола и имеют линейную структуру макромолекул.

Отвержденные ФФС имеют высокую механическую прочность, твердость, тепло- и химическую стойкость. Для улучшения некото-

рых свойств ФФС подвергают химической модификации (частичной замене фенола или формальдегида некоторыми другими веществами). Так, частичная замена фенола анилином приводит к улучшению диэлектрических свойств из-за меньшей полярности анилина (*анилиноформальдегидные смолы*). Модификация ФФС каучуками (*фенопласты*) позволяет повысить стойкость к ударным нагрузкам; карбамидом и меламинами смолами (*аминопласты*) – увеличить дугостойкость. Для модификации ФФС используются также полиамиды, эпоксидные и полиэфирные смолы и т. д. ФФС находят применение как связующие в производстве различных пластмасс, в качестве основы электроизоляционных лаков, эмалей, герметиков, пенопластов.

*Кремнийорганические полимеры* (КП) относятся к элементоорганическим полимерам, в основной цепи макромолекул которых наряду с органическими связями типа С-С или С-Н, содержатся связи Si-O, Si-N или Si-Si, отличающиеся большой прочностью. Благодаря этому КП и материалы на их основе отличаются высокими механическими и диэлектрическими свойствами. КП могут иметь линейную, разветвленную и пространственную структуру. Линейную структуру макромолекул имеют каучукоподобные эластичные материалы (эластомеры), пространственную – твердые материалы. Наиболее распространены полисилоксаны, имеющие группы Si-O. Высокая теплостойкость КП в сочетании хорошими диэлектрическими свойствами и гидрофобностью позволяет применять их для производства электроизоляционных лаков, лакотканей, компаундов, связующих в композиционных материалах, работающих при высоких температурах, каучуков, кремнийорганических электроизоляционных жидкостей и т. д. К недостаткам относится плохая адгезия ко многим материалам.

Некоторые основные свойства рассмотренных выше полимеров представлены в табл. 4.3.

## Свойства некоторых полимеров

Материал	Плотность, мг/м <sup>3</sup>	$\sigma_{в}$ , МПа	$\delta$ , %	$T_{\text{раб}}$ , °С	ТКЛР, $\cdot 10^{-5}$	$\rho_v$ , Ом·м	$\epsilon$ при $f = 50$ Гц	$\text{tg } \delta$ при $f = 50$ Гц	$E_{\text{пр}}$ , кВ/мм
Полиэтилен высокого давления	0,9	14	400	-70 +110	18	$10^{15}$	2,3	(1-4) $\cdot 10^{-4}$	15- 20
Полиэтилен низкого давления	0,96	30	600	-70 +110	-	-	-	-	-
Фторопласт-4	2,2	25	250	-270 +300	10	$10^{16}$	2,2	(1-2) $\cdot 10^{-4}$	20- 30
Полипропилен	0,9	30	350	-70 +150	15	$10^{16}$	2,2	$6 \cdot 10^{-4}$	25- 35
Полистирол	1,0	45	1	-40 +80	8	$10^{14}$	2,5	$2 \cdot 10^{-4}$	100
Полиизобутилен	1,0	0,2	900- 2000	-30 +70		$10^{14}$	2,5	$5 \cdot 10^{-4}$	15
Поливинилхлорид	1,4	50	15	-40 +70	7	$10^{12}$	3,4	$2 \cdot 10^{-2}$	40
Фторопласт-3	2,1	35	20- 200	-190 +130	9	$10^{14}$	2,7	$10^{-2}$	100
Полиметилметакрилат	1,2	70	4	-80 +70	9	$10^{13}$	4	$3 \cdot 10^{-2}$	40
Полиамиды	1,1	50	350	-80 +180	10	$10^{13}$	4	$4 \cdot 10^{-2}$	15
Полиформальдегиды	1,4	120	30	-70 +70	8	$10^{13}$	3	$6 \cdot 10^{-3}$	50
Поликарбонаты	1,2	60	10- 100	-100 +140	6	$10^{14}$	3	$2 \cdot 10^{-3}$	25
Полиэфирные смолы	1,3	30- 80	20- 600	-70 +60	6- 11	$10^{13}$	3- 5	(5-9) $\cdot 10^{-3}$	10- 20
Эпоксидные смолы	1,2	40- 90	5	-70 +130	6	$10^{12}$ - $10^{14}$	4	(2-20) $\cdot 10^{-3}$	20- 30
Фенолоформальдегидные смолы	1,2	40- 60	-	-70 +200	8- 12	$10^{11}$	5	(1-10) $\cdot 10^{-1}$	15
Кремнийорганические смолы	2	30- 35	-	-80 +180	10	$10^{12}$	3- 50	(30-20) $\cdot 10^{-3}$	10- 20
Лавсан	1,2	100- 300	100- 200	-70 +175	6	$10^{13}$	3	$4 \cdot 10^{-3}$	120- 1000

## 2. Пластмассы

Пластмассы представляют собой сложные по составу системы, построенные на полимерной основе. Связующий полимер определяет основные термомодеформационные и технологические свойства пластмасс. Кроме различных полимеров в состав пластмасс входят различные наполнители и добавки (пластификаторы, отвердители, красители, стабилизаторы, антистарители, смазки и т. д.)

Наполнители дисперсно распределены в связующей полимерной фазе и всегда имеют с ней четко выраженную границу раздела. Содержание наполнителя в пластиках обычно составляет 45–50 %, но иногда может превышать содержание матрицы более чем в 3 раза. Наполнители придают изделиям на основе полимерных материалов высокую прочность, химическую стойкость, теплостойкость, улучшают диэлектрические качества, снижают (повышают) плотность, повышают фрикционные (антифрикционные) свойства и т. д. Наполнители могут быть как органическими, так и неорганическими веществами (древесные опилки, молотый кварц, слюда, асбест, стеклянные волокна, бумага и т. д.).

Добавки вводятся в состав пластмасс для противодействия их старению (стабилизаторы, антистарители), повышения их пластичности при переработке (пластификаторы), придания пластмассе желаемого цвета (красители), ускорения отверждения термореактивных смол (отвердители).

Пластмассы в зависимости от входящих в их состав полимеров могут классифицироваться аналогично им, например, могут быть термопластичными и термореактивными.

Однако основная классификация пластмасс производится в зависимости от структуры входящего в них наполнителя (табл. 4.4).

Классификация пластмасс по виду наполнителя

Структура наполнителя	Вид наполнителя	Вид пластмасс
Порошкообразный	Органические и неорганические вещества	Пресс-порошки и литьевые пластмассы
Волокнистый	Органические волокна	Волокниты
	Асбестовые волокна	Асбоволокниты
	Стеклняные волокна	Стекловолокниты
Листовой	Бумага	Гетинаксы
	Хлопчатобумажная ткань	Текстолиты
	Асбестовая ткань	Асботекстолиты
	Стеклоткань	Стеклотекстолиты
	Древесный шпон	Древесно-слоистые пластики (ДСП)
Газообразный	Воздух, CO <sub>2</sub>	Пенопласты
		Поропласты

### 2.1. Пластмассы с порошковыми наполнителями

В качестве порошковых наполнителей для получения пластмасс могут применяться: древесная мука – дешевый материал для получения фенопластов и аминопластов общего назначения; недостатком ее является низкая нагрево-, влаго- и химическая стойкость; газовая сажа, измельченный кокс и графит используют для повышения химической и теплостойкости, теплопроводности, однако при этом увеличивается и электропроводность, что недопустимо для электроизоляционных материалов; молотые мел, тальк, слюда и каолин применяют для получения резин, слюдяных и других электроизоляционных материалов; молотые кварц, песок, асбест увеличивают нагревостойкость, теплопроводность и механическую прочность термо- и реактопластов.

Пластмассы с порошковым наполнителем производятся в виде пресс-порошков и литьевых материалов. Пресс-порошки – это реактопласты, представляющие собой порошкообразную или гранулированную смесь наполнителя с термореактивной смолой, предназначенную для формования изделий методами прессования.



## 2.2. Пластмассы с волокнистыми наполнителями

Волокнистые наполнители позволяют повысить механическую прочность, износо-, нагрево- и химическую стойкость пластиков. Волокна могут быть непрерывными (длиной до десятков мм) и рублеными (до нескольких мкм). Если волокнистый наполнитель хаотически расположен в полимерной матрице, то материал изотропен, в случае его упорядоченного расположения – анизотропен. В тех случаях, когда это допускается формой изделия, волокна скрепляют между собой в нити, жгуты или ткани.

К волокнистым наполнителям относятся:

– природные волокна (хлопок, лен) имеют хорошие диэлектрические и удовлетворительные механические свойства, низкую стоимость, но высокое влагопоглощение и низкую химическую стойкость. Используются в качестве наполнителей для волокнистых фенопластов, аминопластов;

– синтетические волокна (полиамидные, полиакрилонитрильные, полиэфирные) применяются для повышения химической, коррозионной, влаго- и износостойкости. Пластмассы (органоволокниты), наполненные этими волокнами, значительно превосходят волокниты по механическим и диэлектрическим свойствам, имеют малый коэффициент трения, повышенную нагревостойкость (до 200–300 °С);

– неорганические волокна (стеклянные, асбестовые и т. д.) повышают механические и электрические свойства материалов и придают им повышенную нагрево-, огне-, атмосферо- и химическую стойкость. Асбоволокниты используются в качестве материала тормозных устройств (колодки, накладки, диски подъемных кранов, вагонов, автомобилей, экскаваторов, из них изготавливают фрикционные ролики, контактные панели и т. д.). Стекловолокниты применяются для изготовления силовых электротехнических деталей (каркасы катушек), деталей машиностроения (золотники, уплотнения насосов, перекачивающих специальные агрессивные среды).

## 2.3. Пластмассы с листовыми наполнителями

Слоистые пластмассы изготавливаются на основе только термоактивных связующих. В качестве наполнителей применяют бумагу, ткань, сетку, пленку и другие материалы, имеющие пористую

или волокнистую структуру, которые пропитывают раствором или расплавом связующего, после чего прессуют. Все слоистые пластмассы хорошо механически обрабатываются, анизотропны и выпускаются в виде листов, плит, труб и т. д.

Наибольшее распространение получили следующие слоистые пластмассы.

*Гетинакс* изготавливают на основе модифицированных фенольных, анилиноформальдегидных и карбамидных смол и различных сортов бумаги. Бумагу режут на листы нужного размера, пропитывают связующим, собирают в пачки требуемой толщины и прессуют при повышенной температуре. Гетинакс хорошо обрабатывается резанием. Применяется в качестве электроизоляционного материала в электромашинах, телефонной аппаратуре, трансформаторах, катушках индуктивности, высокочастотных контурах. Как конструкционный материал применяется для производства панелей, крышек, втулок и других изделий.

*Органогетинакс* – пластмасса на основе бумаги из синтетических волокон, например, полиамидных; превосходит гетинакс по прочности, диэлектрическим параметрам, нагрево- и влагостойкости, но дороже. Применяется там же, где и гетинакс.

*Текстолит* изготавливают на основе фенолформальдегидных смол с наполнителем из листов хлопчатобумажной ткани (шифон, бязь и др.). Среди слоистых пластиков текстолит обладает наибольшей способностью поглощать вибрационные нагрузки. Текстолит обладает низким коэффициентом трения, высокой износостойкостью. Недостатком текстолита является низкая рабочая температура (до 90 °С). Из текстолита изготавливают подшипники, шестерни.

*Стеклотекстолит* изготавливается на основе стеклоткани. Для стеклопластиков конструкционного и электроизоляционного назначения обычно применяют ткани из бесщелочного алюмоборосиликатного стекла, для нагревостойких (до 300 °С) – из кварцевых волокон. Стеклотекстолит превосходит гетинакс и текстолит по механическим и диэлектрическим свойствам, влаго-, нагрево- и химической стойкости и по длительности срока службы. Применяют как конструкционный материал в химической промышленности, авиа-, кораблестроении, для изготовления корпусов, кожухов, лопастей, емкостей и т. д.; как электроизоляционный – в электрических машинах, трансформаторах.

*Асботекстолит* изготавливается на основе асбестовой ткани. Превосходит другие слоистые пластики по нагревостойкости: может длительно работать при температуре 200 °С, ограниченно – при 250–500 °С и кратковременно – при 1800–4500 °С. Используют как конструкционный и теплоизоляционный материал в ракетной, авиационной и автомобильной технике – для изготовления лопаток ротационных бензонасосов, фрикционных дисков, накладок, тормозных колодок и др.; в электротехнической промышленности – для изготовления панелей и электрощитков при монтаже низковольтной аппаратуры.

## 2.4. Пластмассы с газовым наполнителем

Газонаполненные пластмассы представляют собой гетерогенные дисперсные системы, состоящие из твердой и газообразной фаз. Структура таких пластмасс образована твердым, реже эластичным, полимером – связующим, которое образует стенки элементарных ячеек или пор с распределенной в них газовой фазой – наполнителем. Газонаполненные пластмассы обладают чрезвычайно малым весом и высокими тепло- и звукоизоляционными характеристиками.

В зависимости от структуры газонаполненные пластмассы делятся на две группы:

– *пенопласты* – материалы с ячеистой структурой, в которых газообразные наполнители изолированы друг от друга и от окружающей среды тонкими слоями полимерного связующего;

– *поропласты* – материалы с губчатой структурой, в которых газообразные наполнители сообщаются друг с другом и с окружающей атмосферой.

Основной операцией при получении таких материалов является вспенивание, которое может происходить в результате: продувки газа (воздух, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> и т. д.) через полимер, находящийся в вязкотекучем состоянии; разложения газообразователя, предварительно смешанного с полимером; реакции полимерных компонентов с образованием газа (самовспенивание).

Наибольшее распространение получили следующие газонаполненные пластмассы: пенополивинилхлорид, пенополистирол, пенополиэтилен, пенополиуретаны, пенофенопласты, пеноэпоксиды, пеносилоксаны, которые применяют в качестве легких конструкци-

онных, амортизационных, звуко- и теплоизоляционных материалов, герметиков и т. д.

Свойства некоторых пластмасс, рассмотренных выше, представлены в табл. 4.5.

Таблица 4.5

Свойства некоторых пластмасс

Материал	Плотность, МГ/М <sup>3</sup>	$\sigma_p$ , МПа	$\delta$ , %	$T_{\text{раб}}$ , °С	ТКЛР, ·10 <sup>-5</sup>	$\rho_v$ , Ом·м	$\epsilon$ при $f=50$ Гц	$\text{tg } \delta$ при $= 50$ Гц	$E_{\text{пр}}$ , кВ/мм
Газонаполненные пластики	(1-8) · 10 <sup>-2</sup>	-	-	-	-	-	1	2 · 10 <sup>-3</sup>	-
Фенольные пресс-порошки	1,4-1,9	60-100	1-5	-70 +200	0,2-5	10 <sup>12</sup>	6-10	(3-8) · 10 <sup>-2</sup>	10-20
Волокниты	1,5	80-150	1-10	-70 +150	-	10 <sup>11</sup>	-	-	4-16
Органоволокниты	1,1-1,5	70-700	1-8	-70 +120	-	10 <sup>12</sup>	5-10	(1-10) · 10 <sup>-2</sup>	5-20
Стеклопластики	1,4-1,9	150-1500	-	-	4-12	10 <sup>10</sup> 10 <sup>12</sup>	3-7	(1-5) · 10 <sup>-2</sup>	-
Текстолиты	1,3	110	-	-	2-10	10 <sup>10</sup>	8	0,4	8-110
Гетинаксы	14	150	-	-80 +150	20	10 <sup>9</sup> 10 <sup>11</sup>	8	0,3	25-35
Асбобластики	2	150-50	-	-80 +350	15	10 <sup>10</sup>	3-5	0,2-0,5	1-12
Бороволокниты	2	>2000	-	-	-	-	-	-	-

### Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с краткими сведениями о полимерах и пластмассах.
2. Изучить коллекцию полимерных и пластмассовых образцов, классифицировать и описать их свойства.
3. Составить отчет.

## Содержание отчета

1. Название, цель и задачи работы.
2. Применяемое оборудование и материалы.
3. Краткое описание сведений о полимерах и пластмассах.
4. Описание рассмотренных полимерных и пластмассовых образцов.

## Контрольные вопросы

1. Что такое полимер?
2. От чего зависят свойства полимеров?
3. Какими способами получают полимеры?
4. Какие химические вещества входят в состав полимера?
5. Какой структурой может обладать полимер?
6. Как классифицируются полимеры?
7. Как подразделяются полимеры в зависимости от отношения их к повторному нагреву?
8. В чем отличие между полярным и неполярным полимером?
9. В каких агрегатных состояниях могут находиться полимеры?
10. Приведите примеры полимеров и назовите области их применения.
11. Что такое пластмассы?
12. Из каких компонентов состоят пластмассы?
13. Что такое наполнители и добавки, для чего они применяются?
14. Как классифицируются пластмассы?
15. Приведите примеры пластмасс с порошковым наполнителем и назовите области их применения.
16. Приведите примеры пластмасс с волокнистым наполнителем и назовите области их применения.
17. Приведите примеры пластмасс с листовым наполнителем и назовите области их применения.
18. Приведите примеры пластмасс с газовым наполнителем и назовите области их применения.

# Лабораторная работа № 5

## Маркировка, структура и свойства антифрикционных материалов

### Цель работы

1. Ознакомиться с составом, маркировкой, микроструктурой, свойствами и областью применения антифрикционных материалов.
2. Освоить методику проведения металлографического анализа антифрикционных материалов.

### Задачи работы

1. Сформировать представление о составе, микроструктуре, свойствах, маркировке и области применения антифрикционных материалов.
2. Ознакомиться с методикой приготовления микрошлифов, их травления и исследования структуры под микроскопом.

### Оборудование и материалы

1. Набор металлических образцов антифрикционных материалов.
2. Машина шлифовально-полировальная.
3. Бумага шлифовальная, алмазная паста, полировальная смесь, травитель.
4. Микроскоп металлографический МИ-1.

### Общие сведения об антифрикционных материалах

*Антифрикционными* называют материалы, предназначенные для повышения срока службы трущихся поверхностей деталей и механизмов машин, работающих в условиях трения скольжения. Эти сплавы используются для изготовления элементов кинематических узлов с вращательным или качательным движением, например, подшипников скольжения, которые применяют в виде вкладышей (рис. 5.1).

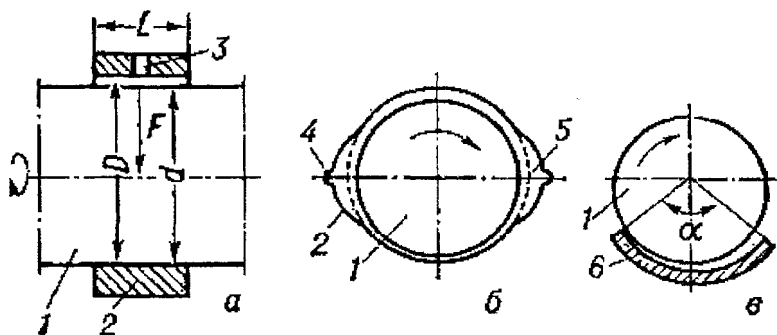


Рис. 5.1. Схемы узла с радиальным подшипником скольжения: *а* – с подводом смазки через отверстие во вкладыше; *б* – разрез подшипникового узла с масляными карманами; *в* – с вкладышем частичного охвата; 1 – вал; 2 – втулка (вкладыш); 3, 4 – отверстия для подачи смазки; 5 – масляные карманы; *б* – вкладыш с углом охвата  $\alpha$ ; *F* – радиальная нагрузка; *L* – ширина вкладыша; *D* – внутренний диаметр вкладыша; *d* – диаметр шейки вала

Антифрикционные материалы должны обладать следующими свойствами: низким коэффициентом трения, высокой износостойкостью, хорошей прирабатываемостью к валу, высокой теплопроводностью, малой склонностью к заеданию (схватыванию), способностью обеспечить равномерную смазку, хорошими технологическими свойствами.

Данными свойствами антифрикционный материал должен обладать при определенных удельных контактных нагрузках и различных конструкциях узла трения. В связи с этим, строение антифрикционных материалов должно быть гетерогенным: с относительно мягкой пластичной основой, в которой равномерно распределена твердая вторая фаза. Твердые частицы или кристаллы должны осуществлять непосредственный контакт с вращающимся валом, а также служить ему опорой и уменьшать трение. Мягкая пластичная основа должна обеспечивать хорошую прирабатываемость вкладыша к валу.

Твердая фаза должна быть равномерно распределена в пластичной основе таким образом, чтобы ее кристаллы не соприкасались между собой. В мягкой основе при ее изнашивании образуются мельчайшие каналы, которые обеспечивают равномерность распределения смазки.

мельчайшие каналы, которые обеспечивают равномерность распределения смазки.

Разнообразие конструктивных типов узлов трения и условий их эксплуатации привело к созданию различных антифрикционных материалов. В настоящее время в машиностроении применяют следующие антифрикционные материалы: сплавы на основе меди, алюминия, олова, железа, металлокерамические (бронзографит, железографит): пластмассы (текстолит, фторопласт-4), а также композиционные материалы. По структуре металлические антифрикционные материалы можно разделить на две группы: материалы с мягкой основой и твердыми включениями; материалы с твердой основой и мягкими включениями. В современной вакуумной и компрессорной технике используются антифрикционные материалы на основе меди, алюминия, олова, железа, а также пластмассы и керамика.

### 1. Антифрикционные материалы на основе меди

В качестве антифрикционных материалов на основе меди используются оловянные и свинцовые бронзы. Оловянные бронзы обладают мягкой основой, представляющей собой  $\alpha$ -твердый раствор Sn в Cu, в микроструктуре выявляющийся в виде светлой фазы, а в качестве твердых частиц выступает эвтектоид ( $\alpha + \delta$ ), который в микроструктуре выявляется в виде темной фазы (рис. 5.2).

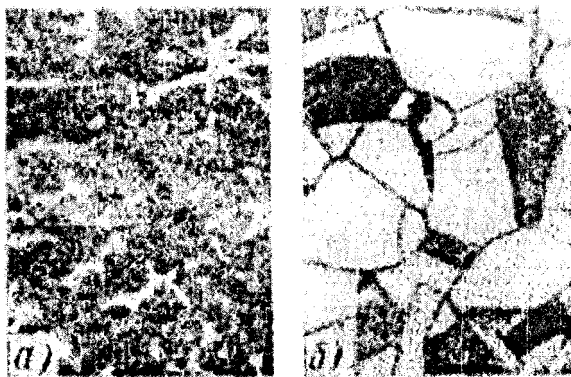


Рис. 5.2. Микроструктуры литой оловянной бронзы



Для изготовления подшипников в настоящее время широко применяются оловянные бронзы БрОЦС5-5-6, БрОЦС4-4-17, БрОЦС3,5-7-5, БрОЦС4-4-2,5. В данных бронзах кроме олова содержится цинк и свинец. Цинк повышает механические свойства и жидкотекучесть сплава, а свинец улучшает антифрикционные свойства и жидкотекучесть.

Свинцовые бронзы типа БрС30 являются заменителями оловянных бронз и относятся к антифрикционным материалам с твердой медной матрицей и мягкими свинцовыми включениями (рис. 5.3), так как Pb не растворяется в Cu в твердом состоянии, а образуют с ней механическую смесь.



Рис. 5.3. Микроструктура бронзы БрС30

Эта бронза отличается высокой теплопроводностью (в четыре раза большей, чем у остальных бронз) и хорошим сопротивлением усталости. Кроме того относительно невысокая твердость зерен Cu позволяет достигать хорошей прирабатываемости, а при граничном трении на поверхность вала переносится тонкая пленка Pb, защищающая поверхность вала от повреждений.

Антифрикционные бронзы используются для изготовления вкладышей, работающих в особо тяжелых условиях эксплуатации (значительные удельные давления и числа оборотов вала), но недостатком бронз является их высокая стоимость и сравнительно невысокая прочность, поэтому их иногда наплавляют на стальную ленту.

## 2. Антифрикционные материалы на основе алюминия

Антифрикционные материалы на основе алюминия в последнее время все шире используются для замены антифрикционных материалов на основе меди, свинца и олова. Данные материалы можно классифицировать по характерной для них микроструктуре. Первая группа сплавов имеет в структуре твердые включения ( $\text{FeAl}_3$ ,  $\text{Al}_3\text{Ni}$ ,  $\text{CuAl}_2$ ,  $\text{Mg}_2\text{Si}$ ,  $\text{AlSb}$ ) в пластичной алюминиевой матрице. Они применяются при высоких скоростях вращения и невысоких нагрузках с применением смазки. Однако, если подача смазки прекращается, то наступает схватывание. Вторая группа сплавов дополнительно легирована оловом, поэтому при прекращении поступления смазки в результате нагрева олово расплавляется и покрывает вал тонким жидким слоем, тем самым препятствуя схватыванию. Антифрикционные материалы на основе Al обладают низким коэффициентом трения и высокой износостойкостью, однако по технологичности уступают оловянным и свинцовым баббитам. Высокий коэффициент линейного расширения алюминиевых сплавов требует больших зазоров в узлах подшипников скольжения. В настоящее время в промышленности используются следующие антифрикционные алюминиевые сплавы АСС 6-5 (5–6 % Sb, 4–5 % Pb); АСМ (3,5–5 % Sb); АН 2,5 (2,7–3,4 % Ni).

## 3. Антифрикционные материалы на основе железа

Основными антифрикционными материалами на основе железа являются чугуны. Антифрикционные свойства чугунов в значительной степени определяются строением графитовых включений, которые выполняют роль мягкой составляющей и создают эффект самосмазывающегося подшипника, кроме того они впитывают смазку и снижают коэффициент трения. Чугун с глобулярной формой графита или с толстыми пластинками более износостоек, чем чугун с тонкими пластинками графита. В структуре антифрикционных чугунов должно быть минимальное количество свободного феррита (не более 15 %) и должен отсутствовать свободный цементит.

Для изготовления деталей узлов трения в машиностроении применяют серые чугуны (АЧС-1, АЧС-2), которые обладают перлитной структурой и повышенным содержанием графита. Они работа-

высокопрочные чугуны (АЧВ-1, АЧВ-2). К их недостаткам можно отнести плохую прирабатываемость, чувствительность к недостатку смазки, пониженную стойкость к воздействию ударной нагрузки.

В качестве антифрикционных материалов иногда используют малоуглеродистые стали с повышенным содержанием (до 30 %)  $\text{Cu}$ , либо графитизированные стали, имеющие включения свободного графита. Данные материалы применяются в качестве заменителя бронз в легких условиях работы при небольших давлениях и невысоких скоростях скольжения.

#### 4. Антифрикционные материалы на основе олова и свинца (баббиты)

Антифрикционные материалы на основе олова и свинца называют баббитами. Баббиты имеют минимальный коэффициент трения со сталью и отлично прирабатываются, благодаря вязкой основе они легко поглощают посторонние твердые частицы, не образуя задиров вала, обладают низкой твердостью (НВ 130–320 МПа), имеют невысокую температуру плавления (240–320 °С), повышенную размягчаемость (НВ 90–240 МПа при 100 °С). В то же время они обладают низким сопротивлением усталости, что влияет на работоспособность подшипников.

В качестве баббитов на основе олова используют сплавы Б88 (88 %  $\text{Sn}$ ; 7–8 %  $\text{Sb}$ ; 2,5–3,5 %  $\text{Cu}$ ) и Б83 (83 %  $\text{Sn}$ ; 10–12 %  $\text{Sb}$ ; 5,5–6,5 %  $\text{Cu}$ ). Структура баббита Б83 состоит из трех фаз –  $\alpha$ ,  $\beta$  ( $\text{SnSb}$ ) и  $\gamma$  ( $\text{Cu}_3\text{Sn}$ ) (рис. 5.4).

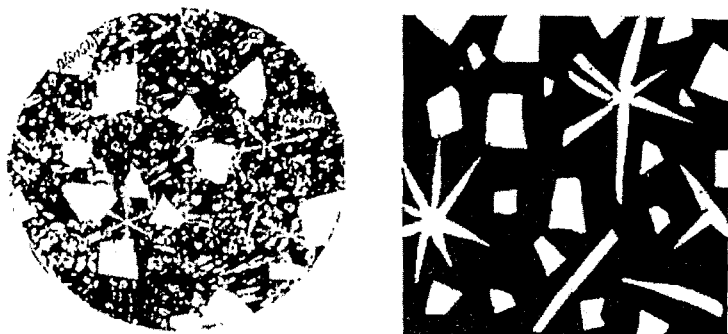


Рис. 5.4. Микроструктура баббита Б83

В данном случае мягкой основой является  $\alpha$ -твердый раствор на основе олова, в микроструктуре выявляется в виде темного фона, так как границы зерен в  $\alpha$ -фазе обычно не вытравливаются. В качестве твердых включений выступают первичные кристаллы  $\beta$ -фазы (твердый раствор на основе соединения  $\text{SnSb}$ ), в микроструктуре выявляется в виде светлых граненых включений. Кроме того в структуре сплава имеется еще одна твердая составляющая (интерметаллид  $\text{Cu}_3\text{Sn}$ ), имеющая вид звездчатых кристаллов, которые выделяются из расплава в первую очередь и образуют каркас, препятствующий всплытию более легких  $\beta$ -кристаллов. Оловянные баббиты являются лучшими подшипниковыми сплавами и применяются для заливки наиболее ответственных подшипников паровых турбин, компрессоров, дизелей и других высоконагруженных установок, работающих со смазкой при высоких скоростях скольжения.

Свинцовые баббиты являются более экономичными, чем баббиты на основе олова, и применяются как их заменители для деталей, не испытывающих ударных нагрузок. Кроме того они обладают большим коэффициентом трения, но при этом более хрупкие, так как в них мягкой составляющей является достаточно хрупкая эвтектика.

В качестве баббитов на основе свинца используют сплавы Б16 (15–17 % Sn; 15–17 % Sb; 1,5–2 % Cu остальное Pb), Б6 (5–6 % Sn; 14–16 % Sb; 2,5–3,0 % Cu остальное Pb). Микроструктура сплава Б16 (рис. 5.5) имеет эвтектическое строение с равномерно распределенными включениями. В качестве мягкой основы выступает эвтектическая смесь, состоящая из  $\beta$ -фазы (твердый раствор олова и сурьмы в свинце, светлая фаза),  $\gamma$ -фазы (интерметаллид  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ , звездчатые кристаллы) и  $\delta$ -фазы (темная). Твердыми включениями в этом баббите являются  $\beta$ -фаза (белые граненые кристаллы) и  $\gamma$ -фаза (звездчатые кристаллы).



Рис. 5.5. Микроструктура баббита Б16

## **Порядок выполнения работы**

1. Ознакомиться с краткими сведениями об антифрикционных материалах.
2. В соответствии с методикой металлографического анализа исследовать под микроскопом и зарисовать микроструктуру образцов антифрикционных материалов.
3. Составить отчет.

## **Содержание отчета**

1. Название, цель и задачи работы.
2. Применяемое оборудование и материалы.
3. Краткое описание сведений об антифрикционных материалах.
4. Зарисовка микроструктуры образца и ее описание.

## **Контрольные вопросы**

1. Что такое антифрикционный материал?
2. Какими свойствами должен обладать антифрикционный материал?
3. Какие материалы используются в качестве антифрикционных материалов?
4. Какие структурные составляющие формируют необходимые свойства антифрикционных материалов?
5. Какие антифрикционные материалы на основе меди вы знаете?
6. Какие антифрикционные материалы на основе алюминия вы знаете?
7. Какие антифрикционные материалы на основе железа вы знаете?
8. Какие антифрикционные материалы на основе олова и свинца вы знаете?
9. Что такое баббит?

## **Лабораторная работа № 6**

### **Определение упругости паров и температуры кипения вакуумных масел**

#### **Цель работы**

1. Ознакомиться с составом, маркировкой, свойствами и областью применения вакуумных масел.
2. Освоить методику определения упругости паров и температуры кипения вакуумных масел.

#### **Задачи работы**

1. Сформировать представление о составе, свойствах, маркировке и области применения вакуумных масел.
2. Ознакомиться с методикой определения упругости паров и температуры кипения вакуумных масел.

#### **Оборудование и материалы**

1. Вакуумные масла VM-1, VM-3, VM-5.
2. Вакуумная установка, масляный термостат, электропечь, тензиометр, осветитель (с фокусным расстоянием 1 м), кронштейн с поворотной головкой.
3. Микроскоп лабораторный с увеличением  $15^{\times}$ .
4. Лабораторная посуда, термометр, бязь хлопчатобумажная, бумага полупрозрачная, бензин, спирт.

#### **Общие сведения о вакуумных маслах**

Широкое внедрение вакуумных технологий во многих отраслях промышленности способствует развитию и совершенствованию вакуумной техники и оборудования, работа которых невозможна без качественных вакуумных рабочих жидкостей, так как степень достигаемого вакуума в значительной мере зависит от их эксплуатационных свойств. Основной рабочей жидкостью вакуумных систем является вакуумное масло. Вакуумное масло представляет собой жидкость с низким давлением пара, которая применяется как сма-

зочный материал трущихся поверхностей в вакуумных устройствах, как рабочая жидкость в паромасляных насосах или как уплотняющая жидкость в насосах механического действия, а также для наполнения жидкостных вакуумметров.

При использовании в качестве рабочей жидкости механических насосов, вакуумные масла обеспечивают герметичность рабочих камер насоса, при этом наиболее значимым свойством в данных условиях эксплуатации является вязкость масла. От вязкости масла зависит уровень его рабочих (уплотняющих и смазывающих) характеристик, кроме того от нее зависит испаряемость вакуумного масла.

Как рабочая жидкость паромасляных вакуумных насосов вакуумное масло должно обладать низкой упругостью пара при рабочей температуре и термической стойкостью, а также быть химически инертным по отношению к кислороду и откачиваемым газам.

Выбор вакуумного масла зависит от характеристик насосов, его совместимости с оборудованием, в котором оно будет перекачиваться, а также с конструкционными уплотнительными материалами и откачиваемой средой. От правильного выбора масла зависит то, насколько эффективно будет происходить эксплуатация вакуумного оборудования.

Вакуумное масло получают вакуумной дистилляцией природных и синтетических жидкостей, по химическому составу различают минеральные, кремнийорганические и другие масла. Наибольшее применение в вакуумной технике нашли минеральные и кремнийорганические вакуумные масла.

В странах СНГ выпускают и применяют вакуумные масла серии ВМ.

Масло ВМ-1С (ТУ 38.1011187–88) вырабатывается из сернистых или малосернистых парафиновых нефтей путем глубокой очистки и специальной вакуумной дистилляции. Применяется в качестве рабочей жидкости в высоковакуумных паромасляных насосах, в механических насосах с масляным уплотнителем.

Основные свойства:

- плотность при 20 °С не более 870 кг/м<sup>3</sup>;
- вязкость кинематическая при 50 °С не менее 35 мм<sup>2</sup>/с;
- температура вспышки не ниже 243 °С.

Масло ВМ-1И (ТУ 38.401-58-206-97), аналог масла ВМ-1С.

Основные свойства:

- плотность при 20 °С не более 870 кг/м<sup>3</sup>;
- вязкость кинематическая при 50 °С не менее 60–70 мм<sup>2</sup>/с;
- температура вспышки не ниже 234 °С.

Масло ВМ-3 (ТУ 38.401-58-3-90) является рабочей жидкостью для высокопроизводительных паромасляных бустерных, вспомогательных пароструйных и специальных форвакуумных насосов.

Основные свойства:

- вязкость кинематическая при 50 °С не менее 8–11 мм<sup>2</sup>/с;
- температура вспышки не ниже 150–180 °С.

Масло ВМ-4 (ТУ 38.401-58-3-90) является рабочей жидкостью для высокопроизводительных паромасляных бустерных, вспомогательных пароструйных и специальных форвакуумных насосов, для механических вакуумных насосов с масляным уплотнением.

Основные свойства:

- плотность при 20 °С не более 908 кг/м<sup>3</sup>;
- вязкость кинематическая при 50 °С не менее 48–57 мм<sup>2</sup>/с;
- температура вспышки не ниже 205 °С.

Масло ВМ-5С (ТУ 38.1011187-88) применяется в качестве рабочей жидкости в высоковакуумных паромасляных насосах (для создания сверхвысокого вакуума), в механических насосах с масляным уплотнителем.

Основные свойства:

- плотность при 20 °С не более 875 кг/м<sup>3</sup>;
- вязкость кинематическая при 50 °С не менее 42 мм<sup>2</sup>/с;
- температура вспышки не ниже 250 °С.

Масло ВМ-6 (ТУ 38.401-58-3-90) является рабочей жидкостью для механических вакуумных насосов с масляным уплотнением.

Основные свойства:

- вязкость кинематическая при 50 °С не менее 40 мм<sup>2</sup>/с;
- температура вспышки не ниже 170–185 °С.



Масло ВМ-11 (ТУ 38.401-58-3-90) является рабочей жидкостью для пароструйных вакуумных вспомогательных насосах.

Основные свойства:

- вязкость кинематическая при 50 °С, не менее 12,5–15 мм<sup>2</sup>/с;
- температура вспышки не ниже 216 °С.

Массовая доля золы для всех типов масел должна быть не более 0,01 %, наличие вода в составе масла недопустимо. В зависимости от вида механико-динамической нагрузки вакуумные масла при различных температурах, давлении и продолжительности эксплуатации могут изменять свою консистенцию и вязкость. Эти изменения основных свойств могут повлиять на работу компонентов вакуумной техники. В связи с этим необходимо четкое соблюдение и контроль основных показателей вакуумных масел: вязкости, давления насыщенных паров, предельного остаточного давления и стабильности против окисления.

### **Методика определения упругости паров и температуры кипения вакуумных масел**

Изучаемый метод определения упругости паров и температуры кипения вакуумных масел соответствует с ГОСТ 19678-74 и распространяется на вакуумные масла, имеющие давление паров при температуре  $20 \pm 5$  °С не выше  $1 \cdot 10^{-5}$  мм рт. ст.

Сущность метода заключается в том, что вертикально подвешенный диск тензиометра, прикрывающий сопло испарителя, отклоняется на некоторый угол под действием давления паров испытываемого масла при определенных температуре и остаточном давлении. Отклонение диска от первоначального положения компенсируется наклоном тензиометра, при этом за угол отклонения диска принимают угол наклона тензиометра, по которому и определяют упругость паров вакуумного масла.

#### **1. Подготовка к испытанию**

Перед испытанием промывают и сушат тензиометр (рис. 6.1). Для этого пробку тензиометра, поверхность корпуса, соприкасающуюся с ней, и трубку со шлифом предварительно протирают бя-

зью, смоченной в бензине, для удаления смазки. Затем корпус тензиометра, пробку с держателем, подвесками и диском промывают бензином и ополаскивают спиртом.

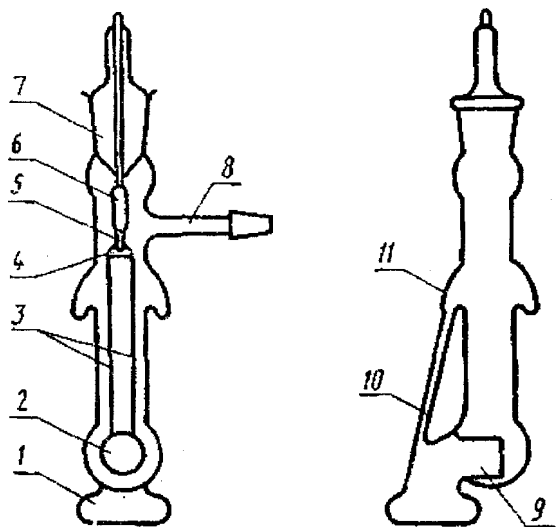


Рис. 6.1. Общий вид тензиометра: 1 – испаритель; 2 – алюминиевый диск; 3 – молибденовые нити; 4 – подвески; 5 – держатель; 6 – стержень; 7 – пробка; 8 – трубка со шлифом на конце; 9 – сопло; 10 – соединительная трубка; 11 – корпус

Промытые корпус и пробку с держателем, подвесками и диском, помещенную в измерительный цилиндр, устанавливают в сушильный шкаф и выдерживают в нем 2 ч при температуре 120 °С.

После сушки пробку с держателем, подвесками и диском, находящуюся в измерительном цилиндре, тщательно осматривают. На молибденовых нитях не должно быть искривлений или петель, а поверхность диска должна быть ровной.

После этого тензиометр закрепляют в муфте поворотной головки кронштейна, к тензиометру прикрепляют с помощью отвертки зеркало, шлиф отводной трубки тензиометра смазывают вакуумной смазкой и подсоединяют тензиометр к вакуумной системе (рис. 6.2). При помощи стеклянной воронки через соединительную трубку в испаритель тензиометра заливают 5–10 см<sup>3</sup> испытуемого масла. Затем вставляют пробку с держателем, подвесками и диском

и проверяют, полностью ли закрыто диском сопло. Если диск смещен, то с помощью держателя и винта поворотной головки кронштейна подгоняют диск к соплу в вертикальной плоскости. После этого пробку вынимают, смазывают вакуумной смазкой, вставляют в тензиометр и тщательно притирают. Вращением пробки диск устанавливают в плоскости, параллельной плоскости среза сопла.

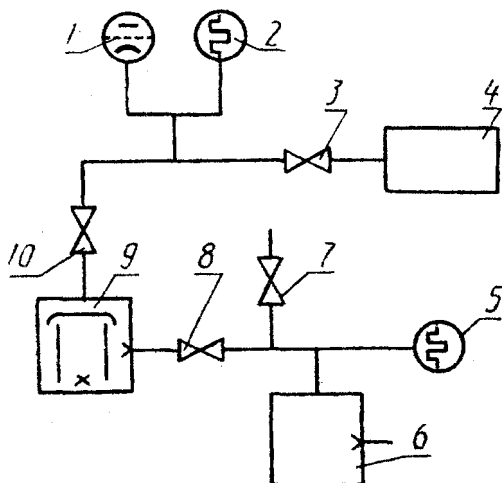


Рис. 6.2. Схема вакуумной системы установки:

- 1 – ионизационный манометрический преобразователь; 2, 5 – термопарный манометрический преобразователь; 3, 7 – напускной вакуумный клапан; 4 – тензиометр; 6 – механический вакуумный насос; 8, 10 – вакуумный клапан с ручным приводом; 9 – диффузионный вакуумный насос

## 2. Проведение испытания

Для проведения испытания отключают тензиометр при помощи поворотной головки кронштейна в сторону открытия сопла, включают механический вакуумный насос и через 1–2 минуты открывают вакуумные клапаны. При откачке вакуумной системы следует избегать вспенивания испытуемого масла и попадания его в сопло. При достижении в системе давления  $2 \cdot 10^{-2}$  мм рт. ст., определяемого по манометрическому термопарному преобразователю, включают электронагреватель диффузионного насоса и подают воду в систему охлаждения диффузионного насоса.

После этого на испаритель тензиометра надевают электропечь, включают ее и подогревают масло до установления в вакуумной системе стабильного давления, определяемого по манометрическому ионизационному преобразователю, порядка  $10^{-5}$  мм рт. ст. Во время проведения испытания давление в вакуумной системе должно быть порядка  $10^{-5}$  мм рт. ст. После установления указанного давления электропечь снимают с тензиометра и после его охлаждения до  $20 \pm 5$  °С погружают в термостат с температурой  $20 \pm 5$  °С, перемещающая подъемный стол установки.

Затем устанавливают осветитель (предназначен для измерения угла наклона тензиометра) так, чтобы при закрытом диском сопле тензиометра луч падал перпендикулярно к зеркалу, а отражение луча от него, сфокусированное на вертикально установленной шкале осветителя, было в верхней части шкалы.

Установочными винтами поворотной головки и вращением пробки тензиометра добиваются того, чтобы плоскость среза сопла тензиометра во всех точках соприкасалась с поверхностью диска (при наклоне тензиометра диск должен оставаться параллельным плоскости среза сопла).

Затем отмечают положение светового «зайчика» на шкале осветителя, соответствующее нулевому положению диска ( $n_0$ ).

Вращением поворотной головки тензиометр наклоняют в сторону закрытия сопла так, чтобы «зайчик» осветителя переместился по шкале осветителя от положения  $n_0$  не менее чем на 450 мм.

После этого включают нагрев и мешалку масляного термостата. Термостат нагревают до температуры, при которой упругость пара испытуемого масла будет порядка  $10^{-3}$  мм рт. ст. (для вакуумных масел ВМ-1 и ВМ-2 достигается 120–125 °С). При этой температуре испытуемое масло выдерживают 3–5 мин с погрешностью не более 0,2 °С. Температура определяется термометром.

По истечении указанного времени выключают мешалку масляного термостата и, наблюдая через микроскоп за плоскостью прилегания диска к соплу, вращением поворотной головки плавно отклоняют тензиометр в сторону открытия сопла.

При достижении тензиометром положения, при котором упругость пара уравновешена эффективной массой диска тензиометра (т. е. происходит появление колебаний диска при дальнейшем пе-

ремещении тензиометра), отмечают положение «зайчика» на шкале осветителя ( $n_1$ ).

Затем снова наклоняют тензиометр в сторону закрытия сопла. Включают мешалку термостата, понижают его температуру на 3–5 °С и отмечают положение светового «зайчика»  $n_2$  при температуре  $t_2$  по описанной выше методике, предварительно выдержав испытуемое масло при достигнутой температуре 3–5 мин.

Отмечают еще шесть-семь положений светового «зайчика» на шкале осветителя ( $n_3...n_i$ ) при температурах ( $t_3...t_i$ ), различающихся не менее чем на 3 °С.

За величину определения положения светового «зайчика» при данной температуре принимают среднее арифметическое пяти параллельных определений.

После этого испытание считают законченным; выключают осветитель и нагреватель диффузионного насоса, затем открывают сопло тензиометра. Закрывают вакуумные клапаны, опускают масляный термостат и, осторожно открывая напускные клапаны, выпускают в вакуумную систему воздух. Вынимают тензиометр из муфты поворотной головки кронштейна. После охлаждения диффузионного насоса перекрывают вакуумные клапаны, выключают механический насос и открывают напускной клапан (около насоса).

### 3. Обработка результатов испытаний

Упругость пара ( $P_1, P_2, P_3, \dots, P_i$ ) испытуемого масла в мм рт. ст. при соответствующих температурах ( $t_1, t_2, t_3, \dots, t_i$ ) вычисляют по формуле (6.1)

$$P_i = 0,753 \frac{m}{S} \sin\left(\frac{1}{2} \arctg \frac{n_0 - n_i}{z}\right), \quad (6.1)$$

где  $m$  – масса диска, г;

$S$  – площадь среза сопла, см<sup>2</sup>;

$z$  – расстояние от шкалы осветителя до зеркала тензиометра, мм;

$n_0$  – расстояние по шкале осветителя от нулевого деления шкалы до положения «зайчика», соответствующего нулевому положению диска, мм;

$n_i$  – расстояние по шкале осветителя от нулевого деления шкалы до положения «зайчика», соответствующего положению диска при температуре  $t_i$ ;

0,735 – коэффициент для пересчета упругости пара из г/см<sup>2</sup> в мм рт. ст.

Далее на полупологарифмической бумаге строят график функции

$$\lg P = f\left(\frac{1}{T}\right), \quad (6.2)$$

где  $P$  – упругость пара, мм рт. ст.;

$T$  – соответствующая данной упругости пара температура, К.

Полученную линейную зависимость экстраполируют и определяют упругость пара испытуемого масла при 20 °С. По полученной зависимости определяют температуру испытуемого масла при упругости пара  $1 \cdot 10^{-2}$  мм рт. ст., которую принимают за температуру кипения вакуумного масла.

### **Порядок выполнения работы**

1. Ознакомиться с краткими сведениями о вакуумных маслах.
2. Провести определение упругости паров и температуры кипения вакуумных масел.
3. Составить отчет.

### **Содержание отчета**

1. Название, цель и задачи работы.
2. Применяемое оборудование и материалы.
3. Краткое описание сведений о вакуумных маслах.
4. Результаты проведенных испытаний по определению упругости паров и температуры кипения вакуумных масел.

### **Контрольные вопросы**

1. Что такое вакуумные масла?
2. Какими свойствами должны обладать вакуумные масла?
3. Какие вакуумные масла вы знаете?
4. Для каких целей применяются вакуумные масла ВМ-1–ВМ-11?
5. Опишите методику определения упругости паров и температуры кипения вакуумных масел?

# Лабораторная работа № 7

## Определение кинематической и расчет динамической вязкости масел

### Цель работы

1. Освоить методику определения кинематической вязкости масел.
2. Освоить методику расчета динамической вязкости масел.

### Задачи работы

1. Сформировать представление о понятии вязкости масел.
2. Ознакомиться с методикой определения кинематической вязкости и расчета динамической вязкости масел.

### Оборудование и материалы

1. Пробы вакуумных и компрессорных масел.
2. Набор стеклянных капиллярных вискозиметров серии ВПЖ 2 и ВПЖ 4; термостат; термометр типа ТИН-10; держатель, обеспечивающий строго вертикальное крепление вискозиметра; секундомер с ценой деления 0,2 с; лупа.
3. Лабораторная посуда, бязь хлопчатобумажная, бумага фильтровальная, растворитель, спирт.

### Общие сведения о вязкости масел

*Вязкость* – это внутреннее трение или сопротивление течению жидкости. Вязкость – одна из важнейших характеристик масел, от которой зависят: легкость пуска насоса или двигателя; качество смазывания и распределение масла, и, следовательно, износ трущихся деталей; расход масла; потери энергии на трение, и, следовательно, мощность насоса или двигателя. Вязкость – одна из основных характеристик масла, по которой делается выбор рабочей жидкости для применения в конкретном случае.

Вязкость масла зависит от химического состава и структуры соединений, составляющих масло, и является характеристикой масла как вещества. Кроме этого, вязкость масла также зависит от внеш-

них факторов – температуры, давления (нагрузки) и скорости сдвига, поэтому рядом с числовым значением вязкости всегда должны указываться условия определения вязкости.

Условия работы насоса или двигателя определяются двумя основными факторами – рабочей температурой и скоростью сдвига, влияющими на выбор рабочей жидкости с определенным значением вязкости. Поэтому вязкость масел определяется при температурах и скоростях сдвига, близких к эксплуатационным.

Важное значение при эксплуатации механизмов в широком интервале температур приобретает зависимость вязкости масла от температуры. Так, например, для облегчения пуска двигателя или насоса вязкость масла должна быть как можно меньше, а при работе прогретого агрегата желательно, чтобы вязкость была достаточно высокой для обеспечения жидкостного трения между его деталями. С повышением температуры вязкость масла понижается, при этом характер изменения вязкости имеет вид параболы (рис. 7.1, а). Такая зависимость неудобна для экстраполяции и для расчетов вязкости. Поэтому кривую зависимости вязкости от температуры строят в полулогарифмических координатах, в которых эта зависимость приобретает практически прямолинейный вид (рис. 7.1, б).

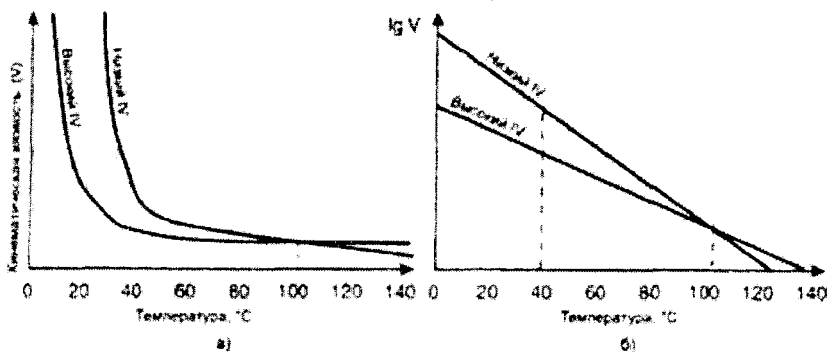


Рис. 7.1. Зависимость вязкости масла от температуры:

а – в прямолинейных координатах; б – в полулогарифмических координатах

Зависимость вязкости масла от температуры принято характеризовать эмпирическим, безразмерным показателем *индексом вязкости VI*. Чем выше численное значение индекса вязкости, тем меньше вязкость масла зависит от температуры и тем меньше на-



клон кривой (рис. 7.1, б). Масло с более высоким индексом вязкости имеет лучшую текучесть при низкой температуре и более высокую вязкость при рабочей температуре. Индекс вязкости зависит от молекулярной структуры масла, так, наивысший индекс вязкости бывает у парафиновых масел (около 100). При очистке масел их индекс вязкости, как правило, повышается, что в основном связано с удалением из масла ароматических соединений. Индекс вязкости масел можно повысить введением специальных присадок – полимерных загустителей.

Вязкость характеризуется двумя показателями – *кинематической и динамической вязкостью*. *Кинематическая вязкость*  $\nu$  – это сопротивление жидкости течению под действием гравитации. При движении жидкости под действием силы тяжести при данном гидростатическом давлении давление жидкости пропорционально ее плотности  $\rho$ . Для всех вискозиметров время истечения определенного объема жидкости прямо пропорционально ее кинематической вязкости  $\nu$ , где  $\nu = \eta/\rho$  и  $\eta$  – динамическая вязкость. *Динамическая вязкость*  $\eta$  – это отношение применяемого напряжения сдвига к скорости сдвига жидкости. Таким образом, динамическая вязкость является мерой сопротивления истечению или деформации жидкости.

Вязкость масла определяется при помощи двух основных типов вискозиметров. При помощи *вискозиметров истечения* измеряется кинематическая вязкость по скорости свободного течения (времени вытекания). Для этой цели применяются капиллярные вискозиметры (рис. 7.2) или сосуды с калиброванным отверстием на дне – вискозиметры Энглера, Сейболта, Редвуда. В настоящее время для стандартных определений вязкости в основном применяются стеклянные капиллярные вискозиметры, которые отличаются простотой и точностью определения, а скорость сдвига в таком вискозиметре незначительна. *Ротационные вискозиметры* применяются для определения динамической вязкости по крутящему моменту с установленной скоростью ротора или по скорости вращения ротора при заданном крутящем моменте.

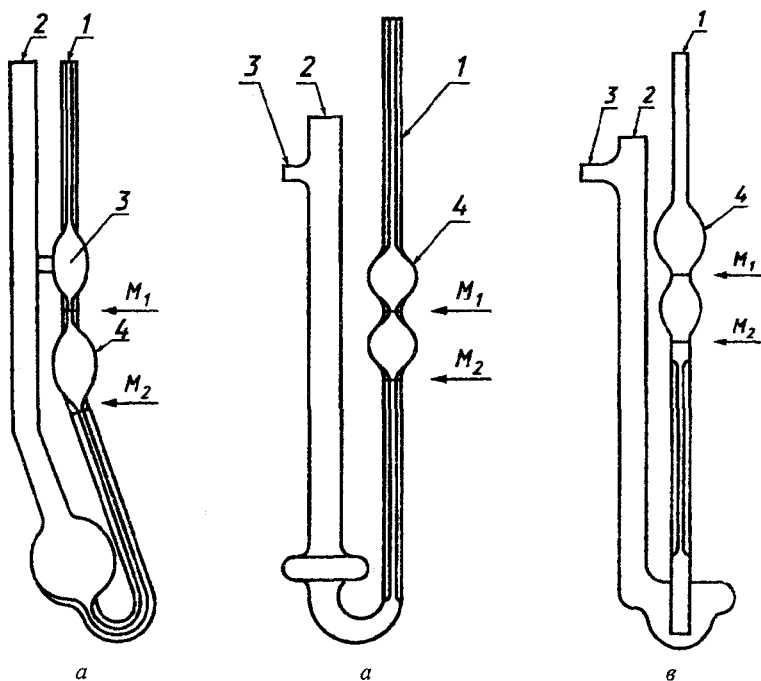


Рис. 7.2. Стекланные капиллярные вискозиметры:  
*а* – типа Канон-Фенске; *б* – типа Пинкевича (ВПЖТ-4, ВПЖ-4);  
*в* – типов ВПЖТ-2, ВПЖ-2

## Методика определения кинематической вязкости масел

Изучаемый метод определения кинематической вязкости  $\nu$  масел соответствует ГОСТ 33–2000 и основан на измерении времени истечения определенного объема жидкости под действием силы тяжести через калиброванный стеклянный капиллярный вискозиметр.

### 1. Подготовка к испытанию

Перед началом проведения измерения вязкости необходимо провести калибровку применяемых термометров и вискозиметров. Чтобы при измерении температур получить наиболее достоверные данные, рекомендуется использовать два термометра, показания которых должны рассматриваться с помощью объективов, дающих

примерно пятикратное увеличение, установленных так, чтобы исключить ошибки углового смещения между видимым и реальным направлением изображения. Для испытания применяют вискозиметры (см. рис. 7.2) со следующими номинальными диаметрами капилляров: 0,99, 1,31, 1,77. Диаметры вискозиметра следует выбирать с таким расчетом, чтобы время истечения исследуемых масел было в пределах  $300 \pm 180$  с.

Вискозиметры, используемые для проведения испытания, должны быть чистыми и сухими. Для этого вискозиметры тщательно промывают несколько раз растворителем, затем промывают полностью испаряющимся растворителем. Сушат вискозиметр, пропуская слабую струю сухого отфильтрованного воздуха в течение 2 мин или до полного удаления следов растворителя.

Вискозиметр должен быть установлен в держателе, обеспечивающем строго вертикальное крепление вискозиметра, у которого верхняя метка расположена непосредственно над нижней, с погрешностью не более  $1^\circ\text{C}$  по всем направлениям. Температура бани в термостате должна регулироваться таким образом, чтобы (для каждой серии определений времени истечения) в интервале от  $15$  до  $100^\circ\text{C}$  температура в бане не менялась более чем на  $\pm 0,02^\circ\text{C}$  по всей высоте вискозиметров или в пространстве между вискозиметрами и местом расположения термометра. Для температур, находящихся вне указанного интервала, изменения температуры не должны превышать  $\pm 0,05^\circ\text{C}$ . Для наполнения бани используют прозрачную жидкость, которая остается в жидком состоянии при температуре испытания. Баня с регулируемой температурой должна быть достаточной глубины, чтобы в момент измерения расстояния от уровня масла в вискозиметре до верхнего уровня жидкости в бане и от уровня масла до дна бани были не менее  $20$  мм.

## 2. Проведение испытания

Вискозиметры типа ВПЖ-4, ВПЖТ-4 и ВПЖ-2, ВПЖТ-2 заполняют испытуемым маслом по следующей методике.

На отводную трубку 3 надевают резиновую трубку. Далее, зажав пальцем колено 2 и перевернув вискозиметр, опускают колено 1 в сосуд с маслом и засасывают его (с помощью резиновой груши, водоструйного насоса или иным способом) до метки  $M_2$ , следя за тем,

чтобы в жидкости не образовались пузырьки воздуха (рис. 7.3). В момент, когда уровень жидкости достигает метки  $M_2$ , вискозиметр вынимают из сосуда и быстро переворачивают в нормальное положение. Снимают с внешней стороны конца колена  $1$  избыток жидкости и надевают на него резиновую трубку. Вискозиметр устанавливают в термостат (рис. 7.4) так, чтобы расширение  $4$  было ниже уровня жидкости. После выдержки в термостате не менее 15 мин засасывают жидкость в колено  $1$  примерно до  $1/3$  высоты расширения  $4$ . Соединяют колено  $1$  с атмосферой и определяют время перемещения мениска жидкости от метки  $M_1$  до  $M_2$ .

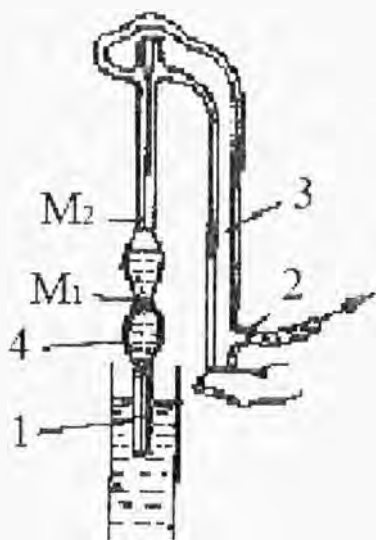


Рис. 7.3. Схема испытания

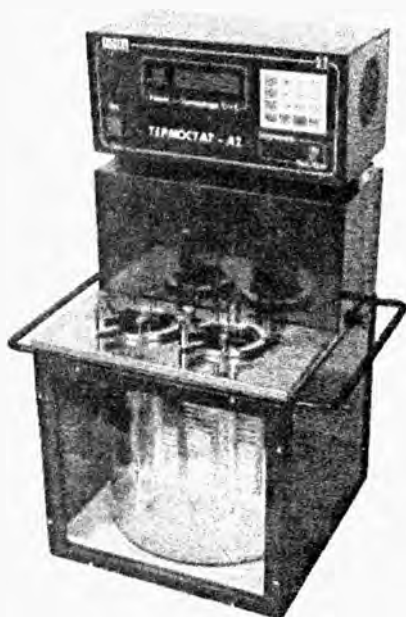


Рис. 7.4. Термостат

Время, полученное на секундомере, записывают, а испытание повторяют не менее 4 раз с точностью до 0,1 с. Во внимание принимаются только те отсчеты, которые отличаются от среднего арифметического не более, чем на  $\pm 0,5$  %. Кинематическую вязкость  $\nu$ ,  $\text{мм}^2/\text{с}$ , рассчитывают по формуле

$$\nu = C \cdot t, \quad (7.1)$$

где  $C$  – калибровочная постоянная вискозиметра,  $\text{мм}^2/\text{с}^2$ ;  
 $t$  – среднее арифметическое значение времени истечения, с.

### **Расчет динамической вязкости масел**

Динамическую вязкость  $\eta$ , МПа·с, рассчитывают на основании кинематической вязкости по формуле

$$\eta = \nu \rho 10^{-3}, \quad (7.2)$$

где  $\rho$  – плотность при той же температуре, при которой определялась кинематическая вязкость,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$\nu$  – кинематическая вязкость,  $\text{мм}^2/\text{с}$ .

### **Порядок выполнения работы**

1. Ознакомиться с краткими сведениями о вязкости масел.
2. Провести определение кинематической вязкости масел
3. Провести расчет динамической вязкости масел.
4. Составить отчет.

### **Содержание отчета**

1. Название, цель и задачи работы.
2. Применяемое оборудование и материалы.
3. Краткое описание сведений о вязкости масел.
4. Результаты проведенных испытаний по определению кинематической и динамической вязкости масел.

### **Контрольные вопросы**

1. Что такое вязкость масла?
2. Что такое кинематическая и динамическая вязкость масла?
3. Какие приборы применяются для определения вязкости масла?
4. Опишите устройство стеклянного капиллярного вискозиметра?
5. Опишите методику определения кинематической вязкости масел?
6. Опишите методику расчета динамической вязкости масел?

## Лабораторная работа № 8 Определение краевого угла смачивания

### Цель работы

Освоить методику определения смачиваемости твердых поверхностей жидкостями методом измерения краевых углов.

### Задачи работы

1. Сформировать представление о физической сущности процесса смачивания поверхностей твердых материалов жидкостями.
2. Научиться различать полное и неполное смачивание поверхности.
3. Изучить принцип работы гониометра.
4. Освоить методику измерения величины краевого угла смачивания.

### Оборудование и материалы

1. Пробы вакуумных и компрессорных масел.
2. Гониометр.
3. Лабораторная посуда, бязь хлопчатобумажная, бумага фильтровальная, растворитель, спирт.

### Общие сведения о процессах смачивания поверхностей жидкостями

**Смачивание** – это явление растекания жидкостей по поверхности твердых или жидких тел под влиянием сил поверхностного натяжения. Различают два вида смачивания: *иммерсионное*, когда вся поверхность твердого тела контактирует с жидкостью, и *контактное*, когда во взаимодействии одновременно находятся три фазы – твердая, жидкая и газообразная.

Смачивание зависит от соотношения между ван-дер-ваальсовыми силами взаимодействия молекул жидкости с молекулами (или атомами) смачиваемого тела и силами взаимного сцепления молекул самой жидкости.

Степень смачивания характеризуется углом смачивания. *Угол смачивания* (или *краевой угол смачивания*) – это угол, образованный касательными плоскостями к межфазным поверхностям, ограничивающим смачивающую жидкость, а вершина угла лежит на линии раздела трех фаз. Угол отсчитывают со стороны жидкости (рис. 8.1).

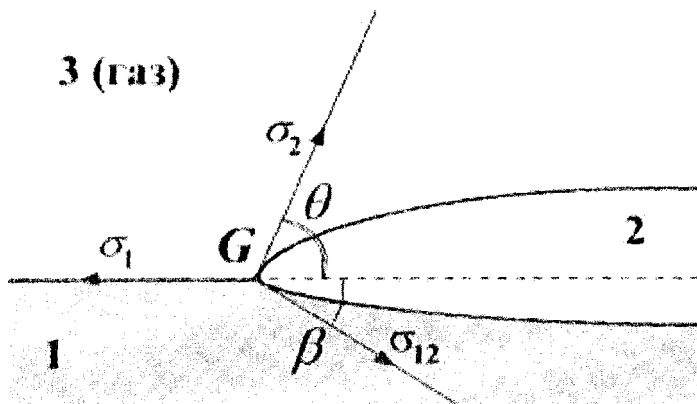


Рис. 8.1. Пример контактного смачивания твердой поверхности жидкостью и определение угла смачивания

*Коэффициентом поверхностного натяжения* (или *поверхностным натяжением*)  $\sigma_{12}$  называют отношение приращения свободной энергии  $\Delta E_{12}$  при образовании площади поверхности  $\Delta S$ :

$$\sigma_{12} = \frac{\Delta E_{12}}{\Delta S}. \quad (8.1)$$

Покажем, от каких факторов зависит величина коэффициента поверхностного натяжения при взаимодействии двух веществ.

Рассмотрим случай, когда поверхность представляет собой границу раздела двух однородных веществ (рис. 8.2). Пусть при образовании этой поверхности на каждую молекулу вещества 2 приходится  $N$  молекул вещества 1. Молекулы этих веществ взаимодействуют главным образом со своими ближайшими соседями, средние расстояния до которых равны  $r_1$  и  $r_2$  соответственно (для определенности будем считать  $r_1 \leq r_2$ ).

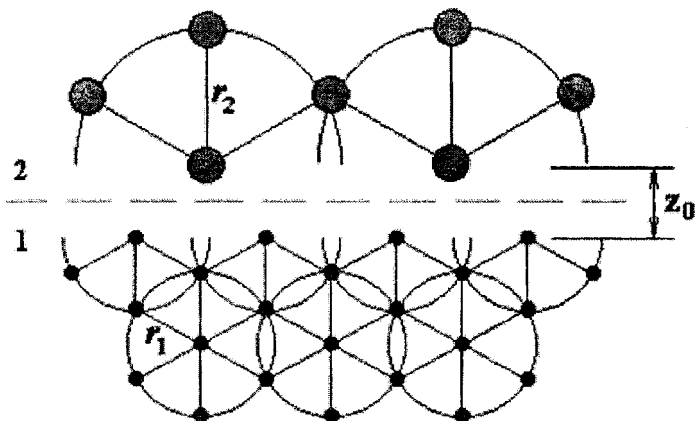


Рис. 8.2. Модель границы раздела двух однородных веществ

Изменение свободной энергии системы, которое соответствует изменению площади этой поверхности, определяется по выражению

$$\Delta E_{12} = \frac{1}{2} (N \times n_1 \times V_1 + n_2 \times V_2) - W_{12}, \quad (8.2)$$

где  $n_1$  и  $n_2$  – число ближайших соседей (координационное число) молекулы внутри вещества 1 и вещества 2 соответственно;

$V_1$  и  $V_2$  – средние энергии парного взаимодействия молекул вещества 1 и 2 соответственно;

$W_{12}$  – средняя энергия взаимодействия поверхностной молекулы вещества 2 с поверхностным слоем, образованным  $N$  молекулами вещества 1, и их ближайшими соседями.

С учетом соотношений  $\Delta S = \pi \times r_2^2$  и  $N = \left[ \frac{r_2}{r_1} \right]^2$  коэффициент поверхностного натяжения (8.1) примет вид

$$\sigma_{12} = \frac{r_2^2 \times n_1 \times V_1 + r_1^2 \times n_2 \times V_2 - 2r_1^2 \times W_{12}}{2\pi r_1^2 \times r_2^2}. \quad (8.3)$$



Таким образом, величина коэффициента поверхностного натяжения зависит от свойств контактирующих веществ (определяется такими параметрами, как координатное число, энергия парного взаимодействия, межмолекулярное расстояние) и от условий взаимодействия между молекулами поверхностей контактирующих веществ. Величины поверхностных натяжений некоторых жидкостей на границе с воздухом приведены в табл. 8.1.

Таблица 8.1

Поверхностное натяжение некоторых жидкостей  
на границе с воздухом

Жидкость	$\sigma_{жг}$ , кДж/м <sup>-2</sup>
Толуол	23,0
Ксилол	28,9
Нитробензол	44,0
Этиленгликоль	47,7
Формаид	58,2
Глицерин	63,4
Вода	72,5

Рассмотрим возможные варианты смачивания поверхностей. В условиях равновесия сумма векторов поверхностных натяжений на всех трех межфазных поверхностях раздела равна нулю:

$$\sigma_{жг} + \sigma_{тг} + \sigma_{тж} = 0. \quad (8.4)$$

В этом случае поверхностное натяжение рассматривается как сила, действующая в плоскости межфазной поверхности раздела и стремящаяся свести ее к минимальной величине. Переходя к проекциям векторов на границу раздела твердой и газовой фаз, получим:

$$\sigma_{жг} \cos\theta - \sigma_{тг} + \sigma_{тж} = 0. \quad (8.5)$$

Из уравнения (8.5) для равновесного краевого угла смачивания  $\theta$

$$\cos\theta = (\sigma_{тг} - \sigma_{тж}) / \sigma_{жг}. \quad (8.6)$$

На поверхностях могут наблюдаться неполное или полное смачивание в зависимости от выбранной смачивающей жидкости и от

состояния поверхности, от степени загрязнения ее, природы этих загрязнений. Измеряя угол смачивания поверхности жидкости с различным поверхностным натяжением, можно количественно оценить состояние поверхности. На рис. 8.3 изображена капля жидкости, находящаяся в разных условиях равновесия с твердой поверхностью и газом.

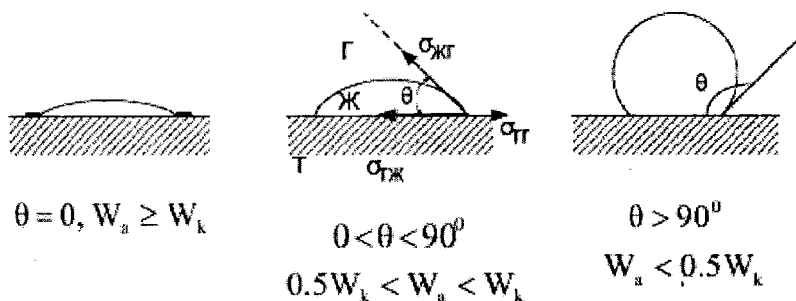


Рис. 8.3. Краевой угол смачивания в условиях полной, частичной смачиваемости поверхности и в условиях отсутствия смачивания

В случае высокой энергии взаимодействия  $W_a$  (работа сил адгезии) между молекулами жидкости и атомами поверхности твердого тела  $\theta = 0$ . Если энергия связи между молекулами внутри капли жидкости  $W_k$  (работа сил когезии) много выше энергии взаимодействия  $W_a$  молекул жидкости с атомами поверхности твердого тела, то наблюдается отсутствие смачивания жидкостью поверхности твердого тела.

В основу методов определения смачиваемости поверхности положены измерения краевого угла смачивания, которые можно проводить либо непосредственно, либо — используя капиллярные явления.

## 1. Описание прибора и методика измерений угла смачивания

Краевые углы смачивания определяют методом проектирования капли на экран. Прибор имеет следующее устройство (рис. 8.4). Капля, нанесенная на исследуемую поверхность, освещается лампой С, расположенной в верхней части прибора, и проектируется объективом О на матовое стекло экрана Э. Лучи света проходят через тепловой фильтр Ф и отражаются от зеркал  $Z_1, Z_2$  и  $Z_3$ , помещенных в

корпусе прибора. Применяя сменные объективы (с различным фокусным расстоянием), можно изменять величину изображения капли на экране. На планшете экрана укреплено приспособление для измерения краевых углов смачивания.

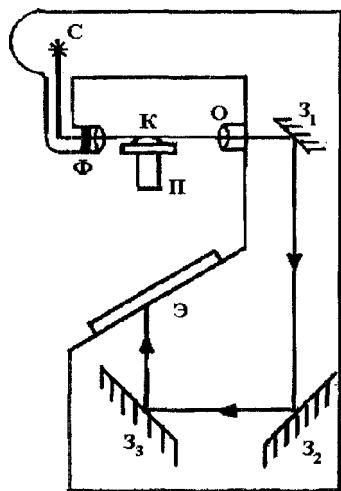


Рис. 8.4. Принципиальная схема прибора для измерения краевого угла смачивания

Металлический держатель, на который помещают пластинки, закрепляется в приборе с помощью бокового винта. Выключателем, расположенным с левой стороны корпуса прибора, включается лампа осветителя (лампу включать только на время измерений). Затем, перемещая винтами весь держатель, и изменяя угол наклона, получают резкое изображение профиля держателя на экране (матовом стекле). Подготовленный образец кладут на держатель и с помощью установочных винтов находят такое положение пластинки, чтобы ее изображение на экране имело вид резко очерченной горизонтальной линии, расположенной приблизительно в середине экрана. Затем с помощью шприца с иглой осторожно наносят каплю жидкости на поверхность пластинки, у самого края ее, обращенного к объективу О. Для хорошей воспроизводимости результатов необходимо наносить капли примерно одинаковых размеров, так, чтобы их диаметр не превышал 2–3 мм. Окончательно регулируют положение держателя для получения наиболее резкого изображения контуров капли и пластинки. Затем с помощью двух махо-

вечков перемещают угломер так, чтобы центр его (точка пересечения перпендикулярных линий) был совмещен с вершиной краевого угла на изображении капли. Окончательная установка производится с помощью микрометрического винта, расположенного на лимбе угломера. Сначала горизонтальная линия угломера устанавливается так, чтобы она совмещалась с изображением пластинки (с границей раздела «капля – поверхность» пластинки). Затем угломер поворачивается в такое положение, чтобы его горизонтальная линия стала касательной к изображению капли и проходила через точку раздела трех фаз (проекцию краевой линии). Разность отсчетов при первой и второй установке угломера дает величину краевого угла. Эти отсчеты делают три раза и рассчитывают среднее значение краевого угла на одной стороне капли.

Радиус капли  $r$  не должен превышать капиллярную постоянную для данной жидкости, чтобы свести к минимуму искажение формы капли за счет гравитации:

$$r \leq a = \sqrt{\sigma_{жт} / (\rho_{ж} \cdot g)}, \quad (8.7)$$

где  $\sigma_{жт}$  и  $\rho_{ж}$  – поверхностное натяжение и плотность смачивающей жидкости, соответственно;

$g$  – ускорение свободного падения.

Таким же образом определяется краевой угол на другой стороне изображения капли, и из двух значений его, которые должны быть близкими, берется среднее. Отсчеты по шкале берутся с точностью  $1^\circ$ . После измерений сразу же выключается лампа осветителя во избежание его перегрева.

Если прибор оборудован кюветой, в которую погружается держатель для образцов, то краевой угол может быть измерен другим способом: пластинка погружается в жидкость, к ней снизу подводится пузырек воздуха с помощью шприца с изогнутой иглой. Краевой угол определяют по изображению пузырька на матовом экране (необходимо помнить, что краевой угол отсчитывается со стороны жидкой фазы).

### Порядок выполнения работы

1. Изучить основные сведения о смачивании поверхностей твердых тел жидкостями.

2. Ознакомиться с порядком измерения краевого угла смачивания.
3. Зарисовать принципиальную схему прибора для измерения краевого угла смачивания.
4. В соответствии с заданием преподавателя выполнить измерения.

### **Содержание отчета**

1. Название, цель и задачи работы.
2. Основные определения краевого угла и коэффициента поверхностного натяжения.
3. Принцип измерения величины краевого угла смачивания.
4. Результаты измерений.

### **Контрольные вопросы**

1. Дать определение понятиям «краевой угол смачивания», «коэффициент поверхностного натяжения».
2. Что такое иммерсионное и контактное смачивание?
3. От каких факторов зависит величина коэффициента поверхностного натяжения при взаимодействии двух веществ?
4. Опишите возможные варианты смачивания поверхностей.
5. Опишите методику измерения величины краевого угла смачивания.

## Литература

1. Гуляев, А.П. Металловедение / А.П. Гуляев. – М.: Metallургия, 1986.
2. Практикум по технологии конструкционных материалов и материаловедению / С.С. Некрасов [и др.]. – М.: Колос, 1983.
3. Беккерт, М. Способы металлографического травления: справочник / М. Беккерт, Х. Клемм. – М.: Metallургия, 1988.
4. Жуковец, И.И. Механические испытания металлов / И.И. Жуковец. – М.: Высшая школа, 1986.
5. Смирягин, А.П. Промышленные цветные металлы и сплавы: справочник / А.П. Смирягин, Н.А. Смирягина, А.В. Белова. – 3 изд. – М., 1974. – 488 с.
6. Осинцев, О.Е. Медь и медные сплавы: справочник / О.Е. Осинцев, В.Н. Федоров. – М.: Машиностроение, 2004. – 336 с.
7. Жолобов, В.В. Металлографический атлас по меди и медным сплавам, обрабатываемым давлением / В.В. Жолобов, Н.И. Зедин. – Л.: Metallургиздат, 1947. – 188 с.
8. Алюминиевые сплавы. Применение алюминиевых сплавов: справочное руководство / И.В. Горынин [и др.]. – М.: Metallургия, 1978. – 364 с.
9. Таубкин, М.Д. Цветные металлы и сплавы: справочник: в 2 т. / М.Д. Таубкин. – М.: Metallургия, 1987.
10. Атлас структур слитков и полуфабрикатов из алюминиевых сплавов. – М.: Metallургия, 1971. – 152 с.
11. Левин, А.М. Конструкционные материалы и герметики в вакуумном приборостроении / А.М. Левин. – М.: Машиностроение, 1986. – 60 с.
12. Бородулин, Г.М. Нержавеющая сталь / Г.М. Бородулин, Е.И. Мошкевич. – М.: Metallургия, 1973. – 320 с.
13. Ульянин, Е.А. Коррозионно-стойкие стали и сплавы: справочник / Е.А. Ульянин. – М., 1980. – 208 с.
14. Акшенцева, А.П. Металлография коррозионно-стойких сталей и сплавов: справочник / А.П. Акшенцева. – М.: Metallургия, 1991. – 288 с.
15. Франценюк, И.В. Альбом микроструктур чугуна, стали, цветных металлов и их сплавов / И.В. Франценюк, Л.И. Франценюк. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. – 192 с.

16. Технические свойства полимерных материалов: учебное пособие / В.К. Крыжановский [и др.]. – 2-е изд., испр. и доп. – СПб.: Профессия, 2005. – 248 с.

17. Технология конструкционных материалов: учебник / О.С. Комаров [и др.]. – Минск: Новое знание, 2005. – 560 с.

18. Жарков, В.Я. Триботехническое материаловедение: учебное пособие / В.Я. Жарков. – Брянск: БГТУ, 2005. – 159 с.

19. Основы трибологии (трение, износ, смазка): учебник для вузов / под ред. А.В. Чиченадзе. – 2-е изд. – М.: Машиностроение, 2001. – 664 с.

20. Топлива и смазочные материалы, технические жидкости. Ассортимент и применение: справочник / И.Г. Анисимов; под ред. В.М. Школьников. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательский центр «Техинформ», 1999. – 596 с.

21. Масла вакуумные. Метод определения упругости паров и температуры кипения: ГОСТ 19678–74.

22. Нефтепродукты. Определение кинематической вязкости и расчет динамической вязкости: ГОСТ 33–2000.

Учебное издание

## МАТЕРИАЛЫ ВАКУУМНОЙ И КОМПРЕССОРНОЙ ТЕХНИКИ

Лабораторные работы  
для студентов специальности  
1-36 20 04 «Вакуумная и компрессорная техника»

Составители:  
ВЕГЕРА Иван Иванович  
ИВАНОВ Игорь Аркадьевич

Редактор Т.А. Подолякова  
Компьютерная верстка Д.А. Исаева

---

Подписано в печать 27.05.2011.

Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная.

Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л. 5,99. Уч.-изд. л. 4,68. Тираж 100. Заказ 1184.

---

Издатель и полиграфическое исполнение:

Белорусский национальный технический университет.

ЛИ № 02330/0494349 от 16.03.2009.

Проспект Независимости, 65. 220013, Минск.