

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Технологии металлов»

# ТРИБОТЕХНИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

*Методические рекомендации к лабораторным работам  
для студентов направления подготовки  
15.03.03 «Прикладная механика»  
очной формы обучения*



Могилев 2025

УДК 669.01  
ББК 30.3  
Т67

Рекомендовано к изданию  
учебно-методическим отделом  
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Технологии металлов» «29» августа 2025 г.,  
протокол № 1

Составители: канд. техн. наук, доц. А. И. Хабибуллин;  
ст. преподаватель Е. Г. Кривоногова

Рецензент канд. техн. наук, доц. А. Е. Наumenко

Содержатся основные теоретические положения и методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу «Триботехническое материаловедение» для студентов направления подготовки 15.03.03 «Прикладная механика» очной формы обучения.

Учебное издание

## Триботехническое материаловедение

Ответственный за выпуск

Д. И. Якубович

Корректор

И. В. Голубцова

Компьютерная верстка

М. М. Дударева

Подписано в печать 30.12.2025. Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.  
Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,86. Уч.-изд. л. 2,0. Тираж 16 экз. Заказ № 931.

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования  
«Белорусско-Российский университет».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя,  
изготовителя, распространителя печатных изданий  
№ 1/156 от 07.03.2019.  
Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

© Белорусско-Российский  
университет, 2025

## Содержание

Правила техники безопасности при проведении лабораторных работ.....	4
1 Лабораторная работа № 1. Определение твердости и износостойкости сплавов.....	5
2 Лабораторная работа № 2. Определение коэффициента трения конструкционных материалов .....	10
3 Лабораторная работа № 3. Структура и свойства углеродистой стали в равновесном состоянии.....	16
4 Лабораторная работа № 4. Изучение зависимости между структурой и свойствами чугунов.....	20
5 Лабораторная работа № 5. Цветные металлы и сплавы.....	25
Список литературы.....	32

## **Правила техники безопасности при проведении лабораторных работ**

1 К работе с учебным оборудованием допускаются лица, прошедшие инструктаж по технике безопасности при проведении лабораторной работы.

2 Разрешается выполнять только ту работу, которая соответствует учебному плану.

3 Лабораторные работы должны проводиться в соответствии с методическими указаниями и правилами технической эксплуатации соответствующего учебного оборудования.

4 Запрещается выполнять лабораторные работы на оборудовании и установках с неисправностями, которые могут привести к пожарам или поражению электрическим током.

5 Запрещается самостоятельно устранять неисправности оборудования.

6 В лаборатории необходимо соблюдать правила внутреннего распорядка.

7 Перед началом работы необходимо провести внешний осмотр оборудования, используемого в лабораторной работе, убедиться в наличии заземления, огнетушителя, отсутствии оголенной электропроводки.

8 Проверить наличие необходимых для выполнения работы образцов и расходных материалов.

9 Обеспечить свободный доступ к используемому оборудованию.

10 При выполнении лабораторной работы запрещается включать оборудование и приборы без разрешения преподавателя, вращать без необходимости настроечные винты и рукоятки, перемещать приборы во время работы.

11 По окончании работы необходимо отключить от электросети оборудование и приборы.

12 Убрать рабочее место.

13 В случае неполадок оборудования и приборов сообщить об этом преподавателю.

# 1 Лабораторная работа № 1. Определение твердости и износостойкости сплавов

**Цель работы:** ознакомление с основными методами измерения твердости и приобретение навыков в работе с соответствующими приборами.

**Оборудование и инструмент:** твердомер Бринелля (ТБ-3000), твердомер Роквелла (ТР 5014), твердомер Виккерса (ИТ 5010-01).

Важными свойствами материалов пары трения являются твердость и микротвердость материала. Твердость – сопротивление материала местной пластической деформации, возникающей при внедрении в него более твердого тела, которая определяется различными методами.

Измерение твердости вследствие быстроты и простоты процесса и возможности без разрушения изделия судить о его свойствах получило широкое применение для контроля качества изделий. Наибольшее применение нашли методы по Бринеллю, Роквеллу и Виккерсу, схема реализации которых приведена на рисунке 1.1.

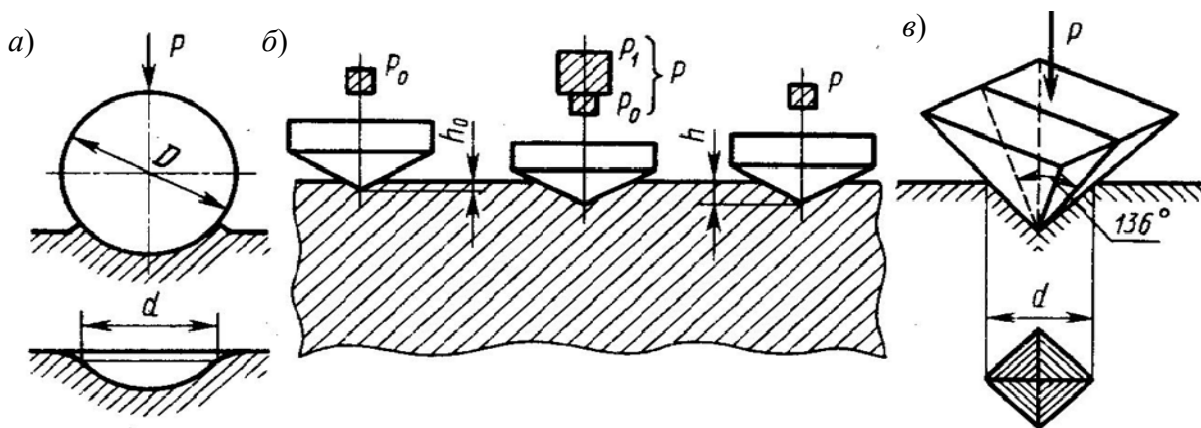


Рисунок 1.1 – Схема определения твердости по Бринеллю (а), Роквеллу (б), Виккерсу (в)

**Определение твердости по Бринеллю.** Сущность метода заключается во вдавливании стального шарика диаметром  $D$  в изделие под действием нагрузки  $P$  и измерении диаметра отпечатка  $d$  после снятия нагрузки (см. рисунок 1.1, а).

Твердость определяют как отношение приложенной нагрузки к площади поверхности сферического отпечатка:

$$HB = \frac{0,102 \cdot 2F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})},$$

где  $F$  – прилагаемая нагрузка, Н;

$D$  – диаметр шарика, мм;

$d$  – диаметр отпечатка, мм.

Чем меньше толщина испытуемого изделия, тем меньший диаметр шарика можно использовать, но в любом случае толщина образца должна превышать глубину отпечатка в 10 раз.

Минимальная толщина испытуемого образца – 0,1 мм. При этом испытания проводятся шариком диаметром 1,0 мм при нагрузке 49,03 Н.

Обычно определение твердости осуществляется шариком диаметром 10,0 мм при нагрузке 29420 Н и продолжительностью выдержки под нагрузкой 10 с. В этом случае твердость обозначается цифрами, характеризующими ее величину, и буквами НВ, например: 170 НВ (Н – hard – твердость, В – метод Бринелля). При нестандартных условиях испытаний после букв НВ указываются условия испытания в следующем порядке:  $D$ ,  $F$  и время выдержки под нагрузкой (в секундах), например: 190 НВ 5/7350/20.

Между временным сопротивлением  $\sigma_s$  и числом твердости НВ существует зависимость для стали и алюминиевых сплавов  $\sigma_s \approx 0,33 \text{ НВ}$ , для медных сплавов  $\sigma_s \approx 0,45 \text{ НВ}$ .

Метод Бринелля не рекомендуется применять для стали с твердостью более 450 НВ, а для цветных металлов – более 200 НВ.

**Определение твердости по Роквеллу.** Сущность метода заключается во вдавливании наконечника с алмазным конусом с углом у вершины  $120^\circ$  (шкалы А и С) или со стальным шариком диаметром 1,58 мм (шкала В) в испытуемый образец под действием последовательно прилагаемых предварительной  $P_0$  и основной  $P_1$  нагрузок и измерений остаточного увеличения глубины внедрения наконечника  $e$  ( $e = (h - h_0) / 0,002$ ) после снятия основной нагрузки в единицах измерения 0,002 мм. При испытании с использованием шкалы А нагрузка составляет 588 Н, шкалы С – 1470 Н, шкалы В – 980 Н.

Схема определения твердости по Роквеллу приведена на рисунке 1.1, б. Под предварительной нагрузкой  $P_0$  индикатор прибора вдавливается в образец на глубину  $h_0$ . Затем на испытуемый образец подается полная нагрузка  $P = P_0 + P_1$ , и глубина погружения наконечника возрастает. После снятия нагрузки прибор показывает число твердости по Роквеллу HR (Н – hard – твердость, R – метод Роквелла). Твердость является величиной, обратной глубине вдавливания. Единица твердости по Роквеллу – безразмерная величина, соответствующая осевому перемещению индикатора на 0,002 мм.

Числа твердости определяются по формулам

$$\text{HRC (A)} = 100 - e; \text{HRB} = 180 - e.$$

Шкала А используется для измерения твердости очень твердых материалов ( $> 67 \text{ HRC}$ ), а также для тонких и твердых поверхностных слоев (0,5...1,0 мм). По шкале В определяют твердость сравнительно мягких (незакаленных) материалов ( $< 400 \text{ НВ}$ ). Основная шкала С используется для испытания материалов, имеющих высокую твердость (после закалки) ( $> 450 \text{ НВ}$ ).

Пределы измерения твердости по шкале А – 70...85 ед., шкале В – 25...100 ед., шкале С – 22...65 ед. Условная запись твердости для разных шкал – HRA, HRB, HRC. Например, 60 HRC (твердость 60 ед. по шкале С).

**Твердость по Виккерсу.** Метод заключается во вдавливании алмазного наконечника, имеющего форму правильной четырехгранной пирамиды (угол при вершине  $136^\circ$ ), в образец под действием нагрузки  $P$  и измерении диагонали отпечатка  $d$  (в миллиметрах), оставшегося после снятия нагрузки (см. рисунок 1.1, в). Нагрузка может изменяться в пределах 9,8...980 Н.

Твердость по Виккерсу определяется по формуле

$$HV = 0,189 \frac{P}{d^2}.$$

Метод используют для определения твердости деталей малой толщины и тонких поверхностных слоев, имеющих высокую твердость. Чем тоньше материал, тем меньше должна быть нагрузка.

В стандартных условиях испытаний (при нагрузке 294 Н, времени выдержки 15 с) обозначение твердости по Виккерсу выглядит как, например, 430 HV. При других условиях испытаний указываются нагрузка и продолжительность выдержки под нагрузкой (например, 250 HV 10/40).

Метод Роквелла, по сравнению с другими методами, имеет преимущество, которое заключается в том, что значение твердости по методу Роквелла фиксируется индикатором, при этом отпадает необходимость в измерении размеров отпечатка и расчетах.

Вместе с тем необходимо запомнить следующие приближенные соотношения:  $1 \text{ HRC} \approx 10 \text{ HB}$  и  $1 \text{ HB} \approx 1 \text{ HV}$ , которые позволяют оперативно определять пределы прочности для типовых изделий.

Например, требуется определить  $\sigma_s$  стали вала редуктора после его улучшения, т. е. с твердостью  $\approx 30 \text{ HRC}$ . Если учесть, что  $30 \text{ HRC} \approx 300 \text{ HB}$ , то  $\sigma_s \approx 300/3 \approx 100 \text{ кгс/мм}^2$ .

Методы HB и HRB применяются для мягких материалов, HRC – для твердых, HRA – для сверхтвердых материалов (например, изделий из карбида вольфрама) и тонких твердых покрытий. Метод Виккерса является универсальным.

Твердость типовых изделий из углеродистых сталей приведена в таблице 1.1, а соответствие между числами твердости, определяемыми различными методами, и пределом прочности при растяжении – в таблице 1.2. Если твердость указанных изделий не соответствует рекомендуемым значениям, можно сделать вывод о браке термической обработки или особых условиях их эксплуатации.

Таблица 1.1 – Твердость типовых изделий из углеродистых сталей

Изделие	Рекомендуемая твердость, HRC
1	2
Ответственные детали машин (валы, оси, шатуны, тяги...)	25
Упругие элементы (пружины, рессоры)	40

Окончание таблицы 1.1

1	2
Инструменты, подвергаемые ударным нагрузкам (зубила, топоры, молотки...)	50
Ножи общего назначения	52...58
Металлорежущий инструмент (сверла, фрезы, метчики, резцы, пилы)	60...65
Алмаз (эталон)	100

Таблица 1.2 – Соответствие между числами твёрдости, определяемыми различными методами, и пределом прочности при растяжении

Твёрдость по Бринеллю, HB		Твёрдость по Роквеллу, HR			Твёрдость, определяемая по Виккерсу, HV	Твёрдость упругой отдачи	Предел прочности при растяжении, кГ/мм <sup>2</sup>		
Диаметр отпечатка, мм	Число твёрдости	Шкалы					Углеродистая сталь	Хромистая сталь	Никелевая и хромо- никеле- вая стали
		С	А	В					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2,2	780	72	89	—	1224	—	—	—	—
2,25	745	70	87	—	1116	—	—	—	—
2,3	712	68	86	—	1022	—	—	—	—
2,35	682	66	85	—	941	90	—	—	—
2,40	653	64	84	—	868	86	—	—	—
2,45	627	62	83	—	804	84	—	—	—
2,50	601	60	82	—	746	81	—	—	—
2,55	578	58	81	—	694	78	—	—	—
2,60	555	56	79	—	649	75	—	—	—
2,65	534	54	78	—	606	71	—	—	—
2,70	514	52	77	—	587	69	—	—	—
2,75	495	50	76	—	551	66	178	173	168
2,80	477	49	76	—	534	65	172	167	161
2,85	461	48	75	—	502	64	165	—	—
2,90	444	46	74	—	473	61	160	156	—
2,95	429	45	73	—	460	59	155	150	146
3,00	415	44	72	—	435	58	149	145	141
3,02	409	43	72	—	423	57	147	143	139
3,05	401	42	71	—	412	56	144	139,5	136,5
3,10	388	41	71	—	401	55	139,5	136	132
3,15	375	40	70	—	390	53	135	131,5	127,5
3,20	363	39	70	—	380	52	130,5	127	123,5
3,25	352	38	69	—	361	51	126,5	123	119,5
3,30	341	37	68	—	344	50	122,5	119	116
3,35	331	36	68	—	335	49	119,5	116,5	113
3,40	321	35	67	—	320	48	115,5	112	109
3,45	311	34	67	—	315	47	111,5	108,5	105,5
3,50	302	33	67	—	305	46	108,5	105,5	102,5
3,55	293	31	66	—	291	43	105,5	102,5	100
3,60	286	30	66	—	285	42	103	100,5	97,5



Окончание таблицы 1.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3,65	277	29	65	—	278	41	99,5	97	94
3,70	269	28	65	—	272	40	97	94	91,5
3,75	262	27	64	—	261	39	94,5	92	89,5
3,80	255	26	64	—	255	38	92	89	86,5
3,85	248	25	63	—	250	37	89,5	87	84,5
3,90	241	24	63	100	240	36	87	84,5	82
3,95	235	23	62	99	235	35	84,5	82,5	80,5
4,00	228	22	62	98	226	34	82,5	80	77,5
4,05	223	21	61	97	221	33	80	77,5	76,5

**Расчет критерия износостойкости стали.** Существует возможность определения критерия износостойкости для ряда сталей, используя только знания их механических свойств, опубликованных в справочной литературе.

Комплексный критерий износостойкости включает базовые показатели механических свойств сталей, активно влияющих на их прочность и износостойкость.

Метод Виккерса обладает широкой шкалой твердости независимо от нагрузки, что делает его наиболее приемлемым для использования в критериальных зависимостях механических свойств.

Расчет значений критерия износостойкости производится с использованием следующей зависимости:

$$\sigma_s \cdot \psi + 10 \cdot \text{HV}.$$

Например, сталь 40 после закалки от 860 °С и высокого отпуска 600 °С имеет следующие механические свойства: предел прочности  $\sigma_s = 660$  МПа; относительное сужение  $\psi = 0,66$ ; твердость по Бринеллю – 1860 НВ (а значит, твердость по Виккерсу – 1860 НВ).

Таким образом, критерий износостойкости этой стали

$$\sigma_s \cdot \psi + 10 \cdot \text{HV} = 660 \cdot 0,66 + 10 \cdot 186 = 435,6 + 1860 = 2295 \text{ МПа}.$$

Представленные данные позволяют судить о возможностях обеспечения высокой прочности и износостойкости деталей машин. Практика повышения долговечности машин диктует необходимость применения рациональной термической обработки сталей для повышения критериев износостойкости.

Для повышения износостойкости изделий из стали 40 необходимо произвести ее закалку и низкий отпуск при температуре 200 °С, обеспечивающие существенное повышение твердости.

### **Контрольные вопросы**

- 1 Укажите области применения различных методов.
- 2 Какие твердости у типовых изделий?

3 По какой формуле производится расчет твердости по Бринеллю и другим методам?

4 На каком приборе следует определять твердость материала, из которого изготовлены консервные банки (гаечные ключи, ножи, лезвия безопасных бритв, медная фольга)?

5 Как определяется комплексный критерий износостойкости?

### **Задание**

1 Изучить основные методы измерения твердости.

2 Зарисовать схемы определения твердости по Бринеллю, Роквеллу, Виккерсу.

3 Записать формулы определения твердости и условные записи твердости для разных методов.

4 Записать области применения различных методов.

5 Усвоить значения твердостей типовых изделий из углеродистых сталей.

6 Провести закалку стали 40, определить ее твердость по Роквеллу, перевести в твердость по Виккерсу и рассчитать критерий износостойкости.

## **2 Лабораторная работа № 2. Определение коэффициента трения конструкционных материалов**

**Цель работы:** ознакомление с методом измерения фрикционных свойств материалов при их скольжении; приобретение навыков в работе с прибором для измерения коэффициента трения.

**Оборудование и инструмент:** измеритель коэффициента трения COF-01, образцы материалов.

### **2.1 Общие положения**

Сила трения скольжения – сила, возникающая между соприкасающимися телами при их относительном движении.

По физике взаимодействия трение принято разделять на:

– сухое, когда взаимодействующие твёрдые тела не разделены никакими дополнительными слоями (смазками) – очень редко встречающийся на практике случай (отличительная черта сухого трения наличие значительной силы трения покоя);

– сухое с сухой смазкой (графитовым порошком);

– жидкостное, при взаимодействии тел, разделённых слоем жидкости или газа (смазки) различной толщины;

– смешанное, когда область контакта содержит участки сухого и жидкостного трения;

– граничное, наиболее распространённый случай, когда в области контакта могут содержаться слои и участки различной природы (оксидные плёнки, жидкость и т. д.).

Величина, характеризующая фрикционные свойства поверхности, называется коэффициентом трения, и обозначается чаще всего латинской буквой « $k$ » или греческой буквой « $\mu$ ».

Коэффициент трения – отношение силы трения к силе (обычно силе тяжести), действующей перпендикулярно поверхностям, находящимся в контакте. Этот коэффициент является мерой относительного усилия, с которым поверхность одного материала скользит по соприкасающейся поверхности такого же или другого материала.

Статический или начальный коэффициент трения связан с измеренной силой, необходимой для начала движения одной поверхности по другой. Кинетический коэффициент трения или коэффициент трения скольжения связан с силой, необходимой для поддержания такого движения.

В первом приближении величина силы трения скольжения может быть рассчитана по формуле

$$F_{mp} = kN,$$

где  $k$  – коэффициент трения скольжения;

$N$  – сила нормальной реакции опоры.

Механизм возникновения сил трения представляет собой сложную физико-механическую проблему, рассмотрение которой показывает, что силы трения имеют электромагнитную природу и определяются характером взаимодействия атомов и молекул в соприкасающихся слоях. Коэффициенты  $\mu_0$  и  $\mu$  зависят от состояния поверхностей соприкасающихся тел, их химической природы и практически не зависят от площади контакта тел. При малых скоростях относительного движения тел коэффициент  $\mu$  не зависит от скорости. При увеличении скорости относительного движения  $\mu$  вначале уменьшается, а затем начинает возрастать. Этот факт можно связывать с тем, что вначале при увеличении скорости выступы шероховатых поверхностей тел все меньше попадают в углубления на этих поверхностях (трение уменьшается). Затем с увеличением скорости происходит разрушение выступов и их измельчение (трение увеличивается).

У полимерных материалов существует ряд особенностей фрикционных свойств. Фрикционные свойства полимерных пленок представляют большой интерес при их использовании для упаковки.

Способность к скольжению в некоторых полимерах, например в полиэтилене, вызывается добавками. Эти добавки имеют разную степень совместимости с матричным материалом пленки. Некоторые из них выступают на поверхность, смачивая ее и делая более скользкой. Поскольку поверхностный налет может быть неоднородным по площади пленки, то результаты могут иметь ограниченную воспроизводимость.

Фрикционные свойства пленок могут зависеть от скорости скольжения соприкасающихся поверхностей, поэтому необходимо тщательно контролировать скорость перемещения.

Фрикционные свойства могут сильно зависеть от возраста пленки или листов и состояния их поверхностей. Свойство многих добавок образовывать скользящий поверхностный налет зависит от времени. Поэтому иногда не имеет смысла сравнивать характеристики трения пленок или листов, изготовленных в разное время, если только не стоит задача специально исследовать такой эффект.

Если материалы изготавливались по разной технологии или по одинаковой технологии, но на разных машинах, то качество их поверхности может зависеть от типа оборудования или его состояния. Эти факторы необходимо учитывать при оценке фрикционных свойств.

Кроме того, на статический коэффициент трения сильное влияние оказывают значения силы, сжимающие трущиеся поверхности, и время с момента приложения этой силы до момента начала испытаний.

Экспериментальные методы определения коэффициента трения скольжения:

- метод «движения тела по горизонтальной поверхности»;
- метод «наклонной плоскости».

## ***2.2 Метод «движения тела по горизонтальной поверхности»***

В соответствии со стандартом ISO 8295 для измерения статического и кинетического коэффициентов трения полимерных пленок методом «движения тела по горизонтальной поверхности» используется прибор COF-01. С помощью определяемых фрикционных характеристик можно контролировать качество герметизации упаковок и скорость упаковывания.

### ***2.2.1 Состав прибора.***

В состав прибора входят (рисунок 2.1) рабочая плоскость, зажим, блок скольжения, тензодатчик, принтер, сенсорный экран.

Рабочая плоскость – плоскость, предназначенная для расположения испытуемого образца.

Зажим – предназначен для удержания испытуемого образца.

Блок скольжения – квадратный стальной брусок, предназначенный для закрепления второго испытуемого образца и создания заданного прижимного усилия.

Тензодатчик – датчик, регистрирующий развиваемое усилие.

Принтер – предназначен для печати отчета об испытаниях.

Сенсорный экран – дисплей для установки параметров испытаний.

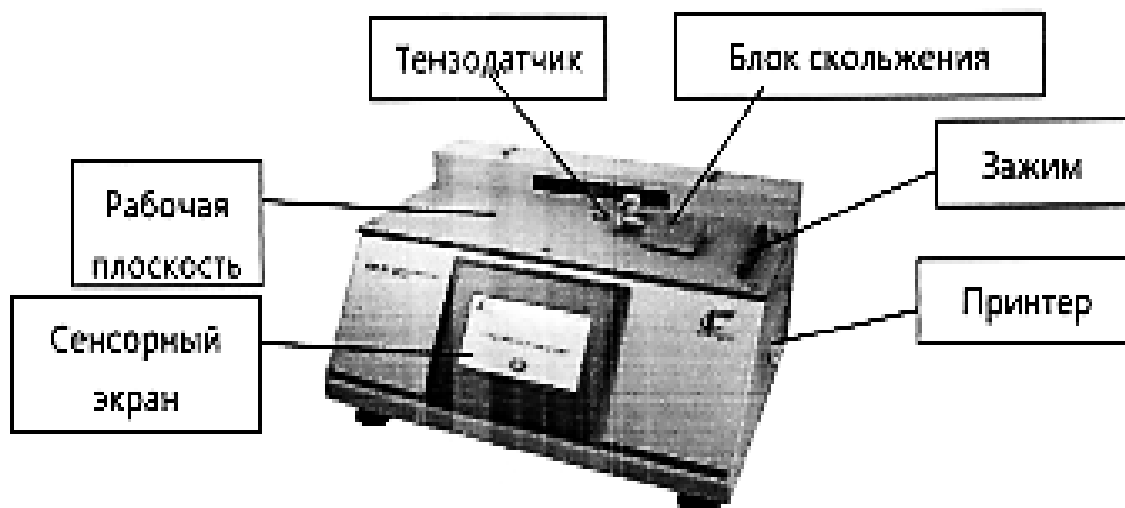


Рисунок 2.1 – Общий вид прибора

### 2.2.2 Последовательность проведения испытаний.

1 Подготовка образцов. Образец пленки, закрепляемый на рабочей плоскости, должен иметь размер  $250 \times 130$  мм, второй образец, прикрепленный к блоку скольжения, должен быть квадратным со сторонами 120 мм. Все образцы должны быть плоскими и недеформированными.

Техническая характеристика оборудования представлена в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Техническая характеристика

Модель	COF-01
Диапазон силы, Н	0...5
Масса блока скольжения, г	$200 \pm 5$
Скорость испытания, мм/мин	0...100
Источник питания	110...220 В, 50 Гц
Габаритные размеры, мм	$540 \times 380 \times 240$
Условия эксплуатации	Температура $10\text{ }^{\circ}\text{C} \dots 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , относительная влажность 20 %...70 %

2 Закрепить образец на рабочей плоскости. Для этого поднять зажим, вставить правый конец образца и опустить зажим. Если образец неровный или скрученный, левый конец необходимо зафиксировать на рабочей плоскости при помощи скотча.

3 Прикрепить скотчем края второго образца к блоку скольжения.

4 Установить параметры испытания с помощью сенсорного экрана:

- количество испытаний: «Num» – 3;
- масса блока скольжения: «Slid mass» – 200 г;
- период времени после нажатия кнопки до начала движения образца: «Adjust time» – 15 с;
- скорость движения: «Speed» – 100 мм/мин.

5 Испытание. После установки параметров нажать кнопку «↵» в правом нижнем углу для входа в основной интерфейс. Нажать кнопку «Test» и войти в раздел «Испытание». На сенсорном экране (рисунок 2.2) в соответствующих окнах будут отражаться следующие параметры:

- $\mu_s$  – значение статического коэффициента трения;
- $\mu_d$  – значение динамического коэффициента трения;
- $\delta_s$  и  $\delta_d$  – значения стандартных отклонений статического и динамического коэффициентов трения соответственно;
- «Num» – номер текущего испытания и общее количество испытаний;
- «Slid mass» – масса блока скольжения;
- «Adjust time» – пауза до начала движения образца;
- «Speed» – скорость движения;
- «Force» – мгновенная сила, прикладываемая к блоку скольжения.

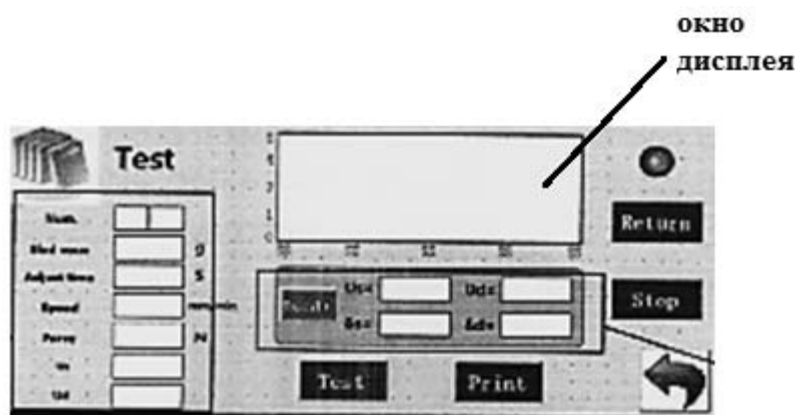


Рисунок 2.2 – Вид сенсорного экрана в режиме «Испытание»

В окне дисплея отражается график изменения коэффициента трения в реальном времени. Кроме того, на сенсорном экране находятся кнопки:

- «Test» – кнопка запуска испытания;
- «Print» – кнопка печати результатов испытания;
- «Return» – кнопка возврата тензодатчика в начальное положение;
- «Stop» – остановка тензодатчика в любой момент.

6 Провести испытание и записать результаты. После каждого испытания блок скольжения должен быть снят перед возвращением тензодатчика. Для возвращения тензодатчика нажать кнопку «Return». Когда тензодатчик вернется в исходное положение, снова установить блок скольжения на тензодатчик и повторить испытание.

### 2.3 Метод «наклонной плоскости»

Для определения статического коэффициента трения скольжения  $\mu_s$  положим тело А на наклонную поверхность В, угол наклона которой к горизонту можно менять (рисунок 2.3). Зафиксируем угол наклона плоскости к

горизонту  $\alpha$  в тот момент, когда тело А начинает скользить по наклонной плоскости или двигаться по ней с постоянной скоростью.

На рисунке 2.3 изображены силы, действующие на тело А.

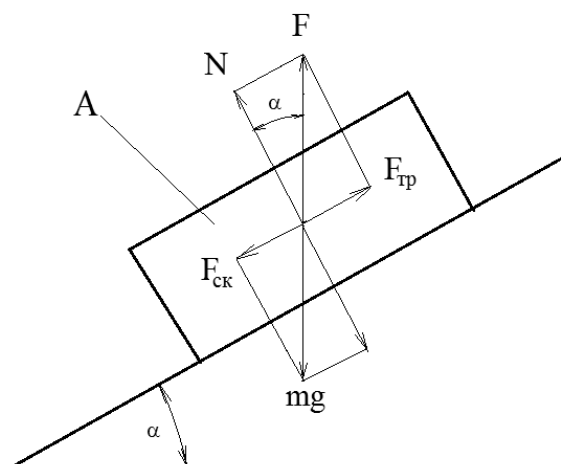


Рисунок 2.3 – Схема сил, действующих на тело, находящееся на наклонной плоскости

Тело начинает скользить по наклонной плоскости, значит, в предельном случае  $F_{тр} = F_{ск}$ , где  $F_{тр}$  – сила трения скольжения;  $F_{ск}$  – скатывающая сила. Из схемы действия сил видно, что  $F_{тр} = F_{ск} = mg \sin \alpha$ ;  $N = mg \cos \alpha$ .

Тогда

$$\mu_s = \frac{F_{тр}}{N} = \operatorname{tg} \alpha .$$

Таким образом, коэффициент трения  $\mu_s$  равен тангенсу угла  $\alpha$  наклонной плоскости, при котором тело А начинает скользить по наклонной плоскости.

### Задание

- 1 Подготовить образцы в соответствии с заданными размерами.
- 2 Закрепить образцы на рабочей плоскости и блоке скольжения.
- 3 Установить параметры испытания с помощью сенсорного экрана.
- 4 Провести необходимое количество испытаний.
- 5 Записать:

- значение статического коэффициента трения  $\mu_s$ ;
- значение динамического коэффициента трения  $\mu_d$ ;
- значения стандартных отклонений статического и динамического коэффициентов трения  $\delta_s$  и  $\delta_d$  соответственно.

- 6 Определить статический коэффициент трения скольжения методом «наклонной плоскости» и сравнить с результатами, полученными методом «движения тела по горизонтальной поверхности».

### **Контрольные вопросы**

- 1 Перечислите основные виды трения.
- 2 Укажите факторы, влияющие на фрикционные свойства полимеров.
- 3 Перечислите составные части прибора COF-01.

## **3 Лабораторная работа № 3. Структура и свойства углеродистой стали в равновесном состоянии**

**Цель работы:** изучение диаграммы состояния железоуглеродистых сплавов; установление зависимости между структурой и свойствами стали; усвоение области применения сталей в зависимости от содержания углерода.

**Оборудование:** микроскринер МС ЛабоМет-1.

Металлы являются основным материалом, используемым для изготовления деталей узлов трения. Преимущество металлов: относительно благоприятное сочетание прочности и пластичности; высокая твёрдость и теплопроводность; способность образовывать эвтектические смеси, твердые растворы и химические соединения с другими металлами и неметаллами. Каждая из этих фаз обладает различными свойствами, а также различными фрикционными характеристиками. Износостойкость металлов в большей степени зависит от их структуры. Сплавы железа, включающие чугуны и стали, а также сплавы цветных металлов – основные конструкционные материалы, наиболее распространенные в технике. Их отличительная черта – широкий диапазон изменения твердости и прочности при изменении химического состава и структуры.

Под *равновесным* понимается такое состояние, при котором все фазовые превращения в сплаве полностью закончились в соответствии с диаграммой состояния. Это имеет место только при очень малых скоростях изменения температуры. Равновесное состояние соответствует минимальному значению свободной энергии и не подвергается самопроизвольному изменению во времени. Поэтому оно называется стабильным.

Превращения, протекающие в сталях в равновесном состоянии, описываются диаграммой «железо – цементит», представленной на рисунке 3.1.

В железоуглеродистых сплавах могут присутствовать следующие твердые фазы: феррит, аустенит, цементит.

*Феррит* – твердый раствор внедрения углерода в  $\alpha$ -железе, имеющем объёмно-центрированную кубическую решетку. Существуют две области феррита: высокотемпературная область *АНН* и низкотемпературная область *GPQ*. Максимальная растворимость в высокотемпературной области составляет 0,10 % (точка *Н*), в низкотемпературной области – 0,02 % (точка *Р*). Содержание углерода при комнатной температуре – 0,01 %. Феррит мягок и пластичен ( $\sigma_s = 200...300$  МПа,  $\delta = 20\%...50\%$ , твердость составляет 80...100 НВ).



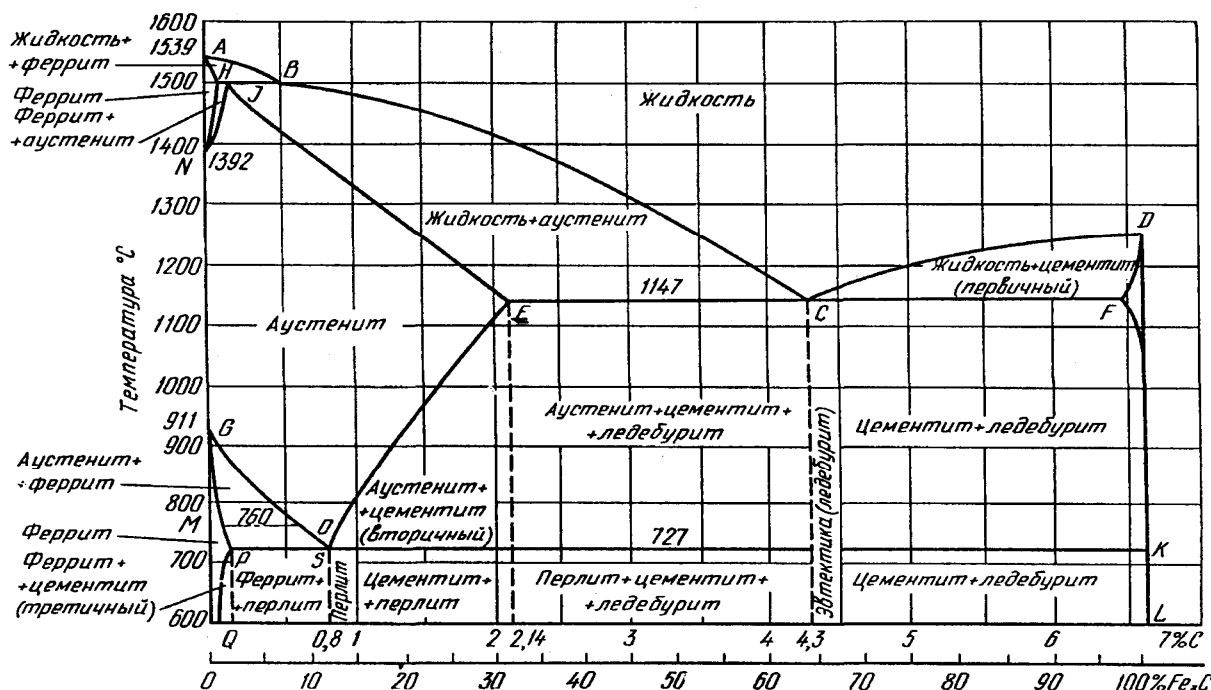
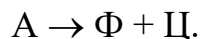


Рисунок 3.1 – Диаграмма «железо – цементит»

*Аустенит* – твердый раствор внедрения углерода в  $\gamma$ -железе, имеющем гранецентрированную кубическую решетку. На диаграмме «железо – цементит» аустенит занимает область *NJESG*. Максимальная растворимость углерода в аустените составляет 2,14 % (точка *E*). По механическим свойствам аустенит близок к ферриту. Горячую обработку давлением (ковку, штамповку) проводят в области существования аустенита (однофазный твердый раствор характеризуется высокой пластичностью).

*Цементит* – химическое соединение железа с углеродом – карбид железа, химическая формула которого  $\text{Fe}_3\text{C}$ . Содержание углерода в цементите равно 6,67 %. Цементит обладает высокой твердостью ( $\approx 72 \text{ HRC}$ ) и хрупкостью. Он имеет сложную ромбическую решетку.

При температуре 727 °C (линия *PSK*) сплавы претерпевают *эвтектоидное превращение*. При эвтектоидном превращении аустенит распадается с образованием *эвтектоидной смеси* – перлита (феррита и цементита):



Эвтектоидная смесь феррита и цементита, образующаяся в результате эвтектоидного распада аустенита, называется *перлитом* (содержание углерода составляет 0,8 %).

В сплавах с содержанием углерода менее 0,8 % (точка *S*) эвтектоидному превращению предшествует выделение из аустенита феррита, которое протекает в интервале температур, ограниченных линиями *GS* и *PS*. При этом в оставшемся аустените концентрация углерода изменяется по линии *GS*. В сплавах с содержанием углерода более 0,8 % (точка *S*) эвтектоидному превращению предшествует выделение из аустенита цементита. Выделение

цементита протекает в интервале температур, ограниченных линиями  $ES$  и  $SK$ . В этом случае концентрация углерода в оставшемся аустените изменяется по линии  $ES$ .

Железоуглеродистые сплавы, в зависимости от содержания углерода, делятся на три группы: *техническое железо, стали, чугуны*.

*Техническое железо* – это сплавы с содержанием углерода менее 0,02 % (точка  $P$ ). Как следует из диаграммы «железо – цементит», техническое железо имеет структуру феррита (рисунок 3.2,  $a$ ). Предельная растворимость углерода в феррите ограничивается линией  $GPQ$ .

*Стали* – это сплавы с содержанием углерода от 0,02 % (точка  $P$ ) до 2,14 % (точка  $E$ ). В структуре стали по мере увеличения содержания углерода возрастает доля цементита и уменьшается доля феррита. Это приводит к повышению твердости и прочности стали и снижению ее пластичности, изменению физических и технологических свойств. В зависимости от содержания углерода стали по своей структуре делятся на *доэвтектоидные, эвтектоидные и заэвтектоидные*.

*Доэвтектоидные стали* содержат от 0,02 % углерода (точка  $P$ ) до 0,8 % углерода (точка  $S$ ). Они имеют структуру феррита (светлые зерна) и перлита (темные зерна) (рисунок 3.2,  $b$ ). С увеличением содержания углерода прямо пропорционально увеличивается содержание перлита. При концентрации углерода в стали 0,8 % количество перлита равно 100 %. Зная площадь, занимаемую перлитом, можно определить содержание углерода в углеродистой стали:

$$C = 0,8 \cdot P / 100,$$

где  $P$  – площадь, занимаемая перлитом.

*Эвтектоидная сталь* содержит 0,8 % углерода (точка  $S$ ) и состоит из перлита (рисунок 3.2,  $b$ ).

*Заэвтектоидная сталь* содержит от 0,8 % углерода (точка  $S$ ) до 2,14 % углерода (точка  $E$ ). Ее структура состоит из перлита и цементита (рисунок 3.2,  $z$ ).

Таким образом, структура и свойства стали определяются количеством углерода в ней. Доэвтектоидные стали, содержащие до 0,8 % углерода, являются *конструкционными*, предназначенными для изготовления деталей машин (машиностроительные стали), конструкций и сооружений (строительные стали). В значительной мере свойства углеродистых сталей и область их применения зависят от содержания в них вредных примесей серы и фосфора. Чем меньше их в стали, тем выше ее качество.

Стали *обыкновенного качества*, наиболее дешевые, являются конструкционными сталями общего назначения и содержат до 0,07 % фосфора, 0,06 % серы, 0,06 % ... 0,49 % углерода. По гарантируемым свойствам они подразделяются на три группы – А, Б, В. В сталях группы А гарантируются механические свойства, группы Б – химический состав, группы В – механические свойства и химический состав.

Сталь группы А маркируется буквами Ст и номером 0, 1, 2, ... 6, например Ст1. В сталях группы Б перед буквами Ст ставится буква Б, например БСт2. В сталях группы В перед буквами Ст ставится буква В, например ВСт3. С увеличением условного номера повышается содержание углерода в стали, что приводит к увеличению прочностных свойств, снижению пластичности и свариваемости.

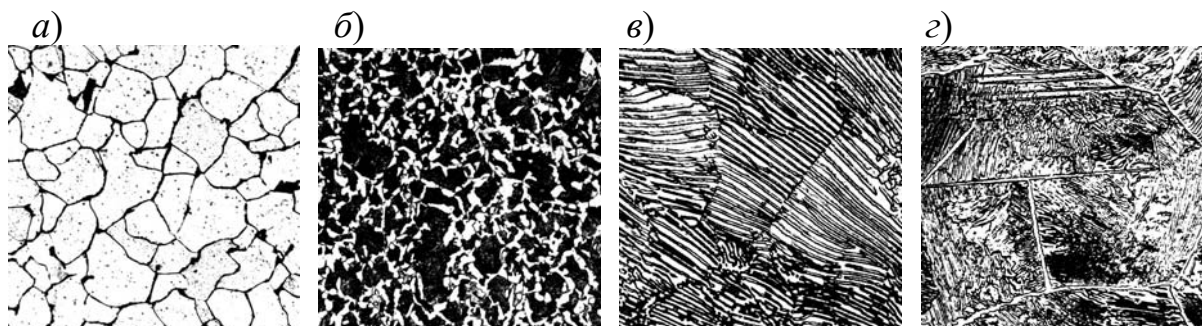


Рисунок 3.2 – Микроструктура технического железа (а), доэвтектоидной (б), эвтектоидной (в) и заэвтектоидной (г) сталей

*Стали группы А* применяются для изготовления рядового проката (швеллеров, уголков, листов, прутков, труб и др., а также для малонагруженных деталей машин (валов, осей, зубчатых колес, болтов и т. д.), *не подвергаемых нагреву в процессе обработки.*

*Стали группы Б* применяются для изготовления изделий, *подвергаемых нагреву* (горячей обработке давлением, сварке, термической обработке).

*Стали группы В* применяются для изготовления сварных конструкций, *подвергаемых расчетам на прочность.*

В конце марки стали ставятся буквы «кп», «пс», «сп». Буквы «кп» показывают, что сталь кипящая, «пс» – полуспокойная, «сп» – спокойная.

*Качественная конструкционная сталь*, по сравнению со сталью общего назначения, содержит вдвое меньше серы и фосфора и отличается более высокими механическими свойствами. Она маркируется цифрами, например сталь 08 ... 80, показывающими содержание углерода в сотых долях процента.

*Низкоуглеродистые стали*, содержащие углерода до 0,25 %, обладают низкой прочностью, но высокой пластичностью и применяются для изготовления изделий листовой *холодной штамповкой* (05кп...10), а также для деталей, *упрочняемых цементацией*, и для различных *сварных соединений* (сталь 15, сталь 20).

*Среднеуглеродистые стали* марок 30...50 предназначаются для *ответственных деталей* высокой прочности с вязкой сердцевиной (зубчатые колеса, шатуны, коленчатые валы, распределительные валы, винты, оси, втулки, рычаги и др.). Как правило, детали из этих сталей подвергаются улучшению (закалке и высокому отпуску).

*Высокоуглеродистые стали* 55...85 применяются для *пружин, рессор*, а также деталей высокой прочности. Детали из этих сталей подвергаются упрочнению методами термической обработки.

Для изготовления различных инструментов применяется *углеродистая инструментальная сталь*, содержащая углерода от 0,7 % до 1,3 %. Эта сталь производится следующих марок: сталь У7...У13 (качественная) или сталь У7А...У13А (высококачественная). Здесь буква У означает «углеродистая инструментальная сталь», число после буквы У – содержание углерода в десятых долях процента (например, У12 содержит углерода 1,2 %).

Стали марок У7 и У8 вязче других, т. к. не имеют в структуре цементита, и они идут на изготовление *ударных инструментов* – молотков, зубил, топоров, кернеров, стамесок, долот, штампов и т. д.

Стали У9...У11 имеют несколько меньшую вязкость и немного большую твердость (т. к. в их структуре содержится небольшое количество цементита) и используются для изготовления *резцов, сверл, метчиков, лерок*.

Стали У12 и У13 обладают низкой вязкостью и высокой твердостью и используются для изготовления *инструмента, не испытывающего ударных нагрузок* (напильников, бритв, рашпилей и т. п.).

### ***Контрольные вопросы***

1 Дайте определение фазам, присутствующим в сталях, и укажите содержание углерода в них.

2 Дайте классификацию углеродистых сталей по качеству, содержанию углерода и назначению.

3 Изучите маркировку сталей и укажите области применения перечисленных сталей: Ст2, БСт3, ВСт4, Ст6; 08кп, 10... 80; У7...У13.

### ***Задание***

1 Зарисовать диаграмму «железо – цементит».

2 Дать определение фазам и структурным составляющим в сталях (доэвтектоидной, эвтектоидной, заэвтектоидной).

3 Определить содержание углерода в образце доэвтектоидной стали.

4 Изучить и зарисовать микроструктуру предложенных шлифов; указать фазы и расставить структурные составляющие.

5 Указать марки сталей, применяемых для изготовления различных деталей машин, сварных конструкций и инструментов согласно заданию преподавателя.

## **4 Лабораторная работа № 4. Изучение зависимости между структурой и свойствами чугунов**

***Цель работы:*** изучение микроструктуры чугунов разных марок, их свойств и области применения.

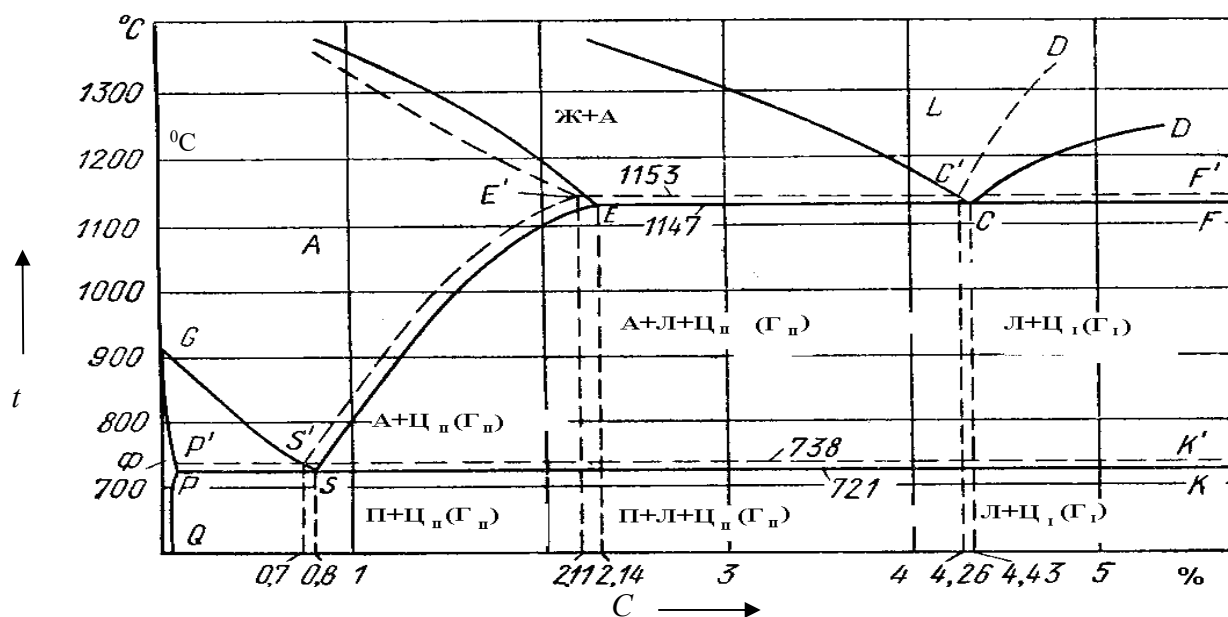
***Оборудование и инструмент:*** микроскринер МС ЛабоМет-1.

*Чугунами* называют железоуглеродистые сплавы, содержащие более 2,14 % углерода. Главным фактором, определяющим свойства, а следовательно, и область использования чугуна, является его структура. Наличие в его

структуре *эвтектики* обуславливает высокие литейные свойства и низкую пластичность, поэтому в машиностроении чугун является одним из основных *литейных* материалов.

По структуре чугуны делят на белые (БЧ), серые (СЧ), ковкие (КЧ) и высокопрочные (ВЧ).

Основной особенностью *белых чугунов* является то, что в них углерод связан в химическое соединение – цементит ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ). Структура белых чугунов описывается метастабильной диаграммой Fe– $\text{Fe}_3\text{C}$  (рисунок 4.1).



Сплошные линии – диаграмма «железо – цементит» (характерна при больших скоростях охлаждения); штриховые – диаграмма «железо – графит» (характерна при малых скоростях охлаждения)

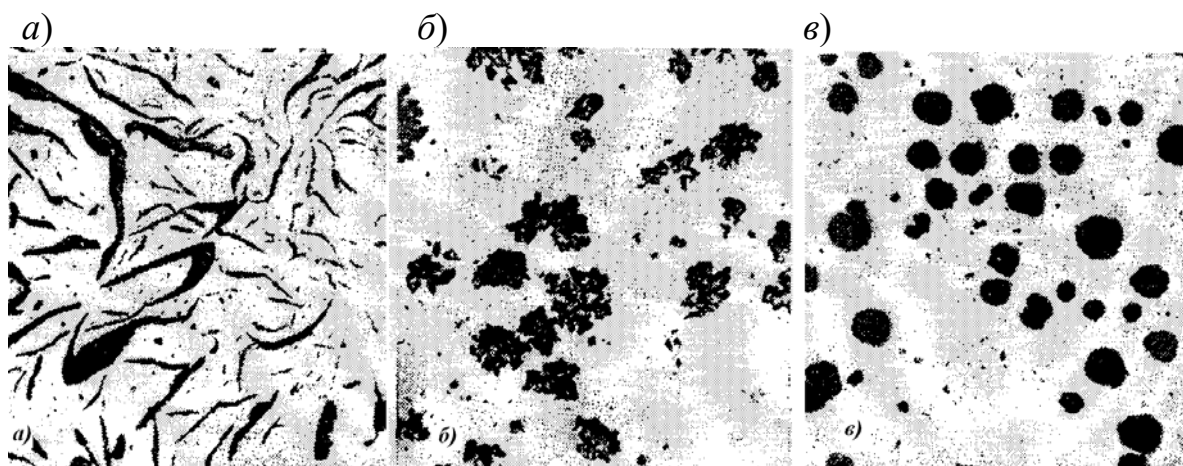
Рисунок 4.1 – Диаграмма «железо – углерод»

Высокая твердость и хрупкость цементита определяют свойства белого чугуна и не позволяют использовать его в качестве конструкционного материала. Образование белого чугуна происходит при больших скоростях охлаждения (например, при литье в металлические формы).

Чугуны подразделяются на доэвтектические ( $C = 2,14 \% \dots 4,3 \%$ ), эвтектические ( $C = 4,3 \%$ ) и заэвтектические ( $C = 4,3 \% \dots 6,67 \%$ ).

В *сером, ковком и высокопрочном* чугунах углерод выделяется в виде графита. Причем в сером чугуне графит имеет пластинчатую форму, в ковком – хлопьевидную и в высокопрочном – шаровидную (рисунок 4.2). Включения графита располагаются в металлической основе, которая, в зависимости от содержания легирующих элементов, может быть ферритной, перлитной или ферритно-перлитной. Схема структуры этих материалов приведена на рисунке 4.3.

Установлено, что чем больше углерода и кремния в сплаве и чем ниже скорость охлаждения, тем выше вероятность образования графитной эвтектики по схеме  $\text{Ж}_{(C^*)} \rightarrow \text{A}_{(E^*)} + \text{Г}$ .



*а* – пластинчатая в сером; *б* – хлопьевидная в ковком; *в* – шаровидная в высокопрочном

Рисунок 4.2 – Форма графитных включений в чугунах

Металлическая основа	Форма графитных включений		
	Пластинчатая	Хлопьевидная	Шаровидная
Феррит			
Феррит + перлит			
Перлит			

Рисунок 4.3 – Классификация чугуна по структуре металлической основы и форме графитных включений

Серые чугуны содержат 3,0 %...3,7 % С; и 1,2 %...2,6 % Si. Высокое содержание кремния в сером чугуне объясняется тем, что кремний является сильным графитообразующим элементом. Растворяясь в аустените, кремний способствует уменьшению растворимости углерода в нем, в результате жидкая фаза обогащается углеродом и процесс образования графита облегчается. Химический состав чугунов выбирается в зависимости от толщины стенки отливки (чем тоньше стенка, тем больше скорость охлаждения, тем больше углерода и кремния во избежание образования цементита).

При конструировании деталей машин следует учитывать, что серые чугуны работают на сжатие лучше, чем на растяжение. В отличие от сталей, они мало чувствительны к надрезам при циклическом нагружении, хорошо поглощают колебания при вибрациях, обладают высокими антифрикционными свойствами

из-за смазывающей способности графита, хорошо обрабатываются резанием, дешевы и просты в изготовлении.

Отливки изготавливают из чугуна следующих марок: СЧ10...СЧ35. Цифры в обозначении марки соответствуют минимальному пределу прочности при растяжении  $\sigma_B$ , кгс/мм<sup>2</sup>. Чугун СЧ10 – ферритный, СЧ15...СЧ20 – ферритно-перлитные, начиная с СЧ25 – перлитные.

Из ферритоперлитных чугунов в автомобилестроении изготавливают тормозные барабаны, крышки и др.; из перлитных – блоки цилиндров, гильзы цилиндров, маховики, диски сцепления и др. В станкостроении серый чугун является основным конструкционным материалом (станины станков, столы, шпиндельные бабки и пр). Наилучшими триботехническими свойствами обладают чугуны с перлитной структурой.

*Высокопрочный чугун* получают модифицированием (микролегированием) жидкого чугуна присадками (0,1 %...0,5 % магния, церия, иттрия от массы чугуна). Модифицирование приводит к образованию графита шаровидной формы, негативное влияние которого на прочность материала значительно ниже, чем пластинчатого (концентрация напряжений в зоне надреза металлической основы графитовыми включениями обратно пропорциональна радиусу скругления) (рисунок 4.4).

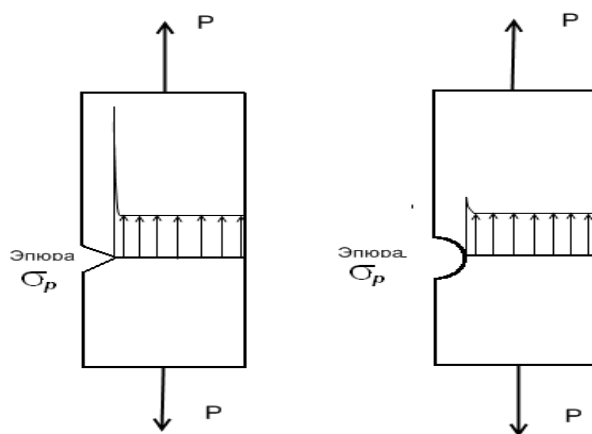


Рисунок 4.4 – Влияние формы надреза металлической основы на величину растягивающих напряжений

Отливки изготавливают из чугуна следующих марок: ВЧ35...ВЧ120. Высокопрочный чугун широко применяется в практике взамен стальных изделий, обеспечивая их надежность и долговечность в различных режимах эксплуатации. Отличительные особенности ВЧ, в сравнении со сталью, позволяют считать этот конструкционный материал более эффективным, чем сталь, особенно в условиях действия динамических нагрузок. Широкое использование ВЧ в деталях машин наряду с их надежностью является мощным резервом снижения расхода материалов, себестоимости изделий и улучшения показателей их работы. В мировой практике ВЧ применяют для литья блоков цилиндров, шатунов, головок блоков, тормозных барабанов, дисков сцепления, суппортов тормозных систем,

поршневых колец, коленчатых и распределительных валов, деталей трансмиссии, зубчатых колес и ряда других деталей.

Столь широкое применение ВЧ обусловлено уникальным сочетанием физико-механических и литейных свойств, превосходящих свойства многих сталей. Например, стоимость коленчатого вала, изготовленного из ВЧ, в 2 раза меньше при 3-кратном увеличении срока службы.

*Ковкий чугун* получают путем отжига белого доэвтектического чугуна. При ускоренном охлаждении в отливке формируется структура белого доэвтектического чугуна ( $\Pi + \text{Л} + \text{Ц}_{\text{II}}$ ). После охлаждения отливку подвергают графитизирующему отжигу, в процессе которого неустойчивая фаза – цементит – распадается с образованием графита хлопьевидной формы. Отжиг состоит из двух стадий (рисунок 4.5). Первая осуществляется при температуре  $t \approx 1000^\circ\text{C}$ .

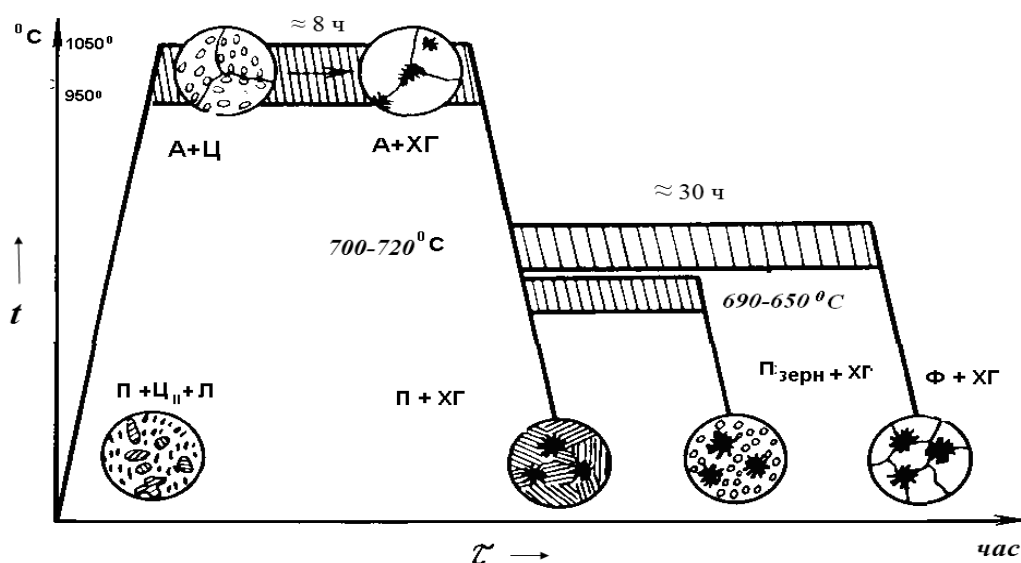


Рисунок 4.5 – График отжига белого чугуна на ковкий

Длительность первой стадии отжига ( $\approx 8$  ч) должна обеспечить полный распад цементита, входящего в состав ледебурита, на аустенит и графит.

В случае непрерывного охлаждения отливки в области эвтектоидной температуры аустенит распадается на перлит пластинчатый. Получается ковкий чугун с перлитной металлической основой. Он обладает высокими твердостью ( $\approx 250$  НВ) и прочностью ( $\sigma_s \approx 750$  МПа) при малой пластичности ( $\delta \approx 2,0$  %). Для повышения пластичности при сохранении высокой прочности проводится непродолжительная (2...4 ч) изотермическая выдержка чугуна при температурах  $\approx 680^\circ\text{C}$ .

Перлит пластинчатый переходит в перлит зернистый путем сфероидизации (округления) пластин цементита.

Наряду с ковким чугуном, имеющим перлитную основу, широко распространен в машиностроении ферритный ковкий чугун, характеризующийся высокой пластичностью ( $\delta \approx 12$  %) и относительно малой прочностью ( $\sigma_s = 350$  МПа). Ферритная основа чугуна образуется в процессе



длительной изотермической выдержки ( $\approx 30$  ч) при  $\approx 710$  °С. На этом этапе цементит, входящий в состав перлита, распадается на  $\Phi + \Gamma$ .

Выпускаются следующие марки ковких чугунов: КЧ30-12, КЧ80-1,5. Первое число соответствует пределу прочности при растяжении  $\sigma_b$ , кгс/мм<sup>2</sup>, второе число – относительному удлинению  $\delta$ , %. Марки, имеющие повышенные значения  $\delta$ , относятся к ферритным чугунам, с низкими значениями – к перлитным.

Перечень литых изделий из КЧ весьма разнообразен (втулки, фланцы, кронштейны, ступицы, вилки карданных валов, тормозные колодки, коленчатые валы, ролики цепных конвейеров и др.). Недостатком технологического процесса получения КЧ является длительный отжиг отливок.

### ***Контрольные вопросы***

- 1 Дайте классификацию чугунов, опишите процесс их структурообразования.
- 2 Перечислите преимущества чугунов перед сталями, укажите области применения чугунов марок СЧ15, СЧ20, СЧ28, СЧ30, СЧ35; КЧ30-12, КЧ60-3, КЧ80-1,5; ВЧ120.

### ***Задание***

- 1 Вычертить диаграмму состояния железоуглеродистых сплавов, ее участок, соответствующий чугунам.
- 2 Дать характеристику серым чугунам, зарисовать микроструктуру.
- 3 Дать характеристику ковким чугунам. Описать способ их получения, начертить график отжига.
- 4 Дать характеристику высокопрочным чугунам. Объяснить способ получения, зарисовать микроструктуру. Указать области применения и преимущества перед другими чугунами.

## **5 Лабораторная работа № 5. Цветные металлы и сплавы**

***Цель работы:*** изучение микроструктуры и свойств цветных металлов и сплавов и установление связи между структурой сплава и соответствующей диаграммой состояния.

**Алюминий и его сплавы.** Алюминий кристаллизуется в гранецентрированной кубической решетке. Наиболее характерные свойства его – малый удельный вес ( $\gamma = 2,7$ ), низкая температура плавления (657 °С), высокие тепло- и электропроводность, пластичность, отражательная способность.

Алюминиевые антифрикционные сплавы находят широкое применение в машиностроении и других отраслях промышленности благодаря своим уникальным свойствам. Эти материалы предназначены для уменьшения трения и износа в парах трения, что делает их незаменимыми в производстве подшипников, втулок и других компонентов.

Применяющиеся в технике алюминиевые сплавы делятся на *деформируемые*, представляющие собой твердые растворы, и *литейные*, содержащие в своей структуре эвтектику (рисунок 5.1).

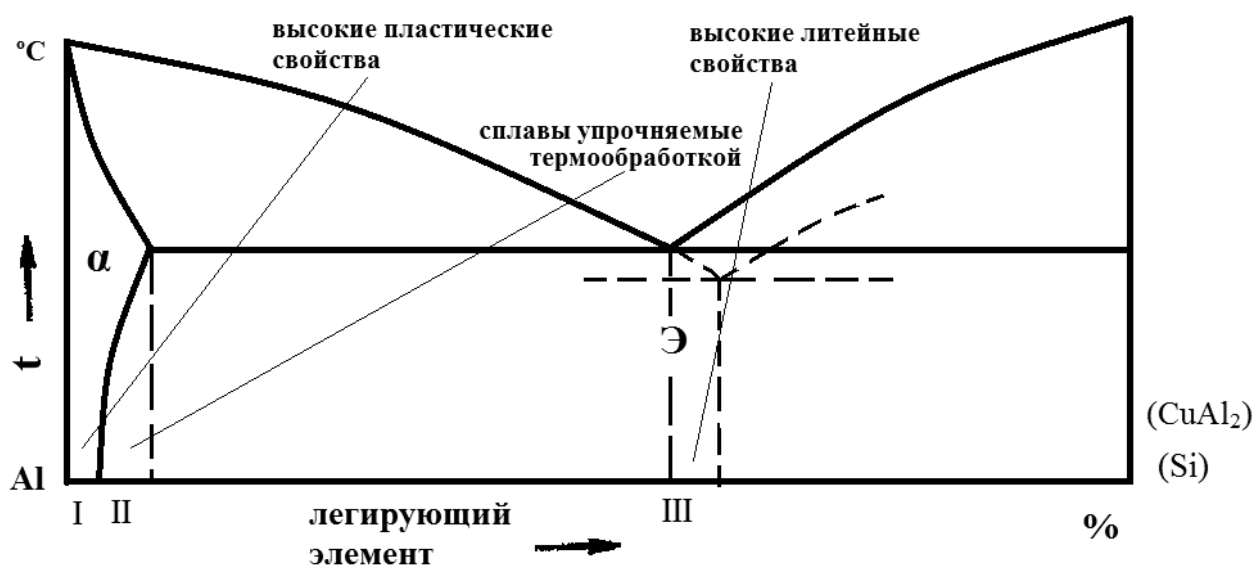


Рисунок 5.1 – Диаграмма состояния «алюминий – легирующий элемент»

**Деформируемые сплавы.** Сплавы этого класса подразделяются на упрочняемые термической обработкой (II группа) и неупрочняемые (I группа).

К первой группы относятся сплавы типа АМг1,5..., АМц2. В связи с низким содержанием легирующих элементов (магния или марганца) они представляют собой однофазные α-твердые растворы (см. рисунок 5.1), обладающие высокими пластичностью, свариваемостью, антифрикционностью, но низкими прочностью и твердостью. Повысить их прочность можно только за счет наклепа, возникающего при холодной пластической деформации. Для них характерна широкая область применения: трубные конструкции, лифты, корпуса судов, автомобилей, различные емкости для жидкостей (фляги, баки, цистерны и пр.), радиаторы охлаждения, элементы строительных конструкций (окна, двери), посуда, а также различные антифрикционные изделия типа втулок скольжения.

К сплавам II группы относятся дуралюмины (Д1, Д18...), ковочные сплавы (АК7, АК8...), высокопрочные сплавы (В93, В95).

Наиболее распространенными представителями этой группы являются дуралюмины (Д1, Д16). Основными легирующими элементами являются медь и магний, поэтому этот материал может быть причислен к сплавам системы Al–Cu–Mg. Перечисленные компоненты образуют ряд растворимых соединений CuAl<sub>2</sub>, CuMgAl<sub>2</sub>, вызывающих упрочнение сплава в процессе термической обработки, заключающихся в закалке от 500 °С в воде с последующим естественным старением в течение 5...7 сут.

Самым простым сплавом II группы является сплав Д1, включающий 4,5 % меди и около 0,5 % магния и марганца. Магний и марганец переходят в твердые растворы, а медь образует включения CuAl<sub>2</sub>. При нагреве под закалку (510 °С)

$\text{CuAl}_2$  полностью растворяется в  $\alpha$ -твердом растворе, и при последующем быстром охлаждении фиксируется пересыщенный  $\alpha$ -твердый раствор. После закалки сплав подвергают естественному или искусственному (при 150 °С) старению, приводящему к распаду пересыщенного твердого раствора и выделению высокодисперсной вторичной фазы  $\text{CuAl}_{2\text{II}}$ , которая является препятствием для движения дислокаций и приводит к упрочнению сплава в 3–4 раза. По этой причине все сплавы II группы являются дисперсионно-твердеющими.

Из них изготавливают обшивки, шпангоуты, стрингера и лонжероны самолетов, кузова грузовых автомобилей и т. д. Ковочные сплавы (АК7...) используют для тяжело нагруженных антифрикционных деталей сложной формы.

В качестве *литейных антифрикционных сплавов* на основе алюминия широкое распространение имеют сплавы III группы, системы Al–Si – силумины (алюминиевокремнистые сплавы, содержащие 5 %...14 % Si).

Силумины обладают высокой жидкотекучестью, малой усадкой, удовлетворительной коррозионной стойкостью и применяются для получения антифрикционных изделий сложной формы. Типичным силумином является заэвтектический сплав АЛ2, структура которого имеет игольчатую эвтектику (основа сплава), состоящую из твердого раствора кремния в алюминии  $\alpha$  и кристаллов кремния ( $\alpha + \text{Si}$ ) и небольшого количества грубых кристаллов Si игольчатой формы (рисунок 5.2, а), которые играют роль надрезов в пластичном алюминии ( $\alpha$ -растворе). Такая структура обладает низкими механическими свойствами.

Для измельчения структуры и устранения избыточных кристаллов Si силумины модифицируют путем присадки к расплаву смеси солей NaF и NaCl. В присутствии Na происходит смещение линий диаграммы состояния, и заэвтектический сплав АЛ2 становится доэвтектическим (см. рисунок 5.1). Вместо избыточного Si появляются округлые кристаллы  $\alpha$ -раствора. (рисунок 5.2).

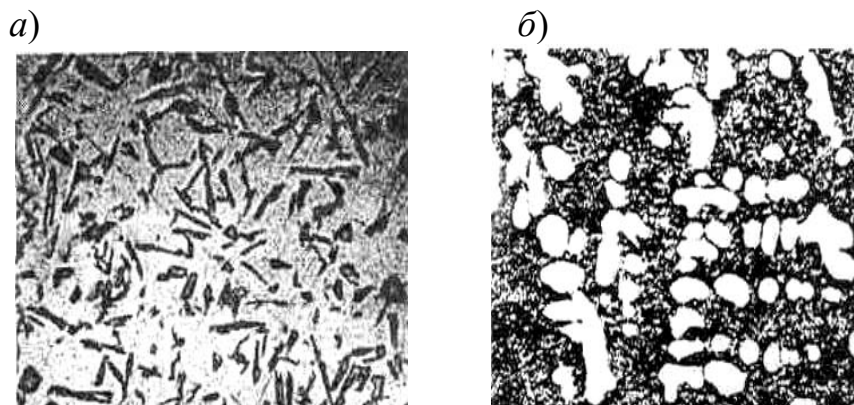
Эвтектика получает тонкое строение и состоит из мелких кристаллов Si и  $\alpha$ -раствора. Такие изменения структуры улучшают механические свойства.

При более высоких требованиях к прочностным свойствам применяют специальные силумины – доэвтектические сплавы ( $\leq 10\%$  Si) с добавками меди, магния, марганца. Эти сплавы способны упрочняться при термической обработке. Маркировка сплавов АЛ: буквы указывают, что это алюминиевый (А), литейный (Л) сплав; цифры – порядковый номер в ГОСТе.

АЛ2 (Алюминий, Олово, Цинк) – Подшипники, втулки.

АЛ9 (Алюминий, Медь) – Поршневые кольца, втулки.

АЛ19 (Алюминий, Никель, Медь) – Авиапромышленность, судостроение.



*a* – немодифицированный; *б* – модифицированный

Рисунок 5.2 – Микроструктура силумина АЛ2

Преимущества алюминиевых антифрикционных сплавов следующие.

- 1 Высокая износостойкость, что продлевает срок службы деталей.
- 2 Низкий коэффициент трения: снижаются энергозатраты на трение и улучшается эффективность работы механизмов.
- 3 Устойчивость к коррозии: актуально для эксплуатации в агрессивных средах.
- 4 Легкость и прочность: соотношение веса и прочности делает сплавы идеальными для использования в высокотехнологичных отраслях.

Области применения следующие.

Автомобилестроение: используются в производстве подшипников, поршневых колец и других деталей двигателя.

Авиастроение: изготовление легких и прочных компонентов.

Судостроение: для создания узлов, работающих в морской воде.

Энергетический сектор: используются в оборудовании для производства электроэнергии.

**Медь и ее сплавы.** Медь имеет гранецентрированную кубическую решетку. Удельный вес меди –  $8,9 \text{ г/см}^3$ , температура плавления –  $1083 \text{ }^\circ\text{C}$ . Она обладает высокой теплопроводностью, электропроводностью, пластичностью в горячем и холодном состояниях и широко применяется в различных областях техники. Кроме того, медь является основой важнейших сплавов – *латуней* и *бронз*.

**Сплавы меди с цинком.** Практическое применение имеют сплавы с содержанием цинка до 45 %, которые называются *латунями*. Равновесная диаграмма состояния для этой системы приведена на рисунке 5.3. По структуре латуни делятся на две группы:

1) сплавы с содержанием цинка до 39 % (Л96-Л75). Являются однофазными со структурой  $\alpha$ -твердого раствора цинка и меди (применяются для холодной штамповки);

2) сплавы с содержанием цинка более 39 % (Л60, Л55). Имеют двухфазную структуру –  $\alpha + \beta$  (рисунки 5.3 и 5.4) и могут подвергаться горячей обработке давлением и литью.

Цинк до определенного предела повышает прочность и пластичность сплавов.

Максимальной пластичностью обладают материалы со структурой однофазного твердого раствора. Переход через границу однофазной области (39 % Zn) приводит к резкому снижению пластичности, повышению прочностных и литейных свойств.

Однофазные латуни легко поддаются пластической деформации, поэтому их используют для производства листов, лент, профилей. Причем для прокатки в холодном состоянии применяют латуни с содержанием цинка до 30 % ( $\alpha$ -латуни), а для прокатки в горячем состоянии пригодны латуни со структурой  $\alpha + \beta$  (при нагреве  $\alpha$ -фаза растворяется и во время горячей обработки давлением их структура состоит из одной  $\beta$ -фазы).

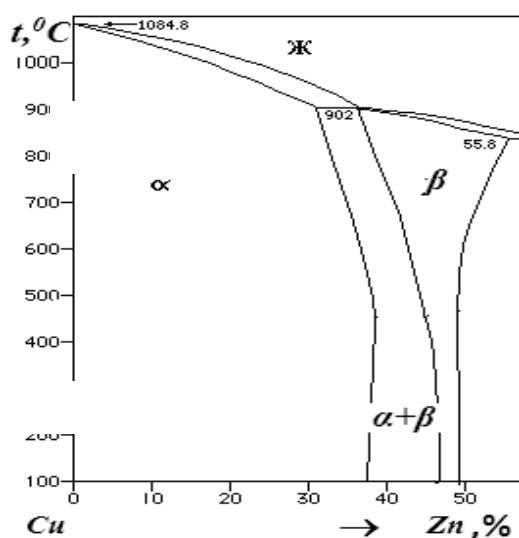


Рисунок 5.3 – Диаграмма состояния Cu–Zn



Рисунок 5.4 – Микроструктура литой двухфазной латуни

Кроме простых латуней – сплавов меди и цинка, применяются специальные латуни, в которые для придания тех или иных свойств дополнительно вводят различные элементы: свинец для улучшения обрабатываемости, олово для повышения сопротивления коррозии в морской воде, алюминий и никель для повышения механических свойств.

Марки латуней начинаются с буквы Л, далее следуют буквы, указывающие наличие определенных легирующих элементов, цифры указывают концентрацию меди и легирующих элементов.

Область применения: латуни применяют при малых скоростях скольжения и невысоких нагрузках.

**Бронзы.** Бронзами называются сплавы меди с другими элементами (за исключением цинка). В зависимости от основного легирующего элемента бронзы разделяются на *оловянистые, алюминиевые, бериллиевые, марганцовистые* и т. д. Марки бронз начинаются с букв Бр. И далее следуют буквы, показывающие наличие определенных легирующих элементов, и цифры, указывающие их содержание. По технологическим свойствам бронзы делятся на *деформируемые* (однофазные) и *литейные* (двухфазные).

**Алюминиевая бронза.** Наиболее распространены алюминиевые бронзы, содержащие 5 %...11 % Al. Диаграмма состояния этих сплавов аналогична

диаграмме латуней. Сплавы с содержанием алюминия до 9,8 % (БрА5, БрА7, БРА9) имеют структуру однофазного  $\alpha$ -твердого раствора алюминия в меди, при больших концентрациях алюминия сплавы имеют двухфазную структуру, состоящую из твердого раствора ( $\alpha$ ) и эвтектоида ( $\alpha + \gamma'$ ). Структура сплава БрА10 приведена на рисунке 5.5.

Алюминиевые бронзы среди медных сплавов выделяются дешевизной и высокими механическими, коррозионными и антифрикционными свойствами. Наряду с простыми алюминиевыми бронзами используют сложные бронзы (БрАЖ9-4Л).



Рисунок 5.5 – Микроструктура литой бронзы БрА10

При 10 % Al в структуре появляется эвтектоид, состоящий из  $\alpha$ -твердого раствора и  $\gamma'$ -электронного соединения (аналогичный перлиту). Этот эвтектоид при нагреве выше 570 °С превращается в  $\beta$ -твердый раствор (аналогично аустениту). При закалке из области  $\beta$ -твердого раствора образуется мартенситоподобная игольчатая структура. Закалкой и отпуском алюминиевых бронз этого состава можно повышать механические свойства сплавов.

**Бериллиевая бронза.** Обладает исключительно ценными качествами. В диаграмме состояния этой системы имеется линия понижения растворимости, как и в диаграмме алюминиевых сплавов, что позволяет проводить упрочнение сплава с помощью аналогичной термической обработки. После закалки и старения она имеет высокую прочность и твердость, повышенный предел упругости и усталости. Бериллиевая бронза является наилучшим антифрикционным и пружинным материалом, она с успехом применяется для изготовления деталей, работающих на износ. Этот материал не дает искр при ударе, что позволяет изготавливать из нее ударники отбойных молотков во взрывоопасных производствах. Кроме того, она обладает высокой электро- и теплопроводностью, коррозионной и холодостойкостью.

Наиболее высокие механические свойства имеет сплав с 2,0 % бериллия, он является дисперсионно-твердеющим. Растворимость бериллия в меди при комнатной температуре не превышает 0,2 %. Закалка с 800 °С фиксирует пересыщенный раствор бериллия в меди. Последующее искусственное старение

при 300 °С приводит к резкому повышению твердости и прочности, которое связано с выделением из  $\alpha$ -твердого раствора  $\gamma$ -фазы ( $\text{CuBe}_{11}$ ) в форме дисперсных включений.

**Легкоплавкие подшипниковые сплавы (баббиты).** Подшипниковыми сплавами называются материалы, из которых изготавливаются вкладыши подшипников скольжения. При применении очень мягких легкоплавких сплавов (баббитов) гарантируется минимальный износ шейки вала. Кроме того, они имеют минимальный коэффициент трения со сталью и хорошо удерживают смазку.

По условиям работы подшипниковый сплав должен иметь гетерогенную структуру и состоять из мягкой основы и твердых включений. Мягкая основа обеспечивает хорошую прирабатываемость подшипника к валу, твердые включения служат опорными точками для трущихся частей вала. Небольшая поверхность соприкосновения вала и вкладыша уменьшают трение, а имеющиеся промежутки между валом и мягкой основой обеспечивают хорошую смазку.

Широкое применение в промышленности получили заэвтектические сплавы системы «свинец – сурьма» (БС), содержащие 16 %...18 % Sb (рисунок 5.6). Мягкой основой в этом сплаве является эвтектика ( $\alpha + \beta$ ), твердость которой составляет 7...8 НВ. Твердыми включениями являются зерна  $\beta$ -твердого раствора свинца в сурьме, их твердость составляет 30 НВ. Микроструктура баббита БС, содержащего 16 %...18 % Sb, приведена на рисунке 5.7.

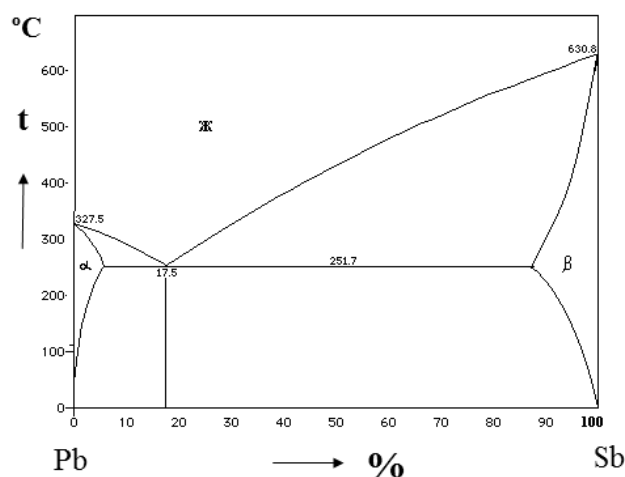


Рисунок 5.6 – Диаграмма состояния Pb–Sb

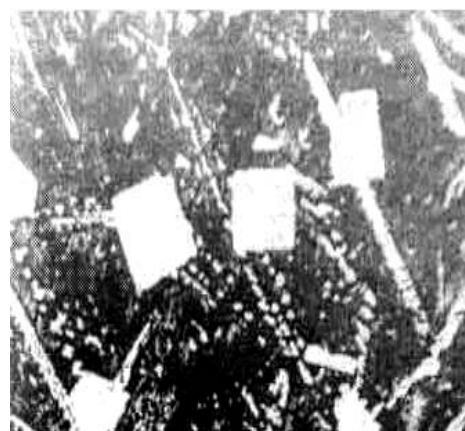


Рисунок 5.7 – Структура баббита БС

### Контрольные вопросы

- 1 Как меняются механические и технологические свойства алюминиевых и медных сплавов при увеличении количества легирующих элементов?
- 2 Дайте объяснение повышения прочностных свойств дисперсионно-твердеющих сплавов на основе алюминия и меди.
- 3 Изложите особенности сплавов БрБ2, БС.

**Задание**

- 1 Зарисовать диаграммы состояния для предложенных систем.
- 2 Используя диаграммы состояния, описать процессы, протекающие при охлаждении изучаемых сплавов.
- 3 Изучить и зарисовать микроструктуры предложенных сплавов.

**Список литературы**

- 1 **Кобелев, О. А.** Материаловедение. Технология композиционных материалов: учебник / О. А. Кобелев – М.: КноРус, 2019. – 270 с.
- 2 **Богодухов, С. И.** Материаловедение: учебник / С. И. Богодухов, Е. С. Козик. – 3-е изд., стер. – Старый Оскол : ТНТ, 2018. – 536 с.
- 3 **Бондаренко, Г. Г.** Материаловедение: учебник / Г. Г. Бондаренко, Т. А. Кабанова; под ред. Г. Г. Бондаренко. – 2-е изд. – М.: Юрайт, 2021. – 327 с.