

Министерство образования и науки Российской Федерации

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования -
«Оренбургский государственный университет»

Е.С.Козик

ФРИКЦИОННОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Лабораторный практикум

Рекомендовано Ученым советом Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Оренбургский государственный университет» в качестве учебного пособия для студентов, обучающихся по программам высшего профессионального образования по специальности «Оборудование и технология повышения износостойкости и восстановление деталей машин и аппаратов»

Оренбург
ИПК ГОУ ОГУ
2010

УДК 621.8 (07)
ББК 34.44 я 7
К 59

Рецензенты

доктор технических наук, профессор С.И. Богодухов
кандидат технических наук, доцент А.С. Килов

Козик, Е.С.
К59 Фрикционное материаловедение : лабораторный практикум /
Е.С. Козик; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург : ОГУ,
2010. – 166 с.

В лабораторном практикуме рассмотрены методы исследования материалов, методы механических испытаний, структуры сталей и чугунов после различных видов термообработки, подшипниковые стали, антифрикционные чугуны, порошковые антифрикционные и фрикционные материалы, пластмассы, абразивно-стойкие материалы.

Практикум предназначен для студентов, обучающихся по программам высшего профессионального образования по специальности 150205 «Оборудование и технология повышения износостойкости и восстановление деталей машин и аппаратов», при изучении дисциплины «Фрикционное материаловедение».

УДК 621.8 (07)
ББК 34.44 я 7

© Козик Е.С., 2010
© ГОУ ОГУ, 2010

Содержание

1	Работа 1. Методы механических испытаний.....	7
1.1	Цель работы.....	7
1.2	Общие сведения.....	7
1.2.1	Испытания механических свойств.....	9
1.2.2	Измерение твердости.....	13
1.2.2.1	Метод Бринелля.....	13
1.2.2.2	Метод Виккерса.....	15
1.2.2.3	Измерение микротвердости.....	17
1.2.2.4	Метод Роквелла.....	19
1.2.2.5	Метод Полюди.....	22
1.2.2.6	Метод Шора.....	24
1.2.3	Современные методы и средства измерения механических свойств.....	25
1.3	Порядок выполнения работы.....	31
1.4	Контрольные вопросы.....	32
1.5	Содержание отчета.....	32
2	Работа 2. Методы исследования микроструктуры материалов.....	32
2.1	Цель работы.....	32
2.2	Общие сведения о методах исследования строения металлов и сплавов.....	33
2.2.1	Макроанализ.....	34
2.2.2	Микроанализ.....	35
2.2.3	Оптическая и электронная микроскопия.....	38
2.2.4	Метод скользящего пучка.....	43
2.2.5	Растровая электронная микроскопия и рентгеноспектральный микроанализ.....	44
2.2.6	Автоионная микроскопия.....	45

2.2.7	Рентгеноструктурный анализ.....	46
2.3	Порядок выполнения работы.....	46
2.4	Содержание отчёта.....	47
2.5	Контрольные вопросы.....	48
3	Работа 3. Структуры сталей и чугунов после различных видов термообработки.....	48
3.1	Цель работы.....	48
3.2	Основные сведения.....	49
3.2.1	Структурные составляющие железоуглеродистых сплавов.....	49
3.2.2	Углеродистые стали.....	53
3.2.2.1	Структура углеродистых сталей после отжига и нормализации.....	53
3.2.2.2	Термическая обработка стали.....	55
3.2.2.3	Маркировка углеродистых сталей.....	64
3.2.3	Чугуны.....	65
3.2.3.1	Белые чугуны.....	65
3.2.3.2	Чугуны со структурно свободным углеродом.....	67
3.3	Порядок выполнения работы.....	71
3.4	Содержание отчета.....	72
3.5	Контрольные вопросы.....	72
4	Работа 4. Подшипниковые стали.....	73
4.1	Цель работы.....	73
4.2	Общие сведения.....	73
4.2.1	Особенности усталостного разрушения.....	73
4.2.2	Подшипниковые стали.....	75
4.3	Порядок выполнения работы.....	81
4.4	Контрольные вопросы.....	81
4.5	Содержание отчета.....	82
5	Работа 5. Антифрикционные чугуны.....	83
5.1	Цель работы.....	83
5.2	Общие сведения.....	83

5.2.1	Антифрикционные низколегированные чугуны.....	85
5.2.2	Антифрикционные ковкие чугуны.....	89
5.2.3	Графитизированные чугуны.....	94
5.3	Порядок выполнения работы.....	96
5.4	Задания.....	96
5.5	Контрольные вопросы.....	97
5.6	Содержание отчета.....	98
6	Работа 6. Порошковые антифрикционные и фрикционные материалы.....	98
6.1	Цель работы.....	98
6.2	Основные сведения об антифрикционных материалах.....	98
6.2.1	Материалы на основе железа.....	100
6.2.2	Материалы на основе меди.....	104
6.2.3	Металлографитовые материалы.....	107
6.2.4	Фрикционные материалы.....	110
6.2.4.1	Материалы на основе железа.....	112
6.2.4.2	Материалы на основе меди.....	113
6.3	Порядок выполнения работы.....	113
6.4	Содержание отчета.....	114
6.5	Контрольные вопросы.....	115
7	Работа 7. Пластмассы.....	115
7.1	Цель работы.....	115
7.2	Общие сведения.....	115
7.2.1	Полимеры.....	116
7.2.1.1	Молекулярное строение полимеров.....	118
7.2.1.2	Молекулярные структуры полимеров.....	120
7.2.1.3	Надмолекулярная структура полимеров.....	121
7.2.1.4	Полярность полимеров.....	121
7.2.1.5	Реакция полимера на нагрев.....	122
7.2.2	Наполнители и добавки.....	123

7.2.3	Свойства пластмасс и области их применения.....	124
7.2.3.1	Термопластичные материалы.....	125
7.2.3.1.1	Неполярные термопластичные пластмассы.....	125
7.2.3.1.2	Полярные термопластичные пластмассы.....	127
7.2.3.2	Термореактивные материалы.....	132
7.2.3.2.1	Пластмассы с порошковыми наполнителями.....	132
7.2.3.2.2	Слоистые пластмассы.....	133
7.2.3.2.3	Пластмассы с волокнистыми наполнителями.....	135
7.2.3.2.4	Газонаполненные пластмассы.....	137
7.2.3.2.5	Антистатика и антисептики.....	138
7.3	Порядок выполнения работы.....	138
7.4	Контрольные вопросы.....	138
7.5	Содержание отчета.....	139
8	Работа 8. Абразивно-стойкие материалы.....	140
8.1	Цель работы.....	140
8.2	Абразивное изнашивание.....	140
8.3	Твердость по Моосу.....	143
8.4	Влияние твердости испытуемого материала на износ.....	144
8.5	Закономерности сопротивляемости сталей и сплавов абразивно- му изнашиванию.....	152
8.6	Машина трения на абразивный износ.....	157
8.7	Порядок выполнения работы.....	158
8.8	Содержание отчёта.....	159
8.9	Контрольные вопросы.....	159
	Список использованных источников.....	159
	Приложение А Диаграммы состояний железо-углерод и железо-цементит.....	162
	Приложение Б Свойства неполярных термопластов.....	163
	Приложение В Свойства полярных термопластов.....	164
	Приложение Г Физико-механические свойства термореактивных пластмасс...	165
	Приложение Д Физико-механические свойства газонаполненных пластмасс...	166

1 Работа 1. Методы механических испытаний

1.1 Цель работы

Ознакомиться с основными методами статических и динамических испытаний металлов.

Ознакомиться с методами определения твердости.

1.2 Общие сведения

Статические испытания

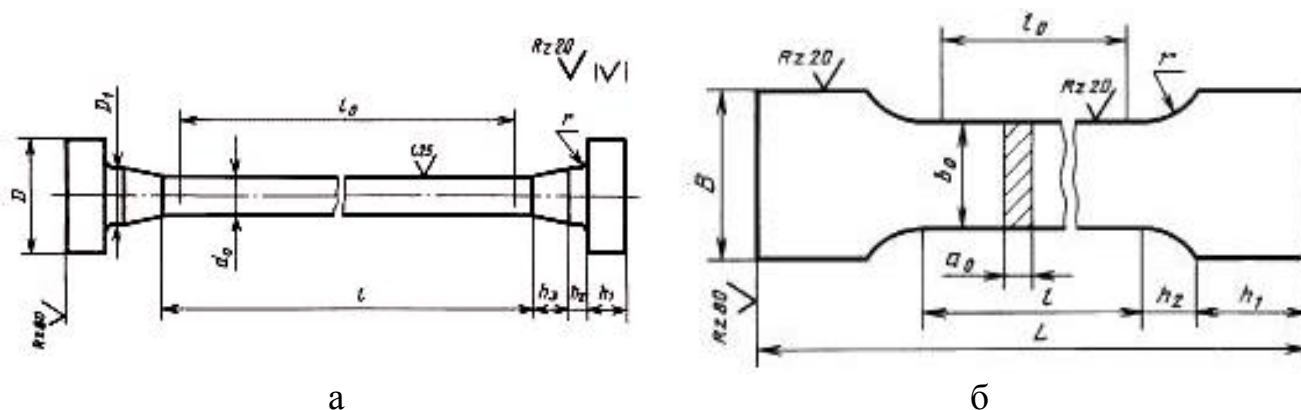
Важное место среди механических испытаний занимают статические испытания на растяжение, при помощи которых можно судить о прочности, упругости и пластичности металлов и сплавов.

Прочность – это способность материала сопротивляться действию внешних сил без разрушения.

Упругость – это способность материала восстанавливать свою первоначальную форму и размеры после прекращения действия внешних сил вызвавших деформацию.

Пластичность – это способность материала изменять свою форму и размеры под действием внешних сил, не разрушаясь, и сохранять полученные деформации после прекращения действия внешних сил.

Статическим испытаниям на растяжение подвергают образцы стандартной формы и размеров по ГОСТ 1497 – 84 на специальных разрывных машинах (рисунок 1.1, таблица 1.1).



а – цилиндрический образец; б – плоский образец

Рисунок 1.1 – Форма и размеры образцов для испытаний на растяжение

Таблица 1.1 – Примеры некоторых стандартных образцов для испытаний на растяжение

Образец	Начальная расчетная длина l_0 , мм	Начальная площадь поперечного сечения образца, мм ²	Начальный диаметр цилиндрического образца d_0 , мм	Символы для обозначения кратности образца (относительного удлинения)
Пропорциональный цилиндрический: длинный	200	314	20	δ_{10}
короткий	100	314	20	δ_5
Пропорциональный плоский: длинный	$11,3 \sqrt{F_0}$	$a_0 \times b_0$	—	δ_{10}
короткий	$5,65 \sqrt{F_0}$	то же	—	δ_5

Динамические испытания

Детали машин и механизмов, хорошо работающие при статических нагрузках, могут разрушаться под действием ударных нагрузок. В связи с этим металлические материалы подвергаются не только статическим, но и динамическим (ударным) испытаниям. При помощи динамических испытаний судят о вязкости и хрупкости металлов и сплавов.

Вязкостью называется способность металлических материалов оказывать сопротивление быстро возрастающим (ударным) нагрузкам. Свойство обратное вязко-

сти называется хрупкостью. Для испытания на ударную вязкость применяется стандартный образец, представляющий призматический брусок квадратного сечения с надрезом посередине.

1.2.1 Испытания механических свойств

Модуль упругости E является постоянной материала и на диаграмме растяжения характеризует крутизну подъема кривой деформации. Чем больше модуль упругости, тем меньшую деформацию получает материал при одинаковом напряжении и тем больше его жесткость. Каждый материал имеет определенный модуль упругости, сравнительно мало зависящий от структуры металла и его обработки. Величина модуля упругости E для различных металлов составляет, МПа:

Сталь.....	$21 \cdot 10^4$
Медь.....	$10 \cdot 10^4$
Алюминий.....	$7 \cdot 10^4$
Титан.....	$1,1 \cdot 10^4$

Напряжение, Н/мм^2 , соответствующее наибольшему усилию $P_{\max}$, предшествующему разрушению образца, называется временным сопротивлением (пределом прочности) при растяжении σ_B :

$$\sigma_B = P_{\max} / F_0 .$$

Относительное удлинение δ после разрыва – отношение (в процентах) приращения расчетной длины образца $(l_K - l_0)$, после разрыва, к его начальной расчетной длине:

$$\delta = \frac{l_K - l_0}{l_0} \cdot 100 .$$

Относительное сужение ψ после разрыва – отношение (в процентах) разности начальной площади поперечного сечения образца F_0 и минимальной F_k площади его поперечного сечения после разрушения к начальной площади полученного поперечного сечения F_0 образца:

$$\psi = \frac{F_0 - F_k}{F_0} \cdot 100.$$

Испытания на кручение

В испытаниях на кручение величина максимальных касательных напряжений близка к нормальным: $\tau_{\max}/\sigma_{\max} = 0,8$.

Эти испытания являются средними по жесткости по сравнению с испытаниями на растяжение и на сжатие.

Испытания на изгиб

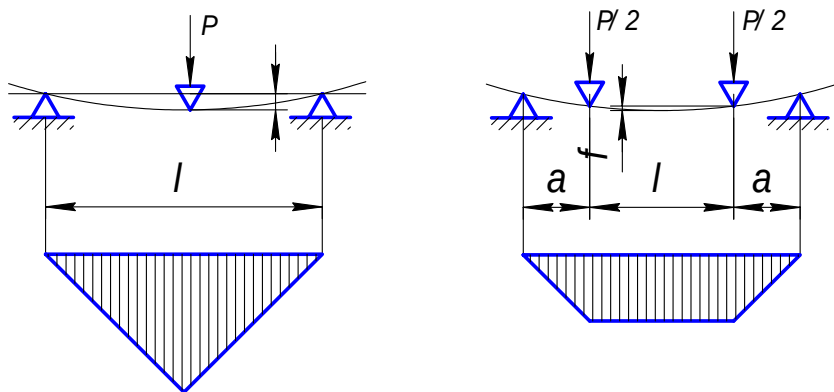
При изгибе в соответствующих зонах образца действуют как растягивающие, так и сжимающие напряжения. Поэтому испытания на изгиб являются более мягким способом нагружения, чем растяжение, но более жестким, чем сжатие.

Эти испытания применяют для малопластичных материалов, главным образом для серых и белых чугунов, инструментальных сталей в состоянии высокой твердости.

Для испытаний на изгиб применяют только цилиндрические или призматические образцы, которые помещают концами на две опоры (рисунки 1.2 и 1.3). Для устранения смятия в опорах лучше применять относительно малые нагрузки; это достигается выбором длинных образцов с соотношением $l : h = \geq 10$.

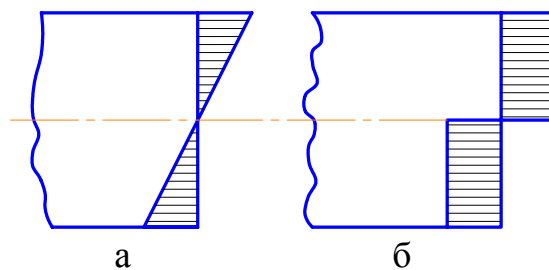
Испытания при переменных нагрузках (на усталость)

Испытания применяют для характеристики поведения материала как пластичного, так и хрупкого в условиях повторно-переменного приложения нагрузки. В таких условиях металлы обнаруживают более низкую прочность по сравнению с определяемой в статических испытаниях.



а – сосредоточенный; б – чистый

Рисунок 1.2 – Схема испытаний на изгиб



а – в области упругих деформаций; б – в области пластических деформаций

Рисунок 1.3 – Распределение напряжений при изгибе

Между пределом прочности на растяжение и пределом выносливости существует приблизительная количественная зависимость. Для стали предел выносливости, определенный при изгибе вращающихся гладких образцов, составляет от 0,45 до 0,55 σ_B , или, что более характерно, около 0,25 S_k . Предел выносливости при кручении составляет 0,5 – 0,6 от предела выносливости при изгибе.

Предел выносливости стальных образцов определяют обычно на базе 5 млн. циклов. Для сталей, вновь применяемых или назначаемых для изготовления деталей, длительность работы которых может значительно превышать 5 млн. циклов, базу испытаний устанавливают до 10 млн. циклов.

Предел выносливости образцов из легких литейных сплавов (алюминиевых или магниевых) определяют на базе 20 млн. циклов, а легких деформируемых спла-

вов — на базе 10 млн. циклов (или на иной базе, задаваемой в зависимости от условий работы детали).

Определения ударной вязкости

Ударной вязкостью КС, Дж/см², определяемой в рассматриваемых здесь испытаниях, называется отношение работы удара К, Дж, к начальной площади S₀, см², поперечного сечения образца в месте концентратора.

На рисунке 1.4 показан стандартный образец типа 1 с концентратором вида U. Размеры образца, форма надреза и способ обработки места надреза оказывают большое влияние на результаты испытаний. Надрезы надо выполнять абразивным камнем, а в мягких металлах – фасонной фрезой с дополнительным шлифованием или доводкой дна надреза.

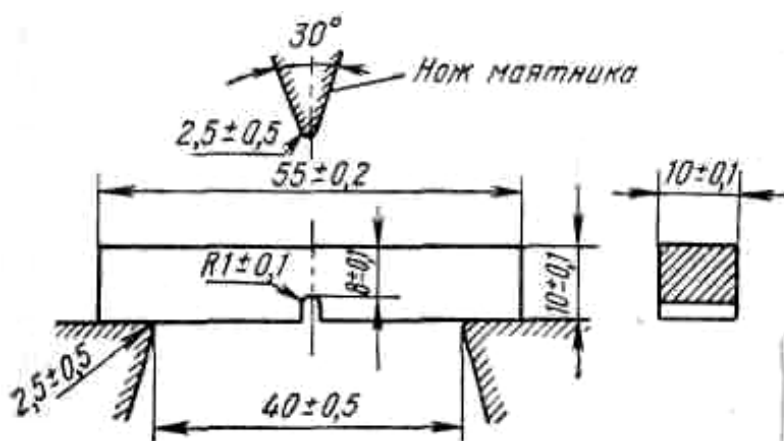


Рисунок 1.4 – Форма и размеры образца для испытаний на ударную вязкость

Зная работу удара К, Дж, можно определить величину ударной вязкости КС, Дж/см²:

$$КС = K/S_0,$$

где S₀ – площадь поперечного сечения образца в месте концентратора, см².

Испытания при низких температурах

Поведение многих металлов и сплавов и их механические свойства при низких температурах отличается от определяемых при плюс 20 °С.

Особенно сильное снижение этих свойств наблюдается у металлов с ОЦК решеткой (что и иллюстрирует существование порога хладноломкости). У металлов с ГЦК решеткой эти свойства или снижаются, но весьма замедленно, либо остаются на том же уровне, как и при 20 °С,

Испытания при повышенных температурах

Определения механических свойств металлов при нагреве принципиально отличаются от выполняемых при 20 °С. Это вызвано тем, что в области температур, лежащих вблизи или выше температур начала рекристаллизации, протекает медленная пластическая деформация (металл «ползет»). Эти температуры следующие: от 300 °С до 450 °С для сталей, ~100 °С для алюминиевых и ~300 °С для титановых сплавов.

1.2.2 Измерение твердости

Твердость – это свойство поверхностного слоя материала оказывать сопротивление деформации при местных контактных воздействиях со стороны другого, более твердого и не получающего остаточной деформации тела (индентора) установленной формы и размеров.

1.2.2.1 Метод Бринелля

При измерении твердости по методу Бринелля в испытуемый образец вдавливают индентор в виде шарика (стального закаленного или из твердого сплава) диаметром D под действием усилия F , приложенного перпендикулярно поверхности образца, в течение определенного времени. После снятия усилия на поверхности металла образуется отпечаток в виде сферической лунки диаметром d (рисунок 1.5).

Твердость измеряют на приборах ТШ-2 или ТП-2.

НВ – твердость по Бринеллю при применении стального шарика;

НВW – твердость по Бринеллю при применении шарика из твердого сплава.

Твердость по Бринеллю НВ (НВW) численно равна отношению приложенного усилия F к площади сферического отпечатка A , мм², и рассчитывается по формулам:

$$НВ (НВW) = \frac{0,102 F}{A} = \frac{0,102 \cdot 2 \cdot F}{\pi D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})}, \quad (1)$$

когда усилие F выражено в Н;

$$НВ (НВW) = \frac{F}{A} = \frac{2 \cdot F}{\pi D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})},$$

когда усилие F выражено в кгс;

где D – диаметр шарика, мм;

d – диаметр отпечатка, мм.

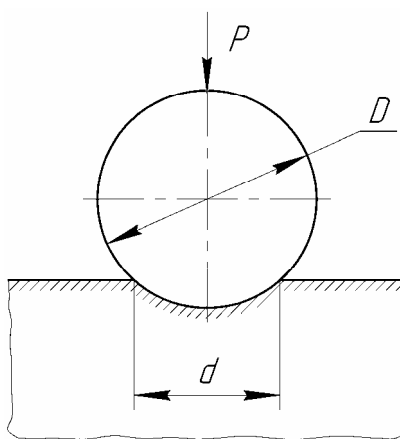


Рисунок 1.5 – Схема измерения твердости по методу Бринелля

Величину твердости по Бринеллю согласно рекомендации ИСО записывают без указания размерности, например, 185 НВ. На практике при измерении твердости расчет по указанным выше формулам не проводят, а используют таблицы, приведенные в ГОСТ 9012-59 (приложение 3). Необходимо отметить, что определение

твердости по методу Бринелля стальным шариком допускается для сталей, твердость которых не более 450 НВ, цветных металлов с твердостью не более 200 НВ. При твердости металлов более 450 единиц применяют шарики из твердых сплавов.

Между пределом прочности σ_B (МПа) и числом твердости НВ различных металлов существует следующая приближенная зависимость:

$$\sigma_B = k \cdot \text{НВ},$$

где k – коэффициент.

Сталь с твердостью НВ:

120 – 175 $\sigma_s \approx 3,4 \cdot \text{НВ}$

175 – 450 $\sigma_s \approx 3,5 \cdot \text{НВ}$

Медь, латунь, бронза:

отожженная $\sigma_s \approx 5,5 \cdot \text{НВ}$

деформированная $\sigma_s \approx 4,0 \cdot \text{НВ}$

Алюминий и алюминиевые сплавы с твердостью

НВ = 200 – 450 $\sigma_d \approx 3,3-3,6 \cdot \text{НВ}$

Дуралюмин:

отожженный $\sigma_s \approx 3,6 \cdot \text{НВ}$

после закалки и старения $\sigma_s \approx 3,5 \cdot \text{НВ}$

1.2.2.2 Метод Виккерса

При измерении твердости по методу Виккерса в поверхность тщательно отшлифованного или даже отполированного материала вдавливают алмазный индентор в форме правильной четырехгранной пирамиды. Испытания проводят на приборе

ре ТП-2. После снятия нагрузки F измеряют диагонали отпечатка в виде квадрата, оставшегося на поверхности образца (рисунок 1.6).

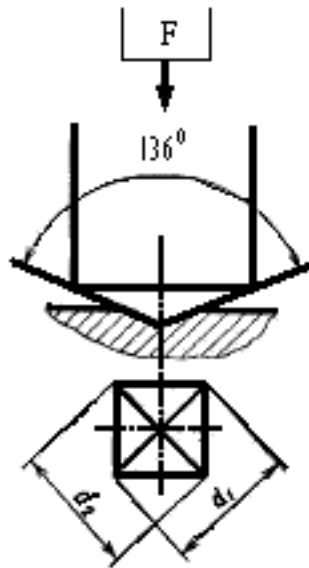


Рисунок 1.6 – Схема измерения твердости по методу Виккерса

Твердость по Виккерсу обозначают символом HV без указания размерности и определяют как отношение нагрузки F к площади боковой поверхности A пирамидального отпечатка по формулам:

$$HV = \frac{0,102F}{A} = \frac{0,102 \cdot 2F \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2} = 0,189 \cdot \frac{F}{d^2},$$

когда F выражена в Н;

$$HV = \frac{F}{A} = \frac{2F \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2} = 1,854 \cdot \frac{F}{d^2},$$

когда F выражена в кгс,

где α – угол между противоположными гранями пирамиды при вершине, равной 136° ;

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

На практике твердость по Виккерсу определяют по значению диагонали отпечатка при выбранной нагрузке по специальным таблицам.

По Виккерсу можно испытывать как мягкие, так и высокотвердые металлы, можно измерять твердость образцов толщиной до 0,3-0,5 мм. Метод Виккерса особенно удобен при определении твердости поверхностно-упрочненных деталей, имеющих сложную конфигурацию, например, цементованных, азотированных или цианированных зубьев шестерен. Числа твердости по Виккерсу можно перевести в числа твердости по Роквеллу, а также в числа твердости по Бринеллю по таблицам (приложение А).

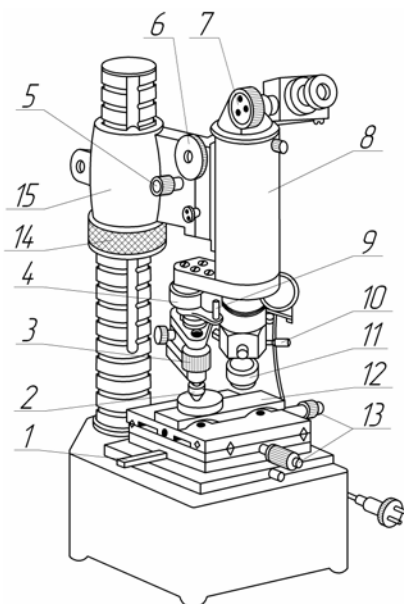
Числа твердости по Виккерсу и Бринеллю имеют одинаковую размерность и для материалов с твердостью до 300 НВ практически совпадают.

Измерение алмазной пирамидой дает более точные значения твердости, чем измерение шариком.

1.2.2.3 Измерение микротвердости

Методом определения микротвердости оценивают твердость отдельных структурных составляющих: отдельных зерен карбидов, металлических соединений или тонких слоев, получающихся в результате химико-термической обработки и гальванических покрытий, тонких полуфабрикатов (лент, фольги, проволоки). Для этих целей используют приборы моделей ПМТ-3, ПМТ-5 (рисунок 1.7).

Определение микротвердости основано на вдавливании под нагрузкой от 0,05 Н (5 гс) до 2 Н (200 гс) в испытуемый образец алмазной четырехгранной пирамиды и последующем измерении диагонали отпечатка с помощью металлографического микроскопа при минимальном увеличении $200^{\times}$ – для отпечатков свыше 25 мкм, $300^{\times}$ – для отпечатков от 76 до 125 мкм, $400^{\times}$ – для отпечатков менее 76 мкм.



- 1 – микровинты для перемещения предметного столика;
 2 – алмазный наконечник; 3 – колонка; 4 – винт тонкой подачи;
 5 – кронштейн; 6 – винт грубой подачи; 7 – окуляр; 8 – окулярный
 микрометр; 9 – тубус микроскопа; 10 – винты; 11 – осветитель;
 12 – объектив; 13 – предметный столик; 14 – основание

Рисунок 1.7 – Прибор ПМТ-3

Поверхность исследуемого образца должна быть отполирована и подвергнута травлению. Значения микротвердости H_n определяют по специальным таблицам (ГОСТ 9450-76) или по тем же формулам, что и твердость по Виккерсу.

На рисунке 1.8 показаны отпечатки, полученные на отдельных структурных составляющих углеродистой стали, содержащей 0,4 % углерода, большой отпечаток (а) получен на мягком феррите, а отпечаток меньших размеров (б) – на твердом перлите.

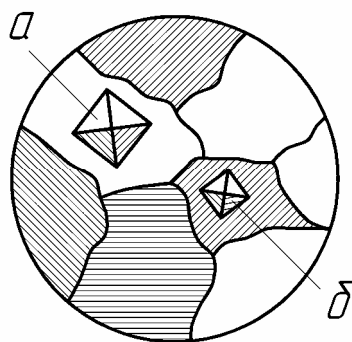


Рисунок 1.8 – Отпечатки, полученные при определении микротвердости

1.2.2.4 Метод Роквелла

Этот метод измерения твердости (ГОСТ 9013-59) наиболее универсален и наименее трудоемок.

Сущность метода Роквелла заключается во внедрении в поверхность образца (или изделия) алмазного конусного (шкалы А, С, D) или стального сферического наконечника (шкалы В, Е, F, G, H, K) под действием последовательно приложенных усилий (предварительного F_0 и основного F_1) и в определении глубины внедрения наконечника после снятия основного усилия F_1 .

Усилия и наконечник выбирают в зависимости от твердости испытуемого образца.

Твердость по Роквеллу величина безразмерная, выраженная в условных единицах. За единицу твердости по Роквеллу принята величина, соответствующая осевому перемещению индентора на 0,002 мм.

Твердость по Роквеллу на приборе ТК-2 можно измерять путем внедрения:

– алмазного конусного наконечника с общим усилием 1471 Н (150 кгс), значение твердости характеризуется цифрой, показываемой стрелкой на черной шкале С. Обозначается символом HRC. Эту шкалу используют для твердых материалов с

твердостью более 450 НВ, например, закаленных сталей. Предел измерений по шкале С – 20-70;

– алмазного конусного наконечника с общим усилием 588,4 Н (60 кгс). Значение твердости в этом случае определяют по шкале А. Твердость обозначают символом HRA и применяют для особо твердых материалов, например, для изделий из твердых сплавов с твердостью более HRC 70, а также для измерения тонких твердых поверхностных слоев (0,3-0,5 мм); изделий с поверхностной термической или химико-термической обработкой. Пределы измерений твердости по шкале А – 20-88;

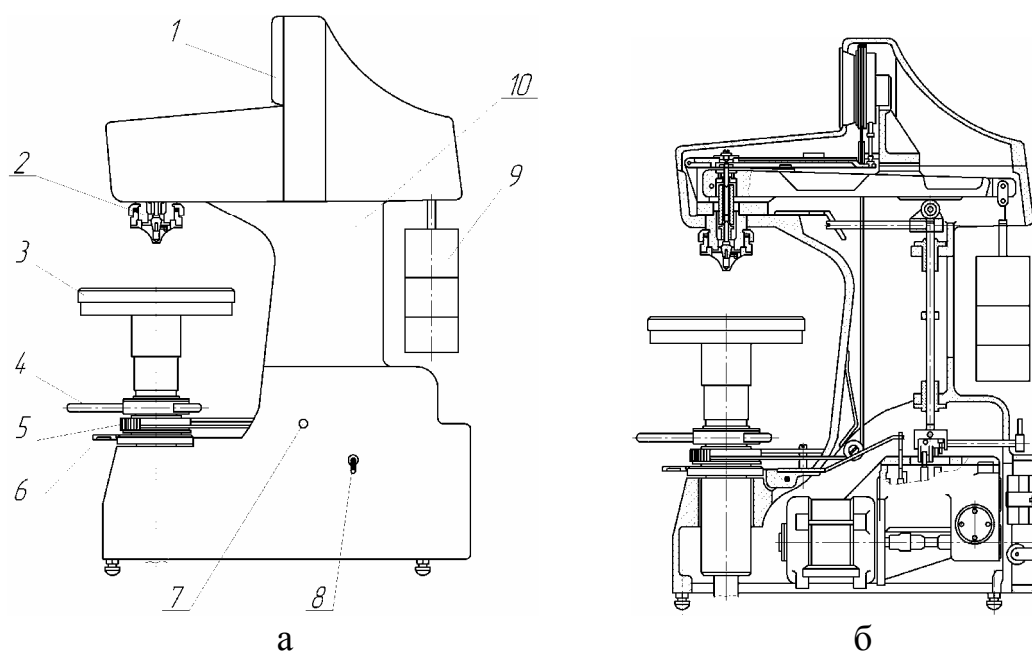
– стального шарикового наконечника с общим усилием 980,7 Н (100 кгс). Значение твердости определяют по красной шкале В. Твердость обозначают символом HRB. Способ применяют для измерения сравнительно мягких материалов, например мягкой отожженной стали или цветных сплавов. Пределы измерения твердости от 20 до 100 HRB.

Прибор ТК-2 предназначен для определения твердости металлов и сплавов по методу вдавливания алмазного конуса или стального закаленного шарика под действием заданной нагрузки в течение определенного времени. Нагрузку обеспечивает набор грузов.

Схема прибора ТК-2 представлена на рисунке 1.9. Основные механизмы: рычажное устройство, привод с электродвигателем, механизм подъема, шток нагрузки.

При замере твердости по Роквеллу расстояние от центра отпечатка до края образца должно быть не менее 2,5 диаметра отпечатка (но не менее 1 мм). Расстояние между центрами двух соседних отпечатков должно быть не менее четырех диаметров отпечатка (но не менее 2 мм). Толщина образца должна быть не менее 10-кратной глубины отпечатка.

Сравнение чисел твердости по Роквеллу и по Бринеллю приведено в приложении А.



а – общий вид; б – схема;

1 – индикатор; 2 – шток с индентором; 3 – стол; 4 – маховик;

5 – установочный диск; 6 – клавиша; 7 – сигнальная лампа;

8 – тумблер; 9 – грузы; 10 – станина

Рисунок 1.9 – Прибор ТК-2

ОАО «Точприбор» в настоящее время выпускает приборы для измерения твердости по методу Роквелла ТР 5006 и ТР 5006 – 02. Прибор ТР 5006 предназначен для измерения твердости по Роквеллу металлов и сплавов, графитов и металлографитов, пластмасс, клееной фанеры, прессованной древесины и других материалов. Диапазон измерения твердости по методу Роквелла: шкала А, HRA – от 70 до 93; шкала В, HRB – от 25 до 100; шкала С, HRC – от 20 до 70.

Твердомер 2120ТР (рисунок 1.10) относится к группе полуавтоматических твердомеров.

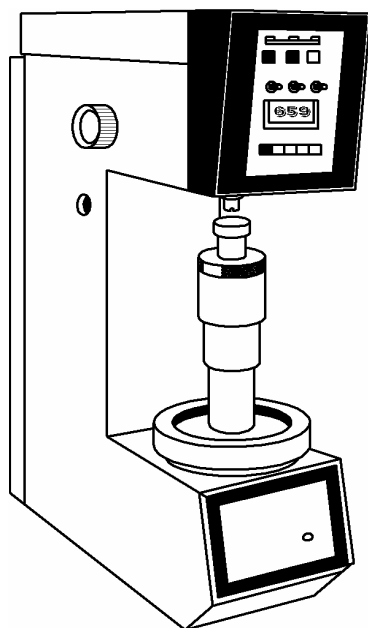


Рисунок 1.10 – Твердомер 2120TP

1.2.2.5 Метод Польди

Наряду с рассмотренными статическими методами иногда для определения твердости крупногабаритных деталей применяется также и динамический метод Польди. Однако при этом достигается значительно меньшая точность, что ограничивает область применения этого метода.

Определение твердости по методу Польди НР основано на сравнении диаметров отпечатков шарика, полученных одновременно на исследуемом образце и эталоне с известной твердостью в результате одного удара молотком (рисунок 1.11).

Удар производится ручным молотком по бойку, который прижат к эталону пружиной. Шарик находится между эталоном и образцом. При ударе шарик вдавли-
вается и в образец, и в эталон.

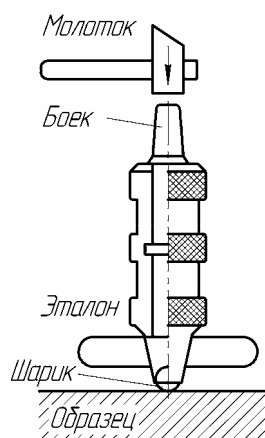


Рисунок 1.11 – Определение твердости по методу Полюди

Измерив диаметры отпечатков на образце и эталоне и зная твердость эталона, можно подсчитать твердость исследуемого образца

$$HP = HB_{\text{э}} \cdot \frac{F_{\text{э}}}{F_{\text{обр}}},$$

где $HB_{\text{э}}$ – число твердости эталона в единицах Бринелля;

$F_{\text{э}}$ – площадь поверхности отпечатка на эталоне;

$F_{\text{обр}}$ – то же, на исследуемом образце.

Если подсчитать поверхность отпечатков на эталоне и образце, имеющих форму шаровых сегментов, то приближенно

$$HP = HB_{\text{э}} \cdot \frac{d_{\text{э}}^2}{d_{\text{обр}}^2},$$

где $d_{\text{э}}$ – диаметр отпечатка на эталоне;

$d_{\text{обр}}$ – то же, на образце.

Прибор Полюди дает приближенные результаты, так как твердость эталона HB определяется при статическом вдавливании по методу Бринелля, а твердость исследуемого образца HP – при динамическом вдавливании.

Для одного и того же материала динамическая твердость значительно больше статической. Для различных материалов отношение этих твердостей колеблется в пределах от 1,6 до 2,8.

Практически твердость по методу Полюди после удара и измерения диаметров отпечатков не подсчитывается по приведенным формулам, а определяется по соответствующим таблицам.

1.2.2.6 Метод Шора

При измерении твердости по Шору (рисунок 1.12) груз вместе с укрепленным на нем индентором (обычно это стальной шарик) падает с высоты H_n на образец перпендикулярно его поверхности. Твердость по Шору определяется по высоте отскока шарика H_o . Шкала твердости разделена на 100 единиц. Она рассчитана таким образом, что твердость стабилизированного после закалки на мартенсит образца из углеродистой инструментальной стали оказывается равной 100 единицам. Эти приборы используются для экспресс-анализов. Между твердостью по Шору и другими методами нет никакой взаимосвязи.

В некоторых случаях, когда применение перечисленных методов невозможно, твердость определяется с помощью тарированных напильников. Этот метод менее точен, но прост и легко применим в цеховых условиях.

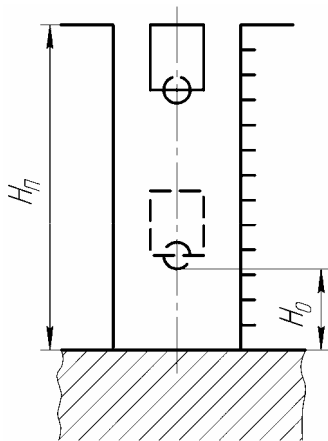


Рисунок 1.12 – Схема определения твердости по Шору

1.2.3 Современные методы и средства измерения механических свойств

В основе рассматриваемых методов лежит аналитическое решение так называемой «задачи Герца» (1882 г.) [1] о взаимной деформации двух твердых шаров при их сжатии, которая подробно рассмотрена в [7]. Труды Герца послужили основой для развития теории и методов определения твердости. Измерение твердости широко используется в науке и технике, хотя до сих пор ведется дискуссия о физическом смысле этой величины и корректных способах ее оценки [18 – 19]. Под твердостью понимается свойство поверхностного слоя оказывать сопротивление упругой и пластической деформации (или разрушению) при местных контактных воздействиях со стороны другого, более твердого тела (индентора), имеющего определенную форму и размер [20].

Использование модели Герца для описания взаимодействия индентора и образца считается корректным в том случае, когда поверхностные силы пренебрежимо малы по сравнению с суммарными силами взаимодействия, а радиус площади контакта существенно меньше радиуса индентора. Именно эти условия лежат в основе рассматриваемых методов оценки функциональных свойств поверхностных слоев. Они реализованы в измерительных установках фирмы CSM (Швейцария) [21], разработанных в последние годы.

Современные методы изучения отклика поверхности на механический контакт с индентором (контртелом) представлены в таблице 1.2. Они включают в себя следующие этапы: непосредственно испытание с записью экспериментальных данных в реальном времени управляющим компьютером; последующий анализ данных, полученных при испытании, и изучение «следов» механического контакта при использовании оптической, зондовой, электронной микроскопии, контактной и бесконтактной профилометрии.

Таблица 1.2 – Методы изучения поверхности в условиях механического контакта с индентором (контртелом)

Схема механического контакта «образец – контртело»	Вдавливание	Царапание	Скольжение
Параметры, измеряемые в реальном времени	Нагрузка – глубина погружения	Нагрузка – глубина погружения	Нагрузка – величина истирания
Рассчитываемые свойства	Твердость	Твердость (Моос)	Износостойкость «Время жизни» покрытий
	Модуль упругости	Адгезионная / когезионная прочность	
	Упругое восстановление	Стойкость к царапанию	

В методах вдавливания и царапания используют индентор, изготовленный из алмаза, а правильность его геометрии и свойств проверяется путем калибровки перед испытанием. При испытаниях по схеме «скольжение» контртело можно считать индентором лишь условно, поскольку его изготавливают не из сверхтвёрдого материала – алмаза, а из требуемого материала (сталей, керамик, твёрдых сплавов и др). Такое контртело заметно упруго деформируется под нагрузкой, а также истирается при проведении испытания, что приводит к изменению его геометрии. Однако модель Герца позволяет рассчитать начальные напряжения («напряжения Герца»), возникающие в паре «образец – контртело» перед началом испытания. Это важно для понимания того, насколько материал выбранного контртела и нагрузка соответствует условиям, в которых находится реальная пара трения.

*Оценка механических свойств многофазных и композиционных материалов.
Механическая спектроскопия*

Для оценки механических свойств многофазных материалов используют матричное индентирование с заданным шагом, выбранным так, чтобы отпечатки попали

на разные структурные составляющие. При достаточно большом количестве независимых измерений и значимой разнице свойств отдельных структурных составляющих можно получить не только усредненные значения твердости, модуля упругости и упругого восстановления, но также количественно оценить их долю и построить карту распределения механических свойств в многофазных и композитных материалах.

Измерительное царапание

Для испытаний покрытий с целью определения адгезионной / когезионной прочности, стойкости к царапанию и определения механизма разрушения используют прибор REVETEST (REVETEST, CSM Instruments), схема которого показана на рисунке 1.13.

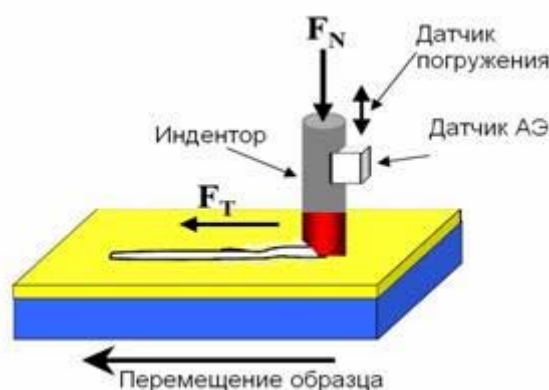
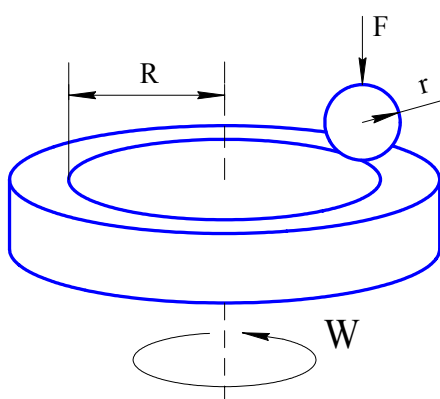


Рисунок 1.13 – Схема испытания на приборе REVETEST

На этом приборе проводят царапание изучаемой поверхности алмазным конусным индентором типа Роквелла при постоянной, ступенчато или непрерывно нарастающей нагрузке. В ходе перемещения индентора с заданной скоростью и с увеличивающейся нагрузкой проходит запись на компьютер показаний нескольких датчиков, а именно: силы нагружения, интенсивности акустической эмиссии, силы трения, коэффициента трения, глубины царапины. Данные сохраняются на жестком диске управляющего компьютера и далее по анализу формы кривых «свойство-нагрузка» и наблюдением следов разрушения покрытия в оптический микроскоп определяют какая минимальная (критическая) нагрузка (L_c) привела к разрушению.

Измерения при поверхностном скольжении и изнашивании (трибологические испытания)

Трибологические испытания функциональных поверхностей по схеме «шарик-диск» (рисунок 1.14) проводят на автоматизированной машине трения, например, марки «TRIBOMETER», CSM Instr. как на воздухе, так и при погружении в жидкую среду. Эти испытания также позволяют использовать модель Герца, они соответствуют стандарту США ASTM G99-959 и стандарту ФРГ DIN50324 и могут быть использованы для оценки износостойкости образца и контртела.



F – нормальная нагрузка; r – радиус шарика; R – радиус кольца износа

Рисунок 1.14 – Схема испытания на установки TRIBOMETER

Непосредственно в процессе испытаний определяют коэффициент трения трущейся пары. Контртело в виде шарика изготавливают из сертифицированного материала (таблица 1.3). При испытании шарик фиксируют в держателе из нержавеющей стали, который передает ему заданную нагрузку и связан с датчиком силы трения.

Важную информацию о механизме разрушения покрытия дает анализ продуктов износа, строение бороздки износа (на образце) и пятна износа (на контртеле – шарике). Для этого применяют микроскопические наблюдения и измерения профиля бороздки износа.

Таблица 1.3 – Условия испытаний на установке «TRIBOMETER»

Контртело	Шарик диаметром 3мм
Материал контртела	Стали, Al_2O_3 , Si_3N_4 , WC-Co и др.
Нормальная нагрузка	1-10 Н
Радиус кольца износа	3-30 мм
Линейная скорость	0,01-50 см/с
Среда испытания	Воздух или жидкость

Строение бороздок износа (на дисках) и диаметр пятен износа (на шариках) наблюдают в оптический микроскоп при увеличении $\times(100-500)$ и стереомикроскоп при увеличении $\times(10-58)$. Измерения вертикального сечения бороздок износа проводят на профилометре в четырех диаметрально и ортогонально противоположных областях и определяют среднее значение площади сечения и глубины бороздки.

Таким образом, комплексное трибологическое исследование включает непрерывную запись значений коэффициента трения при испытании по схеме «неподвижный стержень – вращающийся диск», а также фрактографическое исследование, в том числе измерения профиля бороздки и пятна износа, по результатам которого проводят расчет износа образца и контртела.

Количественно изменение потери объема при изнашивании $\Delta V_{обр.}, \text{ мм}^3$, определяют по следующим формулам:

– потеря объема образца $\Delta V_{обр.} = S \cdot l$,

где l – длина бороздки, мм;

S – площадь сечения бороздки износа, мм^2 ;

– потеря объема контртела $\Delta V_{шар.} = p \cdot h^2(r - 1/3h), \text{ мм}^3$,

где $h = r - (r^2 - [d/2]^2) \cdot 1/2$, мм,

d – диаметр пятна износа,

r – радиус шарика,

h – высота стесанного сегмента.

Приведенный износ I (величину, обратную износостойкости) рассчитывают, используя величину потери объема при испытании ΔV на величины пробега N (м) и приложенной нагрузки P (Н): $I = \Delta V / (N \cdot P)$.

Приведенный износ покрытия и контртела не зависит от пути пробега и нагрузки и позволяет сравнивать трибологические испытания, проведенные при разных условиях.

К перспективным материалам, которые обладают низким коэффициентом трения, относятся материалы на основе квазикристаллов. В таблице 1.4 представлены результаты исследований трибологических свойств образцов на основе квазикристаллов Al-Cu-Fe (Al₆₅Cu₂₂Fe₁₃): объемного квазикристаллического образца, полученного методом горячего прессования; наноструктурной тонкой пленки, осажденной методом магнетронного распыления; объемных композиционных материалов на основе алюминия АСД, дисперсно-упрочненных квазикристаллическими нано- и микрочастицами. В трибологических испытаниях контртелом служил стальной шарик (сталь 100Cr6, аналог стали ШХ15).

Как видно из таблицы 1.4 для исходной алюминиевой матрицы АСД и композита «АСД+10 % нано» отмечено налипание продуктов износа на контртело. Эти образцы показали высокий износ. Лучшую износостойкость и самый низкий начальный коэффициент трения показали тонкая магнетронная пленка и композит «АСД+30 % нано». Отмечено, что во всех случаях при испытании композитов на алюминиевой основе происходил абразивный износ и локальная пластическая деформация, а именно выдавливание материала образца из бороздки износа к ее берегам и образование «навалов».

Таким образом, рассмотрены методы оценки механических и трибологических свойств функциональных поверхностей перспективных материалов и покрытий в условиях механического контакта при вдавливании, царапании и скольжении контртела.

Таблица 1.4 – Трибологические свойства материалов и покрытий на основе квазикристаллов системы Al-Cu-Fe

Образец	Способ получения	Стартовый коэффициент трения	Износ контртела, мм ³ /Н/м	Износ образца, мм ³ /Н/м
Спеченный образец	Горячее спекание	0.14	$2.10 \cdot 10^{-6}$	Нет данных
магнетронная пленка	Магнетронное осаждение	0.29	$2.44 \cdot 10^{-6}$	$6.95 \cdot 10^{-5}$
АСД	Горячая экструзия	0.22	Налипание	$1.24 \cdot 10^{-2}$
АСД+10 % нано	Горячая экструзия	0.20	Налипание	$8.62 \cdot 10^{-3}$
АСД+15 % микро	Горячая экструзия	0.28	0	$3.0 \cdot 10^{-4}$
АСД+30 % микро	Горячая экструзия	0.22	$1.15 \cdot 10^{-5}$	$1.33 \cdot 10^{-4}$
АСД+30 % нано	Горячая экструзия	0.19	$9.87 \cdot 10^{-6}$	$9.23 \cdot 10^{-5}$

1.3 Порядок выполнения работы

1.3.1 Получите у учебного мастера образцы металлов, подлежащие испытанию на твердость (ориентировочная величина твердости образцов должна быть известна) и при необходимости прошлифуйте на шлифовальной бумаге.

1.3.2 Проведите испытания на твердость по Роквеллу на приборе ТК-2 (рисунок 1.9), на ПМТ-3.

1.3.3 Ознакомьтесь с образцами для испытаний на растяжение, изгиб, ударную вязкость.

1.3.4 Ознакомьтесь с современными методами и средствами измерения механических свойств.

1.4 Контрольные вопросы

1.4.1 Назовите основные виды механических испытаний.

1.4.2 Что такое упругость, прочность, пластичность?

1.4.3 Охарактеризуйте относительное удлинение и относительное сужение.

Характеристиками какого вида механического испытания они являются?

1.4.4 Начертите схемы испытаний на изгиб.

1.4.5 Какие применяются виды измерения твердости?

1.4.6 Что за вид механических испытаний – «механическое царапание»?

1.4.7 Перечислите современные виды трибологических испытаний.

1.5 Содержание отчета

В отчете должны быть изложены:

а) цель работы;

б) краткие сведения о видах механических испытаний металлических материалов;

в) рисунки образцов для различных видов испытаний;

г) схемы и способы новейших видов механических испытаний.

Работа 2. Методы исследования микроструктуры материалов

2.1 Цель работы

1.1 Иметь представление о существующих методах исследования строения металлов и сплавов.

1.2 Ознакомиться с методами макроскопического анализа и изучить характерные виды макроструктур.

1.3 Научиться пользоваться металлографическим микроскопом для исследования микроструктуры.

1.4 Ознакомиться с устройством электронного микроскопа, изучить дифракционные структуры.

2.2 Общие сведения о методах исследования строения металлов и сплавов

Свойства металлов и особенно сплавов весьма разнообразны и обуславливаются, прежде всего, химическим составом, а затем строением или структурой.

Для изучения структур металлов и сплавов применяются прямые и косвенные методы. К числу прямых методов относятся:

а) исследование макроструктуры невооружённым глазом по виду изломов или шлифованных и протравленных макрошлифов;

б) исследование микроструктуры при помощи оптического микроскопа с увеличением до 1280 раз, а также с применением электронного микроскопа с увеличением до 200 тыс. раз;

в) исследование атомно-кристаллической структуры с помощью рентгенографического анализа, позволяющего различать расстояния порядка 0,1 нм.

К числу косвенных методов относятся магнитный, дилатометрический, измерение электросопротивления и другие физические методы исследования, которые, хотя и не дают прямого изображения структуры, но всё же позволяют вскрыть кинетику происходящих в них превращений.

Кроме того, существуют методы исследования структуры путём определения твёрдости, микротвёрдости, механических и технологических свойств, а также проведения химического и спектрального анализов и пр.

2.2.1 Макроанализ

Макроскопический анализ заключается в определении строения металла (макростроения) невооруженным глазом или через лупу при небольших увеличениях (до 30 раз). В этом случае можно одновременно наблюдать большую поверхность заготовки (детали), что позволяет судить о качестве металла и определять условия предшествующей обработки.

Поэтому часто макроанализ является не окончательным, а лишь предварительным видом исследования.

Результаты макроскопического анализа можно в необходимых случаях зафиксировать, получив снимок макроструктуры исследуемого места детали или заготовки при увеличении до 20 раз.

Макростроение можно изучать не только непосредственно на поверхности металла (например, отливок, поковок), но и в изломе заготовки (детали), а также после предварительной подготовки исследуемой поверхности, заключающейся в ее шлифовании и травлении специальными реактивами. Шлифованный и протравленный образец называют *макрошлифом*; если макрошлиф изготовлен в поперечном сечении детали, то его иногда называют *темплетом*.

Макроанализ излома металла

Излом может быть разным по форме, виду и способности к отражению света, следовательно, различаться в зависимости от состава металла, его строения, отдельных дефектов, условий обработки и напряженного состояния, при котором произошло разрушение образца (детали). Поэтому анализ излома позволяет установить многие особенности строения, а в ряде случаев и причин хрупкого или вязкого разрушения.

Существует несколько способов макроанализа.

Выявление дефектов, нарушающих сплошность металла

Макроанализ выявляет: а) усадочную рыхлость, газовые пузыри, пустоты и трещины, образовавшиеся в литом металле (слитках, отливках) в зависимости от условий плавки, разливки и кристаллизации; б) трещины, возникающие при обработке

давлением или термической обработке в катаном или кованом металле; в) раковины, газовые пузыри, возникшие при сварке в сварных швах.

Для выявления этих дефектов в слитке, отливках, катаных и кованых заготовках целесообразнее применять темплеты, изготовленные в поперечных сечениях, а в сварных швах – макрошлифы, изготавливаемые в продольном сечении.

Способы травления макрошлифов (темплетов) зависят от вида металла. Выявляют флокены (мелкие трещины, рыхлости, поры), химическую и структурную неоднородность (ликвация).

2.2.2 Микроанализ

Микроскопический анализ заключается в исследовании структуры материалов при больших увеличениях с помощью микроскопа. Наблюдаемая структура называется микроструктурой. В зависимости от требуемого увеличения для четкого наблюдения всех присутствующих фаз, их количества, формы и распределения, т. е. структуры, в целом, используют:

- белый свет и обычные оптические системы, меняющиеся комбинацией стеклянных линз и призм (оптическая микроскопия);
- электронные лучи или точнее поток электронов для создания оптических систем, для которых необходимо применять электромагнитные или электростатические линзы (электронная микроскопия).

Микроанализ позволяет определить фазовый состав и структуры сплавов в условиях равновесия (в отожженном состоянии).

Микроанализ выявляет структуры сплавов в неравновесном состоянии.

Образование в закаленной стали структуры мартенсита, обнаруживаемое микроанализом, резко изменяет свойства, в частности повышает прочность, твердость и значительно уменьшает пластичность и вязкость. При низком отпуске (при 200 – 250 °С) закаленной стали ее микроструктура изменяется, но после нагре-

ва выше 300 – 350 °С микроанализ обнаруживает еще большие изменения, связанные с распадом твердого раствора (мартенсита) и коагуляцией цементита.

Определение характера обработки металла

Способ обработки сплава резко влияет на его структуру и свойства. С помощью микроанализа можно определять, каким образом изготовлен изучаемый сплав (или деталь), какой предварительной обработке он подвергается. В частности, микроанализ позволяет определить, находится ли сплав в литом состоянии или он подвергался обработке давлением и какое влияние оказала пластическая деформация на его структуру.

Определение величины зерна

Сплавы, имеющие мелкие зерна, обладают более высокими механическими свойствами: прочностью, пластичностью и вязкостью. Поскольку размеры зерна зависят от состава и технологического процесса изготовления сплава (условий выплавки, разливки, обработки давлением, термической обработки), то измерение величины зерна производится на микрошлифах.

Однако у легированных сталей зерна, точнее границы зерен, выявляются в этом случае недостаточно четко. Тогда применяют специальные методы обработки: метод цементации, метод окисления, метод травления бывших границ зерен аустенита и др.

Для определения размера зерна сравнивают наблюдаемую микроструктуру при увеличении 100 раз (это соответствует 0,5 мм² площади шлифа) со стандартными шкалами или подсчитывают число зерен, приходящихся на единицу поверхности шлифа.

Для количественной характеристики структуры и, в частности, размеров зерен применяют статистические методы и строят кривые распределения или гистограммы. С помощью окуляр-микрометра определяют число зерен, размер которых находится в пределах определенного числа делений окуляр-микрометра (например, от 0,5 до 1,5 и от 1,5 до 2,5; от 2,5 до 3,5 и т. д.); по этим данным и строят гистограммы.

Количество зерен и включений может быть определено с применением автоматизированных систем обработки измерений (планиметрический метод).

Реактивы для травления железа и его сплавов при выполнении микроскопического анализа приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Реактивы для травления железа и его сплавов

Наименование реактива	Состав реактива	Особенности применения
Спиртовой раствор азотной кислоты (реактив Ржешотарского)	Азотная кислота (плотность 1,4) 1-5 мл, этиловый спирт 100 мл	Реактив окрашивает перлит в темный цвет, выявляет границы зерна феррита, структуру мартенсита и продуктов отпуска. Применяется для выявления структуры углеродистой стали и чугуна, а также азотированной и цементованной стали
Спиртовой раствор пикриновой кислоты (реактив Ижевского)	Пикриновая кислота (кристаллическая) 4 г, этиловый спирт 100 мл	
Царская водка	Соляная кислота (плотность 1,19) 3 части, азотная кислота (плотность 1,4) 1 часть	Для выявления структуры нержавеющих сталей и сплавов.
Щелочной раствор пикрата натрия	Пикриновая кислота 2 г, едкий натр 25 г, вода 100 мл	Для выявления цементита, который окрашивается в темный цвет. Карбиды хрома, вольфрама не окрашиваются.
<i>Для выявления границ зерен сталей</i>		
Реактив Марбле	20 г CuSO_4 , 100 мл HCl (плотность 1,19), 100 мл этилового спирта	Для химического травления сталей аустенитного класса.
<i>Реактивы для травления меди и медных сплавов</i>		
Раствор персульфата (надсернокислого) аммония	Персульфат аммония 10 г, вода 90 мл	Для выявления структуры, меди, латуни, оловянной бронзы, монель-металла
<i>Реактивы для травления алюминиевых сплавов</i>		
Едкий натр	Едкий натр 1-10 г, вода 99-90 мл	Для выявления структуры дуралюминов и литых сплавов

Металлографические микроскопы

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

Металлографический микроскоп состоит из оптической системы, осветительной системы с фотографической аппаратурой и механической системы.

Оптическая система включает объектив, окуляр и ряд вспомогательных оптических элементов: зеркала, призмы и т. п. (микроскопы МИМ7, МИМ8, ММР-2М).

2.2.3 Оптическая и электронная микроскопия

При изучении рельефа изнашиваемых поверхностей и структурных характеристик поверхностного слоя материалов широко применяют оптическую и электронную микроскопию.

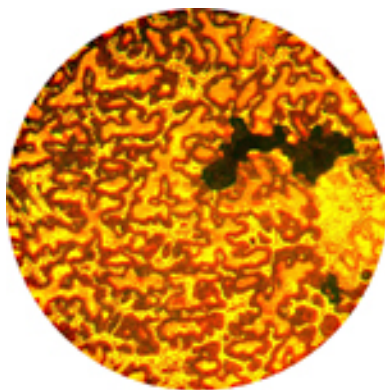
Оптическая микроскопия чаще всего применяется для получения картины размеров и распределения структурных составляющих материала по фотографиям полированных и слегка протравленных участков поверхностей деталей или образцов материала (шлифов).

Зная увеличение на фотографии, легко измерить размеры зерен и их составляющих. В лучших оптических микроскопах увеличение достигает 1000. Примеры оптических и электронных фотографий изношенных поверхностей приведены на рисунке 2.1.

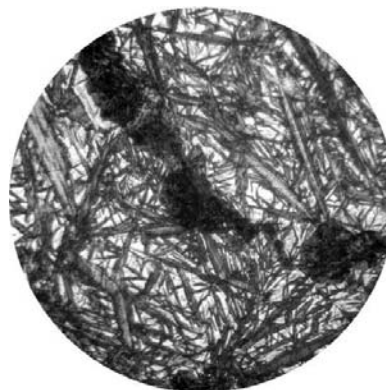
Электронные микроскопы позволяют получить гораздо большее, чем у оптических, увеличение – до 500 000 раз и больше.

На электронных микроскопах возможны съемки «на просвет», если изучается структура и состояние тонких пленок, и при отражении. В режиме отражения работают растровые электронные микроскопы (РЭМ).

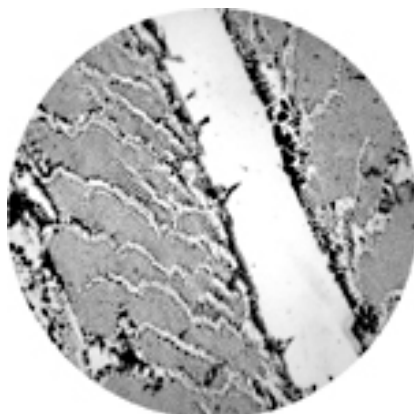
Метод РЭМ широко применяют для наблюдения топографии поверхностей, например, если поверхность содержит островки пленок вторичных структур, то после оттенивания реплик под заданным углом по фотографии можно определить толщину этих пленок.



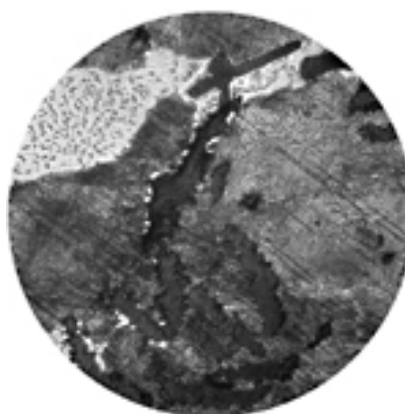
а



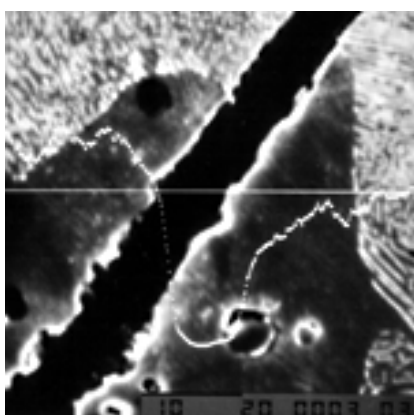
б



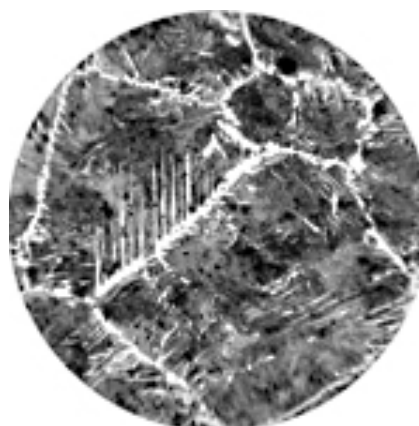
в



г



д



е

а – чугунная поверхность; б – стальные изношенные поверхности;
 в – усталостные трещины (косой срез); г – поверхность, поврежденная
 фреттинг-коррозией; д – развитие дислокационной структуры меди;
 е – развитие усталости при трении кристаллов железа

Рисунок 2.1 – Электронные (x10000) и оптические фотографии
 изнашиваемых поверхностей

Широкий круг методов структурного анализа основан на дифракции рентгеновских лучей, электронов и нейтронов, которые могут быть направлены на изучаемый объект.

При рентгеноструктурном анализе используют лучи с длинами волн в интервале 0,05 – 0,25 нм, соизмеримыми с межатомными расстояниями в твердых телах и жидкостях, что позволяет им проходить сквозь непрозрачные для световых лучей объекты. Проходя сквозь твердое вещество, рентгеновские лучи испытывают дифракцию на атомах кристаллической решетки. Условие максимумов описывается формулой Вульфа-Брегга:

$$n\lambda = 2d \sin\theta, \quad (1)$$

где d – расстояние между соседними параллельными атомными плоскостями кристалла;

θ – угол скольжения;

λ – длина волны рентгеновского излучения;

n – порядок максимума.

Использование электронных лучей, обладающих малой длиной волны, позволяет заметно увеличить разрешающую способность оптической системы.

Длина волны электронов обратно пропорциональна их импульсу, т.е.

$$\lambda = h / (m v),$$

где h – постоянная Планка;

m – масса электрона;

v – скорость электрона.

Изменяя скорость электронов, можно изменять и длину волны.

В электронном микроскопе (рисунок 2.2) удастся достигнуть разрешающей способности системы в 100 000 раз больше.

Электронный микроскоп ЭМВ-100ЛМ состоит из источника электронов – электронной пушки, в которой не только происходит эмиссия электронов, но и достигается увеличение их скорости за счет приложенного напряжения.

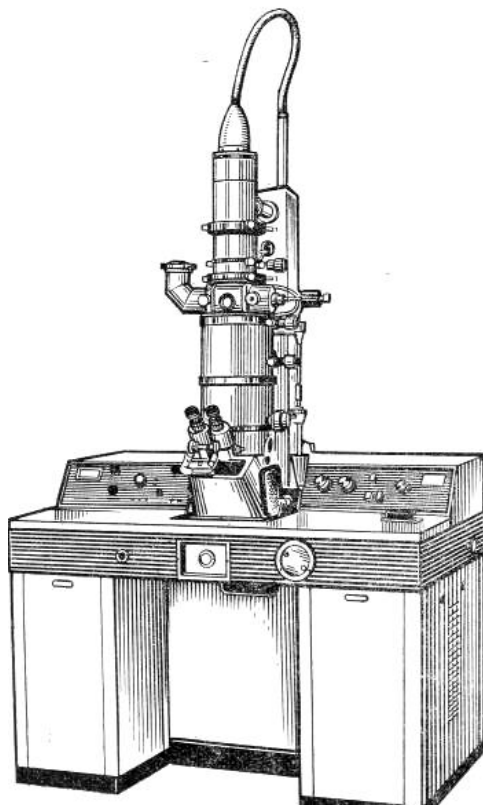


Рисунок 2.2 – Внешний вид электронного микроскопа ЭМВ-100ЛМ

Электроны вылетают при нагреве вольфрамовой спирали, являющейся катодом. Между спиралью и анодом, находящимся на небольшом расстоянии, создается мощное электрическое поле, необходимое для повышения скорости движения электронов. Анод представляет пластинку с отверстием посередине. Электроны проходят через отверстие и расположенные ниже конденсорные линзы. Конденсорная или расположенные далее объективная промежуточная и проекционные линзы имеют значительное по величине магнитное или электростатическое поле.

В зависимости от метода исследования объекта существует ряд конструкций микроскопов:

– просвечивающие, в которых поток электронов проходит через объект; полу-

чаемое изображение является результатом различного рассеивания электронов на объекте;

- отражательные, в которых изображение создается электронами, отраженными от поверхности объекта. Эти микроскопы имеют принципиальную схему электронно-оптической системы, близкую к оптической;

- эмиссионные, в которых изображение создается от поверхности, светящейся под действием электронов;

- растр-микроскопы, где изображение создается за счет вторичной эмиссии электронов, излучаемых поверхностью, на которую падает непрерывно перемещающийся по этой поверхности поток первичных электронов.

Использование просвечивающего микроскопа требует приготовления специальных объектов – тонких металлических пленок 10-20 нм или реплик (слепков) с поверхности металлического шлифа, так как только они прозрачны для электронов.

Для изготовления тонких металлических объектов – пленок толщиной 10-20 нм, строение которых можно изучать «на просвет», применяют следующие методы: осаждение, деформацию и растворение.

Дифракционные картины получают на рентгенограммах при фотографическом методе регистрации в камерах Дебая или на дифрактограммах с автоматической регистрацией счетчиками интенсивности рассеяния рентгеновских лучей. Дифракционная картина в целом позволяет выявить и оценить качественно и количественно изменения фазового состава материалов трущейся пары, межплоскостные расстояния в кристаллических решетках фаз, изменения параметров кристаллической решетки при диффузионном перераспределении легирующих элементов и образовании твердых растворов, изменения состояния тонкой кристаллической структуры деформированных трением поверхностных слоев металлов, сплавов и др.

2.2.4 Метод скользящего пучка

Метод скользящего пучка рентгеновских лучей создан в Институте машиноведения РАН Л.М.Рыбаковой и Л.М. Куксеновой.

Обычно рентгеновские методики позволяют изучать слои глубиной от 10^{-6} до 10^{-4} м. Однако анализируемую толщину материала можно уменьшить еще в несколько раз, изменяя (уменьшая) угол первичного луча.

Для реализации метода скользящего пучка рентгеновских лучей проведена модернизация цилиндрических фотокамер РКД и РКУ, обеспечивающих съемку при весьма малых углах скольжения первичного пучка. Изменение длины волны рентгеновского излучения и угла скольжения α в совокупности позволило проанализировать слои глубиной менее 1 мкм (от 10^{-6} до 10^{-8} м). Методика скользящего пучка рентгеновских лучей была успешно применена авторами при исследовании физического механизма избирательного переноса при трении.

Отдельно отметим возможности *рентгеноспектрального микроанализа поверхностей трения*. Этот метод позволяет определять элементный состав поверхностного слоя. Сущность метода состоит в том, что пучком электронов диаметром около 0,5 мкм возбуждают атомы материала, составляющие поверхностные слои, которые начинают генерировать рентгеновское излучение.

Измеряя длину волны и интенсивность излучения, идентифицируют излучающие элементы и их концентрацию. Подобным же образом работают и *лазерные микроанализаторы*.

Одним из физических методов исследования в трибологии является **спектральный анализ**, позволяющий определять состав вещества тонких поверхностных слоев на основе изучения их спектров.

При возбуждении поверхности электрической дугой или искровыми разрядами анализируемый материал испаряется и испускает световое излучение. Оно разлагается призмой на спектральные линии, обработка которых позволяет идентифицировать их с излучающим веществом при вполне удовлетворительной воспроизводимости резуль-

татов. Применение упомянутых методов наиболее распространено при решении большинства задач трибологии.

2.2.5 Растровая электронная микроскопия и рентгеноспектральный микроанализ

Растровая электронная микроскопия. Принципиальное отличие растровой электронной микроскопии от просвечивающей состоит в том, что формирование изображения объекта осуществляется при сканировании его поверхности электронным зондом диаметром до 5 – 10 нм. Это определяет основные особенности метода.

Во-первых, становится возможным непосредственное изучение структуры поверхности покрытий в широком диапазоне увеличений от 10 до 30000 и более с достаточно высоким разрешением (10 нм), а, следовательно, во многих случаях отпадает необходимость в специальных образцах, прозрачных для электронного луча – репликах и фольгах, методика приготовления которых сложна и трудоемка. В большинстве используемых в настоящее время растровых микроскопах стандартный образец имеет диаметр 20 мм и высоту 10 мм, но могут быть исследованы образцы много меньших размеров.

Во-вторых, в растровом микроскопе достигается в сотни раз большая, чем в просвечивающем, глубина фокуса, что позволяет наблюдать объемное изображение, структуры и объективно оценивать пространственную конфигурацию ее элементов.

Наконец, растровая электронная микроскопия располагает целым рядом аналитических возможностей, которые значительно расширяют область её применения и позволяют получать, разнообразную и часто уникальную информацию. К таким возможностям относится исследование образцов "на просвет", изучение кристаллографической и дислокационной структуры в режиме каналированных электронов, наблюдение за структурными изменениями образцов непосредственно в процессе проведения динамических экспериментов (деформирования, изнашивания, коррозии, нагрева, ионного травления), а также анализ локального химического состава. С последним

связаны многие достижения микрозондовых исследований, которые далее будут рассмотрены.

По своим характеристикам растровая электронная микроскопия занимает промежуточное положение между световой и просвечивающей. Однако не следует считать их конкурирующими методами. Скорее они дополняют друг друга и предполагают комплексное использование. Наибольшее применение растровая микроскопия нашла при исследовании морфологии поверхности покрытий.

2.2.6 Автоионная микроскопия

Автоионная микроскопия широко применяется в физическом металловедении для изучения атомной структуры металлов и сплавов. Атомное разрешение делает автоионную микроскопию пока единственным методом для прямого наблюдения точечных дефектов-вакансий и межузельных атомов, а также для наблюдения тонкой структуры более протяженных несовершенств кристаллической решетки – дислокаций, дефектов упаковки, двойниковых границ, границ зерен. В область применения метода входит изучение процессов адсорбции, коррозии и окисления. Причем автоионная микроскопия позволяет не только исследовать атомную конфигурацию, но и проводить атомно-локальный химический анализ с использованием атомного зонда. Далеко не полное перечисление возможностей предполагает высокую эффективность автоионной микроскопии для исследований структуры покрытий. Однако к настоящему времени имеется весьма ограниченное количество работ, выполненных на таких объектах. Причиной этого могут быть следующие сдерживающие факторы: тончайшее искусство приготовления образцов – острий, методика микроскопического анализа.

2.2.7 Рентгеноструктурный анализ

Рентгеноструктурный анализ по-прежнему остается самым универсальным и распространенным при исследовании покрытий. Он используется для изучения кристаллической структуры, качественного и количественного анализа, определения размеров, распределения и расположения отдельных кристаллитов в поликристаллической структуре, для исследования типа, концентрации и распределения дефектов решетки, а также анализа атомной структуры частично упорядоченных и некристаллических покрытий. Классический подход к решению этих задач показан в учебниках и монографиях, поэтому основное внимание будет обращено на работы, выполненные в последние годы.

Так, разработана методика количественной оценки многокомпонентной аксиальной текстуры непосредственно по кривой текстурной записи исследуемого образца. Для этого предлагается определять истинные профили текстурных максимумов, учитывая соотношение их интенсивностей и угловое расстояние между ними, а затем вычислять количественные характеристики текстуры: процент кристаллитов с беспорядочной ориентировкой, процент текстурированных кристаллитов и средний угол рассеяния аксиальной текстуры. Проведенная таким способом оценка степени текстурирования позволила установить зависимость износостойкости хромовых покрытий от количественных характеристик их текстуры.

2.3 Порядок выполнения работы

2.3.1 Ознакомьтесь с руководством.

2.3.2 Определите характер излома одного из образцов. Зарисуйте структуру, дайте пояснения.

2.3.3 Рассмотрите волокнистую структуру предложенного макрошлифа. Определите, каким методом изготовлено изделие. Зарисуйте структуру.

2.3.4 Проведите анализ сварного соединения методом травления в растворе двойной медно-аммиачной соли. Для этого:

а) шлифуйте анализируемую поверхность темплета сварного соединения наждачной бумагой. Удалите фильтровальной бумагой со шлифованной поверхности остатки абразива;

б) поместите макрошлиф в ванночку вверх шлифованной поверхностью, залейте его раствором двойной медно-аммиачной соли;

в) через 2 мин извлеките образец из раствора и под струей воды снимите ватным тампоном осевший на поверхности макрошлифа слой меди;

г) рассмотрите и зарисуйте выявленное анализом макростроение макрошлифа;

д) слейте раствор из ванночки в бутылку.

2.3.5 Научиться работать на микроскопе ММУ-3, пользуясь настоящим руководством. При изучении микроскопа необходимо найти объектив, окуляр, осветитель, научиться пользоваться рукоятками грубой и микрометрической фокусировки.

2.3.6 Определите общее увеличение микроскопа.

2.3.7 Рассмотрите микрошлифы в микроскопе до травления и зарисуйте обнаруженные неметаллические включения, а для чугуна – графит.

2.3.8 Зарисуйте микроструктуру стали и чугуна, выявленную травлением, и дайте пояснения к ней.

2.3.9 Ознакомиться с возможностями электронного микроскопа УМВ-100к.

2.4 Содержание отчёта

2.4.1 Цель работы.

2.4.2 Перечень дефектов, выявляемых макроанализом.

2.4.3 Рисунки микроструктур образцов стали и чугуна.

2.4.4 Перечень методов исследования, применяемых в работе.

2.5 Контрольные вопросы

2.5.1 Каковы основные методы исследования строения металлов и сплавов?

Дайте определение макроанализа, макрошлифа.

2.5.2 Какие дефекты металла и особенности его структуры позволяет выявить макроанализ?

2.5.3 Какие бывают виды изломов и как они различаются?

2.5.4 Дайте определение микроанализа, микрошлифа.

2.5.5 Для чего производят травление?

2.5.6 Устройство и работа микроскопа ММУ-3.

2.5.7 Что такое полезное увеличение микроскопа?

2.5.8 В чем отличие оптического микроскопа от электронного?

2.5.9 На каком виде микроскопов получают дифракционные структуры и для чего они применяются?

2.5.10 Что такое автоионная микроскопия?

3 Работа 3. Структуры сталей и чугунов после различных видов термообработки

3.1 Цель работы

1.1 Изучить микроструктуры железоуглеродистых сплавов после различных видов термообработки.

1.2 Научиться по микроструктуре и величине твердости определять вид термообработки, которому был подвергнут железоуглеродистый сплав.

3.2 Основные сведения

Металлический сплав получают сплавлением двух или более элементов. В технике широко применяют сплавы железа с углеродом, кремнием, марганцем, хромом, никелем и другими веществами.

Компонентами называются химические элементы – металлы и неметаллы, образующие сплав.

Свойства сплава зависят от многих факторов, но прежде всего они определяются составом фаз и их количественным соотношением.

Фаза – это однородная по химическому составу, строению, свойствам часть сплава, отделенная от других частей (фаз) поверхностью раздела, при переходе через которую химический состав или структура изменяются скачком.

Сплавы могут образовывать следующие элементы структуры: механические смеси, твердые растворы и химические соединения.

Механические смеси представляют собой смесь двух фаз, когда отсутствует взаимодействие между компонентами, нет взаимного растворения, компоненты не вступают в химические реакции и их кристаллические решетки различны.

Твердые растворы образуются в результате проникновения в кристаллическую решетку одного компонента атомов другого компонента. Твердые растворы бывают двух типов: твердые растворы замещения и твердые растворы внедрения.

При образовании химических соединений компоненты вступают в химическое взаимодействие. К химическим соединениям относят карбиды, оксиды, сульфиды и др.

3.2.1 Структурные составляющие железоуглеродистых сплавов

Структуры могут быть однофазные, двухфазные и многофазные. К однофазным структурам относят феррит, аустенит, цементит.

Феррит (Ф) – твердый раствор внедрения углерода в α -железе с ОЦК кристаллической решеткой с максимальной растворимостью углерода 0,02 % при 727 °С (рисунок 3.1).

Характеризуется низкой прочностью $\sigma_b = 300$ МПа и твердостью 80 – 100 НВ, высокой пластичностью (относительное удлинение $\delta = 40$ %). На диаграмме состояния феррит занимает область GPQ (см. приложение). Образуется из аустенита. Твердый раствор внедрения углерода в Fe_δ называют высокотемпературным ферритом.

Аустенит (А) – твердый раствор внедрения углерода в γ -железе с ГЦК кристаллической решеткой, с предельной растворимостью углерода 2,14 % при температуре 1147 °С (рисунок 3.2). В железоуглеродистых сплавах в равновесном состоянии аустенит при комнатных температурах не существует. Обладает высокой пластичностью и низкой твердостью, относительное удлинение находится в пределах 40 – 50 %, твердость 160 – 200 НВ. Железоуглеродистые сплавы, находящиеся в аустенитном состоянии, легко поддаются обработке давлением. На диаграмме состояния аустенит занимает область NJESG (приложение А).

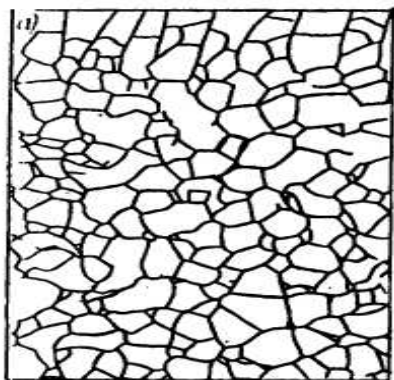


Рисунок 3.1 – Микроструктура феррита (х 300)

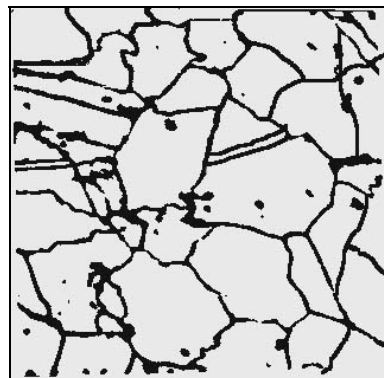
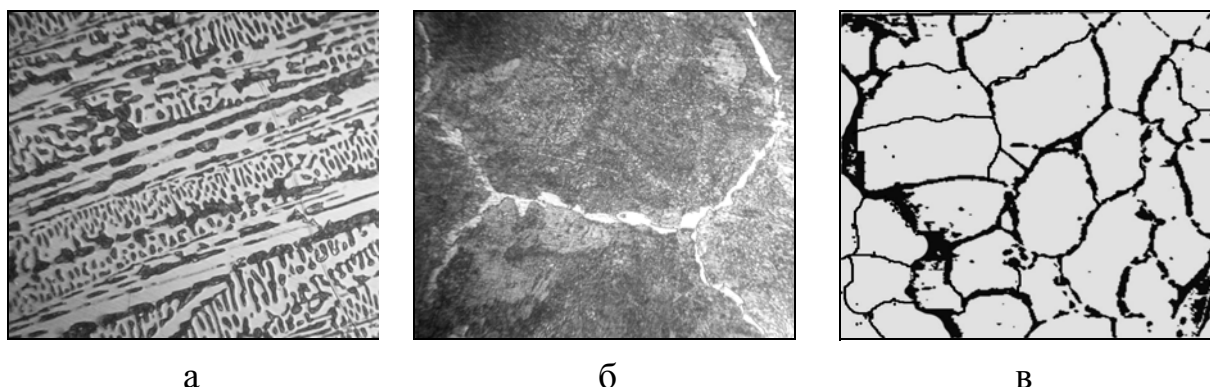


Рисунок 3.2 – Микроструктура аустенита (х 300)

Цементит (Ц) – химическое соединение железа с углеродом, карбид железа Fe_3C (рисунок 3.3). Имеет сложную кристаллическую решетку. В Fe_3C содержится 6,67 % С. Характеризуется высокой твердостью (800 НВ), но очень хрупок. Чем

больше цементита в сплавах, тем большей твердостью и меньшей пластичностью они обладают.



а – цементит первичный (пластинчатые светлые кристаллы);

б – цементит вторичный (светлая сетка по границам зерен);

в – цементит третичный (мелкие светлые включения на границе феррита)

Рисунок 3.3 – Микроструктуры цементита (х 300)

В зависимости от условий образования различают цементит первичный (Ц_I) (рисунок 3.3 а), который образуется при кристаллизации заэвтектических чугунов (ниже линии CD, см. приложение А).

Цементит вторичный (Ц_{II}) (рисунок 3.3 б) – образуется у сплавов с содержанием от 0,9 % до 2,0 % С при охлаждении аустенита в результате изменения растворимости углерода в аустените (ниже линии ES в интервале температур от 1147 °С до 727 °С, см. приложение А).

Цементит третичный (Ц_{III}) (рисунок 3.3 в) образуется у сплавов с содержанием от 0,01 % С до 0,025 % С при охлаждении феррита в результате изменения растворимости углерода в феррите (линия PQ), ниже температуры 727 °С.

Избыточный углерод выделяется в виде цементита третичного, который располагается по границам зерен.

К двухфазным составляющим относят перлит и ледебурит.

Перлит (П) – механическая смесь (эвтектоид), состоящая из двух фаз: феррита и цементита, содержит 0,8 % С (рисунок 3.4). Образуется в результате распада ау-

стенита в процессе его охлаждения при температурах ниже 727°C . Перлит в зависимости от формы частичек цементита бывает пластинчатым или зернистым, что определяет его механические свойства. Перлит чаще всего имеет пластинчатое строение и является прочной структурной составляющей ($\sigma_{\text{в}} = 800\text{-}900 \text{ МПа}$, $\delta \leq 16 \%$, $180\text{-}220 \text{ НВ}$).

Ледебурит (Л) – механическая смесь (эвтектика) аустенита и цементита, образующаяся из жидкого расплава при температуре 1147°C и содержащая $4,3 \%$ С (рисунок 3.5). При температуре ниже 727°C аустенит превращается в перлит. В этом случае ледебурит состоит из цементита и перлита. В этой структурной составляющей цементит образует сплошную матрицу, в которой размещен перлит. Такое строение ледебурита служит причиной его большой твердости ($> 600 \text{ НВ}$) и хрупкости.



Рисунок 3.4 – Микроструктура перлита

Эвтектоидная смесь,
состоящая из пластинок
феррита и цементита (x 300)



Рисунок 3.5 – Микроструктура ледебурита

Эвтектическая смесь,
состоящая из округлых темных
включений перлита на светлой
основе цементита (x 300)

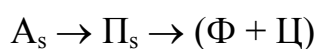
Взаимодействие железа с углеродом описывается двумя диаграммами (см. приложение А):

- а) стабильной – железо-углерод (Fe-C);
- б) метастабильной – железо-цементит ($\text{Fe-Fe}_3\text{C}$).

Ниже линии GS происходит полиморфное превращение аустенита в феррит.

Линия SE является линией насыщения и показывает, как изменяется растворимость углерода Fe_γ с изменением температуры. Вследствие уменьшения растворимости углерода в Fe_γ при понижении температуры из пересыщенного аустенита будет выделяться вторичный цементит $Ц_{II}$.

Линия PSK 727 °C является линией эвтектоидного превращения. При этой температуре аустенит (A_s) состава точки S (0,8 % C) распадается с образованием перлита ($П_s$):



3.2.2 Углеродистые стали

3.2.2.1 Структура углеродистых сталей после отжига и нормализации

По микроструктуре стали делятся на доэвтектоидные, эвтектоидные и заэвтектоидные (рисунки 3.6, 3.7, 3.8). Стали с массовой долей углерода от 0,02 % до 0,8 % C называют доэвтектоидными; с массовой долей 0,8 % углерода – эвтектоидными; с массовой долей от 0,8 % до 2,14 % – заэвтектоидными.

Как следует из диаграммы Fe-Fe₃C, при комнатной температуре в равновесном состоянии микроструктура доэвтектоидной стали состоит из феррита (Φ) и перлита (Π), (рисунок 3.6). Количественное соотношение между структурными составляющими (Φ и Π) в доэвтектоидных сталях определяется содержанием углерода. Чем ближе содержание углерода к эвтектоидной концентрации, тем больше в структуре перлита.

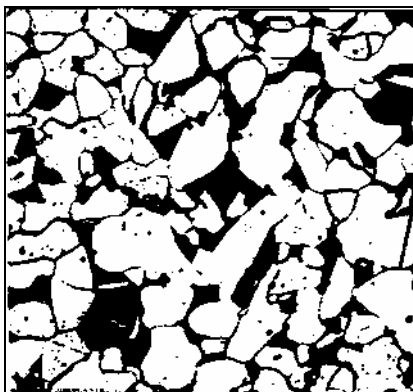


Рисунок 3.6 – Микроструктура низкоуглеродистой доэвтектоидной стали (0,15 % C): феррит (светлая составляющая) + перлит (темная составляющая)

Микроструктура эвтектоидной стали (0,8 % C) состоит только из перлита (рисунок 3.7). Перлит образуется из аустенита при охлаждении стали У8 (линия PSK). Строение перлита вследствие его значительной дисперсности (мелкозернистости) может быть детально различимо только при сравнительно больших увеличениях ($\times 600$).

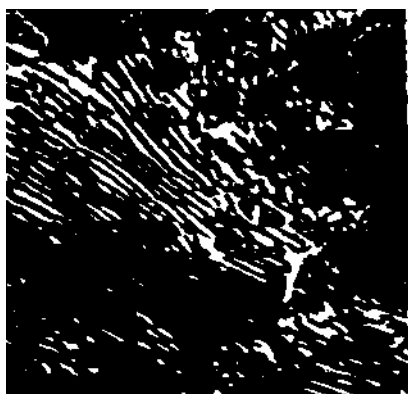


Рисунок 3.7 – Микроструктура эвтектоидной стали (сталь У8: перлит пластинчатый)

Микроструктура заэвтектоидной стали (рисунок 3.8) состоит из перлита и вторичного цементита, который образуется в сталях У9-У13 из аустенита при охлаждении. Сетка цементита начинает образовываться на линии ES, перлит – на линии PSK

(см. приложение). Максимальное количество структурно свободного цементита (~ 20 %) будет в сплаве с содержанием углерода 2,14 %.

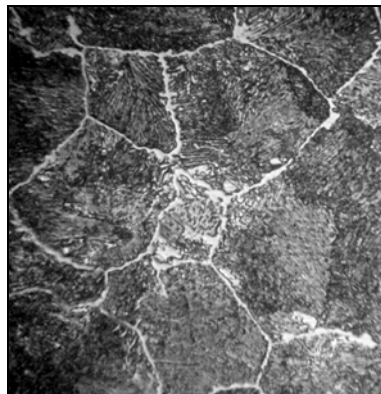


Рисунок 3.8 – Микроструктура заэвтектоидной стали
(перлит + цементит вторичный)

Чтобы отличить микроструктуру цементита от феррита, имеющего также светлую окраску, необходимо шлиф, протравленный 4 %-ным раствором азотной кислоты, заново перешлифовать, переполлировать и заново протравить раствором пикрата натрия, который окрашивает цементит в темный цвет.

3.2.2.2 Термическая обработка стали

В практике современного машиностроения наиболее распространены такие виды термической обработки углеродистых сталей, как отжиг, нормализация, закалка и отпуск. С помощью термической обработки, как правило, изделию придают определенный комплекс физико-механических свойств.

Необходимое сочетание свойств достигается за счет соответствующего регулирования структуры стали, которая, в свою очередь, формируется за счет варьирования главным образом температуры нагрева и скорости охлаждения при термической обработке. В зависимости от конкретного сочетания последних различают три основных типа структурных превращений:

а) при медленном охлаждении из аустенитного состояния в температурном интервале критических точек формируются структуры равновесного типа за счет фазовой перекристаллизации;

б) при быстром охлаждении из аустенитного состояния, когда подавляется превращение аустенита в перлит по равновесной реакции и имеет место более или менее значительное переохлаждение аустенита относительно критической точки A_1 , формируются неравновесные или квазиравновесные структуры. Формирование структур происходит либо диффузионным путем (квазиэвтектоидные структуры типа сорбита и троостита закалки), либо бездиффузионным (мартенситные структуры);

в) при нагреве неравновесных структур ниже критической точки A_1 происходят изменения, приближающие сталь к равновесному состоянию, т. е. имеет место распад неравновесных структур.

Первый тип процессов характерен для отжига и нормализации, второй – для закалки, третий – для отпуска.

По диаграмме «железо-цементит» выбирают температуру нагрева стали, по диаграммам изотермического превращения – скорость охлаждения (рисунок 3.9).

Отжиг стальных изделий осуществляется в целях понижения твердости (улучшения обрабатываемости резанием), подготовки или исправления структуры и снятия внутренних напряжений.

Для **дозвтектоидных** (конструкционных) сталей наиболее распространенным режимом отжига является: нагрев на 20 – 50 градусов выше A_{C1} , (выше линии GS на диаграмме состояния, см. приложение А), выдержка при этой температуре и последующее медленное охлаждение (V_1 на рисунке 3.9) до температуры 500 – 600 °С (обычно с печью), а затем на воздухе.

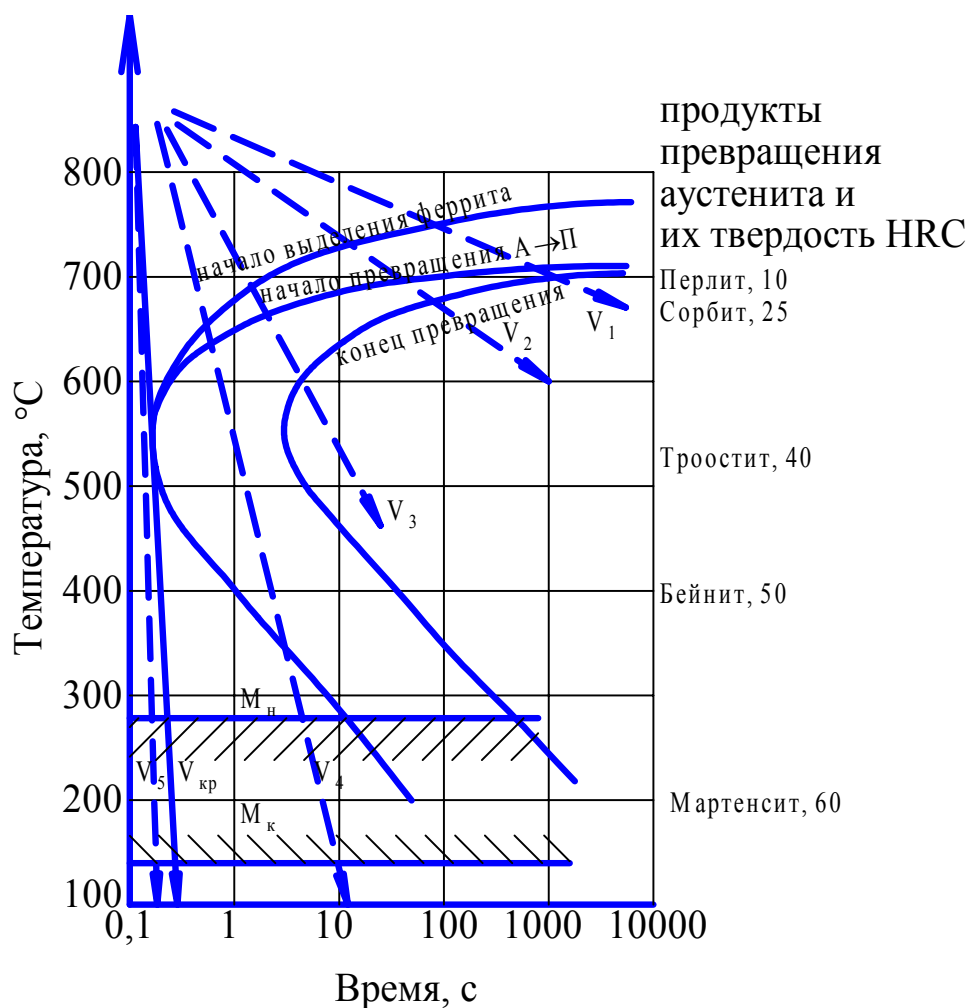
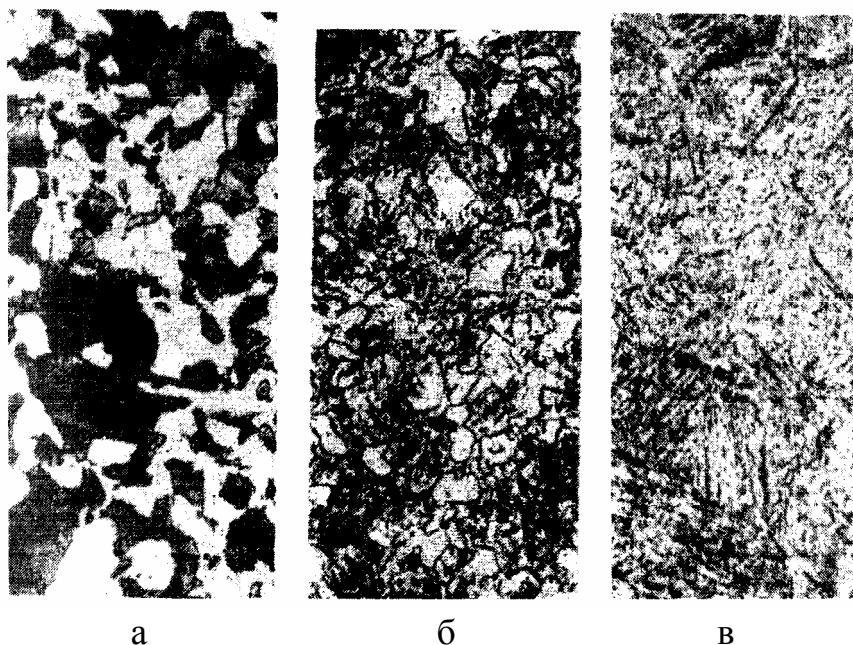


Рисунок 3.9 – Диаграмма изотермического превращения аустенита для доэвтектоидной стали с содержанием углерода 0,45 – 0,50 %

Рассмотрим структурные превращения при таком режиме термообработки. При нагреве выше A_{C3} сталь переходит в аустенитное состояние. В процессе медленного охлаждения (V_1 на рисунке 3.9) по достижении температуры A_{C3} (точка пересечения луча V_1 с линией «начало выделения феррита») начинается выделение феррита. Аустенит при этом обогащается углеродом, концентрация которого повышается вплоть до 0,8 %. По достижении температуры A_{C1} , (точка пересечения луча V_1 с линией «начало превращения» на рисунке 3.9) начинается распад аустенита с образованием перлита.

На рисунке 3.10 представлена микроструктура стали с 0,40 % C в равновесном (после отжига) и неравновесном состояниях после нагрева до 750 °C и быстрого ох-

лаждения (неполная закалка) и после нагрева до 840 °С и быстрого охлаждения (полная закалка).



а – после отжига, структура феррит + перлит, х200; б – после неполной закалки с 750 °С в воде, структура феррит + мартенсит, х500; в – после полной закалки с 840 °С в воде, структура – мартенсит х500

Рисунок 3.10 – Микроструктура углеродистой стали (0,40 % С)

Быстрое охлаждение позволило получить неравновесную структуру и кроме того, характеризовать превращения, происходящие в стали при нагреве. Микроанализ отчетливо показывает, что в результате нагрева до 750 °С, т. е. выше критической точки A_{C1} , но ниже точки A_{C3} , в стали произошло частичное превращение; вместо темной (т.е. более сильно травящейся при микроисследовании) составляющей – перлита и частично светлой феррита образовалась новая структура – мартенсит, но часть светлой (т.е. менее сильно травящейся) составляющей – феррита осталась без изменения. В то же время при более высоком нагреве (до 840 °С, т.е. выше критической точки A_{C3}) произошло полное превращение: образовалась новая структура – мартенсит.

Наиболее распространенным для деталей из **заэвтектоидных и эвтектоидных** (инструментальных) сталей является следующий режим отжига: нагрев на 20-50 °С выше A_{C1} , выдержка при этой температуре с последующим очень медленным охлаждением в интервале температур $A_{r1} - 500$ °С, а затем на воздухе. Соответственно при нагреве заэвтектоидная сталь имеет двухфазную структуру аустенит+цементит вторичный. В процессе охлаждения до A_{r1} из аустенита выделяется цементит, за счет чего концентрация углерода в аустените понижается до 0,8 %. При температуре A_{r1} начинается распад аустенита с образованием перлита. За счет очень низких скоростей охлаждения в области ниже температуры A_{r1} происходит сфероидизация цементита (избыточного и в составе перлита). В результате после отжига заэвтектоидная сталь приобретает структуру зернистый перлит (рисунок 3.11.). В этом структурном состоянии заэвтектоидные стали характеризуются наилучшей обрабатываемостью режущим инструментом.

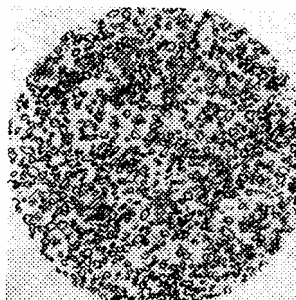


Рисунок 3.11 – Микроструктура заэвтектоидной стали
после отжига (зернистый перлит), $\times 450$

Нормализация углеродистых сталей применяется для исправления литой структуры и структуры перегрева, устранения или дробления цементитной сетки и частично – для снятия внутренних напряжений.

Для **доэвтектоидных** сталей режим нормализации отличается от режима отжига лишь более высокой скоростью охлаждения (V_2 на рисунке 3.9), которая обеспечивается в условиях охлаждения на воздухе. В результате нормализации получается структура феррит + перлит.

Заэвтектоидные стали для нормализации нагревают немного выше точки A_{cm} и затем, после выдержки, охлаждают на воздухе. В этом случае при нагреве сталь приобретает однофазную аустенитную структуру.

При нагреве под закалку **доэвтектоидная** сталь приобретает однофазную аустенитную структуру, а заэвтектоидная – двухфазную: аустенит + цементит вторичный (структуры аналогичны получаемым при нагреве для отжига).

При охлаждении **доэвтектоидной** стали из аустенитного состояния со скоростью, равной или больше критической $V_{кр}$ или V_5 (на рисунке 3.9), температура стали снижается настолько интенсивно, что выделение феррита и образование перлита путем диффузионного распада аустенита не успевает произойти. Аустенит существенно переохлаждается относительно точки A_{r1} . Так как диффузионные процессы при сравнительно низких температурах значительно затормаживаются, то перестройка решетки, необходимая для полиморфного превращения $Fe_\gamma \rightarrow Fe_\alpha$, происходит по сдвиговому (бездиффузионному) механизму и практически реализуется, начиная с температуры около 300 °С и ниже. При этом углерод, входящий в состав переохлажденного аустенита, не выделяется из решетки Fe_α , а образует пересыщенный твердый раствор – мартенсит закалки (рисунки 3.12, 3.13, 3.14).

При закалке заэвтектоидных сталей, имеющих в момент нагрева структуру аустенит + цементит вторичный, в процессе охлаждения превращение претерпевает только аустенит. После закалки заэвтектоидные стали имеют структуру мартенсит + вторичный цементит + аустенит остаточный (рисунок 3.15).

Остаточный аустенит в связи с небольшим его количеством под микроскопом не просматривается. Иглы мартенсита в заэвтектоидных сталях настолько дисперсны (это связано с высоким содержанием углерода), что при увеличениях до 500 практически не различаются.

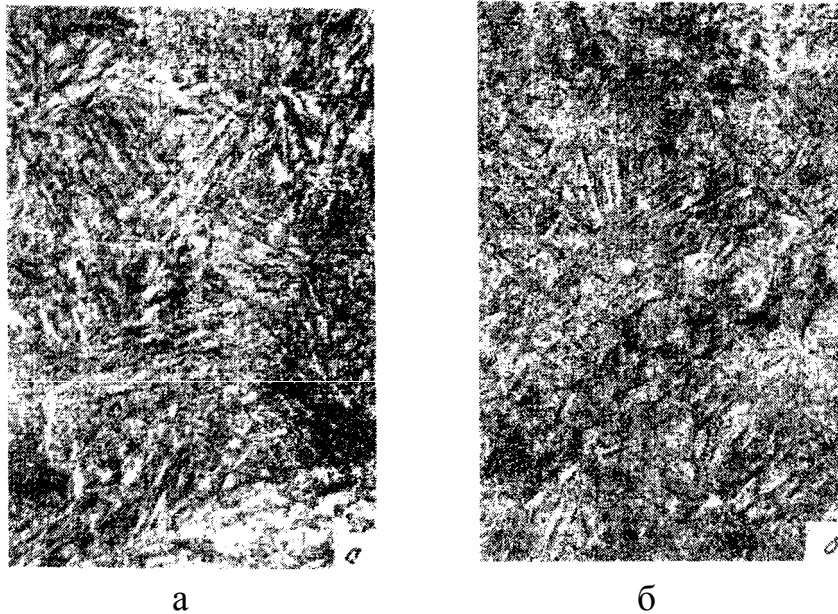
Закаленная на мартенсит сталь обладает повышенной хрупкостью. Отпуск предназначен для уменьшения хрупкости и повышения характеристик вязкости и пластичности после закалки.



Рисунок 3.12 – Микроструктура углеродистой стали (0,4 % C); перегрев при закалке, x500



Рисунок 3.13 – Микроструктура углеродистой стали (0,4 % C) после закалки с 830 °C в масле; структура мартенсит и троостит (темные участки), x 200



а – закалка с 830 °С без перегрева, кристаллы мартенсита мелкие и плохо различимы; б – закалка с 925 °С (перегрев), кристаллы мартенсита более крупные, х600

Рисунок 3.14 – Структура закаленной среднеуглеродистой стали (0,5 % С):

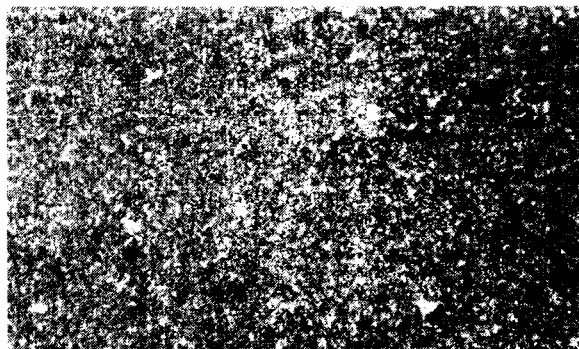


Рисунок 3.15 – Заэвтектоидная сталь (1,2 % С) в закаленном состоянии.
Закалка 800 °С. Мартенсит и вторичный цементит, х500

Отпуск включает нагрев стали до температуры ниже A_{C1} , выдержку при заданной температуре (обычно не менее 2 часов) с последующим охлаждением с произвольной скоростью.

Различают низко- (температура нагрева от 150 °С до 250 °С), средне- (от 300 °С до 450 °С) и высокотемпературный (от 500 °С до 650 °С) отпуск.

После низкотемпературного отпуска закаленная на мартенсит сталь получает структуру мартенсит отпуска. Последний отличается от мартенсита закалки существенно меньшей степенью тетрагональности кристаллической решетки.

При средне- и высокотемпературном отпуске происходит дальнейший распад мартенсита с обособлением и коагуляцией частиц цементита и образованием ферритно-цементитных смесей. По мере повышения температуры отпуска дисперсность ферритно-цементитных смесей уменьшается, образуются структуры троостит отпуска и сорбит отпуска. С увеличением температуры отпуска соответственно уменьшается дисперсность структуры, понижаются характеристики твердости и прочности стали, а характеристики пластичности и вязкости, наоборот, увеличиваются (см. таблицу 3.1).

Таблица 3.1 – Зависимость механических свойств стали от температуры отпуска

Вид термической обработки стали 40	Механические свойства			
	предел прочности, Н/мм ²	относительное удлинение, %	ударная вязкость МДж/м ²	твердость, НВ
Отжиг	560	16	0,8	160
Закалка				550
Закалка + отпуск 250 °С	1400	3	0,1	435
то же 400 °С	1200	6	0,2	370
то же 550 °С	800	12	0,6	245
то же 660 °С	660	14	0,10	195

Двойная обработка типа закалка + высокотемпературный отпуск называется улучшением. Эта операция широко применяется в машиностроении в целях повышения механических характеристик деталей ответственного назначения.

3.2.2.3 Маркировка углеродистых сталей

Углеродистые стали подразделяют на низкоуглеродистые до 0,25 % С, среднеуглеродистые (от 0,3 % до 0,6 % С), высокоуглеродистые (более 0,6 % С). По применению углеродистые стали подразделяются на конструкционные и инструментальные. Конструкционные стали классифицируют на стали обыкновенного качества и качественные.

Конструкционная углеродистая сталь обыкновенного качества обозначается буквами Ст, после которых стоит цифра от 0 до 6, обозначающая условный номер марки стали (с увеличением номера возрастает содержание углерода), например: Ст1, Ст2, ..., Ст6. Чем больше номер, тем выше прочность и твердость, но ниже пластичность (таблица 3.2).

Таблица 3.2 – Механические свойства углеродистых сталей обыкновенного качества

Марка стали	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	Марка стали	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
		не менее				не менее	
Ст0	≥ 310	—	20	Ст4	410-530	265	24
Ст1	320-420	—	31	Ст5	490-630	295	20
Ст2	340-440	—	29	Ст6	≥ 590	315	15
Ст3	380-490	255	26				

Наиболее пластичные и наименее твердые – Ст0, Ст1, Ст2 – идут на изготовление кровельных листов, крепежных изделий; наиболее твердая и прочная сталь этой группы – Ст6 применяется, например, в производстве рельсов, рессор. Стали обыкновенного качества выпускают в виде проката (прутки, балки, листы, уголки, швеллеры и т.п.).

Углеродистые качественные стали характеризуются более низким, чем у сталей обыкновенного качества, содержанием вредных примесей и неметаллических включений.

Качественную сталь маркируют двузначным числом, обозначающим среднее содержание углерода в сотых долях процента. Низкоуглеродистую сталь марок 08, 10, 15, 20, 25 применяют для изготовления метизов и деталей, от которых не требуется высокой прочности. Среднеуглеродистые стали 30, 35, ..., 55 отличаются большей прочностью, меньшей пластичностью, чем низкоуглеродистые. Высокоуглеродистые стали марок 60, 65, ..., 85 имеют большую твердость и прочность и применяются для изготовления ответственных деталей машин.

Качественные инструментальные стали маркируют буквой У и цифрой, указывающей на содержание углерода в десятых долях процента: У7, У8 и т.д. Высококачественные инструментальные стали маркируют так же, как и качественные, но в конце марки ставят букву А: У7А, У8А – У12А.

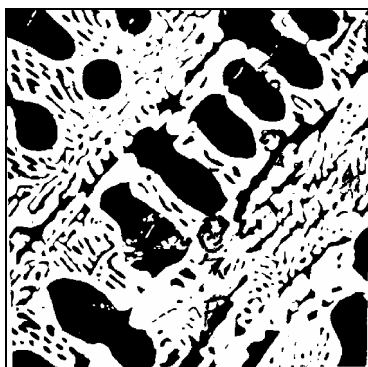
3.2.3 Чугуны

3.2.3.1 Белые чугуны

Чугуном называется сплав железа с углеродом, содержание которого от 2,14 % до 6,67 %. Также чугуны содержат серу, фосфор, кремний и марганец. Чугуны, соответствующие диаграмме Fe-Fe₃C, называют белыми. Такое название они получили ввиду излома, имеющего матово – белый цвет. Весь углерод, содержащийся в белых чугунах, находится в химически связанном состоянии в виде цементита Fe₃C.

В зависимости от содержания углерода белые чугуны подразделяют на доэвтектические (2,14 % < C < 4,3 %), эвтектические (C = 4,3 %) и заэвтектические (C > 4,3 %), (рисунки 3.12, 3.13, 3.14).

Микроструктура доэвтектического белого чугуна состоит из перлита, цементита вторичного и ледебурита (см. рисунок 3.16). Структура эвтектического белого чугуна состоит целиком из ледебурита и представляет собой эвтектическую смесь перлита и цементита (см. рисунок 3.17).



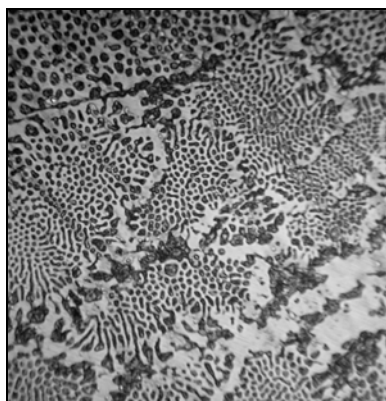
а



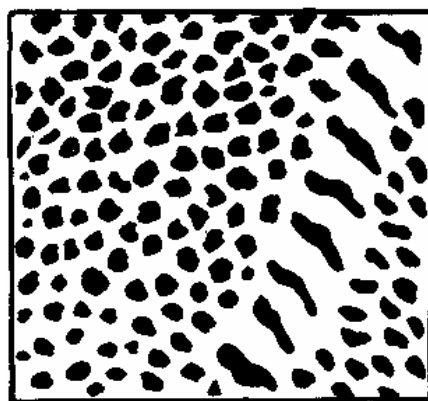
б

а – микроструктура доэвтектического чугуна: перлит (более крупные зерна), цементит вторичный (светлые участки, сливающиеся с цементитом), ледебурит (х 450); б – схема микроструктуры

Рисунок 3.16 – Структура доэвтектического белого чугуна



а

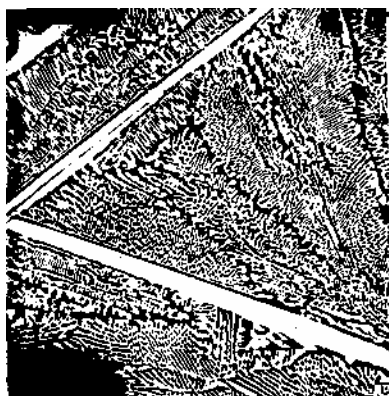


б

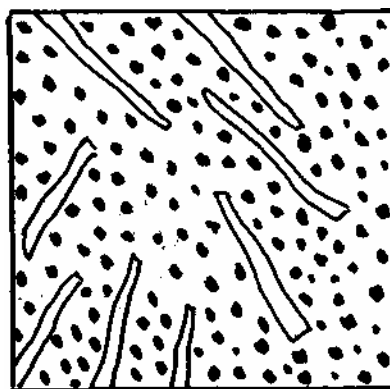
а – микроструктура эвтектического чугуна: ледебурит (участки с точечными темными включениями) (х 450); б – схема микроструктуры

Рисунок 3.17 – Структура эвтектического белого чугуна

Микроструктура заэвтектического белого чугуна состоит из цементита первичного и ледебурита (рисунок 3.18).



а



б

а – микроструктура заэвтектического чугуна: цементит первичный (крупные светлые иглы) и ледебурит (участки с точечными темными вкраплениями) (х 450); б – схема микроструктуры

Рисунок 3.18 – Микроструктура заэвтектического белого чугуна

Чем больше цементита в структуре белого чугуна, тем выше его твердость и хрупкость, тем труднее он обрабатывается резанием. Он используется главным образом для производства деталей, от которых требуется высокая твердость и износостойчивость (шары размолочных мельниц, валки прокатных станов, лемехи плугов и другие детали, работающие в условиях изнашивания).

3.2.3.2 Чугуны со структурно свободным углеродом

Помимо белых чугунов, в которых весь углерод находится в химически связанном состоянии, существуют чугуны со структурно свободным углеродом, выделяющимися в виде графита различной формы. Несмотря на то, что графит разупрочняет чугун, наличие графита обеспечивает хорошую обрабатываемость резанием, а также высокие антифрикционные свойства вследствие низкого коэффициента трения.

Серые, высокопрочные и ковкие чугуны различаются условием образования графитовых включений и их формой, что отражается на металлических свойствах

ОТЛИВОК.

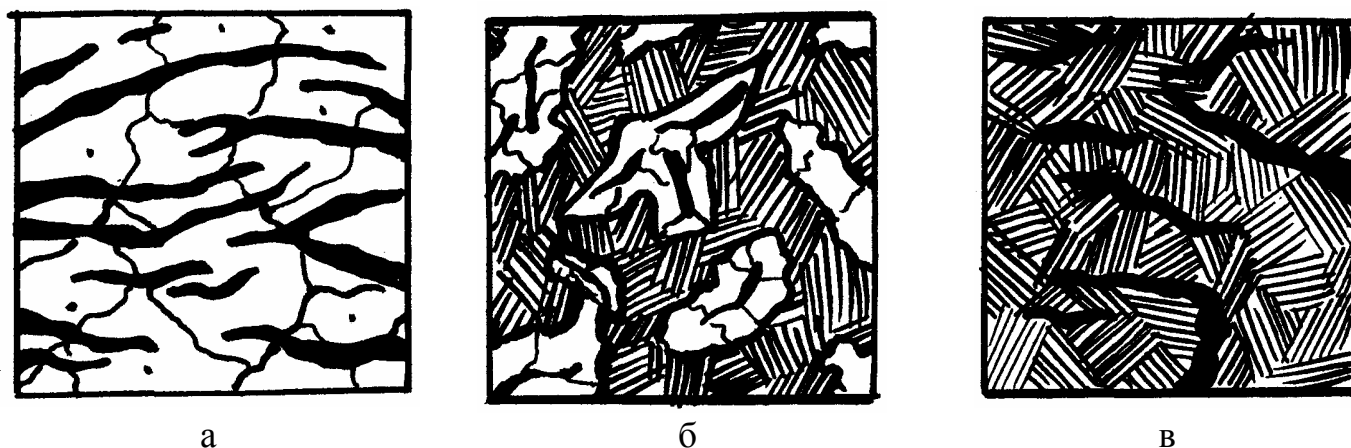
По форме графита различают серые чугуны с графитовыми частицами в виде пластинок, ковкие чугуны с графитом хлопьевидной формы и высокопрочные чугуны с шаровидным графитом.

В микроструктуре чугунов следует различать металлическую основу и включения графита в ней. Свойства чугунов определяются как структурой металлической основы, так и количеством и формой графитных включений.

Структурный состав и свойства чугунов зависят, главным образом, от условий получения отливки (температуры жидкого металла, введения модификаторов и особенно от условий охлаждения при литье).

Серый чугун получил такое название из-за серого цвета излома. Серый цвет излому придает графит, содержащийся в чугуне в свободном состоянии в виде пластинок. Серые чугуны, как и белые, получают непосредственно при литье.

В зависимости от скорости охлаждения и количества графитизатора (кремния), вводимого в расплав, можно получать три вида серых чугунов, различающихся по структуре: ферритный, перлитный, ферритно-перлитный (рисунок 3.19).



а – ферритный; б – ферритно-перлитный; в – перлитный

Рисунок 3.19 – Схемы микроструктур серых чугунов

Медленное охлаждение и повышенное содержание кремния (от 3 % до 4 %) способствует получению ферритного чугуна, а ускоренное охлаждение и содержа-

ние кремния от 1 % до 3 % обеспечивает получение ферритно-перлитного и перлитного серого чугуна. Ферритный серый чугун наиболее мягкий, легко обрабатывается резанием, но обладает наименьшей прочностью и наибольшей хрупкостью. Наилучшими механическими свойствами обладают перлитные серые чугуны.

Ферритные серые чугуны (рисунок 3.19 а) (марки СЧ10, СЧ15) используются для слабо- и средненагруженных деталей: крышки, фланцы, маховики, суппорты, тормозные барабаны, диски сцепления и т.д.

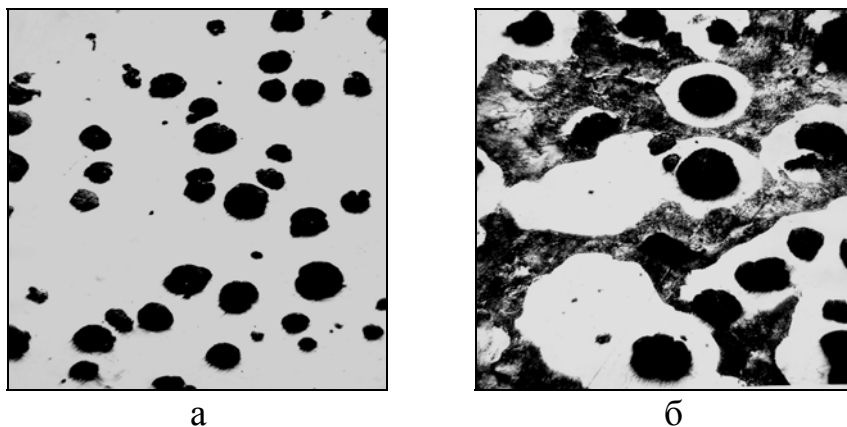
Ферритно-перлитные серые чугуны (рисунок 3.19 б) (марки СЧ20, СЧ25) применяются для деталей, работающих при повышенных статических и динамических нагрузках: картеры двигателя, поршни цилиндров, барабаны сцепления, станины станков и другие отливки разного назначения.

Перлитные серые чугуны (рисунок 3.19 в) (марки СЧ40, СЧ45) применяют для получения отливок станин мощных станков и механизмов. Широко используют перлитные серые модифицированные чугуны. Такие чугуны получают при добавлении в жидкий чугун перед разливкой специальных добавок – ферросилиция (от 0,3 % до 0,6 % от массы шихты) или силикокальция (от 0,3 % до 0,5 % от массы). Обладают более высокими механическими свойствами из-за измельчения графитных включений ($\sigma_{\text{в}}=400-450$ МПа). Эти марки чугунов применяются для корпусов насосов, компрессоров и гидроприводов.

Высокопрочные чугуны получают модифицированием расплава серого чугуна обычно магнием и ферросилицием для получения мелких включений графита шаровидной формы. Наивысшие механические свойства достигаются в чугунах с шаровидным графитом. Высокопрочные чугуны обладают хорошими литейными свойствами при достаточно высокой прочности и пластичности.

По структуре высокопрочный чугун может быть ферритным, ферритно-перлитным или перлитным (рисунок 3.20).

Механические свойства высокопрочного чугуна позволяют применять его для изготовления деталей машин, работающих в тяжелых условиях, вместо поковок или отливок из стали.

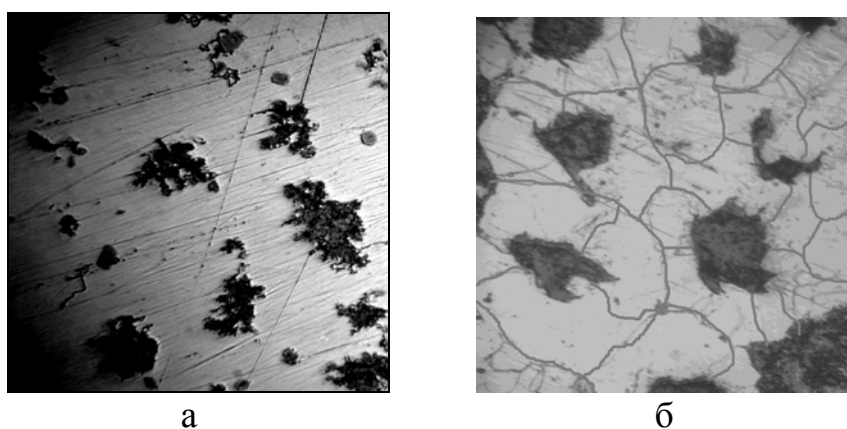


а – нетравленный шлиф; б – травленный

Рисунок 3.20 – Микроструктура высокопрочного чугуна

Из высокопрочного чугуна изготавливают оборудование прокатных станов, кузнечно-прессового оборудования, корпуса паровых турбин, детали тракторов, автомобилей (коленчатые валы, поршни) и другие детали, работающие при циклических нагрузках и в условиях сильного износа.

Ковкий чугун – условное название вязкого и мягкого чугуна, изделия из него получают только литьем, пластической деформации не подвергают. Ковкий чугун получают длительным отжигом доэвтектического белого чугуна. При этом цементит белого чугуна распадается с образованием графита хлопьевидной формы. Металлическая основа в ковких чугунах такая же, как и в литейных серых (рисунок 3.21).



а – нетравленный шлиф; б – травленный

Рисунок 3.21 – Микроструктура ферритного ковкого чугуна

Перлитные ковкие чугуны (КЧ 45-7; КЧ 50-5; КЧ 60-3) более прочные, ферритные – более пластичные. Ковкий чугун широко применяют в автомобильном, сельскохозяйственном, текстильном машиностроении, в судо-, котло-, вагоно- и дизелестроении. Ковкий чугун идет на изготовление деталей высокой прочности, которые подвержены сильному истиранию и ударным знакопеременным нагрузкам.

Серые и высокопрочные чугуны маркируют буквами СЧ и ВЧ соответственно, а также двумя цифрами, обозначающими предел прочности сплава при растяжении, уменьшенный в 10 раз (в МПа). Например, СЧ 35, ВЧ 80.

Ковкие чугуны маркируют буквами КЧ и двумя группами цифр, первая из которых указывает значение уменьшенного в 10 раз предела прочности при растяжении (в МПа), а вторая – значение относительного удлинения (в %), например, КЧ 37-12.

3.3 Порядок выполнения работы

3.3.1 Ознакомьтесь со структурными составляющими железоуглеродистых сплавов. Найдите на диаграмме состояния области существования этих структур.

3.3.2 Получите у учебного мастера микрошлифы образцов различных сталей и чугунов. С помощью металлографического микроскопа изучите структурные составляющие железоуглеродистых сплавов. Определите вид сплава: сталь (доэвтектоидная, эвтектоидная, заэвтектоидная); чугун (белый, серый, ковкий, высокопрочный).

3.3.3 Зарисуйте все просмотренные структуры с указанием фазовых и структурных составляющих. Микроструктуры зарисовать в рамке размером 50 x 50 мм. Основное при изображении микроструктуры – выявить характерные особенности микроструктуры и передать их на рисунке. Нет надобности передавать на рисунке фотографически точное изображение. Фазы и структурные составляющие указывать стрелками, на полях написать их наименование.

3.3.4 По каждой из микроструктур представить сведения о стали (марка, содержание углерода, твердость), виде термической обработки и режимах (температура нагрева, скорость охлаждения), качестве (нормальный режим, возможные отклонения по температуре нагрева и скорости охлаждения), структурных составляющих, применявшемся увеличении, травителе.

3.4 Содержание отчета

3.4.1 Цель работы.

3.4.2 Краткое описание структурных составляющих железоуглеродистых сплавов.

3.4.3 Схемы и микроструктуры сталей и чугунов, указать структурные составляющие.

3.4.4 Пояснение влияния содержания углерода на структуру и механические свойства.

3.4.5 Объяснение влияния формы графитных включений и структуры металлической основы на свойства чугунов.

3.5 Контрольные вопросы

3.5.1 Какие железоуглеродистые сплавы относятся к техническому железу, сталям и чугунам?

3.5.2 Каковы фазовые и структурные составляющие системы Fe-C? Характеристика структурных составляющих.

3.5.3 Какая из структур железоуглеродистых сплавов является механической смесью феррита и цементита?

3.5.4 Что такое ледебурит?

3.5.5 Как классифицируют по структуре стали и чугуны?

3.5.6 Какие существуют виды чугунов? В какой форме присутствует в них углерод?

3.5.7 Как влияет на свойства чугуна форма графитных включений и структура металлической матрицы?

3.5.8 Как получают ковкий и высокопрочный чугуны? Как различаются по свойствам серый, ковкий и высокопрочный чугуны?

4 Работа 4. Подшипниковые стали

4.1 Цель работы

1.1 Изучение особенностей усталостного разрушения металлов;

1.2 Изучение структуры, термической обработки и областей применения подшипниковых сталей.

4.2 Общие сведения

4.2.1 Особенности усталостного разрушения

Элементы усталостного разрушения присущи практически всем видам изнашивания, где наблюдается цикличность взаимодействия тел трибологической пары. Так, разрушение подшипников скольжения происходит не столько из-за износа вкладышей, сколько из-за усталостных повреждений, связанных с пульсирующими напряжениями сжатия. При абразивном изнашивании усталостные разрушения происходят в связи со сменой напряжений растяжения – сжатия на локальных участках при многократных взаимодействиях поверхности металла с абразивом. Повторяющиеся микросдвиги контактирующих деталей трибологической пары приводят к усталостному разрушению – фреттингу.

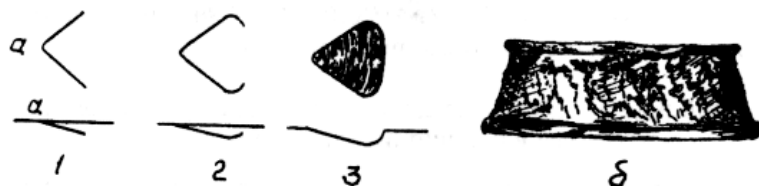
Высоким циклически повторяющимся нагрузкам подвержены узлы трения качения (зубчатые передачи, шарико- и роликоподшипники). Усталостное изнашивание этих узлов является основным видом их разрушения.

Усталостное разрушение имеет ряд особенностей:

- разрушение протекает при напряжениях значительно меньших, чем временное сопротивление (предел прочности) или предел текучести материала;
- разрушение начинается на поверхности (или вблизи от нее) детали путем образования локальных повреждений, возникающих в местах концентрации напряжений. Концентраторами могут быть, например, повреждения в виде следов от режущих инструментов при механической обработке детали, в виде участков взаимодействия с внешней средой (участки коррозии), в виде металлургических неоднородностей (ликвации) и т.д.;
- разрушение протекает путем образования усталостных микротрещин, постепенно развивающихся в одну магистральную трещину, приводящую к окончательному разрушению детали или к выкрашиванию отдельных ее участков.

Поверхностное выкрашивание характерно для материалов, работающих в узлах трения качения. Высокие, циклически повторяющиеся сосредоточенные контактные нагрузки обуславливают возникновение в приповерхностном слое трещин усталости, которые при своем развитии вызывают отделение частиц металла и образование ямок выкрашивания. Схема образования такой ямки и внешний вид изношенного кольца роликового подшипника представлены на рисунке 4.1.

Циклические контактные напряжения сжатия создают в поверхностном слое деталей состояние, облегчающее пластическое деформирование слоя и приводящее к развитию явлений усталости. Поэтому высокая контактная выносливость (сопротивление материала поверхностному выкрашиванию) может быть достигнута только при высокой твердости материала.



а – место зарождения усталостной трещины (1,2 – стадии развития трещины; 3 – ямка выкрашивания); б – внешний вид изношенного кольца роликового подшипника

Рисунок 4.1 – Схема образования поверхностного выкрашивания на рабочей дорожке подшипника качения и внешний вид изношенного кольца роликового подшипника

4.2.2 Подшипниковые стали

Эти материалы предназначены для изделий массового производства, подшипников качения и зубчатых колёс. Усталостное выкрашивание на их рабочих поверхностях вызывают циклические контактные напряжения сжатия. Они создают в поверхностном слое мягкое напряженное состояние, которое облегчает пластическое деформирование поверхностного слоя деталей и, как следствие, развитие в нем процессов усталости. В связи с этим высокая контактная выносливость может быть обеспечена лишь при высокой твердости поверхности, необходимой также для затруднения истирания контактных поверхностей при их проскальзывании.

Рабочие поверхности колец, шариков и роликов подшипников качения испытывают в процессе работы циклические нагрузки, постепенно приводящие к накоплению микропластических деформаций и к контактной усталости – к образованию трещин и шелушению. Качение сопровождается проскальзыванием катящихся шариков или роликов по кольцам, что вызывает интенсивное истирание. Высокие контактные нагрузки статического, динамического и вибрационного характера, которые испытывают подшипники качения, могут приводить к бринеллированию, т.е. к смя-

тию рабочих поверхностей колец и тел качения и, следовательно, к разрушению деталей. В ряде случаев материал для подшипников качения должен обладать и высокими антикоррозионными свойствами.

К закаленной стали для подшипников качения предъявляются следующие основные требования:

- высокое сопротивление контактной усталости;
- высокое сопротивление истиранию;
- высокая упругость и твердость;
- высокая прочность и вязкость;
- в ряде специальных случаев – стойкость против коррозии;
- стабильность размеров.

К подшипниковым сталям относят высококачественные и особо высококачественные стали, способные противостоять сложным сосредоточенным и переменным напряжениям, возникающим в зоне контакта шариков или роликов с дорожками качения подшипниковых колец. Наряду с основным назначением такие стали используют, когда требуется высокая износостойкость при сосредоточенных переменных нагрузках (например, для деталей насосов высокого давления, копиров, роликов, пальцев, храповых механизмов и др.).

Для изготовления подшипников качения в большинстве случаев применяют высокоуглеродистые заэвтектоидные стали, обладающие после сквозной закалки и низкого отпуска высокой твердостью (60-64 HRC). Такие стали высоко работоспособны в условиях знакопеременных локальных контактных нагрузок, но при отсутствии значительного динамического нагружения.

Широкое распространение получили подшипниковые стали марок ШХ15, ШХ15-Ш, ШХ15СГ, ШХ15СГ-Ш, ШХ20СГ, ШХ20СГ-Ш, ШХ4, ШХ4-Ш (ГОСТ 801-78), ШХ10 (ГОСТ 808-70) и некоторые другие. Химический состав сталей приведен в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Массовая доля легирующих элементов и примесей в подшипниковых сталях, %

Марка стали	C	Mn	Si	Cr	S, не более	P, не более
ШХ15	0,95-1,05	0,2-0,4	0,17-0,37	1,3-1,65	0,02	0,027
ШХ15СГ	0,95-1,05	0,9-1,2	0,40-0,65	1,3-1,65	0,02	0,027
ШХ20СГ	0,90-1,00	1,4-1,7	0,55-0,85	1,4-1,7	0,02	0,027
ШХ4	0,95-1,05	0,15-0,3	0,15-0,3	0,35-0,5	0,02	0,027
ШХ10	0,32-0,45	0,4-0,7	0,17-0,37	0,8-1,2	0,03	0,03
В сталях, полученных методом электрошлакового переплава (ШХ15-Ш, ШХ15СГ-Ш, ШХ20СГ-Ш, ШХ4-Ш) массовая доля серы не должна превышать 0,01 %, а фосфора 0,025 %.						

Хром и другие легирующие элементы повышают прокаливаемость стали.

Подшипниковые стали строго регламентируются по неметаллическим включениям и карбидной неоднородности, поскольку такие металлургические дефекты, выходя на поверхность качения, служат концентраторами напряжений, снижающими усталостную прочность и приводящими к местному выкрашиванию деталей подшипника.

В связи с этим высокоскоростные подшипники изготавливают из сталей электрошлакового переплава, обладающих повышенной однородностью структуры. Детали подшипников тщательно полируют. При этом достигается уменьшение количества и эффективности действия концентраторов напряжений, а так же снижение коэффициента трения в подшипниковом узле.

Стали поставляют после сфероидизирующего отжига со структурой мелкозернистого перлита (179-217 НВ) и повышенными требованиями к качеству металла. В них строго регламентированы карбидная неоднородность и загрязненность неметаллическими включениями, так как, выходя на рабочую поверхность, они служат концентраторами напряжений и способствуют более быстрому развитию усталостного выкрашивания.

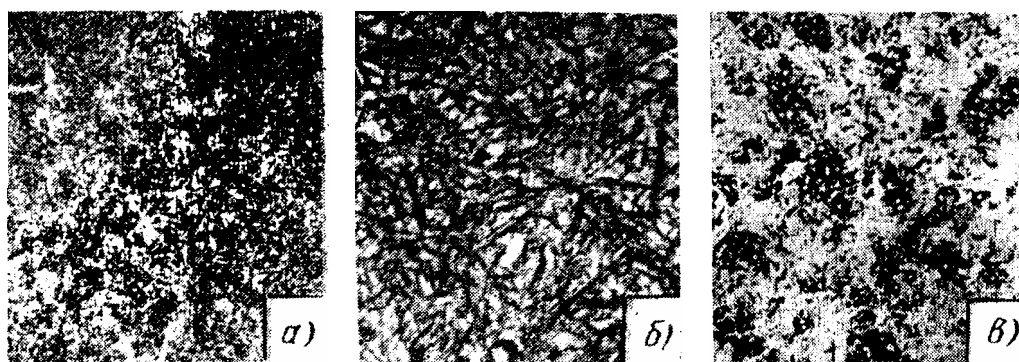
Для изготовления высокоскоростных подшипников применяют стали после электрошлакового переплава (к марке таких сталей добавляют букву Ш, например,

ШХ15-Ш), отличающиеся наибольшей однородностью строения. Такие стали необходимы также для изготовления высокоточных приборных подшипников, детали которых тщательно полируют с тем, чтобы обеспечить минимальный коэффициент трения. Это возможно лишь при высокой чистоте металла по неметаллическим включениям.

Детали подшипников приобретают высокие механические свойства (прочность, контактная выносливость, твердость) после термической обработки, состоящей в неполной закалке от температуры 820 – 850 °С в масле и низком отпуске (150 – 170 °С). Для подшипников, к которым предъявляют повышенные требования по стабильности размеров (прецизионные подшипники), применяют обработку холодом при минус 70 °С, минус 80 °С, уменьшающую количество остаточного аустенита.

Неравномерное распределение карбидов в закаленной стали резко ухудшает прочность при многократных ударах.

Закаленная и отпущенная подшипниковая сталь имеет структуру мелкоиглочатого мартенсита с равномерно распределенными включениями мелких карбидов (рисунок 4.2) и высокую твердость (60 – 64 HRC).



- а* – после нормальной закалки – скрытокристаллический мартенсит и карбиды;
б – после закалки с перегревом – крупноиглочатый мартенсит и карбиды;
в – после закалки с недогревом (мартенсит, троостит и карбиды); X 500

Рисунок 4.2 – Микроструктура подшипниковой стали ШХ15

Температура закалки подшипниковых сталей колеблется в пределах 790 – 870 °С в зависимости от массы деталей: чем крупнее деталь, тем выше температура закалки. Охлаждение проводится в масле (кольца, ролики) или в растворе соды либо поваренной соли в воде (шарики). После закалки и отпуска твердость 62–65 HRC. Оптимальной структурой закаленной подшипниковой стали является скрытокристаллический мартенсит с равномерно распределенными мелкими избыточными карбидами (рисунок 4.2 *а*). Структура игольчатого и крупноигольчатого мартенсита с карбидами (рисунок 4.2 *б*) является признаком перегрева. Детали подшипников, закаленные с недогревом, имеют пониженную прочность. Структура мартенсита с участками троостита и карбидами (на рисунке 4.2 *в*) характеризует недогрев или замедленное охлаждение при закалке. Такая структура обладает пониженной твердостью и поэтому является недопустимой. Важной характеристикой качества закалки является вид излома. Наилучший излом – шелковистый, фарфоровидный. Излом с заметной зернистостью является признаком перегрева стали. Занозистый излом характеризует неполную закалку стали.

На процесс закалки подшипников деталей влияет хром. Хром увеличивает количество избыточных карбидов в структуре стали и уменьшает чувствительность к перегреву. Вследствие присадки хрома уменьшается критическая скорость закалки и увеличивается прокаливаемость. Небольшая критическая скорость закалки необходима для того, чтобы закаливать детали в масле. При закалке в масле происходит частичный отпуск мартенсита, что снижает напряжения.

С увеличением содержания хрома критическая скорость закалки значительно понижается. Для стали ШХ15 (1 % С и 1,5 % Cr) по сравнению со сталью У10 (1 % С) критическая скорость закалки уменьшается с 500 до 35-40 °С/с. В связи с уменьшением критической скорости закалки детали из стали ШХ15 прокаливают на значительно большую глубину по сравнению с деталями из стали У10.

Сталь ШХ4, в связи с меньшим содержанием легирующих элементов, обладает пониженной прокаливаемостью. Ее подвергают поверхностной закалке на глубину 3 – 4 мм.

Обладая вязкой сердцевиной, детали подшипников из стали ШХ4 хорошо воспринимают динамические нагрузки.

Детали крупных роликоподшипников диаметром 0,5 – 2,0 м (подшипники прокатных станов, генераторов и др.) изготавливают из цементуемых сталей 12ХНЗА, 12Х2Н4А, подвергая их цементации на глубину до 6 мм. Продолжительность цементации 120 – 160 часов. Детали подшипников качения из цементуемой стали должны иметь твердый износоустойчивый поверхностный слой и вязкую достаточно твердую сердцевину. Твердость сердцевины после закалки должна быть не ниже 35 – 45 HRC во избежание продавливания цементованного слоя.

Для обеспечения высокой поверхностной твердости, прочности и ударной вязкости эти стали после цементации подвергают сложной термической обработке, обеспечивающей в поверхностном слое структуру отпускаемого мартенсита с включениями глобулярных карбидов, а в сердцевине – низкоуглеродистый мартенсит.

Цементуемые стали применяются для изготовления деталей подшипников, испытывающих в процессе работы высокие динамические нагрузки (подшипники для железнодорожного транспорта, крупногабаритные подшипники для прокатных станов, шары для буровых долот и т.п.).

Шариковые и роликовые подшипники, работающие в воде и агрессивных средах (морская вода, растворы кислот, щелочей), изготавливают из высокохромистой коррозионно-стойкой стали 95Х18. Упрочняющая термическая обработка стали состоит из закалки (подогрев до 800 – 850 °С, затем нагрев до 1000 – 1050 °С; охлаждение в масле) и низкого отпуска при 140 – 150 °С. Твердость закаленной и отпущенной стали не ниже 56 HRC.

Решающим фактором, обуславливающим долговечность подшипников, является высокое качество поверхностей качения: высокая, однородная твердость, прочность и достаточная вязкость, отсутствие местных концентраторов напряжений в виде закалочных и шлифовальных трещин, крупных неметаллических включений, гребешков и рисок от шлифования. При достаточной чистоте стали по неметаллическим включениям и правильной термической обработке долговечность в основном определяется микрогеометрией поверхностей качения, так как сминающиеся гре-

бешки служат очагами усталостного шелушения. В связи с этим поверхности качения колец необходимо подвергать операциям доводки на чугуновых дисках, обеспечивающих точность геометрической формы и предельно высокую гладкость поверхностей.

4.3 Порядок выполнения работы

4.3.1 Ознакомьтесь со всеми разделами методического указания. Ответьте на контрольные вопросы.

4.3.2 Подготовьте микрошлифы образцов из подшипниковой стали.

4.3.3 Рассмотрите и зарисуйте микроструктуру образцов исходной и термообработанной стали. Обратите внимание на степень однородности материала. Сравните со структурой зернистого перлита стали У8А.

4.3.4 Рассмотрите и зарисуйте детали подшипников с усталостными разрушениями.

4.4 Контрольные вопросы

4.4.1 Каковы особенности усталостного разрушения металлов?

4.4.2 В какой степени усталостное разрушение присуще таким видам изнашивания, как окислительное, абразивное, фреттинг-процесс?

4.4.3 Какому виду изнашивания подвержены подшипники качения? Каков механизм изнашивания?

4.4.4 Чем объясняются высокие требования, предъявляемые к однородности структуры подшипниковых сталей и низкой шероховатости обработки деталей подшипников?

4.4.5 Какое механическое свойство стали эффективно препятствует зарождению усталостных трещин?

4.4.6 С какой целью в состав подшипниковых сталей введены легирующие элементы (хром, кремний, марганец)? К какой группе по равновесному составу относится большинство подшипниковых сталей?

4.4.7 Каковы отличительные особенности подшипниковой стали ШХ4? Какой термической обработке подвергают детали подшипников из этой стали?

4.4.8 Какова структура термически обработанной (закалка + отпуск) стали ШХ15? Для деталей какого типа используется эта сталь?

4.4.9 Из каких сталей изготавливают детали крупногабаритных (диаметром 0,5-2,0 м) подшипников качения? Какому виду термической обработки их подвергают?

4.4.10 Какую сталь применяют для изготовления подшипников, работающих в агрессивных средах? Какой термической обработке подвергают детали подшипников?

4.5 Содержание отчета

В отчете должны быть приведены:

- а) цель работы;
- б) краткие сведения об усталостном изнашивании; видах и областях применения подшипниковых сталей;
- в) рисунки усталостного разрушения деталей подшипников; рисунки и описание микроструктуры рассмотренных образцов подшипниковых сталей.

5 Работа 5. Антифрикционные чугуны

5.1 Цель работы

5.1. Ознакомиться с составом, структурой и областями применения антифрикционных чугунов.

5.2. Ознакомиться с результатами стендовых испытаний антифрикционных чугунов.

5.2 Общие сведения

Антифрикционные чугуны по структуре относятся к подшипниковым металлическим сплавам с твердой матрицей и мягкими включениями, роль которых выполняют графитные частицы. Включения графита обеспечивают эффективное самосмазывание при трении и хорошее удерживание смазочных масел в самых тяжелых условиях работы.

Перлитная, перлитно-ферритная и аустенитная структуры металлической основы чугунов сообщает им высокую несущую способность при трении и хорошую износостойкость. Дополнительное повышение износостойкости обеспечивается наличием в структуре фосфидной эвтектики и в некоторых чугунах (АЧС-5, АЧВ-1, АЧЕ-2) небольших количеств цементита, обладающих высокой микротвердостью.

Детали, работающие в узлах трения, как подшипники скольжения в паре с закаленным или нормализованным валом, в условиях трения с повышенными окружными скоростями, в особо нагруженных узлах трения, изготавливают из низколегированных антифрикционных чугунов, марки которых регламентирует ГОСТ 1585-85:

– шесть марок антифрикционного серого чугуна с пластинчатым графитом - АЧС-1, АЧС-2, АЧС-3, АЧС-4, АЧС-5 и АЧС-6, имеющие твердость от 100 до 290 НВ;

- две марки антифрикционного высокопрочного чугуна с шаровидным графитом - АЧВ-1 и АЧВ-2, имеющие твердость соответственно 210-260 НВ и 167-197НВ;
- две марки антифрикционного ковкого чугуна с хлопьевидным графитом – АЧК-1 и АЧК-2, имеющие твердость соответственно 187-229 НВ и 167-197НВ.

Критерием выбора марки антифрикционного чугуна являются режимы эксплуатации узлов трения, давление, скорость скольжения и совокупность этих факторов, а также состояние металлической основы сопряженного вала.

Преимущественно перлитная металлическая основа и графит обеспечивают хорошее удержание смазочного материала на рабочей поверхности, высокие прочность и теплоотвод от зоны трения, а наличие небольшого количества цементита и фосфидов придает деталям износостойкость при высоком давлении и скорости. Технология производства отливок из антифрикционных чугунов практически не отличается от общепринятой.

Антифрикционные чугуны применяют для работы в паре с деталями, имеющими высокую поверхностную твердость, например, с термически обработанными сталями.

Для предупреждения искрения и значительного нагрева трибологической пары необходимо непрерывное качественное смазывание трущихся поверхностей.

Из антифрикционных чугунов изготавливают разнообразные узлы трения (втулки, вкладыши, подшипники скольжения, уплотнения, ролики); изнашивающиеся детали горнорудного и угольного оборудования, строительных и дорожных машин, тракторов и экскаваторов, сельскохозяйственных машин; некоторые трущиеся детали турбин, компрессоров, двигателей и насосов.

Основными преимуществами антифрикционных чугунов в сравнении с цветными антифрикционными сплавами являются высокая износостойкость, хорошая работоспособность при высоких давлениях и смазке, меньшая зависимость коэффициента трения от повышения температуры в зоне трения, низкая стоимость.

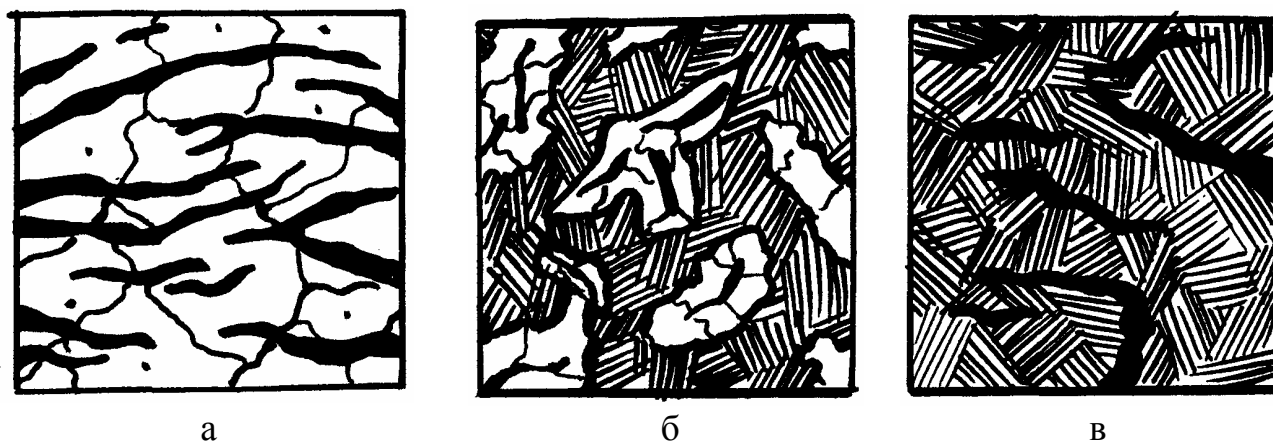
Международным стандартом ГОСТ 1585-85 предусмотрены 10 марок антифрикционных чугунов, работающих в узлах трения со смазкой. Химический состав чугунов представлен в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Химический состав антифрикционных чугунов

Марка чугуна	Содержание элементов, %					
	C	Si	Mn	P	S	Прочие элементы
АЧС-1	3,2-3,6	1,3-2,0	0,6-1,2	0,15-0,40	≤0,12	0,2 – 0,5 Cr; 0,8–1,6 Cu
АЧС-2	3,0-3,8	1,4-2,2	0,3-1,0	0,15-0,40	≤0,12	0,2–0,5 Cr; 0,2–0,5 Ni; 0,2–0,5 Cu; 0,03–0,10 Ti
АЧС-3	3,2-3,8	1,7-2,6	0,3-0,7	0,15-0,40	≤0,12	≤0,3Cr; 0,2–0,5 Cu; ≤0,3 Ni; 0,03-0,10 Ti
АЧС-4	3,0-3,5	1,4-2,2	0,4-0,8	≤0,30	0,12-0,20	0,04–0,40 Sb
АЧС-5	3,5-4,3	2,5-3,5	7,5-12,5	≤0,2	≤0,05	0,4–0,8 Al
АЧС-6	2,2-2,8	3,0-4,0	0,2-0,6	0,5-1,0	≤0,12	0,5-1,0 Pb
АЧВ-1	2,8-3,5	1,8-2,7	0,6-1,2	≤0,20	≤0,03	≤0,7 Cu; 0,03-0,08 Mg
АЧВ-2	2,8-3,5	2,2-2,7	0,4-0,8	≤0,20	≤0,03	0,03-0,08 Mg
АЧК-1	2,3-3,0	0,5-1,0	0,6-1,2	≤0,20	≤0,12	1,0-1,5 Cu
АЧК-2	2,6-3,0	0,8-1,3	0,2-0,6	≤0,25	≤0,12	

5.2.1 Антифрикционные низколегированные чугуны

Для существенного повышения износостойкости деталей насосов, пневмо- и гидроаппаратуры, прокатных станов, металлорежущих станков, коленчатых валов и блоков двигателей, кузнечно-прессового и литейного оборудования, подвергающихся в процессе работы трению с давлением до 10 МПа и со смазочным материалом, загрязненным стружкой, абразивом или другими включениями, используют антифрикционные низколегированные серые чугуны и антифрикционные высокопрочные чугуны с шаровидным или вермикулярным графитом. Использование низколегированных чугунов с перлитно-бейнитной, бейнитной или бейнитно-ферритной матрицей является весьма перспективным направлением в заготовительном производстве машиностроения и позволяет значительно повысить долговечность работы сопряженных деталей машин, станков и механизмов. Структура серых антифрикционных чугунов приведена на рисунке 5.1.



а – ферритный; б – ферритно-перлитный; в – перлитный

Рисунок 5.1 – Схемы микроструктур антифрикционных серых чугунов

Работоспособность антифрикционных чугунов в значительной степени зависит от их структуры. Структура, состоящая из тонкого сорбитообразного перлита и равномерно распределённых в отливке графитных включений, обеспечивает получение тонкодисперсных продуктов износа без выкрашивания крупных частиц, способствующих возникновению задиров. Увеличение содержания в чугуне свободного графита улучшает его антифрикционные свойства. Включения структурно-свободного цементита в большинстве видов чугунов не допускаются, так как они увеличивают хрупкость сплава и сильно изнашивают контртело трибологической пары.

Чугуны марок АЧС-1 – АЧС-6 (антифрикционные чугуны серые) с графитом пластинчатой формы.

АЧС-1 – АЧС-4 имеют преимущественно перлитную металлическую основу, образующуюся при легировании сплавов добавками меди, хрома, никеля, титана или сурьмы. Наличие от 0,15 % до 0,40 % фосфора обеспечивает формирование в их структуре высокотвердой фосфидной эвтектики. Включения структурно-свободного цементита в этих чугунах недопустимы.

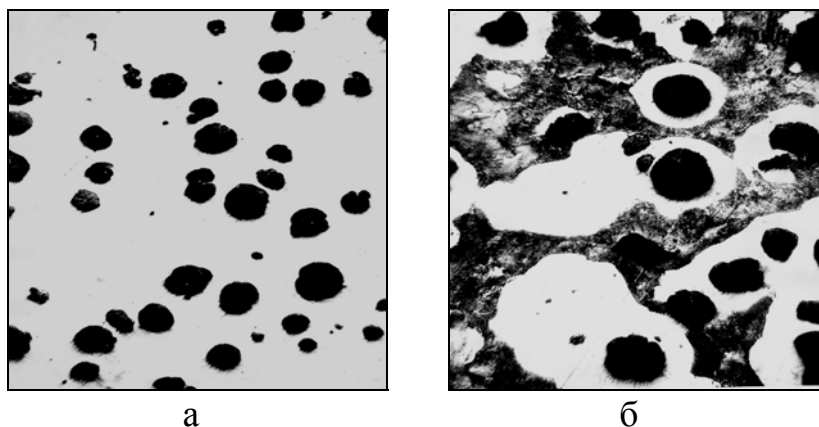
Чугун АЧС-5 в связи с высокой концентрацией марганца (от 7,5 % до 12,5 %) обладает аустенитной металлической основой с включениями пластинчатого графита и марганцевых карбидов. Содержание последних не должно превышать

25 % в литом состоянии и 8 % после закалки. Твердость чугуна $HV = 1400 - 2900$ МПа зависит от наличия мартенсита и количества карбидных частиц. Оптимальное содержание марганца в чугуне определяется параметрами отливки и составляет от 7,5-8,5 % для отливок толщиной 5-10 мм до 11,5-12,5 % для отливок толщиной 40-60 мм.

Чугун АЧС-6 обладает перлитной металлической основой с включениями фосфидной эвтектики. Система легирования (0,5-1,0 % Рb и повышенное содержание Р) обеспечивает равномерную микропористость, позволяющую чугуну этой марки хорошо удерживать смазочный материал и сообщает ему хорошие антифрикционные свойства несмотря на низкую твердость (1000-1200 НВ).

Структура высокопрочных чугунов приведена на рисунке 5.2.

Чугуны АЧВ-1 и АЧВ-2 (антифрикционные чугуны высокопрочные) с графитом шаровидной формы имеют перлитную (АЧВ-1) или ферритно-перлитную (АЧВ-2) металлическую основу. В структуре чугунов содержится также фосфидная эвтектика и допускается некоторое количество (не более 5 %) структурно свободного цементита. Их твердость по Бринеллю составляет 2100-2500 и 1670-1970 МПа соответственно.



а – нетравленный шлиф; б – травленный

Рисунок 5.2 – Микроструктура антифрикционного высокопрочного чугуна

В таблице 5.2 приведены результаты стендовых испытаний на изнашивание низколегированных чугунов при различных нагрузках. Для сравнения испытаны детали из высокопрочных и обычных серых чугунов.

Таблица 5.2 – Результаты стендовых испытаний антифрикционных сплавов [11]

Материал	Удельный износ, мкм/мин		
	Малые нагрузки	Большие нагрузки, после приработки	Большие нагрузки, без приработки
АЧС-1	140 – 160	240 – 290	730 – 770
СЧ30	170 – 210	530 – 580	820 – 910
АЧВ-1	90 – 130	320 – 370	350 – 970
АЧХН0,5М0,3	80 – 100	180 – 230	590 – 700
АЧМН0,5Х0,3	50 – 80	120 – 190	470 – 530
АЧМН0,5Х0,8Ц0,2	35 – 60	90 – 110	280 – 360
АЧМН0,5С0,3Ц0,2	25 – 55	75 – 120	220 – 290
ВЧ40	180 – 220	410 – 540	Задирь
АЧС-4	110 – 135	170 – 210	580 – 650
ВЧ100	20 – 50	25 – 100	210 – 280
ВЧ70	112 – 130	195 – 212	307 – 335

Методы выплавки антифрикционного серого чугуна с низкой температурой перегрева, получившие широкое распространение в чугунолитейных цехах при работе на коксовых, коксогазовых, а в отдельных случаях и на газовых вагранках, с последующим модифицированием силикохромом часто не позволяют получать отливки со стабильными свойствами, заданной структурой и ликвидировать влияние наследственности шихтовых материалов. Поэтому для производства отливок из АЧС и АЧВ часто переходят на плавку и доводку химического состава и температуры в электрических печах. Они обеспечивают заданный химический состав, высокий перегрев, возможность внепечной обработки и заданную структуру в отливках.

Для повышения эксплуатационных характеристик деталей прессов, насосов, гидроаппаратуры, станков и механизмов, работающих на трение (кареток, направ-

ляющих планок, клиньев, шкивов и т.п.), в ряде случаев широко используются различные методы комплексного модифицирования, а также процессы микро- и низкого легирования чугуна. Для практического осуществления этих операций в большинстве случаев не требуется специального оборудования. Положительные результаты от микролегирования и комплексного модифицирования достигаются при условии, что температура выплавляемого чугуна составляет не ниже 1400 °С.

5.2.2 Антифрикционные ковкие чугуны

В качестве антифрикционного материала в машиностроении используют и ковкие чугуны, являющиеся более пластичными сплавами, чем серые. Область применения и условия работы деталей из ковкого чугуна приведены в таблице 5.3.

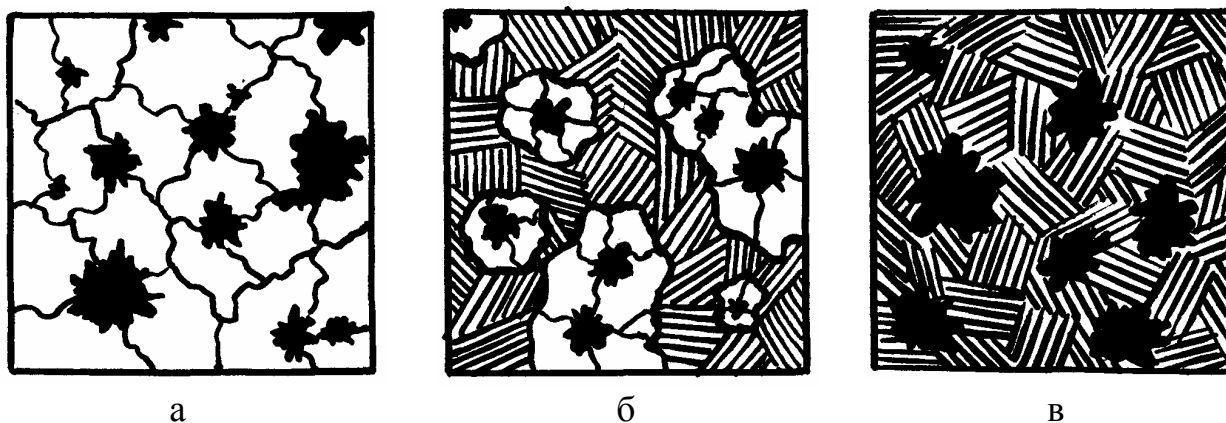
Таблица 5.3 – Применение и условия работы деталей из ковкого чугуна

Отрасль машиностроения	Номенклатура деталей	Термообработка отливок	Условия работы деталей	Структура металлической основы
1	2	3	4	5
Авто- и тракторостроение	Коленчатые валы, ступицы, картеры дифференциалов, втулки и др.	Отжиг и нормализация	Износ и переменные динамические нагрузки	Ферритно-перлитная и перлитная
Сельскохозяйственное машиностроение	Звенья цепей, головки ножей, звездочки, ступицы, муфты, храповики и др.	Графитизирующий отжиг и нормализация, термоулучшение	Статические и динамические нагрузки, износ	Ферритно-перлитная и с зернистым перлитом
Станкостроение и текстильное оборудование	Шестерни, втулки, подшипники, звенья, рычаги, вилки и др.	Отжиг и закалка с отпуском	Повышенный износ	Перлитно-ферритная и перлитная

Продолжение таблицы 5.3

1	2	3	4	5
Вагоно- и судо- строение, точ- ное машино- строение	Детали воздушных тормозов, под- шипники, ил- люмина- торные кольца, втулки и др.	Отжиг и термо- улучшение	Ударные нагрузки и износ	Ферритно- перлитная и перлитная

На рисунке 5.3 приведены схемы микроструктур ковких чугунов.



а – ферритный; б – ферритно-перлитный; в – перлитный

Рисунок 5.3 – Схемы микроструктур ковких чугунов

Ковкий чугун обладает следующими свойствами:

- сохраняет вязкость при статических и динамических нагрузках и отрицательных температурах;
- может использоваться для изготовления сварных конструкций;
- имеет более высокие, чем серый чугун, показатели относительного удлинения, временного сопротивления и ударной вязкости;
- имеет более высокое, чем сталь, отношение предела текучести к временному сопротивлению;
- обладает низкой чувствительностью к надрезам.

Формирование конечной металлографической структуры ковкого чугуна про-

исходит в процессе графитизирующего отжига, состоящего из первой, промежуточной и второй стадий. Во время первой стадии графитизации (при температуре не менее 900 °С) зарождаются и растут центры графита, в результате чего растворяются и исчезают эвтектические карбиды; промежуточную стадию графитизации (медленное охлаждение примерно до 700 °С) проводят с целью выделения углерода из аустенита в виде графита; вторая стадия графитизации (выдержка при температуре 720 °С) вызывает распад аустенита на феррит и графит или феррит и цементит.

Износостойкость, задиростойкость, пластичность и другие механические свойства ковкого чугуна определяются структурой металлической основы, количеством и степенью компактности включений углерода отжига.

По структуре металлической основы ковкие чугуны делят на ферритные, ферритно-перлитные и перлитные.

Ферритные ковкие чугуны КЧ35-10, КЧ37-12 и КЧ33-8 при трении скольжения с давлениями от 6 до 12 МПа по термически обработанному контртелу имеют больший износ, чем бронзы. Более высокую износостойкость имеют КЧ45-7 и КЧ60-5 с ферритно-перлитной основой.

При работе в паре с сырым валом ферритные и ферритно-перлитные ковкие чугуны допускают более высокие удельные давления при трении. Основными характеристиками для ферритно-перлитных ковких чугунов являются твердость, количество перлита в структуре и фактор формы углерода отжига. Цементит в структуре антифрикционных ковких чугунов всех марок не допускается.

Перлитные ковкие чугуны почти всегда имеют в структуре некоторое количество феррита, содержание которого существенно влияет на их свойства. Эти чугуны имеют высокую прочность, повышенную твердость, но низкую пластичность.

Низкий износ при трении с недостаточной смазкой при давлениях от 1 до 10 МПа в паре с «сырым» валом твердостью 227 – 255 НВ обеспечивает антифрикционный ковкий чугун марки АЧК-2, твердость которого составляет 167 – 197 НВ, временное сопротивление от 350 до 450 МПа, а относительное удлинение от 6 % до 10 %. В отливках с толщиной стенок от 8 до 40 мм в этом чугуне

содержится от 35 % до 80 % перлита, а в тонкостенных отливках из КЧ45-7 содержание перлита достигает от 75 % до 92 %.

Ковкий чугун марки АЧК-1, содержащий от 2,6 % до 3,0 % углерода и от 0,8 % до 1,3 % кремния, обеспечивает в отливках с толщиной стенок до 30 мм перлитно-ферритную или перлитную основу с выделениями углерода отжига и твердость 197 – 217 НВ. При работе со стальным термически обработанным валом чугун обладает хорошими противозадирными свойствами и высокой износостойкостью в условиях трения скольжения при давлениях от 10 до 12 МПа; средний износ бронзы БрОЗ,5Ц7С5Н при работе в таких условиях с удельными давлениями от 2 до 12 МПа – значительно выше.

Удельные нагрузки, вызывающие задиры на образцах, при трении с недостаточной смазкой в паре со стальным валом твердостью 214 НВ составляют для чугунов марки АЧС-3 – 10 МПа; КЧ35-10 – 23,1 МПа; АЧК-2 – 26 МПа; АЧК-1 – 29,3 МПа и бронзы БрОЗ,5Ц7С5Н – 39,9 МПа. Эти данные свидетельствуют о том, что сопротивление износу у ковких чугунов более высокое, чем у серого чугуна.

Чугуны АЧК-1 и АЧК-2 (антифрикционные чугуны ковкие) имеют компактный графит (хлопьевидный или вермикулярный – так называют графит, имеющий червеобразную форму). Легированность чугуна АЧК-1 медью (от 1,0 % до 1,5 %) обуславливает перлитную структуру его металлической основы, чугун АЧК-2 обладает ферритно-перлитной основой. В структуре обоих чугунов имеется фосфидная эвтектика. Свободный цементит недопустим.

Основные факторы, учитываемые при выборе марок антифрикционных чугунов, определяются условиями работы трибологической пары (скорость скольжения, величина давления), а также видом, состоянием и твердостью материала сопряженной трущейся детали. В таблице 5.4 приведены назначения и предельные режимы работы деталей из антифрикционных чугунов.

Помимо антифрикционных чугунов в качестве материала узла трения широко применяют обычные серые, ковкие и высокопрочные чугуны.

Таблица 5.4 – Назначение и режимы работы деталей из антифрикционных чугунов [11]

Марка чугуна	Назначение	Предельные режимы работы			Коэффициент трения по стали	
		давление P , МПа	скорость скольжения V , м/с	$P \cdot V$, МПа $\cdot$ м/с	без смазочного материала	со смазочным материалом
АЧС-1	Для работы в паре с закаленным или нормализованным валом	5,0-14,0	5,0-0,3	12,0-2,5	0,12-0,23	0,008
АЧС-2	То же	10,0-0,1	0,3-3,0	2,5-0,3	0,01	0,012
АЧС-3	Для работы в паре с закаленным или нормализованным валом или валом, не подвергающимся т.о.	6,0	1,0	5,0	0,012	0,016
АЧС-4	То же, что АЧС-1	15,0	5,0	40,0	0,12	0,016
АЧС-5	Для работы в особо нагруженных узлах трения в паре с закаленным или нормализованным валом	20,0-30,0	1,0-0,4	20,0-12,5	0,14	0,014
АЧС-6	Для работы в узлах трения при t до 300 °С в паре с валом, не подвергающимся термообработке	9,0	4,0	9,0	0,18	0,008
АЧВ-1	Для работы в узлах трения с повышенными окружными скоростями в паре с закаленным или нормализованным валом	1,5-20,0	10,0-1,0	12,0-20,0	0,16	0,009
АЧВ-2	То же, что АЧВ-1, но в паре с валом, не подвергающимся т.о.	1,0-12,0	5,0-1,0	3,0-12,0	0,14	0,004
АЧК-1	То же, что АЧС-1	20,0	2,0	20,0	0,18	0,006
АЧК-2	Для работы в паре с валом, не подвергающимся термообработке	0,5-12,0	5,0-1,0	2,5-12,0	0,16	0,006

5.2.3 Графитизированные чугуны

Прочностные свойства высокопрочных чугунов (ЧШГ) как в литом состоянии, так и после термообработки зависят, главным образом, от структуры металлической основы, степени сфероидизации и количества включений графита, а также от содержания Mg и Ce. Однако в структуре чугуна часто присутствуют до 5 % включений графита неправильной формы, что практически не влияет ни на прочность, ни на долговечность литых деталей.

Наличие более 5 % включений графита неправильной формы отрицательно сказывается на механических свойствах чугуна и фрикционной износостойкости.

В последние годы в качестве износостойких материалов используют чугуны ЧШГ (таблица 5.5) и частично графитизированные чугуны, в которых имеется и графит, и структурно-свободный (первичный эвтектический) цементит. Цементит обеспечивает повышенное сопротивление разрушению при изнашивании, а графит как смазывающий материал способствует уменьшению тех сил, которые разрушают цементит и другие составляющие металлической основы. Процессы износа сложны и многообразны и включают в себя микросрезы, усталостное механическое и термическое разрушение, фазовые превращения, окисление и прочее, поэтому приведенное выше объяснение повышения износостойкости дано в наиболее общей форме.

Частично графитизированный чугун как материал тормозных колодок характеризуется высокой износостойкостью и удовлетворительными другими характеристиками, предъявляемыми к материалу этого назначения. Коэффициент трения тормозных колодок зависит от скорости торможения. Их трущаяся поверхность нагревается до высоких температур, что приводит к изменению физико-механических свойств чугуна в этих слоях, повышению коэффициента трения, фазовым превращениям в чугуне, его окислению.

Увеличение толщины стенки отливки из ферритного чугуна приводит к незначительному уменьшению прочности, относительное удлинение при этом снижается.

Таблица 5.5 – Химический состав и механические свойства ЧШГ [11]

Структура чугуна	Массовая доля элементов (остальное - Fe), %								σ _В	σ _{0,2}	δ, %	НВ, МПа
	С	Si	Mn	Ni	Mo	Cu	Ce	Mg	МПа			
Феррит (после отжига)	3,9	2,2	0,5	0,1	-	-	0,02	0,04	420	320	24	1550
Феррит + 15 % перлита	3,9	2,5	0,3	0,6	-	-	0.05	0,03	460	320	18	1650
Перлит	3,9	2,2	0,7	2,0	-	-	0,03	0,05	820	560	2	2650
Верхний бейнит	3,9	2,2	0,7	2,0	0.5	-	0,05	0,04	840	630	6	2850
Нижний бейнит	3,9	2,2	0,7	2.7	0,3	-	0,04	0,04	1150	980	2	3500
Перлит	3,9	2,2	0,8	0,5	-	0,6	0,04	0,05	750	500	1,2	2400

У перлитных ЧШГ прочность уменьшается достаточно сильно, в то время как относительное удлинение изменяется незначительно. Это можно объяснить образованием крупных неравномерно распределенных включений графита шаровидной, а также пластинчатой формы, а в результате ликвации химических элементов образованием карбидов, выделяющихся по границам зерен.

5.3 Порядок выполнения работы

5.3.1 Ознакомьтесь со всеми разделами методического указания. Ответьте на контрольные вопросы.

5.3.2 Изучите под микроскопом и опишите микроструктуру антифрикционных чугунов различных марок.

5.3.3 Выполните задание по подбору марки антифрикционного чугуна для конкретных условий работы.

5.4 Задания

5.4.1 Подберите марку антифрикционного чугуна для изготовления подшипника скольжения водяного центробежного насоса. Диаметр вала 40 мм, частота вращения 960 мин^{-1} , радиальное давление 3 МПа. Вал нормализован.

5.4.2 Подберите марку антифрикционного чугуна для изготовления поршневых колец водяного насоса. Поршень совершает 30 двойных ходов в минуту, длина хода 200 мм. Цилиндр термически не обработан.

5.4.3 Подберите марку антифрикционного чугуна для изготовления подшипников скольжения вагона. Нормализованный вал колесной пары диаметром 120 мм совершает 800 об/мин. Давление на подшипник 4 МПа.

5.4.4 Подберите марку антифрикционного чугуна для изготовления подвесных подшипников шнекового конвейера для транспортировки руды. Диаметр вала 60 мм,

частота вращения 120 мин^{-1} . Радиальное давление на подшипник 2 МПа. Вал закален.

5.4.5 Подберите марку антифрикционного чугуна для изготовления упорного подшипника шнека, имеющего частоту вращения 120 мин^{-1} , диаметр вала 100 мм. Передаваемое на подшипник осевое давление 14 МПа. Вал закален.

5.4.6 Подберите марку антифрикционного чугуна для изготовления поршневых колец двигателя внутреннего сгорания. Поршень совершает 1500 ходов в минуту, ход поршня 100 мм. Цилиндр имеет водяное охлаждение, термически не обработан.

5.4.7 Подберите марку антифрикционного чугуна для изготовления подшипника скольжения грязевого насоса. Диаметр вала 80 мм, частота вращения 1000 мин^{-1} . Радиальное давление 3 МПа. Вал нормализован.

5.5 Контрольные вопросы

5.5.1 Какова металлическая основа антифрикционных чугунов?

5.5.2 Какова роль фосфидной эвтектики в антифрикционных чугунах?

5.5.3 Какова роль графита в антифрикционных чугунах?

5.5.4 Почему в большинстве марок антифрикционных чугунов недопустимо присутствие структурно свободного цементита?

5.5.5 Какой легирующий элемент обеспечивает получение аустенитной металлической основы в чугуне АЧС-5?

5.5.6 Какую структуру металлической основы обеспечивает легирование чугуна АЧС-6 свинцом?

5.6 Содержание отчета

В отчете должны быть приведены:

- 1) цель работы;
- 2) краткие сведения о составе, свойствах, маркировке и областях применения антифрикционных чугунов;
- 3) рисунки микроструктур рассмотренных образцов антифрикционных чугунов;
- 4) текст и выполнение индивидуального задания.

6 Работа 6. Порошковые антифрикционные и фрикционные материалы

6.1 Цель работы

6.1.1 Изучить виды порошковых материалов.

6.1.2 Получить навыки выбора порошковых материалов для различных узлов и деталей.

6.2 Основные сведения об антифрикционных материалах

При использовании методов порошковой металлургии возможно получение антифрикционных материалов с равномерно распределенными включениями веществ, выполняющих функции твердого смазочного материала (графит, сульфиды, селениды, фториды и другие соединения), участвующих в создании вторичных структур на поверхности трения. В структуру антифрикционного материала можно вводить износостойкие твердые добавки, например, карбиды, обладающие невысо-

ким коэффициентом трения и способные принять на себя нагрузку, увеличивающую несущую способность подшипника. В широких пределах можно регулировать дисперсность включений и их распределение в материале подшипника.

Повышение физико-механических свойств антифрикционных порошковых материалов достигается применением химико-термической обработки (цементация, азотирование, фосфатирование и т. п.). Для повышения прочности и несущей способности подшипников проводится армирование их волокнами и уплотнение спеканием под давлением, горячим прессованием, инфильтрацией медью, бронзой и др. материалами.

Методами порошковой металлургии изготавливают в основном антифрикционные материалы на основе железа, меди и их сплавов. Физико-механические характеристики порошковых материалов уступают однотипным по составу литым сплавам (из-за наличия пор), однако по триботехническим свойствам они значительно превосходят их (таблица 6.1).

Таблица 6.1 – Сравнительные физико-механические и антифрикционные свойства литых и порошковых материалов общемашиностроительного назначения

Материал	П, %	НВ, МПа	σ _в , МПа	Макс. режимы работы в присутствии смазки			f _{тр}	Отно- ситель- ная из- носо- стой- кость
				V, м/с	PV, МПа·м/с	t, °C		
Порошковые								
Ж (пористое)	20	500	100	1-2	1,0-1,6	100	0,01	1,5-3
Бр0(8-10)Гр(2-4)	20	300-500	50	1-2	2,5-3,0	60-80	0,005	1,5-3
СП (100-300)-1	15-25	500-900	100	3-4	7-10	150	0,06-0,006	1,5-3
СП100К1	15-25	600-900	150	5	8-10	200	0,06-0,006	2-6
СП(100-200)Д(2-3)	15-25	800-1200	180	4	5-8	200	0,09-0,009	1,5-3
СП100ДЗК0,4	15-20	800-1200	150	4-8	10-15	200	0,05	2-6
СП300Цс4	15-20	600-1000	150	10	20		0,05-0,1	2-10
Литые								
Ст3	-	100-130	300	-	-	-	0,5	-

Срок службы порошковых материалов на основе железа и меди в полтора-три раза превышает время эксплуатации подшипников скольжения, изготовленных из бронзы, латуни, баббита, чугуна, стали и также подшипников качения.

6.2.1 Материалы на основе железа

Пористое железо представляет собой наиболее простой тип антифрикционных материалов. Заполнение пор маслом обеспечивает стабильно низкий коэффициент трения триботехнической пары, предохраняет металл от коррозии и создает эффект самосмазывания, делающий ненужным подвод смазочного материала извне.

При невысоких скоростях скольжения на поверхности трения появляется смазочная пленка, возникающая при поступлении масла из капилляров, образованных пора́ми в объеме тела подшипника. Количество масла регулируется капиллярными силами, удерживающими масло в порах. Чем больше скорость скольжения, тем в большей степени нагревается поверхность трения, тем более обильно поступает на нее смазочный материал.

Пористые подшипники при малых скоростях скольжения способны выдержать нагрузки, более высокие, чем литые подшипники. При увеличении скоростей допустимые нагрузки на литые подшипники увеличиваются, а на пористые – уменьшаются. Однако, если к пористым подшипникам подвести смазочный материал извне, то при повышении скоростей значения допустимых нагрузок увеличиваются.

При стабильной подаче смазочного материала длительная работоспособность пористого железа обеспечивается при нагрузках 2,0 – 2,5 МПа и скорости скольжения 1 – 2 м/с ($P \cdot V = 2,5 - 5,0 \text{ МПа} \cdot \text{м/с}$).

С увеличением скорости скольжения в режиме самосмазывания допустимая величина нагрузки резко уменьшается и значение PV превышает 0,7 – 1,6 МПа·м/с. При нормальной работе такого материала температура не должна превышать 70 – 80 °С.

Железографит является наиболее распространенным антифрикционным порошковым материалом на основе железа. Его используют как в режиме самосмазывания, так и при дополнительной подаче масла. Железографитовые материалы обладают ферритно-перлитной (феррита – менее 50 %) структурой металлической основы и содержат около 1,5 % свободного углерода. Материал обладает твердостью, обеспечивающей восприятие достаточно высоких скоростей скольжения и нагрузок при минимальном износе. При удовлетворительном смазочном материале коэффициент трения композиции находится в пределах от 0,005 до 0,09, при ограниченном – от 0,02 до 0,125. Критерий PV в условиях самосмазывания составляет 1,6 МПа·м/с, при стабильном смазывании до 10 МПа·м/с, а при смазывании под давлением до 40 МПа·м/с. Предельная скорость скольжения допускается до 2 – 3 м/с. Порошковые железографитовые материалы по триботехническим характеристикам близки к серым чугунам, но обладают более высокой прирабатываемостью. Износ контртела, работающего в паре с железографитом обычно не превышает износа контртела в паре с чугуном. Длительность службы подшипника в среднем не превышает 3 – 5 тысяч часов. Применяют железографитовые материалы марок СП (80-150) – 1, СП100 – 1, СП200 – 1, СП300 – 1 и другие.

Композиции на основе железа и меди нашли широкое применение главным образом в связи с более высокими физико-механическими и технологическими свойствами по сравнению с пористым железом и железографитом. Антифрикционные свойства железомедных и железомеднографитовых материалов сопоставимы с материалами на основе железа. Высокие механические характеристики позволяют применять их в узлах трения, где требуется повышенная прочность. Они способны выдерживать статические нагрузки до 60 – 290 МПа, но критерий P·V их не превышает 2 (МПа·м/с) в условиях ограниченной смазки. В состав железомедных и железомеднографитовых антифрикционных композиций обычно вводят от 5 % до 9 % меди. Подшипники из таких материалов работают обычно с подводом смазочных материалов и реже в режиме самосмазывания. К железомедным относятся, например, сплавы ЖД3, ЖД5, к железомеднографитовым – СП100Д5, СП400Д7, СП(100-200)Д(2-3) и другие.

Существенного улучшения физико-механических, технологических и эксплуатационных характеристик железографитовых и железомеднографитовых материалов достигают дополнительным легированием серой или сульфидами металлов (таблица 6.2). Легирование серой повышает несущую способность подшипников при увеличении скорости скольжения. Применение композиций Fe – Cu – C – S вместо чугунных втулок позволяет продлить срок их службы в десятки раз и ограничит смазывание узлов трения до одного раза в сезон.

Таблица 6.2 – Характеристика сульфидированных железографитовых материалов

№ материала	Содержание элементов, %				Условия смазывания	Предельно допустимые	
	C	S	P	Cu		P, МПа	V, м/с
1	1	0,8-1	0	0	Ограниченное смазывание	4,9-24,5	2,4
2	1,5	0,4-0,8	0	2,5-3	То же	4,9-7,85	2,8
3	1,3-2	0,4	0	3-10	–	14,7-18,6	0,1
4	1,5	0,7-0,1	0,5-0,7	0	Огранич. (P=18-20 %), без смазочного материала %)	14	–

Материал под номером 1 применяется как заменитель бронз в тракторах при изготовлении втулок, шестерен переключателей скоростей, дисков регулятора крышки регулятора, шестерен механизмов смазки.

Материал номер 2 применяют при температуре до 200 °С для направляющих втулки клапана автомобилей, втулки рычажно-тормозной передачи железнодорожных вагонов, втулки оборудования текстильного производства, втулки транспортеров, кормораздатчиков и др. Материал номер 3 используют для втулок лебедок и петель дверей грузовых автомобилей, шайб шкворней и шарниров поворотных кулаков, при повышенных (до 500 °С) температурах – для направляющих втулок клапанов автомобилей.

Из материала, обозначенного номером 4, изготавливают детали токарно-винторезных станков.

При легировании сульфидами цинка образуется структура тонкодисперсного перлита с повышенной износостойкостью, несущей способностью и прирабатываемостью материала, что значительно расширяет возможные области применения железистографитовых материалов в связи с достижением повышенных предельных параметров как при работе со смазочными материалами, так и без дополнительной смазки (таблица 6.3). Введение в такие материалы до 1 % олова существенно улучшает их антифрикционные свойства.

Таблица 6.3 – Условия работы и возможные области применения железистографитовых материалов, содержащих сернистый цинк

Материал	Предельно допустимые		Условия работы и область применения
	P, МПа	V, м/с	
СП100 с добавками (1-1,5 % C, 4 % ZnS)	5,89 17,66 6,87	4,5	Трение при ограниченном смазывании. Текстильное машиностроение и бытовая техника.
СП100 с добавками (1-1,5 % C, 4 % ZnS, 1 % Sn, 1 % S)	9,81 низкое	4,5 48-63	Трение в режиме самосмазывания и при ограниченной подаче смазочного материала. Подшипники бытовых приборов.
СП300 с добавками (3 % C, 4 % ZnS)	9.81 18.64 0,98-2,94	12 5 100	Трение с ограниченной подачей смазочных материалов в режиме самосмазывания. Подшипники текстильного оборудования, сельхозмашин, приборов, электрооборудования, торцевые уплотнения быстровращающихся валов.

Узлы трения, оснащенные сульфидированными материалами на основе железа, обладают работоспособностью, в несколько раз превышающей работоспособность бронз, баббитов, а также порошковых материалов на основе бронз.

Следует учитывать, что материалы, содержащие сульфиды обладают повышенным, по сравнению с железистографитом, коэффициентом теплового расширения и несколько меньшей коррозионной стойкостью.

Введение в железомеднографитовые материалы фосфора позволяет повысить их сопротивление пластической деформации при трении, что уменьшает возможность закупорки поровых каналов при возможном увеличении нагрузки. Они обладают более высокой износостойкостью при трении без смазочного материала. При дополнительном смазывании они способны работать с нагрузкой до 7,65 МПа и скорости скольжения 4 м/с. Оптимальными являются материалы на основе железа, содержащие 1,2 % С и 0,2 – 0,4 % Р; 0,6 % С и 0,9 % Р.

Присутствие молибдена в антифрикционных материалах на железной основе значительно улучшает их антифрикционные свойства, особенно при тяжелых условиях работы.

Так, пористое железо, содержащее 10 % молибдена, при трении без смазки со скоростью скольжения 46 м/с и температуре 540 °С имеет коэффициент трения 0,075. Влияние молибдена на антифрикционные свойства малопористого железнографита (3 % С) показано в таблице 6.4.

Таблица 6.4 – Влияние содержание Мо на свойства малопористого железнографита

Содержание Мо, %	Твердость НВ	Несущая способность $P_{\max}$, МПа	Коэфф. трения, f	Линейный износ I_L , мкм/км
0	1,67-1,77	0,78-0,98	0,35-0,40	15
5	1,96-2,16	1,77-1,96	0,25-0,35	15
10	2,45-2,75	1,96-2,35	0,20-0,33	15
15	3,43	3,92-4,9	0,20-0,26	5-10

6.2.2 Материалы на основе меди

Антифрикционные материалы на основе меди получили широкое распространение в связи с их высокими антифрикционными свойствами, коррозионной стойкостью и электропроводностью.

Эти свойства обеспечили эффективное их применение в узлах трения машин и механизмов и в электротехнике в качестве скользящих токосъемных контактов.

К таким материалам относятся пористая оловянная бронза, легированная пористая бронза (свинцовистая, фосфористая и др.), бронзографит, ленточные беспористые и пористые с пропиткой пластмассой бронзовые материалы на стальной подложке, медь-графит и др.

Из пористой бронзы изготавливают подшипники машин для обработки пищевых продуктов, текстильных и бытовых машин, небольших электродвигателей, пусковых устройств, часовых механизмов, насосов для холодной воды, вентиляторов и т.п., работающих в легких условиях при низких скоростях скольжения (до 1,5 м/с) и нагрузках 0,5 – 1,0 МПа.

Состав и свойства некоторых марок пористых бронз приведены в таблице 6.5.

Таблица 6.5 – Физико-механические и антифрикционные свойства пористых оловянистых бронз

Марка	Содержание Sn, %	Плотность, г/см ³	Пористость П, %	Предел прочности σ_B , МПа	Относительное удлинение δ , %	Твердость НВ	PV, МПа·м/с
Порошковые							
ПА-БрО10	10	6 – 7	20 – 30	75 – 127	5	24 – 39	1,5 – 2,5
ПА-Бр100	9,5 – 10,5	6,4 – 7,2	20 – 30	93 – 137	1 – 3	63 – 80	1,5 – 2,5
Литые							
БрО10	7,5 – 8,5	–	–	215	3	69 – 79	0,5 – 1

В бронзографитовых материалах графит играет роль твердого смазочного материала. В процессе трения он постепенно образует на поверхности контртела графитовую пленку, которая постоянно восстанавливается при механических повреждениях участков поверхности трения.

Несущая способность бронзографитовых подшипников в значительной мере определяется их пористостью и скоростью скольжения (таблица 6.6).

Коэффициент линейного расширения бронзографитов, содержащих 8 – 10 % Sn и 2 – 3 % C, равен $10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ Ч10-6К-1, теплопроводность в интервале температур от 100 $^{\circ}\text{C}$ до 600 $^{\circ}\text{C}$ равна 34 – 43 Вт/(м·К).

Таблица 6.6 – Зависимость величины предельных давлений для бронзографитовых подшипников от пористости и скорости скольжения

Материал	Пористость П, %	Нагрузки, МПа, при скорости скольжения, м/с, не выше					
		0,1	0,5	1	2	3	4
Бронзографит (9-10 % Sn, 1-4 % C, ост. Cu)	15-20	17,6	6,9	5,9	4,9	3,4	1,2
	20-25	14,7	5,9	4,9	3,9	2,9	1,0
	25-30	11,8	4,9	3,9	2,9	2,4	0,8

Бронзографитовые материалы могут применяться в тех же случаях, что и пористая бронза, а также в циркуляционных насосах для горячей воды, в водомасляных смесях, в мотоциклах, тракторах, для изготовления шестерен. Они заменяют литые бронзы, латуни, подшипники качения.

Свойства некоторых бронзографитов приведены в таблице 6.7.

Хорошей прирабатываемостью, но относительно низкой несущей способностью обладают свинцовистые бронзы. При нанесении тонкого слоя бронзы на стальную подложку несущая способность материала значительно повышается.

Сплавы системы медь-свинец предназначены для работы в масле, но в случае прекращения подачи смазочного материала роль его начинает играть свинец, который покрывает пленкой поверхность контртела.

Таблица 6.7 – Физико-механические и антифрикционные свойства бронзографита

Материал	γ , г/см ³	П, %	σ_b , МПа	δ , %	НВ, МПа	P_{max} МПа	V_{max} , м/с	PV, МПа·м/с	f по стали
Порошковые									
ПА-БрОГр10-3	-	20	98	2,5	343	4	5-10	1,5-6,9	0,04-0,07
ПА-БрОГр9-3	5,6-6,3	18-20	79- 147	5-10	177- 294	4	5-10	1,5-6,9	0,04-0,07
ПА-БрОГр8-4	5,5-6,5	20-25	-	-	167- 490	4	5-10	1,5-6,9	0,04-0,07
ПА-117 НД (9,5-10,5 % Sn, 75 % C)	6,8-7,2	7	137	3	-	-	-	-	-
Литые									
БрО8С12	-	-	100	3-8	69- 98	8	10-15	5-8	0,08

6.2.3 Металлографитовые материалы

Металлографитовые материалы содержат более 4 – 5 массовых % от массы графита. Физико-механические и антифрикционные свойства таких сплавов в значительной мере определяются их составом и плотностью. С увеличением содержания углерода в структуре порошкового материала уменьшается количество межчастичных контактов металл-металл и возрастает число контактов металл-графит и графит-графит, снижающих прочность композиции.

Для повышения прочностных характеристик металлографитовых материалов применяют двукратное прессование и спекание, горячее прессование, жидкофазное спекание и т.д. Высокий уровень свойств позволяет использовать эти материалы для изготовления подшипников скольжения и торцевых уплотнений, применяющихся в различных отраслях машиностроения, для агрегатов текстильной и пищевой промышленности, при изготовлении деталей электротехнического назначения и др. (таблица 6.8).

Углеграфитовые материалы характеризуются значительной прочностью при высоких температурах, химической инертностью, малой плотностью, хорошими электрофизическими свойствами, а также возможностью регулирования теплопроводности и электрического сопротивления в широких пределах. В то же время они обладают недостаточными термопрочностью и стойкостью к тепловому удару, малой ударной вязкостью и хрупкостью, что ограничивает их применение.

Эти недостатки в большей степени отсутствуют у композиционных материалов на основе углеродного волокна (УВ) в качестве армирующего элемента и объемно-изотропной матрицы в виде поликристаллической углеродной массы, получивших название углерод-углеродные композиционные материалы (УУКМ).

Таблица 6.8 – Состав и области применения металлографитовых материалов

Массовая доля, %		Области применения, условия работы
С	добавки	
На основе железа		
2-20 10-30	Cu-до 15 -	Работа в присутствии смазочного материала Работа без смазочного материала в тяжелых условиях трения: при t от минус 200 °С до плюс 600 °С в среде воды, газов, паров; при t до 900 °С и V _{ск} до 45 м/с
10-15 до 8 4-25	Bi, As, Sb-1,5-3,5 TiNi-2-5,0 Ni-18,0	Для работы при t = 50-370 °С, p = 0,2-1,0 МПа и V _{ск} = 4,35-35,6 м/с
315	Pb -до 20; Cu-до 25; Ni-15	Для работы без смазочного материала Для тяжелых условий работы при высоких нагрузках, повышенной запыленности, при трении без смазки Ползуны
На основе сплава Fe-Ni		
10	Mn-2; ZnS-2,5	Для работы в режиме самосмазывания при высоких скоростях скольжения, при работе в воде
На основе меди		
4-20	Pb, Al, P, Sn, Zn -9-10	Ползуны, уплотнения, подшипники 15-16 Pb-10-12, для работы без смазочного материала
На основе бронзы или латуни		
4-25	-	Для работы при температуре от минус 200 до плюс 350 °С в паре, воде, газах
На основе сплава Cr-Co		
15-30 4-17 10-16	- - Mg-2,5-5	Материалы с высокой теплопроводностью и износостойкостью, для изготовления контактов, щеток генераторов То же То же
На основе серебра		
10	-	То же

При получении УУКМ необходимо разделить УВ на филаменты, смешать его с порошком пека и произвести набор пресс-пакетов для дальнейшей переработки. Для реализации этих процессов использовались два способа.

Первый способ. Углеродистое волокно и пек перемешивают в гидросмесителе. Под действием турбулентных потоков воды волокна измельчаются, разделяются на филаменты и смешиваются с пеком. Диспергированную массу обезвоживают в нутч-фильтрах и сушат до постоянного веса. Полученные пресс-пакеты прессуют, термообработывают при $t = 900 - 1200$ °С, несколько раз пропитывают пеком, карбонизируют при $t = 950$ °С и графитизируют при $t = 2300$ °С. В результате получают УУКМ с плотностью $\rho = 1,8 - 1,85$ г/см³, в котором исходное УВ измельчено до длины 0,5 – 2,0 мм.

Прочность при изгибе такого композита (марка ФУУМ-1) составляет 60 – 100 МПа, что примерно соответствует серийному материалу Термар-ДФ ($\sigma_{изг} = 80 - 85$ МПа). Количество вводимого волокна варьируется от 55 до 95 мас. %. В некоторых экспериментах в исходную шихту добавляли до 3 мас. % порошка BN; такому материалу присвоена марка ФУУМ-2. Обе композиции имеют одинаковые физические и механические свойства.

Второй способ. С целью повышения прочностных характеристик УУКМ применяют другой способ, для реализации которого была изготовлена специальная установка. Принцип ее работы заключается в следующем: углеродное волокно, нарезанное до длины 5 – 10 мм, воздушным потоком направляется в камеру, где разделяется на филаменты и измельчается, затем по трубопроводу оно попадает в смесительную камеру, в которой осуществляется его смешение с порошкообразным пеком. Полученная масса осаждается в наборной гильзе с помощью направленного воздушного потока. После прессования заготовки термообработывают при $t = 900 - 1200$ °С, пропитывают несколько раз фенолформальдегидной смолой, карбонизируют и графитизируют при $t = 2300$ °С. В конечном итоге получают УУКМ с $\rho = 1,8 - 1,85$ г/см³ и $\sigma_{изг} = 150 - 160$ МПа (марка АФФ), прочностные свойства которого несколько выше таковых серийного материала Термар-АДФ. Количество УВ в этих УУКМ находится в пределах 55 – 95 мас. %.

6.2.4 Фрикционные материалы

Использование фрикционных материалов основано на высоких значениях коэффициента трения и повышенной износостойкости. Они предназначены для работы в узлах, передающих кинетическую энергию (устройства сцепления) или рассеивающих ее (тормозные устройства).

Порошковые фрикционные материалы предназначены для работы в различных тормозных и передаточных узлах самолетов, автомобилей, гусеничных машин, дорожных и строительных механизмов, станков, прессов и т.п.

Фрикционные элементы с порошковыми материалами изготавливают в виде дисков, секторных накладок и колодок различной конфигурации. Они представляют собой, как правило, конструкцию, состоящую из стального несущего каркаса, облицованную с одной либо с двух сторон слоем спеченного фрикционного материала.

Во фрикционных материалах сочетается металлическая несущая матрица, обладающая необходимыми свойствами: прочностью, износостойкостью, жаропрочностью и пластичностью, с хрупкими наполнителями, обеспечивающими достижение требуемых значений коэффициента трения и их стабильность и предотвращающими схватывание. В связи с этим порошковые фрикционные материалы представляют собой сложные композиции из металлических и неметаллических порошков. Доля последних нередко достигает 50-60 %. Высокое содержание неметаллических добавок снижает прочность металлической основы, ухудшает прессуемость и требует приложения нагрузки при спекании. Именно из-за хрупкости фрикционного материала, как было отмечено выше, изделия изготавливают путем припекания фрикционного слоя к стальной прокладке. В качестве компонентов, образующих металлическую матрицу материалов, обычно используют порошки меди и железа.

Для фрикционных материалов на медной основе наиболее подходящим является медный порошок с дендритной формой частиц, полученный электролизом. Для изготовления обычно используют порошки марок ПМА, ПМ, ПМС-1, ПМС-2, ПМС-К.

Для изготовления фрикционных изделий на железной основе используют порошки марок ПЖВ1, ПЖВ2, ПЖВ3 (ГОСТ 9849-86), изготавливаемые методом восстановления. Они имеют разветвленную форму частиц, уменьшаемую методом различных присадок и улучшающую прессуемость. Рекомендуется применять и очень мелкие железные порошки, так как с увеличением дисперсности порошка улучшаются фрикционные характеристики.

В качестве фрикционной добавки в материалах на бронзовой и железной основах наибольшее распространение получил диоксид кремния. Дисперсность и форма частиц могут изменяться в очень широких пределах и зависят от состава предъявляемых к нему требований. Для изготовления фрикционных материалов на основе железа используют кварцевый песок первого, второго и третьего классов, содержащий не менее 94 % оксида кремния (ГОСТ 2138 - 91).

Основными типами порошковых материалов, предназначенных для тормозных передаточных устройств, являются материалы на железной и медной основах. Обычно они применяются для тяжелых и самых тяжелых условий работы и, как правило, используются в условиях сухого трения. Материалы на медной основе предназначены для работы в более легких условиях и применяются как при сухом трении, так и при работе с жидкостной смазкой.

Фрикционные материалы состоят из основного металла, компонентов, улучшающих механические и теплофизические свойства основы, и веществ, увеличивающих коэффициент трения трибосистемы и повышающих сопротивление материала схватыванию.

Фрикционные элементы с порошковыми материалами изготавливают в виде дисков, секторных накладок и колодок различной конфигурации. Они представляют собой, как правило, конструкцию, состоящую из стального несущего каркаса, облицованного с одной или с двух сторон слоем порошкового фрикционного материала.

6.2.4.1 Материалы на основе железа

Среди материалов на железной основе большое распространение получили ФМК-8, ФМК-11, МКВ-50А и СМК, предназначенные для работы в тяжело нагруженных колесных и дисковых тормозах. Составы некоторых фрикционных материалов приведены в таблице 6.9.

Таблица 6.9 – Состав некоторых фрикционных материалов на основе железа для трения без смазочного материала

Марка материала	Массовая доля, %				
	Fe	Cu	C (графит)	ас-бест	другие добавки
1. ФМК-11	64	15	9	3	BaSO ₄ -6; SiO ₂ -3
2. МКВ-50А	64	10	8	3	FeSO ₄ -5; SiC-5; B ₄ C-5;
3. СМК	40-65	9-25	—	—	Mn-6,5-10; BN-6-12; SiC-1-6; B ₄ C-8-15; MoS ₂ -2-5;
4. СМК-80	48	23	—	—	Mn-6,5; MoS ₂ -2,5; BN-6,5; B ₄ C-9,5
5. СМК-83	54	20	—	—	Mn-7; MoS ₂ -2; BN-6,5; SiC-1; B ₄ C-9,5
6. ...	60-75	—	10-25	—	SiC<20; муллит, Al ₂ O ₃ ; MoS ₂ ; Pb, Sn<20
7. ...	55-75	30	—	6	SiO ₂ -6; P<1; Al<9

ФМК-11 обладает более высоким и устойчивым коэффициентом трения, чем ФМК-8, но уступает ему в износостойкости. МКВ-50А относительно стабилен при температурах до 600 °С.

По величине и стабильности коэффициента трения он превосходит ФМК-11.

Высокими фрикционными свойствами при работе в тяжелых условиях обладает материал СМК. Его различные модификации применяют в дисковых тормозах открытого и закрытого типа, тяжело нагруженных ленточных и колодочных тормозных устройствах, для оснащения тормозных устройств тяжелых автомобилей (грузоподъемностью до 65 т и более).

Из материалов на железной основе наибольшее распространение получили ФМК-11, МКВ-50 А и СМК.

6.2.4.2 Материалы на основе меди

Применяемые в условиях трения без смазочного материала порошковые фрикционные материалы на основе меди и ее сплавов, обладая достаточно высоким коэффициентом трения и хорошей износостойкостью, успешно работают в тормозных и передаточных устройствах различного назначения. По сравнению с материалами на основе железа они значительно меньше истирают сопряженную деталь, изготовленную из стали или чугуна.

Наиболее широкое применение нашли порошковые фрикционные материалы на медной основе для работы в тормозных и передаточных узлах трения в условиях жидкой смазочной среды. Преимущества масляных фрикционных устройств состоят в плавности включения, большей долговечности, легкости и надежности охлаждения. При этом, однако, следует иметь в виду, что замена сухого фрикционного узла на устройство, работающее в условиях контакта с жидкими смазочными материалами, влечет за собой снижение фрикционной активности. Поэтому для обеспечения высокой энергоемкости тормозных и передаточных устройств, работающих в масле, давление на поверхностях трения повышают до 6 – 7 МПа. Порошковые фрикционные материалы на основе меди характеризуются высокой износостойкостью при работе в тяжело нагруженных муфтах сцепления, фрикциях и тормозах. Химический состав некоторых фрикционных материалов на основе меди и ее сплавов, предназначенных для работы в маслах, представлен в таблице 6.10.

6.3 Порядок выполнения работы

6.3.1 Изучить сравнительные физико-механические и антифрикционные характеристики всех групп порошковых материалов с литыми материалами.

6.3.2 Ознакомиться со всеми группами представленных порошковых антифрикционных и фрикционных материалов.

6.3.3 Провести сравнительные испытания твердости и плотности антифрикционных и фрикционных материалов.

Таблица 6.10 – Составы некоторых фрикционных материалов на медной основе для работы в условиях жидкой смазочной среды

Марка материала	Химический состав, %							
	Cu	Fe	Sn	Pb	Ni	C	ас-бест	Другие добавки
М-88Б	основа	6	9	4	-	4	2	бентонит 2
М-110	основа	4	9	7	-	5	3	
М-140	основа	4	9	8	-	4	-	муллит 1,5
МК-5	основа	6-8	8-10	7-9	-	3-5	-	
МП-11	основа	4	10	5	-	4	9	пульвербакелит 11
ФАБ	основа	5	-	8	-	7	-	алюминий 11
ФАОБ	основа	5	2	7	-	8	-	алюминий 4
ФМК-8	-	основа	-	-	25	7	-	Cr 10; W 6; Cu ₂ S 7
ФМК-11	15	основа	-	-	-	9	3	BaSO ₄ 6; SiO ₂ 3
МКВ-50А	18	основа	-	-	-	8	3	FeSO ₄ 5; SiC 5; B ₄ C 5
СМК-80	23	основа	-	-	-	-	-	Mn 6,5; BN 6,5; B ₄ C 10; SiC 3,5; MoS 2,5

6.4 Содержание отчета

6.4.1 Цель работы.

6.4.2 Краткое описание основных видов порошковых антифрикционных материалов.

6.4.3 Привести таблицу результатов по определению твердости и плотности порошковых антифрикционных материалов.

6.5 Контрольные вопросы

6.5.1 Изложите сущность метода порошковой металлургии для получения заготовок и готовых деталей.

6.5.2 Что такое железографит?

6.5.3 Какие химические элементы вводятся в железографитовые материалы и для чего?

6.5.4 Зачем применяются антифрикционные сплавы на основе железа?

6.5.5 Способы изготовления металлографитовых материалов.

6.5.6 Способы получения УУКМ.

6.5.7 Области применения и способы получения порошковых фрикционных материалов.

6.5.8 Приведите примеры порошковых фрикционных материалов на основе железа и меди.

7 Работа 7. Пластмассы

7.1 Цель работы

Изучение классификации, свойств, структуры и областей применения пластмасс.

7.2 Общие сведения

Пластическими массами, или пластмассами, называют материалы на основе природных или синтетических полимеров, способных при нагреве размягчаться и под давлением принимать заданную форму и устойчиво сохранять ее после охлаждения.

Детали из пластмасс менее трудоемки в изготовлении, имеют меньшую стоимость, поэтому ими часто заменяют изделия из металла.

Простые пластмассы состоят из одних полимеров (без добавок). Сложные пластмассы помимо полимеров включают добавки: наполнители, пластификаторы, красители, отвердители, катализаторы и т.д.

Наполнители в пластмассы вводят в количестве от 40 % до 70 % для повышения твердости, прочности, жесткости, а также для придания особых специфических свойств, например, фрикционных, антифрикционных и снижения их стоимости. Наполнителями могут быть ткани, а также порошковые, волокнистые вещества.

Пластификаторы (стеарин, олеиновая кислота, дибутилфталат) повышают эластичность, пластичность и облегчают обработку пластмасс. Их содержание колеблется в пределах от 10 % до 20 %.

Отвердители (амины) и катализаторы (пероксидные соединения) в количестве нескольких процентов вводят в пластмассы для отверждения, т.е. создания межмолекулярных связей и встраивания молекул отвердителя в общую молекулярную сетку.

Красители (минеральные пигменты, спиртовые растворы органических красок) придают пластмассам определенную окраску.

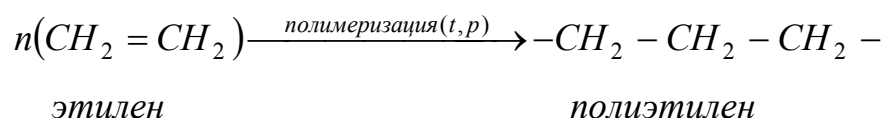
Состав компонентов, их сочетание и количественное соотношение позволяют изменять свойства пластмасс в широких пределах.

7.2.1 Полимеры

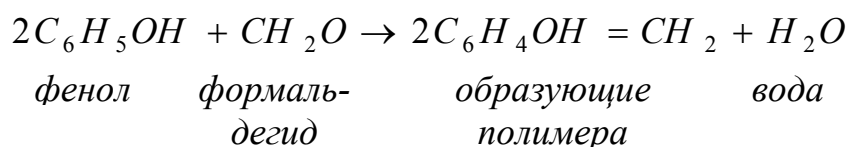
Основным компонентом пластмасс, обеспечивающим работу всей композиции как единого целого, являются полимерные материалы, или смолы, представляющие собой высокомолекулярные соединения, макромолекулы которых состоят из нескольких тысяч мономерных звеньев.

Полимеры получают синтезом низкомолекулярных веществ методами полимеризации или поликонденсации.

Элементный состав продукта полимеризации не отличается от состава исходных веществ, так как процесс происходит при последовательном присоединении мономеров к растущей полимерной цепи. Кроме молекул полимера никаких других соединений не возникает. Например, образование полиэтилена протекает по схеме:



При поликонденсации высокомолекулярные соединения образуются в результате реакций замещения или обмена между реагентами, сопровождающихся образованием низкомолекулярных соединений (воды, аммиака и т.д.) и непредельных углеводородов, участвующих в полимеризации. Например, при взаимодействии формальдегида с фенолом образуется фенолформальдегидный полимер и вода:



Макромолекулы полимеров могут состоять из одинаковых или разнородных по химическому составу мономеров. В последнем случае эти соединения называются сополимерами, а реакции их образования – сополимеризацией.

Полимеры классифицируют по различным признакам, основными из которых являются состав и структура макромолекул, полярность, отношение к нагреву (таблица 7.1).

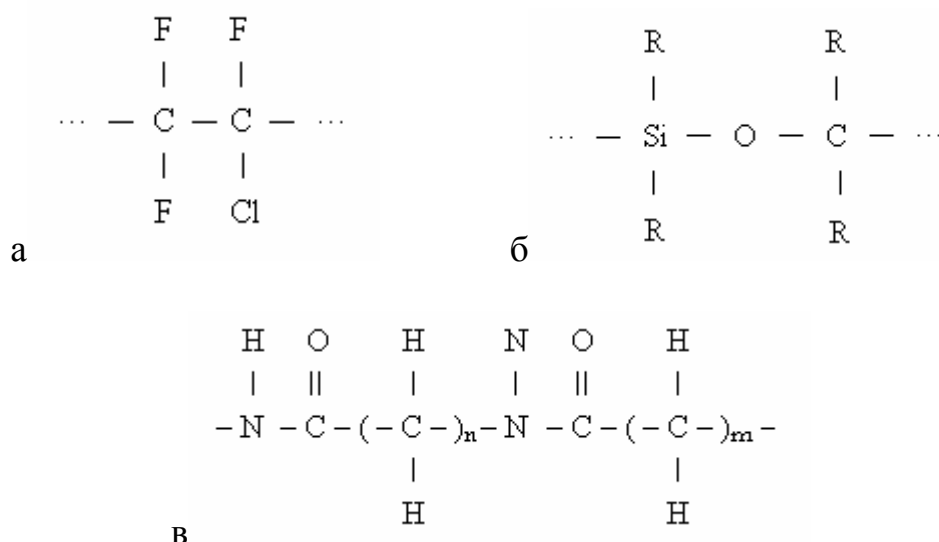
Таблица 7.1 – Классификация полимеров

Классификационный признак групп полимеров	Наименование типов полимеров	Примеры
1 Состав	1.1 Органические	Полиолефины
	1.2 Элементоорганические	Полититаноксаны
	1.3 Неорганические	Керамика
2 Структура макромолекул	2.1 Линейные (цеповидные)	Полиамиды
	2.2 Разветвленные	Полиизобутилен
	2.3 Ленточные (лестничные)	Полисилоксаны
	2.4 Пространственные (сетчатые)	Резины (вулканизаты)
3 Надмолекулярная структура	3.1 Аморфные	Поливинилхлорид
	3.2 Кристаллические	Полиэтилен
4 Полярность	4.1 Полярные	Пентапласт
	4.2 Неполярные	Полистирол
5 По отношению к повторному нагреву	5.1 Термопластичные	Органическое стекло
	5.2 Термореактивные	Фенолформальдегидная смола

7.2.1.1 Молекулярное строение полимеров

Наибольшую группу соединений составляют органические полимеры. Если основная молекулярная цепь полимера состоит из одинаковых атомов, то такой полимер называют гомоцепным, если молекулярная цепь представлена только атомами углерода – карбоцепным. Например, карбоцепными являются полиэтилен, поливинилхлорид, фторопласты (рисунок 7.1 а) и др.

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. Например, гетероцепными являются полиуретан, полиэтиленфторфталат (лавсан), полиамид (рисунок 7.1 в) и др.



- а – структура макромолекулы политрифторхлорэтилена (фторопласт –3);
 б – строение макромолекул кремнийорганических соединений;
 в – строение макромолекулы полиамида

Рисунок 7.1 – Структура макромолекул полимеров

Присутствующие в молекулярных цепях гетероцепных полимеров неорганические элементы придают материалу повышенную теплостойкость, а органические радикалы – прочность и эластичность. Присутствие кислорода способствует повышению эластичности материала, а фосфора и хлора – огнестойкости, атомы серы уменьшают газопроницаемость.

Элементоорганические полимеры содержат в основных молекулярных цепях сочетающиеся с органическими радикалами атомы Si, Ti, Al и других элементов (рисунок 7.1 б).

Основу неорганических полимерных материалов составляют оксиды кремния, магния, алюминия, кальция и др. Представителями таких полимеров являются силикатные стекла, керамика, асбест, слюда.

7.2.1.2 Молекулярные структуры полимеров

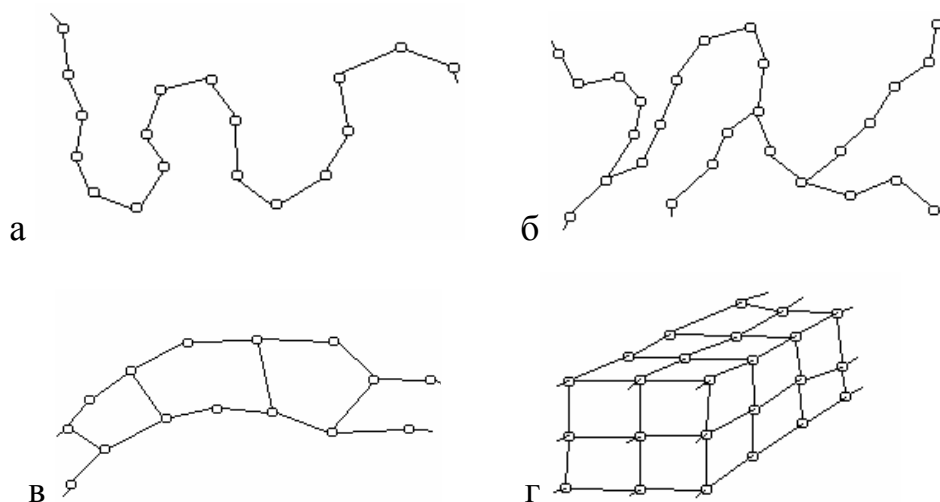
Свойства полимерных материалов в значительной степени определяются структурой макромолекул.

Линейную макромолекулу (рисунок 7.2 а) можно представить в виде длинной изогнутой в пространстве цепочки. Длина такой макромолекулы в несколько тысяч раз больше ее поперечного сечения (полиамид, полиэтилен).

У разветвленной макромолекулы (рисунок 7.2 б) основная цепь имеет относительно короткие (короче основной цепи) боковые ответвления.

Макромолекулы ленточного типа (рисунок 7.2 в) состоят из двух молекулярных цепей, соединенных между собой химическими связями.

Пространственные макромолекулы (рисунок 7.2 г) образуются путем соединения различных макромолекул прочными поперечными связями непосредственно или через мостики, состоящими из атомов или групп атомов.



а – линейные; б – разветвленные; в – ленточные; г – пространственные

Рисунок 7.2 – Строение макромолекул полимера

7.2.1.3 Надмолекулярная структура полимеров

Помимо строения макромолекул на свойства полимерного материала влияет расположение их в пространстве (надмолекулярная структура). Полимеры могут быть аморфными и кристаллическими, т.е. обладать упорядоченной структурой. Кристалличность придает материалу повышенную жесткость, прочность и теплостойкость. Обычно полной кристаллизации полимера не происходит. В реальных условиях надмолекулярная структура состоит из чередующихся кристаллических и аморфных участков.

7.2.1.4 Полярность полимеров

В зависимости от химического состава, строения макромолекул, надмолекулярной структуры полимеры по электрическим и физическим свойствам могут быть полярными и неполярными. В макромолекулах неполярных полимеров центры тяжести разноименных зарядов совпадают. У полярной макромолекулы центр тяжести электронов сдвинут в сторону более электроотрицательного атома и центры тяжести разноименных атомов не совпадают.

Неполярные полимеры имеют симметричное расположение функциональных групп и дипольные моменты связей атомов взаимно компенсируются (рисунок 7.3 а).

В молекулах полярных полимеров присутствуют или полярные связи группировок ($-\text{Cl}$, $-\text{F}$, $-\text{OH}$) (рисунок 7.3 б) или несимметрия в их структуре.

Полярные полимеры обладают повышенной жесткостью и теплостойкостью, высокой адгезионной способностью, пониженной морозостойкостью. Неполярные – являются высококачественными и высокочастотными диэлектриками. Их свойства мало изменяются при понижении температуры. Они отличаются высокой морозостойкостью.

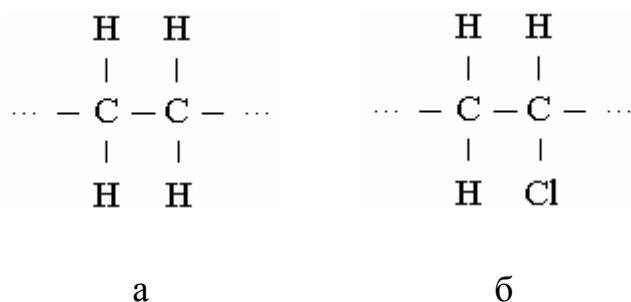


Рисунок 7.3 – Структура неполярных (а) и полярных (б) полимеров

7.2.1.5 Реакция полимера на нагрев

По отношению к нагреву полимеры могут быть термопластичными (термопласты) и термореактивными (реактопласты). Термопластичные материалы обладают линейной или разветвленной структурой макромолекул. При нагревании они размягчаются и затем при определенной температуре переходят в вязкотекучее состояние. Охлаждение вызывает затвердевание полимера. Никаких химических реакций при этом не происходит. Процесс «размягчение – затвердевание» полностью обратим, и может протекать многократно. Повторный нагрев термореактивных пластмасс не изменяет их твёрдого состояния.

Макромолекулы термореактивных полимеров в начальной стадии обладают линейной структурой. Полимер при нагревании легко переходит в вязкотекучее состояние. Выдержка при повышенной температуре приводит к развитию химических реакций, в результате которых макромолекулы приобретают пространственную структуру, и материал необратимо затвердевает.

В зависимости от температуры повторного нагрева такие полимеры могут находиться в одном из трех состояний: стеклообразном (твёрдом), высокоэластичном или вязкотекучем.

7.2.2 Наполнители и добавки

Состав компонентов, их сочетание и количественное соотношение позволяют изменять свойства пластмасс в широких пределах.

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, очесы хлопка, молотый кварц, слюда, асбест, стеклянные волокна, бумага и т.д.). По структуре наполнители бывают порошкообразными, волокнистыми, листовыми, газообразными (таблица 7.2).

Таблица 7.2 – Классификация пластмасс по виду наполнителя

Структура наполнителя	Вид наполнителя по происхождению	Вид пластмасс
Без наполнителя	—	Ненаполненные (простые) пластмассы. Состоят из полимера и добавок. Например, фторопласт – 4, полиэтилен
Порошкообразный	Органические и неорганические вещества	Пресс-порошки и литьевые пластмассы
Волокнистый	Органические волокна	Волокниты
	Асбестовые волокна	Асбоволокниты
	Стеклянные волокна	Стекловолокниты
Листовой	Бумага	Гетинаксы
	Хлопчатобумажная ткань	Текстолиты
	Асбестовая ткань	Асботекстолиты
	Стеклоткань	Стеклотекстолиты
	Древесный шпон	Древесно-слоистые пластики (ДСП)
Газообразный	Воздух, CO ₂	Пенопласты
		Поропласты

7.2.3 Свойства пластмасс и области их применения

В таблице 7.3 приведена классификация некоторых групп пластмасс по назначению с указанием наиболее характерных свойств. Классификация в значительной мере условна, так как одни и те же пластмассы могут входить в различные группы.

Таблица 7.3 – Классификация некоторых групп пластмасс по назначению

Пластмассы		
Назначение	Характерные свойства	Примеры
Конструкционные (нагруженные узлы и детали конструкций)	Высокие механические свойства	Стеклопластики, этролы, фенопласты
Электроизоляционные (электроизолирующие детали, пленки, шланги)	Высокие диэлектрические свойства	Полиэтилен, полистирол, фторопласты
Химически стойкие (химическая аппаратура, емкости, трубы)	Высокое сопротивление действию влаги и химических соединений	Фторопласт – 4, полиэтилен, поливинилхлорид
Тепло- и звукоизоляционные (тепло- и звукоизолирующие наполнители)	Низкий коэффициент теплопроводности, высокая звукопоглощающая способность	Пенополистирол, поролон, пенополисилоксан
Светотехнические и оптические (оптические детали, арматура осветителей)	Стойкие к воздействию света, высокие оптические свойства	Полиметилметакрилат, полистирол, дакрил – 2М
Фрикционные (детали тормозов, муфт сцепления)	Высокий коэффициент трения	Асбополимерные материалы (асбосмоляные, асбокаучуковые, асбофрикционные)
Антифрикционные (подшипники скольжения, покрытия направляющих)	Низкий коэффициент трения	Капрон, фторопласт – 4, лавсан

7.2.3.1 Термопластичные материалы

7.2.3.1.1 Неполярные термопластичные пластмассы

К неполярным пластикам относятся полиэтилен, полипропилен, полистирол и фторопласт-4.

Полиэтилен $(-\text{CH}_2-\text{CH}_2-)_n$ – продукт полимеризации бесцветного газа этилена. Полиэтилен представляет собой воскообразную массу и относится к кристаллизующимся полимерам.

По плотности полиэтилен разделяют на полиэтилен низкой плотности, получаемый в процессе полимеризации при высоком давлении, содержащий от 55 % до 65 % кристаллической фазы, и высокой плотности, получаемый при низком давлении, имеющий степень кристалличности до 95 %.

Механическая прочность и теплостойкость увеличиваются с повышением плотности и степени кристалличности полиэтилена.

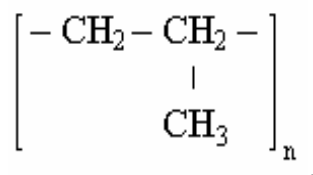
Высокая упругость и эластичность полиэтилена позволяет получать тонкие прозрачные пленки, способные пропускать ультрафиолетовые лучи.

Полиэтилен химически стоек и при комнатной температуре нерастворим ни в одном из известных растворителей; устойчив к кислотам, щелочам и растворам солей до температуры 60 °С.

Недостатком полиэтилена является его подверженность старению. Для защиты от окисления в полиэтилен вводят стабилизаторы и ингибиторы. Часто в полиэтилен добавляют до 3 % сажи, поглощающей солнечные лучи и замедляющей процессы старения в 30 раз. Под действием радиоактивного облучения полиэтилен твердеет, приобретает большую прочность и теплостойкость.

Из него изготавливают защитные оболочки кабелей проводов, детали высокочастотных установок и коррозионно-стойкие детали – трубы, прокладки, шланги. Его выпускают в виде пленки, листов, труб, блоков.

Полипропилен является производной этилена с химической формулой

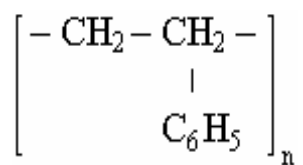


Жесткий нетоксичный материал с высокими физико-механическими свойствами. По сравнению с полиэтиленом этот пластик более теплостоек: сохраняет форму до температуры 150 °С. Полипропиленовые пленки прочны и более газонепроницаемы, чем полиэтиленовые, а волокна эластичны, прочны и химически стойки.

Недостатком полипропилена является его невысокая морозостойкость (до минус 20 °С).

Полипропилен применяют для изготовления труб, конструкционных деталей автомобилей, холодильников, текстильных машин, корпусов насосов и различных емкостей.

Полистирол имеет структурную формулу



Это аморфный, твердый, жесткий, прозрачный полимер, имеющий преимущественно линейное строение.

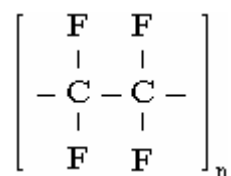
Полистиролу присущи высокие диэлектрические свойства, удовлетворительная механическая прочность, невысокая рабочая температура (до 100 °С), химическая стойкость в щелочах, минеральных и органических кислотах, маслах. Набухает в 65 %-ной азотной и ледяной уксусной кислотах, бензине и керосине. При температуре выше 200 °С разлагается, образуя стирол.

Недостатками полистирола является его хрупкость при пониженных температурах, склонность к постепенному образованию поверхностных трещин.

Выпускается полистирол в виде прозрачных листов, стержней (блочный полистирол) или порошка.

Из полистирола изготавливают детали для радиотехнических и телевизионных приборов и машин, пленки стирофлекс для электроизоляции, как основа магнитонных лент.

Фторопласт-4 (политетрафторэтилен) имеет структурную формулу



и является термически и химически стойким материалом.

Это насыщенный полимер, имеющий аморфно-кристаллическую структуру. Медленное охлаждение при температуре ниже 327 °С вызывает быструю кристаллизацию полимера. До температуры 250 °С скорость кристаллизации мала и не влияет на его механические свойства, поэтому длительно эксплуатировать фторопласт-4 можно до температуры 250 °С. При 415 °С фторопласт распадается, не переходя в вязкотекучее состояние, и выделяет при этом ядовитый фтор.

Температура стеклования минус 120 °С, но даже при весьма низких температурах (до минус 269,3 °С) пластик не охрупчивается. Имеет низкий коэффициент трения (0,04), не зависящий от температуры.

Высокая термостойкость фторопласта-4 обусловлена высокой энергией связи С – F. Кроме того, небольшой размер атомов фтора образует из него плотную оболочку вокруг цепи С – С и защищает последнюю от химических реагентов: фторопласт-4 стоек к действию растворителей, кислот, щелочей, окислителей.

Недостатками фторопласта-4 является его токсичность вследствие выделения фтора при высоких температурах, хладотекучесть и трудность переработки из-за отсутствия пластичности.

Применяют для изготовления труб для химикатов, деталей (вентили, краны, насосы, мембраны), работающих в сильно коррозионных средах, антифрикционных покрытий на металлах (подшипники, втулки).

Физико-механические свойства неполярных термопластичных пластмасс приведены в приложении Б.

Низкая технологичность фторопласта-4 и невысокие механические характеристики ($\sigma_B \approx 20$ МПа, $a \approx 9,8 \cdot 10^{-2}$ МДж/м²) обусловили его применение в качестве антифрикционного материала, главным образом, в комбинации с другими материалами, что позволяет существенно повысить эксплуатационные свойства пластмассы (таблица 7.4).

Таблица 7.4 – Антифрикционные свойства наполненных материалов на основе фторопласта-4

Материал	Предельные значения pV , МПа·м/с, при V , м/с			Относительная износостойкость
	0,05	0,5	5	
Фторопласт-4	0,045	0,065	0,090	1
Ф4С15(фторопласт-4 + 15 % стекл. волокна)	0,35	0,45	0,55	250
Ф4С15М5 (фторопласт-4 + 15 % стекл. волокна + 5 % MoS ₂)	0,40	0,50	0,62	275
Ф4К20 (фторопласт-4 + 20 % кокса)	0,50	0,70	1,10	625
Ф4К15М5 (фторопласт-4 + 15 % кокса + 5 % MoS ₂)	0,60	0,70	1,10	1000

7.2.3.1.2 Полярные термопластичные пластмассы

К полярным пластикам относятся фторопласт-3, органическое стекло, поливинилхлорид, полиамиды, поликарбонаты и другие.

Фторопласт-3 (политрифторхлорэтилен) имеет структурную формулу, представленную на рисунке 7.1, и представляет собой линейный аморфно-кристаллический полимер белого цвета.

Присутствие атома хлора нарушает симметрию звеньев макромолекулы, и в результате полимер становится полярным.

Фторопласт-3 имеет диапазон рабочих температур от минус 105 °С до 70 °С. Нагрев выше 300 °С вызывает его деструкцию с образованием токсичного газообразного фтора.

Фторопласт-3 по химической стойкости несколько уступает фторопласту-4, но легко перерабатывается в изделия методами прессования, литья под давлением и др. Применяют для изготовления труб, клапанов, насосов, шлангов, а также применяют в качестве низкочастотного диэлектрика.

Полиметилметакрилат (органическое стекло) – аморфный, бесцветный, прозрачный термопласт на основе сложных эфиров акриловой и метакриловой кислот. Материал более чем в 2 раза легче минеральных стекол, отличается высокой атмосферостойкостью, оптически прозрачен. При нагреве до 800 °С начинает размягчаться, а при температурах от 105 °С до 150 °С становится пластичным. Основным критерием, определяющим его пригодность, является прочность. Повышение механических свойств органических стекол осуществляют путем двухосного растяжения при нагреве до температуры, превышающей температуру размягчения.

Органическое стекло не подвержено действию разбавленных кислот, щелочей, углеродных топлив и смазочных материалов, растворяется в органических кислотах и хлорированных углеводородах. Недостатком является невысокая поверхностная твердость.

Органическое стекло выпускается в виде листов толщиной от 0,8 до 24 мм. Из оргстекла изготавливают оптические линзы, детали светотехнических устройств.

Поливинилхлорид (ПВХ) – линейный аморфный полимер, имеющий структурную формулу, показанную на рисунке 7.3 б. ПВХ стоек во многих средах: воде, щелочах, разбавленных кислотах, маслах, бензине. Размягчается при температуре, близкой к 70 °С.

Поливинилхлорид используют в виде винипласта и пластиката. Винипласт содержит стабилизаторы (карбонаты металлов) и представляет собой непрозрачное твердое вещество.

Винипласт хорошо поддается механической обработке, легко сваривается, склеивается различными клеями. Материал применяют для облицовки гальванических ванн и в качестве защитного покрытия металлических емкостей.

Винипласт склонен к хладотекучести, чувствителен к надрезам, отличается низкой теплостойкостью и хрупкостью при низких температурах.

Пластикаты получают, вводя в ПВХ пластификаторы – труднорастворимые органические жидкости. Пластифицированный ПВХ отличается повышенной эластичностью и морозостойкостью и более низкими электроизоляционными свойствами. Пластикат выпускается промышленностью в виде листов, лент, трубок. Его часто используют в качестве уплотнителя воздушных и гидравлических систем, изолятора проводов и защитных оболочек кабелей, аккумуляторных банок.

Полиамиды (торговые названия капрон, анид, нейлон и др.) – это полимеры, содержащие в основной цепи макромолекулы повторяющиеся амидные группы – $\text{CO} - \text{NH}_2$ –, а также метиленовые группы – CH_2 –.

Применяют полиамиды для изготовления шестерен, втулок, уплотнений; в качестве антифрикционных покрытий. Полиамиды ударопрочны, способны поглощать вибрации, хорошо сопротивляются истиранию, обладают в паре с закаленными сталями низким коэффициентом трения и низкой плотностью.

Полиамиды ударопрочны, способны поглощать вибрации, хорошо сопротивляются истиранию, обладают в паре с закаленными сталями низким коэффициентом трения (таблица 7.5).

Таблица 7.5 – Антифрикционные свойства некоторых полимерных материалов (пара трения металл-полимер, без смазочного материала)

Материал	Коэффициент трения	Интервал рабочих температур, °С
Композиции на основе полиолефинов	0,1-0,15	до плюс 60 от минус 250 до плюс 250
Полиамиды	0,1-0,2	от минус 40 до плюс 80
Фторопласт - 4	0,05-0,1	от плюс 250 до минус 250
Фторопласт - 3	0,07 - 0,08	от минус 195 до плюс 125
Поликарбонат (марки ДАК)	0,15-0,2	от минус 100 до плюс 240
Полиарилат (марки Д-4)	0,4	от минус 100 до плюс 180
Ароматический полиамид (фенилон)	0,15-0,2	от минус 50 до плюс 200
Полиимид (марки ПАМ-15)	0,18	от минус 196 до плюс 250

Для улучшения антифрикционных свойств полиамиды наполняют сухими смазочными материалами (тальк, графит, дисульфид молибдена). Интенсивность изнашивания наполненных пластмасс в два-пять раз ниже, чем без наполнителей.

Поликарбонаты – это сложные полиэфиры угольной кислоты с общей формулой $[-O-R-O-CO-O-R-]_n$, где R – радикал двухатомного (с двумя группами –ОН) фенола. Выпускаются промышленностью под торговым названием дифлон.

Поликарбонат обладает высокой ударной прочностью, не склонен к ползучести, имеет высокую коррозионную стойкость. Работоспособен при низких температурах (до минус 253 °С). К недостаткам относится плохая сопротивляемость циклическим воздействиям и низкая усталостная прочность.

Антифрикционный поликарбонат ДАК (дифлон, модифицированный тетрафторэтиленом) используется для изготовления втулок, зубчатых колес, клапанов и др. деталей, работающих в узлах трения без смазочных материалов.

Полиимиды – продукты поликонденсации тетракарбоновых кислот и их производных. Цепь макромолекулы содержит имидные циклы $-N\begin{pmatrix} CO \\ CO \end{pmatrix}$ и ароматические ядра, соединенные гибкими связями $-O-$, $-CO-$. В зависимости от структуры полиимиды могут быть термопластичными и термореактивными.

Полиимиды обладают высоким комплексом механических свойств (см. таблицу 7.5), высокой теплостойкостью, хорошо сопротивляются действию органических растворителей, масел, разбавленных кислот. Неустойчивы в щелочах и концентрированных кислотах.

Антифрикционный самосмазывающийся полиимид ПАМ-15 (композиция на основе полиимида с сухим смазочным материалом) используют для изготовления шестерен быстроходных ступеней редукторов, подшипников скольжения и качения, способных работать при значительных вибрационных нагрузках, в условиях глубокого вакуума, при температурах от минус 196 °С до плюс 250 °С.

Свойства полярных термопластов приведены в приложении В.

7.2.3.2 Термореактивные материалы

Термореактивные пластмассы производят на основе термореактивных смол: фенолформальдегидных, аминокальциидных, эпоксидных, полиимидных, кремний-органических, ненасыщенных полиэфиров. Пластмассы на основе этих смол отличаются повышенной прочностью, не склонны к ползучести и способны работать при повышенных температурах. Смолы в пластмассах являются связкой и должны обладать высокой клеящей способностью, теплостойкостью, химической стойкостью в агрессивных средах, электроизоляционными свойствами, доступной технологией переработки, малой усадкой при затвердевании.

7.2.3.2.1 Пластмассы с порошковыми наполнителями

Пресс-порошки и литые пластмассы на основе фурановых и эпоксидных смол с наполнителями из графита и дисульфида молибдена используют для изготовления подшипников скольжения. Минеральные наполнители придают пластмассе водостойкость, химическую стойкость, повышенные электроизоляционные свойства. При использовании в качестве связующего вещества кремнийорганических полимеров и наполнителей в виде кварцевого порошка или асбеста теплостойкость пластмасс достигает 300 °С.

Композиции на основе эпоксидных смол широко применяют в машиностроении для изготовления различной инструментальной оснастки, вытяжных и формовочных штампов и другой оснастки, а так же для восстановления изношенных деталей, устранения дефектов металлических отливок.

7.2.3.2.2 Слоистые пластмассы

Слоистые пластмассы являются силовыми конструкционными и поделочными материалами. Листовые наполнители, уложенные слоями, придают пластику анизотропность. Материалы выпускаются в виде листов, плит, труб, заготовок, из которых механической обработкой получают различные детали.

Гетинакс – изготавливают на основе модифицированных фенольных, анилино-формальдегидных и карбамидных смол и различных сортов бумаги.

По назначению гетинакс делится на электротехнический и декоративный различных цветов и текстуры, имитирующей древесные породы. Применяют для внутренней облицовки пассажирских кабин самолетов, железнодорожных вагонов и т.д.

Текстолиты – 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 (от 0,2 до 0,3 без смазочных материалов и от 0,06 до 0,1 со смазочным материалом), высокой износостойкостью (текстолитовые подшипники до 15 раз долговечнее бронзовых).

Зубчатые колеса, изготовленные из текстолита, работают бесшумно при частотах вращения до $30\,000\text{ мин}^{-1}$. Недостатком текстолита является низкая рабочая температура (до $90\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Асботекстолиты изготавливают на основе кремнийорганических смол с наполнителем из асбестовых тканей. Коэффициент трения асботекстолитов при отсутствии смазочных материалов от 0,3 до 0,38, со смазочным материалом от 0,05 до 0,07.

Асботекстолит выдерживает кратковременно высокие температуры и поэтому применяется в качестве теплозащитного и теплоизоляционного материала (в течение четырех часов выдерживает температуру до $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ и кратковременно $3000\text{ }^{\circ}\text{C}$ и выше). Из асботекстолитов изготавливают лопасти ротационных бензонасосов, фрикционные диски, накладные, тормозные колодки и др.

Древеснослоистые пластики (ДСП) изготавливают из древесного шпона, пропитанного термореактивным связующим. ДСП имеют низкий коэффициент тре-

ния (со смазочным материалом до 0,04) и применяют в узлах трения вместо деталей из цветных металлов. Вкладыши подшипников из древесно-слоистых пластиков интенсивно снижают шум узла трения, не образуют задиров на поверхности вала. Недостатком ДСП является гигроскопичность.

В *стеклотекстолитах* применяют в качестве наполнителя стеклянные ткани, которые по виду ткацкого переплетения подразделяются на полотняные или гарнитуровые, сатиновые или атласные и кордовые ткани. Продольные нити ткани называют основой, поперечные – утком.

Ткани полотняного переплетения имеют на поверхности максимально частое чередование основных и уточных нитей, что придает ткани жесткость. Однако стекловолокна хрупки, и при их взаимном перетирании или под давлением может произойти разрушение ткани. В сатиновых тканях более редкое перекрытие нитей (через четыре и более), поэтому стеклотекстолит на их основе прочнее и лучше работает в конструкциях. Кордовые ткани имеют усиленные нити основы и тонкие, редко расположенные нити утка. При получении изделий усиленные нити основы укладываются в направлении, совпадающем с деформацией, и воспринимают растягивающие нагрузки. В поперечном направлении прочность значительно ниже, т.е. материал анизотропен. При многослойной перекрестной укладке пропитанных тканей можно получить равнопрочный стеклопластик.

Материал СВМ представляет собой стекловолокнистый анизотропный материал, в котором стеклянные нити сразу по выходе из фильер, склеиваются между собой в виде стеклянного шпона и затем укладываются как в фанере. Связующие могут быть различными. СВМ является конструкционным материалом с большой жесткостью и высокой ударной вязкостью.

Длительно стеклопластики могут работать при температурах до 400 °С, однако кратковременно в течение нескольких десятков секунд стеклопластики выдерживают несколько тысяч градусов. Стеклопластики обладают высокой демпфирующей способностью, хорошо работают при вибрационных нагрузках. Некоторые стеклопластики обладают выносливостью при изгибе до $1,5 \cdot 10^8$ циклов и высокой прочностью (больше, чем у металлов).

Из стеклопластиков изготавливают несущие детали летательных аппаратов, кузова и кабины автомашин, кожухи, контейнеры и т.д.

Эластомеры. Полиуретановые эластомеры.

Твёрдость по Шору – 400 – 600

Модуль упругости 100 % – 1,6 – 26 МПа

Модуль упругости 300 % – 2,4 – 35 МПа

Прочность на растяжение – 13 – 52 МПа

Удлинение при разрыве – 250 – 600 %

Прочность на раздир – 30 – 110 Н/м

Эластичность по отскоку – 20 – 65 %

Истираемость – 20 – 130 мм

Плотность – 1,1 – 1,25

Эластомеры – полиуретановые эластомеры представляют собой каучукоподобный материал. Высокая прочность, износостойкость, эластичность, абразивостойкость и ряд других качеств позволяют с большим эффектом использовать этот материал практически во всех отраслях промышленности и сельского хозяйства взамен резины, традиционных пластмасс, а в ряде случаев и металлов.

7.2.3.2.3 Пластмассы с волокнистыми наполнителями

Волокниты представляют собой композиции из волокнистого наполнителя в виде очесов хлопка, пропитанного фенол-формальдегидным связующим.

Прессматериал волокнита является грубой и жесткой массой, из которой нельзя прессовать мелкогабаритные, тонкостенные детали. Волокниты применяют для деталей общего назначения с повышенной устойчивостью к ударным нагрузкам, работающим на изгиб и кручение (рукоятки, стойки, шкивы, маховики и т. д.)

Асбоволокниты содержат наполнитель асбест – волокнистый минерал, расщепляющийся на тонкое волокно (диаметром 0,5 мкм). Состав хризотилового асбеста $3\text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Связующим служит в основном фенольно-формальдегидная

смола. Преимуществом асболокнитов является повышенная теплостойкость (свыше 200 °С), ударопрочность, устойчивость к кислым средам и фрикционные свойства; как диэлектрики их применяют для тока с низкими частотами. Асболокниты используются в качестве материала тормозных устройств (колодки, накладки, диски подъемных кранов, вагонов, автомобилей, экскаваторов), из них изготавливают фрикционные ролики, контактные панели, коллекторы электрических машин и т. д.

Стекловолокниты – это композиции, состоящие из связующего – синтетической смолы и стекловолокнутого наполнителя. Стекловолокно получается путем продавливания расплавленной стекломассы через фильеры (отверстия в дне электропечи). Применяется непрерывное или короткое стекловолокно, причем прочность непрерывного волокна выше в 3,5 раза, чем короткого. Прочность стекловолокна резко возрастает с уменьшением его диаметра (вследствие влияния неоднородностей и трещин, возникающих в толстых сечениях). Максимальное значение прочности наблюдается для волокна диаметром от 1 до 3 мкм. Для практических целей употребляется волокно диаметром от 5 до 20 мкм.

Стекловолокно негорюче, устойчиво к действию ультрафиолетовых лучей, химически стойко, имеет стабильные размеры. Наполнитель является армирующим элементом и воспринимает основные нагрузки при работе стеклопластика.

Стекловолокниты содержат в качестве наполнителя короткое стекловолокно. Это позволяет прессовать детали сложной формы, с металлической арматурой. Под давлением волокно раскалывается на мелкие отрезки и вместе со связующим легко заполняет все извилины формы. Материал получается с изотропными прочностными характеристиками, намного более высокими, чем у пресс-порошков и даже волокнитов. Представителем такого стекловолокнита является материал АГ-4В, который применяется для изготовления силовых электротехнических деталей (каркасы катушек и т. п.), деталей машиностроения (золотники, уплотнения насосов, перекачивающих специальные агрессивные среды, и т. д.). При использовании в качестве связующего непредельных полиэфиров стекловолокниты можно применять для крупногабаритных изделий простых форм (кузова автомашин, лодки, корпуса при-

боров и т. п.).

Свойства термореактивных пластмасс приведены в приложении Г.

7.2.3.2.4 Газонаполненные пластмассы

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 малой плотностью и высокими тепло- и звукоизоляционными характеристиками.

В зависимости от физической 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 (губчатые материалы) с открытопористой структурой, вследствие чего присутствующие в них газообразные включения свободно сообщаются друг с другом и с окружающей атмосферой.

Образование пенистой структуры достигается введением специальных газообразователей (порофоров), разлагающихся при нагревании; вспениванием жидкой смолы (эмульсии) путем продувки воздухом (азотом); самовспениванием жидких компонентов, при взаимодействии которых образуется твердая фаза и одновременно выделяются газы, вызывающие ее вспенивание.

Пенопласты применяют для теплоизоляции кабин, контейнеров, холодильников, рефрижераторов и т.д.

Получение поропластов основано на введении в композицию веществ, которые способны выкипать при нагревании или вымываться водой, образуя поры.

Поропласт обладает повышенной звукопоглощаемостью на технических частотах (до 80 %).

Свойства газонаполненных пластмасс представлены в приложении Д.

7.2.3.2.5 Антистатики и антисептики

Выпускаемые промышленностью полимеры являются диэлектриками. При изготовлении и эксплуатации изделий из полимеров на поверхности возникают и накапливаются электрические заряды. Для предотвращения этого явления используют два основных способа. Первый – в полимер вводятся различные антистатические поверхностно-активные вещества, уменьшающие поверхностное сопротивление. Такие вещества в своем химическом строении имеют кратные связи. Второй – заключается во введении в полимерную матрицу электропроводящих наполнителей. Ими могут служить как материалы, так и их соединения (серебро, никель, медь).

Антисептики предотвращают развитие в полимерных материалах различных микроорганизмов. В качестве антисептиков используют органические соединения олова, меркаптаны, кремнефтористый натрий, тетрациклин, низин, ионы металлов.

7.3 Порядок выполнения работы

7.3.1 Ознакомьтесь со всеми разделами методических указаний. Ответьте на контрольные вопросы.

7.3.2 Ознакомьтесь с коллекцией полимерных материалов и пластмассовых изделий. Опишите свойства трех представителей пластмасс различных классов.

7.3.3 Сопоставьте плотность пластмасс с плотностью цветных и черных металлов.

7.4 Контрольные вопросы

7.4.1 Что такое пластмассы?

7.4.2 Какие компоненты входят в пластмассы?

7.4.3 Что такое полимер?

7.4.4 Какими способами получают полимеры?

7.4.5 Как влияют атомы кислорода, серы, хлора, присутствующие в молекулярных цепях полимеров, на свойства материала?

7.4.6 Как меняется структура макромолекул термореактивных полимеров в процессе изготовления изделий?

7.4.7 Каково назначение наполнителей и добавок в пластмассах?

7.4.8 Как классифицируют пластмассы по назначению? Каковы достоинства и недостатки пластмасс антифрикционного назначения по сравнению с металлическими антифрикционными материалами?

7.4.9 Какие материалы называют полиолефинами, полиамидами, фторопластами, поликарбонатами, полиимидами? Каковы их основные свойства?

7.4.10 Как влияет комбинирование фторопласта с другими материалами на его свойства?

7.4.11 Какие вам известны композиционные материалы на основе фторопласта-4?

7.4.12 Какие термореактивные материалы используют для изготовления узлов трения? Каковы их характерные свойства?

7.5 Содержание отчета

7.5.1 Цель работы.

7.5.2 Записать состав и свойства основных полимерных материалов.

7.5.3 Результаты проведенных замеров твердости и прочности привести в таблице.

7.5.4 Выводы по работе.

8 Работа 8. Абразивно-стойкие материалы

8.1 Цель работы

8.1.1 Ознакомиться с абразивно-стойкими материалами.

8.1.2 Изучить структуру и свойства абразивно-стойких материалов.

8.2 Абразивное изнашивание

В настоящее время изнашивание материалов деталей машин принято подразделять по причинам, его вызывающим, в соответствии с чем разделяется на следующие виды изнашивания: абразивное, усталостное, адгезионное, коррозионно – механическое.

Абразивным называется механическое изнашивание материала детали в результате режущего или царапающего действия на него абразивных частиц, находящихся в свободном или закрепленном состоянии. Абразивные частицы, обладая большей, чем металл твердостью, разрушают поверхность деталей и резко увеличивают их износ. Частицы чаще всего бывают минерального происхождения, оксиды, продукты износа или наклепанные металлические частицы. Они имеют различную форму, часто острые грани или ребра. Основным механизмом их воздействия – резание или царапание.

Абразивное изнашивание проявляется при трении металла под нагрузкой о более твердое тело или частицы – часто минерального происхождения. Это могут быть куски руды, подвергаемой дроблению или транспортировке; каменный монолит, подвергаемый бурению; частицы песчаной пыли, попавшие в смазочный материал между трущимися поверхностями металлических деталей. Абразивное изнашивание может иметь место при трении твердой шероховатой стальной поверхности о более мягкую, например, поверхность подшипников вала.

Механизм этого вида изнашивания заключается в удалении материала с изнашиваемой поверхности: либо в виде очень мелкой стружки, либо фрагментов металла, выдавленного предварительно по сторонам пластически деформированной царапины, либо в виде дисперсных частиц, хрупко отделяющихся при однократном или многократном воздействии.

Абразивное изнашивание характерно для очень большого числа машин и механизмов, работающих в самых разнообразных условиях, когда рабочие органы оборудования непосредственно соприкасаются добываемыми, транспортируемыми и перерабатываемыми горными породами, режут грунт или почву, а также в случаях, когда твердые частицы, увлекаемые потоком воды, воздуха, газов со значительной скоростью ударяются о металлические детали.

Абразивный износ выделяется в самостоятельный вид и характеризуется как наиболее интенсивный процесс разрушения материалов. Следует отметить, что классификационные признаки пока твердо не установлены и эти классификации существенно отличаются друг от друга. В процессе абразивного изнашивания металл и поверхностные слои испытывают сложнапряженное состояние. При этом воздействие абразивов, вдавливаемых в рабочую поверхность и затем перемещающихся относительно её, характеризуется неравномерностью распределения по поверхности и сосредоточенностью в местах контакта с абразивными телами. Площадь соприкосновения каждого абразива с деталью может быть соизмерима с величиной зерна металла. В этих условиях механические и физические свойства структурных составляющих приобретают большее значение, чем общие свойства сплава, определяемые стандартными методами.

Для абразивного изнашивания при трении скольжения по монолитному абразиву характерно высокое внешнее силовое воздействие на поверхность металла. В этих условиях не все частицы абразива в виде выступов и неровностей способны разрушать металл путем микрорезания или многократного пластического деформирования: часть из них разрушается не поражая металла, но создавая предпосылки к ухудшению условий изнашивания рабочей поверхности деталей. Интенсивность изнашивания металла при трении о монолитный абразив определяет-

ся соотношением их прочностных характеристик. Высокие значения твердости и прочности абразива определяют его способность внедряться в металл и разрушать его путем резания или сжатия при взаимном перемещении. Если металл более твердый и прочный – разрушается абразив.

В механизме абразивного изнашивания велика роль не только твердости и прочности, но и устойчивости исходных структур при нагреве.

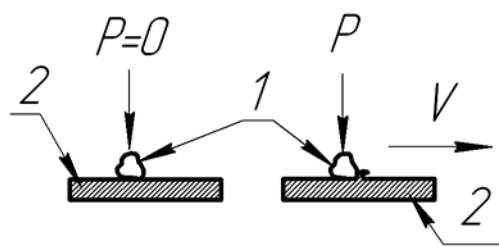
Абразивное изнашивание является одним из наиболее распространенных видов изнашивания. В транспортных и дорожных машинах более 60 % случаев износа имеют абразивный характер. Основным источником попадания абразивных частиц в сопряжения машин является окружающая среда. В 1 м³ воздуха содержится от 0,04 до 5 г пыли, на 60 – 80 % состоящей из взвешенных частиц минералов (кварц, корунд, оксиды и диоксиды кремния, соединения Al, Ca, Mg, Na и другие элементы). Частицы минералов, содержащихся в воздухе, обладают высокой твердостью (диоксид кремния SiO₂ 10780 – 11700 Н/мм², оксид алюминия 20900 – 22900 Н/мм²), что превышает твердость рабочих поверхностей большинства деталей машин.

Абразивное изнашивание может быть вызвано разными механизмами, вызывающими поверхностное разрушение, сопровождаемое однократным или многократным пластическим деформированием. Необходимым условием возможного проявления абразивного изнашивания является большая твердость в процессе трения изнашивающего тела, чем изнашиваемого.

В зависимости от условий взаимодействия детали с абразивными частицами разрушение металла может происходить:

- путем микрорезания;
- многократной пластической деформации поверхности трения;
- коррозионно-механического изнашивания.

Эти виды изнашивания зависят от соотношения твердости материала и абразива и могут быть проиллюстрированы следующими схемами (рисунок 8.1).



1 – абразивная частица; 2 – металл

Рисунок 8.1 – Виды разрушений поверхности
при абразивном изнашивании

Коррозионно-механическое изнашивание происходит в основном за счет разрушения непрерывно восстанавливающихся в атмосферных условиях оксидных пленок и выкрашивания:

- а) при микрорезании – $H_{\mu} < H_a$;
 - б) при пластическом оттеснении – $H_{\mu} < 0,6 H_a$;
 - в) при коррозионно-механическом износе – $H_{\mu} > 0,8 H_a$,
- где H_{μ} – твердость материала образца;
 H_a – твердость абразива.

8.3 Твердость по Моосу

Твердость каменных материалов оценивают шкалой Мооса, представленной десятью минералами, из которых каждый последующий своим острым концом царапает все предыдущие. Эта шкала включает минералы в порядке возрастающей твердости от 1 до 10:

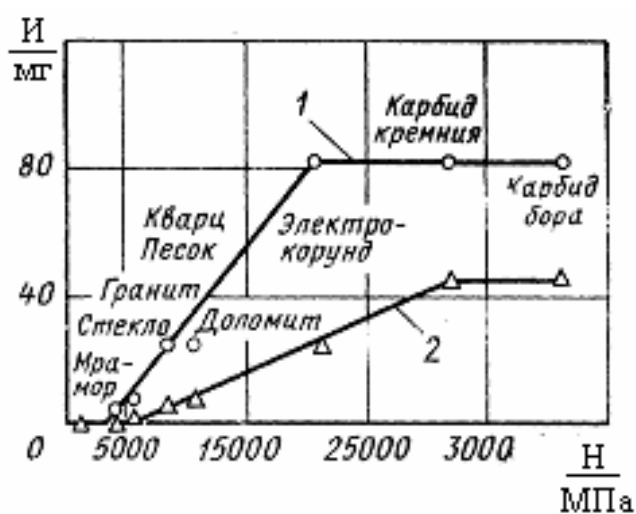
- тальк $Mg_3 [Si_4 O_{10}][OH]_2$ – легко царапается ногтем;
- гипс $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ – царапается ногтем;
- кальцит $CaCO_3$ – легко царапается стальным ножом;

- флюорит (плавиковый шпат) CaF_2 – царапается стальным ножом под небольшим нажатием;
- апатит $\text{Ca}_5 [\text{PO}_4]_3 \text{F}$ – царапается ножом под сильным нажимом;
- ортоклаз $\text{K}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$, кварц SiO_2 , топаз $\text{Al}_2[\text{Si}_4\text{O}][\text{F},\text{OH}]_2$, корунд Al_2O_3 , алмаз C – легко царапают стекло, применяются в качестве абразивных (истирающих и шлифующих) материалов.

Твердость древесины, металлов, бетона и некоторых других строительных материалов определяют путем вдавливания в них стального шарика или твердого наконечника (в виде конуса или пирамиды). В результате испытания вычисляют твердость $\text{HB} = P/F$, где F – площадь поверхности отпечатка.

8.4 Влияние твердости испытуемого материала на износ

Согласно многочисленным данным, твердость абразива существенно влияет на износ и природу изнашивания при скольжении. Результаты исследования влияния твердости абразива на закономерность ударно-абразивного изнашивания приведены на рисунке 8.2.



(1 – $\text{HV} = 2400$ МПа; 2 – $\text{HV} = 5870$ МПа)

Рисунок 8.2 – Зависимость износа стали от твердости материала

Испытания проводили при ударе по незакрепленному абразиву, твердость которого изменялась от 1100 до 42 500 МПа (таблица 8.1). Это позволило проследить изменение износа при более чем 40-кратном изменении твердости абразива. В опытах использовали абразив одной зернистости. Естественные абразивные материалы использовали в виде крошки после дробления монолита породы. Дробленую породу рассеивали по фракциям. Для опыта отбирали частицы, которые задерживались на сите с размером стороны ячейки 630 мкм, что соответствует стандартной зернистости 63 (ГОСТ 3647 – 80).

Таблица 8.1 – Испытания при ударе по незакрепленному абразиву

Абразив	Твердость по Моосу	Микро-твердость, МПа	Предел прочности, МПа	Форма зерен
Мрамор	3,2	1100	64,0	Изометрическая с тупыми углами
Доломит	3,5 – 4	3250 – 4150	80,0 – 320,0	Изометрическая с округлой формой
Стекло	–	5850	–	Изометрическая с острыми гранями
Гранит	6,54	8300	80,0 – 00,0	Изометрическая с острыми углами
Кварц. песок	7	10000 – 11 000	–	Окатанная
Электрокорунд	9	10 000 – 22 000	–	Изометрическая с тупыми углами
Карбид кремния	–	29 000 – 35 000	–	Многогранная, неправильная с острыми и тупыми углами
Карбид бора	–	40 000 – 42 500	–	Многогранная, неправильная с острыми и тупыми углами

Частицы в результате дробления породы приобретают неправильную форму – с тупыми или острыми углами при вершинах, с гладкой или шероховатой поверхностью. Так, при дроблении доломита образуются частицы округлой формы, частицы гранита всегда имеют острые грани. Характер воздействия абразивных частиц на поверхность изнашивания определяется не только твердостью, но также формой и микрогеометрией их поверхности.

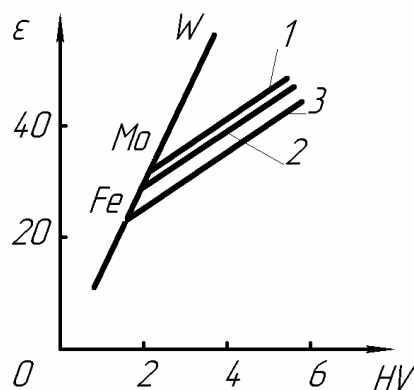
При увеличении твердости абразива до 5850 МПа износа образцов из закаленной стали 45 практически не наблюдается. При дальнейшем увеличении твердости абразива износ увеличивается пропорционально твердости абразива.

Интенсивность абразивного изнашивания прямо пропорциональна твердости H_a абразивных частиц и обратно пропорциональна твердости H_z поверхности трения. Материалы высокой твердости обладают повышенной абразивной износостойкостью.

Критическое значение отношения $h_{кр}$ (глубины внедрения абразивной частицы в изнашиваемый материал) к радиусу закругления частицы r приводит к микрорезанию:

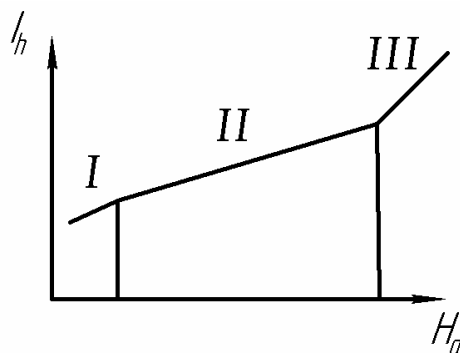
$$\frac{h_{кр}}{r} \geq \frac{1 - (2\tau / \sigma_T)}{2}.$$

Количественная зависимость абразивного изнашивания от твердости абразива и твердости изнашиваемого материала представлена на рисунках 8.3 и 8.4.



1 – сталь X12; 2 – сталь Y12; 3 – сталь 40

Рисунок 8.3 – Зависимость относительной износостойкости металлов от их твердости



$$I - H_a < H_{\mu}; \quad II - H_a = H_{\mu}; \quad III - H_a > H_{\mu}$$

Рисунок 8.4 – Влияние твердости абразива на интенсивность изнашивания материала детали

Трение о закрепленный абразив (монокит) сопровождается изнашиванием металла и разрушением самого абразива путем дробления и скола частиц (рисунок 8.5). Это обуславливает обновление изнашивающей способности абразива по отношению к металлу.

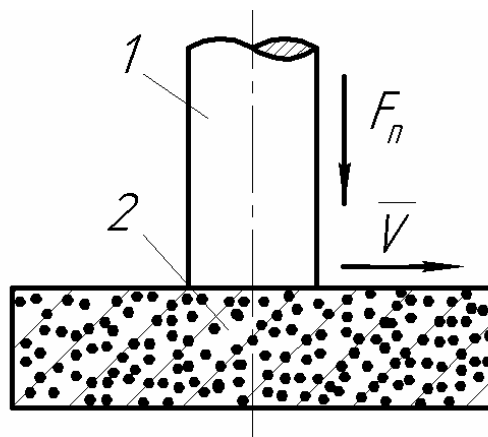


Рисунок 8.5 – Схема изнашивания индентора 1
об абразивный монокит 2

При таком взаимодействии металл-абразив проявляется прочностная основа. Если металл будет более твердым и прочным – разрушаться будет абразив, а наоборот – будет происходить резание и деформирование металла.

Основной признак такого подвида абразивного изнашивания – наличие на металлической поверхности хорошо различимых рисок (царапин) и углублений различной протяженности, но всегда ориентированных в направлении движения металла или абразива (рисунок 8.6).

Интенсивность изнашивания металла можно выразить в функциональном виде:

$$I_h = \varphi(H_a, H_\mu, \sigma_\mu, \sigma_a, F_n, T),$$

где H_a – твердость абразива;

H_μ – твердость материала образца;

σ_μ – прочность материала образца;

σ_a – прочность абразива;

F_n – нормальная нагрузка;

T – температура на поверхности детали.

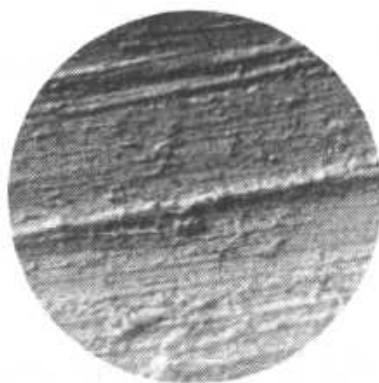
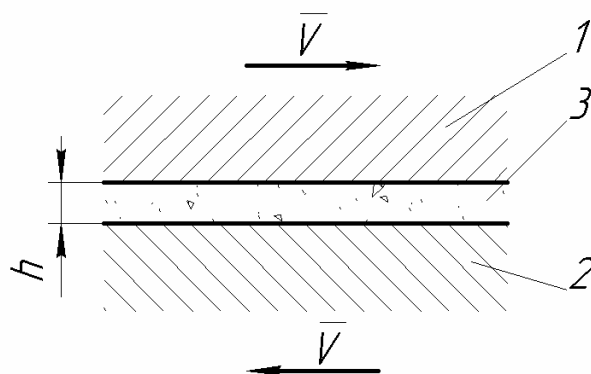


Рисунок 8.6 – Топография поверхности трения при изнашивании материала о закрепленный абразив (материал – сталь Ст3, x10)

Изнашивание незакрепленными абразивными частицами обычно наступает при динамическом контактировании металлических поверхностей 1 и 2, когда между ними попадают абразивные или иные твердые частицы 3 (рисунок 8.7).

При такой схеме твердые частицы присутствуют в виде абразивной прослойки, препятствующей полному сближению контактирующих поверхностей.



1, 2 – металлические поверхности; 3 – твердые частицы

Рисунок 8.7 – Изнашивание металлических поверхностей
в абразивной прослойке

В абразивной прослойке твердые частицы могут ударяться своими гранями о металлическую поверхность, скользить, шаржировать или вращаться, вызывая на ней углубления, язвы или царапины.

Изнашивание в абразивной прослойке происходит в узлах и сочленениях, чаще всего в соединениях вал-втулка, в различных машинах и механизмах.

При движении деталей машин в массе незакрепленных абразивных частиц силовое воздействие на контакте отдельно взятой частицы и детали будет аналогично воздействию, наблюдаемому в рассмотренных ранее подвидах абразивного изнашивания (рисунок 8.8). Абразивная частица будет совершать по поверхности детали перемещения, сопровождаемые микрорезанием или пластическим деформированием детали.

Условия изнашивания при трении в абразивной массе по внешнему силовому воздействию на контакте существенно отличаются от условий при других подвидах абразивного изнашивания: абразивная масса податлива; сопротивление перемещению деталей в ней гораздо ниже, чем при других подвидах абразивного изнашивания; абразивные частицы будут оттесняться деталью с пути перемещения; усилие на контакте будет определяться скоростью движения детали в абразивной массе, плотностью этой массы, размером и твердостью ее частиц, а также наличием жидкой среды в массе абразива.

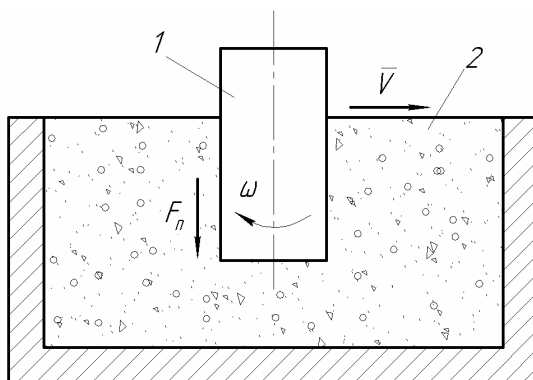


Рисунок 8.8 – Схема изнашивания образца 1 в абразивной массе 2

Известны многочисленные примеры изнашивания деталей машин, механизмов и инструментов, вызванного ударом по закрепленному (монокристаллическому) или незакрепленному абразиву в виде свободно расположенных на твердой поверхности частиц или глыб породы (рисунок 8.9).

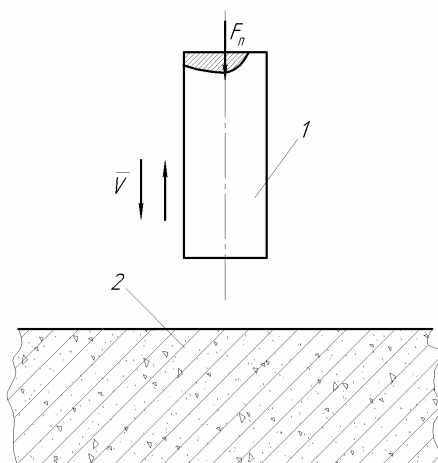


Рисунок 8.9 – Схема воздействия образца 1 при ударе по абразиву (монокристаллическому) 2

Прямое внедрение твердой частицы в образец под действием удара создает на нем углубление в виде лунки, приближенно копирующее геометрию частицы.

Газоабразивному изнашиванию присуще изнашивание свободными абразивными частицами, увлекаемыми воздушным (газовым) потоком, гравитационными силами или центробежной силой в центробежных ускорителях абразивных частиц (рисунок 8.10). Оно наблюдается на деталях пескоструйных аппаратов, струйных

мельниц, компрессорах, промышленных вентиляторах, нагнетателях, деталях, эксплуатирующихся в запыленном потоке, и т.д.

При гидроабразивном изнашивании носителем абразивных частиц является жидкость. Поэтому интенсивность гидроабразивного изнашивания зависит от факторов, управляющих формированием процесса изнашивания (скорость, масса частиц, угол атаки и др.) с учетом разупрочняющего действия жидкой среды на поверхностный слой детали. Этому виду изнашивания подвергаются детали песковых, рефулерных насосов, гидротурбин и многочисленного горнообогатительного оборудования (гидроциклонов, флотационных машин, сепараторов, пульпопроводов и др.).

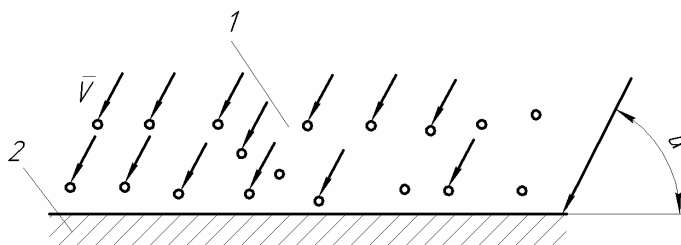


Рисунок 8.10 – Схема воздействия газозабразивного потока 1
на изнашиваемую поверхность 2

Закономерности этого сложного процесса исследовали ряд отечественных и зарубежных ученых (СП. Козырев, М.М. Тененбаум, Е. Кригель, Г. Финне и др.). Силовая схема взаимодействия частиц и среды с поверхностью детали такая же, как и при газозабразивном изнашивании, т.е. решающую роль в этом процессе играет угол атаки.

8.5 Закономерности сопротивляемости сталей и сплавов абразивному изнашиванию

Бесконечное многообразие сплавов и их структурного состояния, связанное с возможностью легирования, термической и других видов обработки, делает необходимым разделение их на определенные группы по любым признакам (химсостав, термообработка и т.д.), однако, наиболее логичным является разделение на системы легирования.

Ниже представлены закономерности сопротивляемости нелегированных сталей и сплавов (система Fe – C) абразивному изнашиванию. Нелегированные углеродистые стали и сплавы не только являются основой химического состава большинства износостойких при абразивном изнашивании материалов, но и сами широко используются в качестве деталей многих машин и механизмов, подверженных интенсивному абразивному воздействию.

Большинство исследователей основную роль в сопротивляемости сталей и сплавов абразивному изнашиванию отводят карбидам – наиболее твердой составляющей структуры. Однако, как показано в работе [1], не меньшее значение имеет металлическая матрица, которая сама должна противостоять воздействию абразивных частиц и прочно удерживать карбиды, не допуская их выкраивания.

В принципе, все многообразие железоуглеродистых сплавов основано на сочетании карбидов и трех типов матриц: феррита, мартенсита и аустенита. Не являются исключением и промежуточные структуры (перлит, сорбит и троостит), т.к. они представляют собой смесь феррита с карбидами различной степени дисперсности. Для выяснения особенностей сопротивляемости углеродистых сталей и сплавов абразивному изнашиванию в максимально широком диапазоне содержания углерода исследованы железоуглеродистые сплавы от практически чистого железа до содержания углерода 4,3 % при вариации всех возможных типов структурного состояния металлической матрицы. При этом оценивался уровень сопротивляемости абразивному изнашиванию всего многообразия сплавов системы Fe-C.

Ферритные сплавы. Повышение содержания карбидной фазы в ферритной матрице (отожженное состояние) естественно увеличивает твердость сплавов. Растет при этом и износостойкость, но значительно менее интенсивно, чем износостойкость чистых металлов. Поэтому зависимость $\epsilon = f(HV)$ для отожженных железоуглеродистых сталей и сплавов находится значительно правее линии чистых металлов (карбиды более существенно повышают твердость, чем износостойкость) и не является прямой.

При анализе зависимости $\epsilon = f(HV)$ для сплавов с ферритной основой очевидно влияние на их износостойкость размера карбидной фазы и ее связи с металлической матрицей. Мелкие карбиды более интенсивно повышают сопротивляемость изнашиванию ферритных сплавов (цементит в составе перлита и избыточный цементит в сплавах с содержанием углерода лишь немногим выше его концентрации в эвтектоиде). В этом диапазоне содержания углерода (до стали У12) зависимость $s = f(HV)$ идет достаточно круто вверх. Появление более крупных избыточных карбидов при дальнейшем увеличении содержания углерода также приводит к повышению твердости, однако износостойкость увеличивается уже менее интенсивно из-за поломок и выкраивания крупных карбидов (ферритная матрица не способна их прочно удерживать). Зависимость $\epsilon = f(HV)$ при этом существенно отклоняется от прямой в сторону меньших значений износостойкости, что объясняет сравнительно низкую износостойкость белых нелегированных чугунов.

Износостойкость мартенсита. Установлено, что и твердость, и износостойкость мартенсита однозначно зависят от содержания в нем углерода. Причем, не имеет значения, чем вызвано снижение твердости мартенсита – недостаточным содержанием углерода (закалка без отпуска мало- и среднеуглеродистых сталей) или отпуском закаленных углеродистых (до У8) сталей.

Износостойкость сталей в мартенситном состоянии (отпуск до 300 °С) значительно выше, чем с промежуточными структурами. Преобразование типа основы из мартенсита в троостит резко снижает износостойкость. При дальнейшем изменении структуры – троостит, сорбит, перлит (температура отпуска выше

300 °C) – сопротивляемость изнашиванию продолжает уменьшаться пропорционально снижению твердости, но менее интенсивно.

Результаты исследования износостойкости сталей после закалки и отпуска позволяют обосновать принципиально новый подход к выбору термообработки деталей, подверженных интенсивному абразивному изнашиванию.

Ранее считалось, что низкий отпуск, приводящий к существенному увеличению пластичности и вязкости закаленных сталей, практически не влияет на их сопротивляемость изнашиванию. В действительности наиболее интенсивно износостойкость снижается именно при низком отпуске, хотя твердость при этом падает незначительно. Следовательно, при изготовлении деталей, работающих в условиях интенсивного абразивного изнашивания, температура отпуска должна быть как можно ниже, а при возможности отпуск не следует назначать вообще.

Сплавы со структурой мартенсит + карбиды. Износостойкость всех закаленных на мартенсит заэвтектоидных сплавов с содержанием углерода до 4,3 % одинакова и находится на одном уровне с износостойкостью закаленной стали У8. Несмотря на более высокую, чем у мартенсита, твердость цементит не увеличивает износостойкость закаленных заэвтектоидных сталей и чугунов, что связано с упрочнением мартенсита в процессе изнашивания. При этом наибольшей способностью к упрочнению обладает структура неотпущенного мартенсита. Отпуск, приводящий к выделению углерода из мартенсита, заметно снижает его способность к упрочнению. Поэтому упрочненный в процессе изнашивания неотпущенный мартенсит обладает износостойкостью, равной цементиту, несмотря на несколько большую исходную твердость последнего. Это хорошо согласуется с производственным опытом: белые чугуны не обладают высокой износостойкостью ни в отожженном, ни в закаленном состояниях. Их применение малооправдано как с точки зрения износостойкости, так и эксплуатационной надежности в связи с чрезвычайной хрупкостью, а отмеченная во многих работах высокая износостойкость легированных чугунов обусловлена, вероятно, более твердыми, чем цементит, карбидами.

Остаточный аустенит. Влияние остаточного аустенита (такая структура может быть получена при закалке заэвтектоидных сплавов от температур, значительно превышающих A_{ci}) на способность железоуглеродистых сплавов сопротивляться абразивному изнашиванию четко проявляется на сплавах, структура которых после соответствующей термической обработки приобретает максимально возможное количество остаточного аустенита без избыточных карбидов. Установлено, что с повышением температуры закалки твердость заэвтектоидных сплавов снижается из-за увеличения в структуре количества остаточного аустенита. Износостойкость при этом, напротив, возрастает. Наивысшая износостойкость достигается при закалке от 800 °С сплава с содержанием углерода 2,0 %, когда в структуре присутствует максимально возможное количество остаточного аустенита.

Таким образом, из всех структур термообработанных железоуглеродистых сплавов максимальной износостойкостью обладает остаточный аустенит, несмотря на свою невысокую исходную твердость, которая значительно ниже твердости как мартенсита, так и цементита. Сплавы с содержанием углерода менее 2,0 % после закалки на максимально возможное для них количество аустенита содержат большее количество мартенсита. Их твердость при этом выше, а износостойкость ниже.

При закалке сплавов с содержанием углерода более 2,0 % от максимально возможной температуры в их структуре, наряду с аустенитом, присутствует некоторое количество цементита, что также снижает износостойкость, несмотря на повышение твердости сплава.

Износ сплавов ΔP после различных видов термообработки приведён в таблице 8.2.

Таблица 8.2 – Закономерности сопротивляемости сталей и сплавов после различных видов термообработки.
Время испытания 10 мин. Круг – 25А 25Н СТ26 К35МИСБ

Материал	Режим ТО	HRC (сред- нее) 3-х обр.	Диаметр образца, мм				Масса образца, г		Износ, г
			до трения		после трения		Р ₁ . (до тре- ния)	Р ₂ , (после трения)	ΔР
			Д1	Д2	Д1	Д2			
Сталь цемен- тованная У12 борированная	Закалка в воду – 780 °С. Отпуск – 180-200 °С 1 час.	62	–	–	–	–	–	–	1,81845
ХВГ	Закалка – 820 °С, 3 мин, масло. Отпуск – 108 °С, 30 мин, 2 раза.	61	200,75	200,85	200,75	200,8	14,21115	12,17090	2,04025
Х12Ф1	Закалка 820 °С – 3 мин, 1050 °С – 3 мин, масло, отпуск 180 °С – 30 мин.	60,8	200,75	200,8	200,75	200,8	14,54770	12,91515	1,63255
Р6М5	Пред. нагрев 1100 °С, 2 мин – 1220 °С, закалка в соляной ванне, отпуск 580 °С, 1 ч – 2 раза.	65,1	200,7	200,8	200,7	200,7	13,61910	13,45990	0,1592
ВК8	Спеченный	–	200,7	200,8	200,7	200,8	19,95025	19,94835	0,0019

8.6 Машина трения на абразивный износ

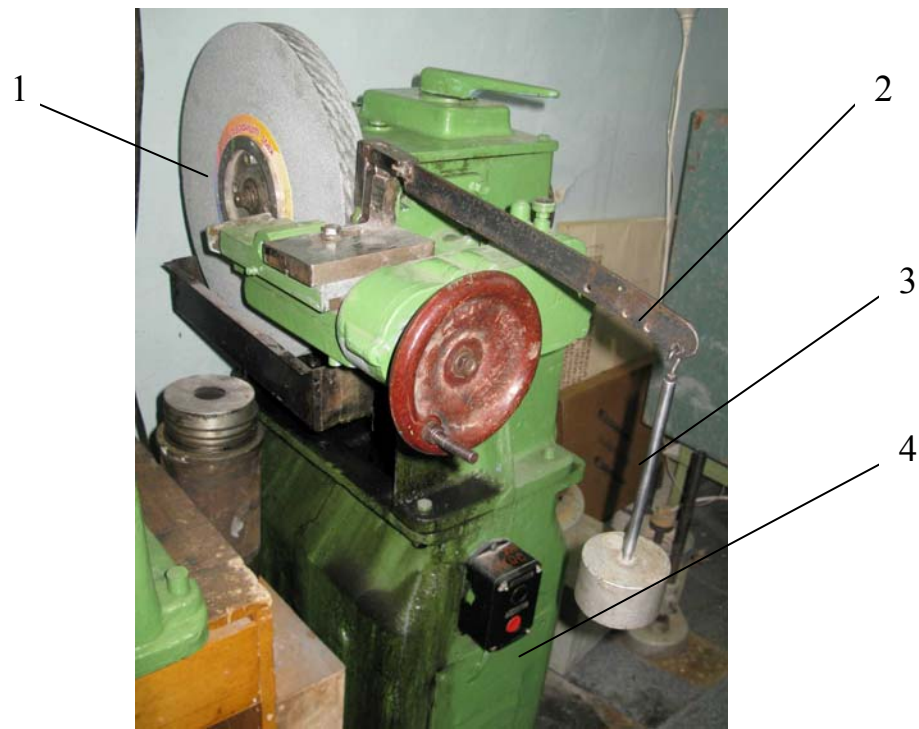
Испытания на износ проводятся на машине трения в лаборатории кафедры МТМ № 1111. Износ определяется путем взвешивания образцов до и после испытания на аналитических весах АДВ – 200, а также с помощью микрометра – линейный износ. Результаты испытания на трение некоторых марок материалов приведены в таблице 8.3.

Таблица 8.3 – Результаты испытания на трение образцов

№ образца	Материал	Твердость HRC	Износ ΔP , мг
1	У12	62-64	691
2	9ХС	62-64	675
3	30ХГСА	62-64	603
4	9ХС эл. искр.	62-64	391
5	ХВГ	64-65	321
6	Х12Ф1	62-64	281
7	У12 эл. искр.	62	227
8	ВК8	67	6

Если учесть малые габариты установки и ее компактность, а также возможность имитировать многие реальные процессы, то преимущество установки становится вполне очевидным.

Машина трения разработана на кафедре материаловедения и технологии материалов в ГОУ ОГУ (рисунок 8.11).



1 – абразивный круг 400х12724А16М28К2 ГОСТ 242-87

2 – рычаг; 3 – груз 2,2 кг; 4 – станина; $V = 36$ м/с

Рисунок 8.11 – Вид машины трения на абразивный износ

8.7 Порядок выполнения работы

8.7.1 Ознакомьтесь со всеми разделами методического указания.

8.7.2 Ознакомиться с машиной трения абразивного износа.

8.7.3 Измерить линейный износ, твердость, посмотреть микроструктуру образцов и представить результаты измерения в виде таблицы.

8.7.4 Зарисовать и описать структуры стали У10 и Р6М5.

8.8 Содержание отчета

8.8.1 Цель работы.

8.8.2 Описание и эскизы видов износа полученных образцов.

8.8.3 Описание условий работы деталей агрегатов и причины выхода их из строя (по заданию преподавателя).

8.8.4 Технологические рекомендации для устранения интенсивного износа (для одного-двух образцов).

8.8.5 Выводы по выполненной работе.

8.9 Контрольные вопросы

8.9.1 Какие вы знаете виды изнашивания?

8.9.2 Три стадии изнашивания и их характеристики.

8.9.3 Какими параметрами характеризуется износ?

8.9.4 Как определяются износостойкость, интенсивность изнашивания, коэффициент трения?

8.9.5 Как взаимосвязаны интенсивность изнашивания и коэффициент трения?

Список использованных источников

1 Материаловедение: учебник для вузов / Б. Н. Арзамасов [и др.]; под общ. ред. Б. Н. Арзамасова, Г. Г. Мухина. – 3 изд., переработ. и доп. - М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. – 648 с.

2 Геллер, Ю.А. Материаловедение: учебное пособие для вузов / Ю.А. Геллер, А.Г. Рахштадт; под ред. А.Г. Рахштадта. – М.: Металлургия, 1989. – 454 с.

3 Материаловедение и технология металлов: учебник для вузов / Г.П. Фетисов [и др.]; под ред. Г.П. Фетисова. – М.: Высшая школа, 2002. – 638 с.

4 Технологические процессы в машиностроении / С.И. Богодухов, Е.В. Бондаренко, А.Г. Схиртладзе, Р.М. Сулейманов, А.Д. Проскурин. – М.: Машиностроение, 2009. – 640 с.

5 Богодухов, С. И. Курс материаловедения в вопросах и ответах: учебное пособие / С. И. Богодухов, В. Ф. Гребенюк, А. В. Синюхин. – 2-е изд. – М.: Машиностроение, 2005. – 288 с.

6 Гуляев, А.П. Металловедение: учебник для вузов / А.П. Гуляев. – М.: Металлургия, 1986. – 542с

7 Гаркунов, Д.Н. Триботехника / Д.Н. Гаркунов – М.: Машиностроение, 2002. – 424 с.

8 Костин, П.П. Физико-механические испытания металлов, сплавов и неметаллических материалов / П.П. Костин. – М.: Машиностроение, 1990. – 256 с.

9 Конструкционные материалы: справочник / Б.Н. Арзамасов [и др.]; под общ. ред. Б.Н. Арзамасова. – М: Машиностроение, 1990. – 688 с.

10 Марочник сталей и сплавов / М.И. Колосов [и др.]; под общ. ред. А.С. Зубченко. – М.: Машиностроение, 2001. – 672 с.

11 Марукович, Е.И. Износостойкие сплавы / Е.И. Марукович, М.И. Карпенко. – М.: Машиностроение, 2005. – 428 с.

12 Основы проектирования заготовок в автоматизированном машиностроении: учебное пособие / С. И. Богодухов, А. Г. Схиртладзе, Р. М. Сулейманов, Е. С. Козик. – М: Машиностроение, 2009. – 432 с.

13 Порошковые легированные стали / В.Н. Анциферов, В.Б. Акименко, Л.М. Гревнов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия. 1991. – 318 с.

14 Получение и свойства порошковых материалов: учебное пособие / С.И. Богодухов, А.Д. Проскурин, Е.С. Козик. – Оренбург: ИПК ГОУ ОГУ, 2009. – 180 с.

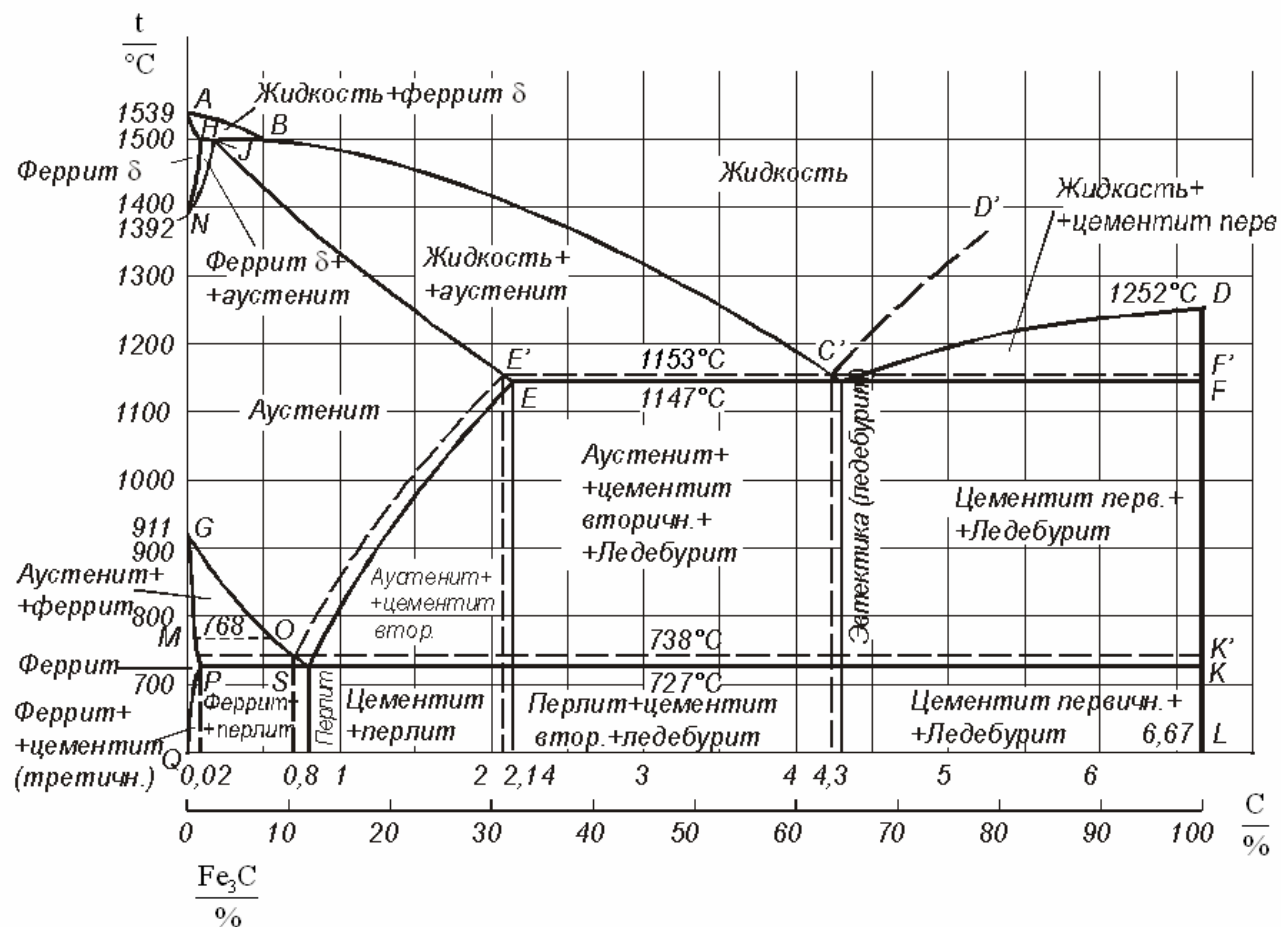
15 Справочник по триботехнике / под общ. ред. М. Хебды, А. Чичинадзе. - М.: Машиностроение, 1989. Т.1 – 400 с.

16 Чугун: справочник / под ред. А.Д. Шермана и А.А.Жукова. – М.: Металлургия, 1991. – 576 с.

- 17 Ландау, Л. Теория упругости / Л. Ландау, М. Лифшиц. – М.: Наука, 1987. – 248 с.
- 18 Musil, J. Vlček / J. Musil, H. Zeman, F. Kunc. – J./Mater. Sci. Eng, 2002. – A340, 281.
- 19 Veprek, S. D., He J.L. / S. Veprek, S. Mukherjee, H. Mannling. – Mater. Sci. Eng, 2002 – A340, 292.
- 20 Золотаревский, В.С. Механические свойства металлов / В.С. Золотаревский. – М.: МИСиС, 1998. – 400 с.
- 21 <http://www.csm-instruments.com/>

Приложение А (справочное)

Диаграммы состояний железо-цементит и железо-углерод



Сплошные линии – метастабильная система железо-цементит (Fe – Fe₃C),
пунктирные линии – стабильная система железо-углерод (Fe-C)

Приложение Б (справочное)

Свойства неполярных термопластов

Таблица Б.1

Материал	Плотность, кг/м ³	Рабочая температура, °С		Предел прочности, МПа, при		Модуль упругости при изгибе, МПа	Относительное удлинение при разрыве, %	Ударная вязкость, кДж/м ²	Диэлектрическая проницаемость при частоте тока 10 ⁶ Гц	Удельное объемное сопротивление, Ом · м	Тангенс угла диэлектрических потерь × 10 ⁻⁴ при частоте тока 10 ⁶ Гц
		максимальная	минимальная	растяжении	изгибе						
Полиэтилен: ПЭВД	913-929	105	-70 и ниже	12-17	12-17	120-260	15-20	Не ломается	2,2-2,3	10 ¹⁵	2-3
ПЭНД	949-953	125	-70 и ниже	20-38	20-38	650-750	10-12	2-150	2,1-2,4	10 ¹⁵	2-5
Полипропилен	900-910	150	-15	25	70-80	—	100-400	33-800	2,2	до 10 ¹⁷	2-5
Полистирол	1050-1080	90	35	65-105	65-105	2700	1,5	16-20	2,5-2,7	10 ¹⁵	3-4
Фторопласт-4	2150-2240	250	14-35	11-14	11-14	470-850	250-500	10-100	1,9-2,2	до 10 ¹⁸	2-2,5

Приложение В (справочное)

Свойства полярных термопластов

Таблица В.1

Материал	Плотность, кг/м ³	Рабочая температура, °С		Предел прочности, МПа, при		Модуль упругости при изгибе, МПа	Относительное удлинение при разрыве, %	Ударная вязкость, кДж/м ²	Диэлектрическая проницаемость при частоте тока 10 ⁶ Гц	Удельное объемное сопротивление, Ом · м	Тангенс угла диэлектрических потерь $\times 10^{-4}$ при частоте тока 10 ⁶ Гц
		максимальная	минимальная	растяжении	изгибе						
Фторопласт-3	2090-2160	150	-195	30-45	60-80	1450	20-200	20-160	2,5-2,7	$1,2 \times 10^{16}$	0,01
Поливинилхлорид	1350-1430	90	до -40	40-120	80-120	3000	5-100	80-125	3,1-3,4	10^{15}	0,018
Полиметилкрилат	1200	60	-60	63-100	90-120	—	2,5-20	8-18	3,5-4,5	10^{12}	0,02-0,08
Полиамиды	1100-1140	60 - 110	до -60	38 - 60	35-70	1500	70-280	80-125	—	—	—
Поликарбонат (дифлон)	1200	130-140	до -135	70	24-120	—	—	150	—	—	—

Приложение Г (справочное)

Физико-механические свойства термореактивных пластмасс

Таблица Г.1

Пластмассы	Плотность, кг/м ³	Предельные температуры длительной работы, °С	Предел прочности, МПа, при			Относитель- ное удлине- ние при раз- рыве, %	Ударная вяз- кость, кДж/м ²	Модуль уп- ругости при растяжении, МПа	Твердость НВ
			растяже- нии	сжатии	изгибе				
Порошковые									
Фенопласты (карболиты)	1400	110	30-60	150-190	50-72	0,3-0,5	4-6	7000-9000	300
Аминопласты	1400-1550	300	40-50	120-190	60-80	0,4-0,7	5-6	–	400
Волокнистые									
Волокнит	1350-1450	110	30-60	80-150	50-80	1-3	9-104	8500	250- 270
Асбоволокнит	1950	200	–	110	70	3-4	20	18000	300
Стекловолокнит	1700-1900	280	80-500	130	120-250	1-3	25-150	–	–
Слоистые									
Гетинакс	1300-1400	150	80-100	160-290	80-100	1-3	12-25	10000	–
Текстолит	1400	125	65-100	120-150	120-160	1-3	30	До 10000	–
Асботекстолит	1600	190	55	–	–	–	20-25	20000	–
ДСП	1350	140-200	180-300	100-180	140-280	–	80-90	До 30000	–
СВАМ	1800-2000	200	350-1000	350-450	500-700	–	180-200	35000	–
Стеклотекстолит	1600-1900	200-300	250-600	210-260	150-420	–	50-100	До 30000	–

Приложение Д (справочное)

Физико-механические свойства газонаполненных пластмасс

Таблица Д.1

Пенопласт	Кажущаяся плотность, кг/м ³	Рабочая температура, °С	Предел прочности, МПа,			Удлинение при разрыве, %	Ударная вязкость, кДж/м ²	Водопоглощение за 30 суток, %	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)
			при растяжении	при сжатии	при изгибе				
Пенополистирол (ПС)	25-200	От -60 до 70	0,18-3	0,13-3	0,13-1,4	2-8	0,1-1,8	0,05-2	0,044
Пенополивинилхлорид (ПХВ)	50-200	От -60 до 70	1,5-4,5	0,4-2	1,8-4	2-7	1,0-1,5	0,3	0,045
Пенополиуретан (ПУ)	60-200	От -60 до 200	1,8	0,2-3	—	—	0,4-1,5	—	0,05
Поролон	30-70	От -40 до 100	1,0-1,2	—	—	—	—	—	0,05
Пенофенопласт	200	От -60 до 160	2,0	4	—	—	0,2	—	0,05
Фенольно-каучуковые:									
ФК-20	200	До 120	1,2-1,5	3	—	6 – 8	0,8	—	0,052
ФК-20-А-20	200	До 200	0,8	2,0-2,3	—	1,5 – 2	0,5-0,7	—	0,063
Пенополисилоксан (К- 40)	25-300	До 250	—	0,5-2	—	—	0,2-0,3	—	0,045
Пенополиэпоксидный (ПЭ)	100-200	До 110	—	0,8-1,2	—	—	0,5-1,3	0,1 за 24 ч	0,032
Пенокарбамид (мипора)	20	До 130	—	0,05	—	—	—	До 500 за 24 ч	0,03