



Министерство образования Республики Беларусь

**Учреждение образования
«Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого»**

Кафедра «Материаловедение в машиностроении»

ОСНОВЫ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ И СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ

ПРАКТИКУМ

**по выполнению лабораторных работ
для студентов специальности 1-36 07 02 «Производство
изделий на основе трехмерных технологий»
дневной формы обучения**

Гомель 2021

УДК 54(075.8)
ББК 24я73
О-75

*Рекомендовано научно-методическим советом
механико-технологического факультета ГГТУ им. П. О. Сухого
(протокол № 6 от 27.04.2020 г.)*

Составители: *С. Н. Бобрышева, Н. В. Грудина*

Рецензент: зав. каф. «Металлургия и технологии обработки материалов»
ГГТУ им. П. О. Сухого канд. техн. наук, доц. *Ю. Л. Бобарикин*

Основы материаловедения и структурообразования : практикум по выполнению лаборатор. работ для студентов специальности 1-36 07 02 «Производство изделий на основе трехмерных технологий» днев. формы обучения / сост.: С. Н. Бобрышева, Н. В. Грудина. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2021. – 244 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <https://elib.gstu.by>. – Загл. с титул. экрана.

Изложены основные теоретические сведения в области материаловедения и структурообразования материалов и процессов, применяемых в аддитивных технологиях. Рассмотрена методика выполнения лабораторных работ. Рекомендован порядок их выполнения и составления отчетов.

Для студентов специальности 1-36 07 02 «Производство изделий на основе трехмерных технологий» дневной формы обучения.

**УДК 54(075.8)
ББК 24я73**

© Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», 2021

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
<i>Лабораторная работа № 1. Определение твердости и ударной вязкости материалов</i>	6
<i>Лабораторная работа № 2. Макроструктурный анализ металлов и сплавов</i>	17
<i>Лабораторная работа № 3. Микроструктурный анализ металлов и сплавов</i>	28
<i>Лабораторная работа № 4. Изучение диаграммы состояния сплавов «железо-цементит»</i>	41
<i>Лабораторная работа № 5. Изучение углеродистых сталей в равновесном состоянии</i>	49
<i>Лабораторная работа № 6. Закалка стали</i>	58
<i>Лабораторная работа № 7. Структура углеродистых сталей в неравновесном состоянии</i>	67
<i>Лабораторная работа № 8. Отпуск стали</i>	74
<i>Лабораторная работа № 9. ХТО. Цементация стали</i>	81
<i>Лабораторная работа № 10. Изучение микроструктуры чугунов</i>	91
<i>Лабораторная работа № 11. Легированные конструкционные стали</i>	103
<i>Лабораторная работа № 12. Легированные инструментальные стали</i>	117
<i>Лабораторная работа № 13. Микроструктура меди и медных сплавов</i>	134
<i>Лабораторная работа № 14. Сплавы на основе алюминия. Пластическая деформация и рекристаллизация алюминия</i>	147
<i>Лабораторная работа № 15. Идентификация термопластичных материалов</i>	156
<i>Лабораторная работа № 16. Исследование набухания, растворимости и химической стойкости полимеров</i>	168
<i>Лабораторная работа № 17. Определение вязкости растворов полимерных материалов</i>	176
<i>Лабораторная работа № 18. Определение времени жизни и времени отверждения терморезактивных полимеров</i>	186
<i>Лабораторная работа № 19. Определение гранулометрического состава наполнителя</i>	192
<i>Лабораторная работа № 20. Классификация и исследование свойств керамических материалов</i>	198

<i>Лабораторная работа № 21. Определение механических свойств материалов при статических испытаниях на растяжение.....</i>	<i>208</i>
<i>Лабораторная работа № 22. Определение твердости (микротвердости) полимерных и композиционных материалов</i>	<i>215</i>
<i>Лабораторная работа № 23. Определение ударной вязкости полимерных и композиционных материалов.....</i>	<i>235</i>
<i>Литература</i>	<i>244</i>

ВВЕДЕНИЕ

Назначение пособия – способствовать развитию навыков самостоятельного экспериментального исследования структуры, физико-химических, механических, технологических и эксплуатационных свойств компонентов и композиционных материалов (КМ), их взаимосвязи в процессе применения в аддитивных технологиях.

Практикум содержит описания лабораторных работ по определению структуры и свойств металлов, сплавов, наполнителей (волокнистых и дисперсных), не наполненных полимерных материалов (термо - и реактопластов), композиционных материалов. Каждой лабораторной работе предшествует теоретическая часть, которая знакомит студентов с понятиями, используемыми в работах, обосновывается выбор темы, объекта и метода исследования. Для каждой работы сформулирована цель, перечислены материалы, оборудование, приборы, необходимые для ее выполнения. Далее приводится описание приемов, которые используются для выполнения конкретных заданий. В конце каждой лабораторной работы дается список литературы, в которой более детально рассмотрены вопросы по представленной тематике. Для качественного выполнения работы и самоконтроля студентов предложены контрольные вопросы по каждой представленной теме. В конце практикума имеются приложения, в которых приводятся необходимые справочные материалы. Перед выполнением каждой лабораторной работы студенты должны ознакомиться с методикой ее проведения, устройством оборудования и порядком работы на нем. Студентам необходимо оформить выполненную работу в соответствии с требованиями, приведенными в практикуме. Отчет о работе должен содержать тему, цель, краткую методику эксперимента, описание оборудования и применяемых технологий. Описание оборудования и порядок выполнения работы не должны быть повторением текста настоящего лабораторного практикума. Результаты экспериментов оформляются в виде отчетов. Расчеты необходимых величин представляют с указанием исходных данных и размерностей.

Выполнение лабораторного практикума завершается сдачей оформленных работ и их защитой. Лабораторный практикум составлен в соответствии с учебной программой дисциплины «Основы материаловедения и структурообразования». Для студентов специальности «Производство изделий на основе трехмерных технологий».

Лабораторная работа № 1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТВЕРДОСТИ И УДАРНОЙ ВЯЗКОСТИ МАТЕРИАЛОВ

Цель работы: освоить методы измерения деформационно-прочностных свойств материалов.

Определение твердости является наиболее часто применяемым методом испытания материалов, т. к. не требуется изготовления специальных образцов и не происходит разрушения материала.

Твердость – это способность материала сопротивляться упругопластической деформации при внедрении в него более твердого тела.

Существуют различные методы определения твердости – вдавливанием, царапанием, упругой отдачей и др. Чаще всего при испытании на твердость производят вдавливание в испытываемый материал наконечника – индентора, изготовленного из значительно более твердого материала (алмаза, твердого сплава), чем испытываемый материал.

О твердости судят либо по глубине проникновения индентора после снятия нагрузки (твердость по Роквеллу – HRC, HRB, HRA), либо по величине отпечатка, остающегося после вдавливания индентора (твердость по Бринеллю-HB, по Виккерсу-HV, микротвердость -H). Наиболее широко применяются испытания твердости по Бринеллю и Роквеллу.

1. Определение твердости материалов по Бринеллю (ГОСТ9012-59)

Метод предложен в 1899-1900 гг. шведским инженером Бринеллем. Метод Бринелля заключается в том, что в испытываемый материал вдавливаются стальной закаленный шарик, определенного диаметра, под действием стандартизированной нагрузки. После снятия нагрузки с индентора измеряется диаметр отпечатка, и по его размеру подсчитывается условная площадь поверхности отпечатка шарика. Твердость определяется из выражения:

$$HB = \frac{P}{F} = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}; \text{ (кгс / мм}^2\text{)},$$

где P – нагрузка на шарик, кгс; D – диаметр шарика, мм; d – диаметр отпечатка, мм.

Наиболее распространенным прибором для испытания на твердость по Бринеллю является рычажный пресс типа ТШ-2. В шпindel пресса над столиком закрепляется наконечник с шариком тре-

буемого диаметра, выбирается нагрузка и время выдержки образца под нагрузкой. На столик пресса устанавливается образец. Вращая маховик, соединенный со столиком пресса, поднимают столик с образцом к индентору до упора. Инденторами могут быть стальные закаленные шарики диаметром (1; 2; 2,5; 5; 10 мм). На шарик диаметром D действует нагрузка P , от которой шарик вдавливается в испытываемый материал за период времени t на глубину h (рис. 1).

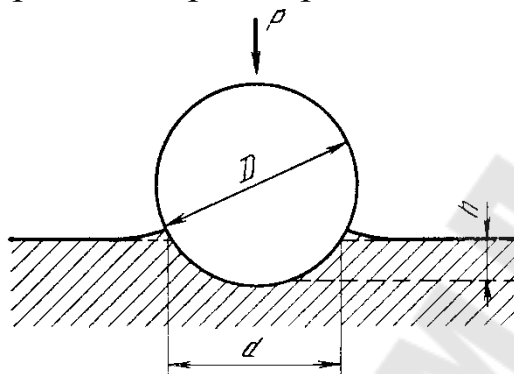


Рис. 1. Схема вдавливания стального шарика при испытании твердости по Бринеллю

Приложение и снятие нагрузки происходит автоматически при нажатии пусковой кнопки прибора. По диаметру полученной лунки d определяют НВ. Измерения d производят лупой или измерительным микроскопом МПБ-2 с точностью $\pm 0,05$ мм.

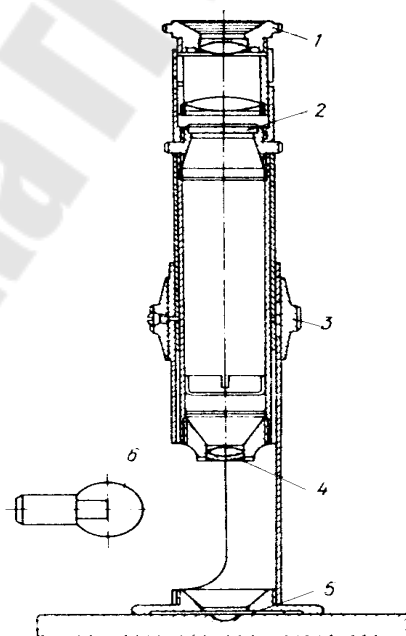


Рис. 2. Отсчетный микроскоп МПБ-2:
1 – окуляр; 2 – сетка; 3 – установочное кольцо;
4 – объектив; 5 – измеряемый отпечаток; 6 – источник света

Минимальная толщина образца должна быть не менее 10-кратной глубины отпечатка и определяется по формуле

$$S \geq h \cdot 10,$$

где S – толщина образца; h – глубина отпечатка (рис. 1).

Расстояние между центрами двух соседних отпечатков должно быть не менее $4d$, а расстояние от центра отпечатка до края образца (изделия) – не менее $2,5d$, для металлов с твердостью 35НВ эти расстояния соответственно $6d$ и $3d$.

Испытание производят с применением нагрузок, зависящих от соотношения K и D , приведенных в таблице 1.

Таблица 1

Диаметр шарика, мм	Нагрузка, P кгс; $K = \frac{P}{D^2}, \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$					
	$K=30$	$K=15$	$K=10$	$K=5$	$K=2,5$	$K=1$
1,000	30	–	10	5	2,5	1
2,000	120	–	40	20	10	4
2,500	187,5	–	62,5	31,2	15,6	6,2
5,000	750	–	250	125	62,5	25
10,000	3000	1500	1000	500	250	100

Диаметр шарика и соответствующую нагрузку следует выбирать так, чтобы диаметр отпечатка находился в пределах $0,25 D < d < 0,6 D$. Для выбора K (соотношения между нагрузкой и квадратом диаметра шарика) рекомендуется пользоваться данными таблицы 2.

Таблица 2

Металлы и сплавы	K	НВ
Железо, сталь, чугун и др. высокопрочные сплавы	30	от 96 до 450
Титан и его сплавы	15	от 50 до 220
Алюминий, медь, никель и их сплавы	10	от 32 до 200
Магний и его сплавы	5	от 16 до 100
Подшипниковые сплавы	2,5	от 8 до 50
Олово, свинец	1	от 3,2 до 20

Примечание. Поверхность образца или испытываемого изделия должна быть ровной, гладкой и свободной от окисной пленки. При подготовке поверхности образца необходимо принять меры, исключающие изменение свойств металла из-за нагрева или наклепа. Обработку поверхности образца (изделия) можно проводить шлифовкой или мелким напильником. При определении твердости ша-

риком диаметром 1 мм поверхность образца должна быть отполирована.

Диаметр отпечатка шарика должен быть измерен с помощью измерительного микроскопа с точностью до сотых долей мм. Диаметр отпечатка необходимо определять, как среднее арифметическое из двух измерений взаимно перпендикулярных диаметров.

Метод Бринелля позволяет измерять твердость от 3,2 до 450 единиц НВ стальным закаленным шариком и от 450 до 650 единиц шариком из твердого сплава.

Условия испытания: $P = 3000$ кгс, $D = 10$ мм и продолжительность выдержки в нагруженном состоянии $t=10-15$ с считаются стандартными для черных металлов. Твердость обозначается НВ, например, 270 НВ. Во всех остальных случаях, связанных с изменением условий измерения твердости, в обозначении обязательно указываются: используемый диаметр шарика, нагрузка и время выдержки. Например, при $D = 5$ мм, $P = 750$ кгс, $t = 30$ с твердость обозначается с указанием условий испытания следующим образом: 161 НВ 5/750/30.

При измерении твердости шариком из твердого сплава твердость обозначается: НВW(500 НВW).

По значению величины твердости можно определить другие механические характеристики. Например, между числами НВ и пределом прочности существует следующая примерная зависимость:

для стали с твердостью 120 – 175 НВ	$\sigma_B \approx 0,34$ НВ;
для стали с твердостью 175 – 450 НВ	$\sigma_B \approx 0,35$ НВ;
для меди, латуни, бронзы (отожженных)	$\sigma_B \approx 0,55$ НВ;
для алюминия и алюминиевых сплавов	
с твердостью 20-45НВ	$\sigma_B \approx 0,33-0,36$ НВ

и т. д.

2. Определение твердости материалов по Роквеллу (ГОСТ – 9013-59)

Испытания на твердость по Роквеллу производят вдавливанием в испытываемый образец (деталь) алмазного или твердосплавного конуса с углом при вершине 120° (шкалы А и С) или стального закаленного шарика диаметром 1,588 мм (шкала В) под действием последовательно прилагаемых предварительной (P_0) и основной (P_1) нагрузок. Общая нагрузка (рис. 3) $P=P_0+P_1$. Предварительная нагрузка во всех случаях равна 10кгс, а основная P_1 и общая P нагрузки составляют: при вдавливании стального шарика (шкала В); $P_1= 90$ кгс, $P=$

10+90=100 кгс; при вдавливании алмазного конуса (шкала С); $P_1=140$ кгс, $P=10+140=150$ кгс; при вдавливании алмазного конуса (шкала А); $P_1=50$ кгс, $P=10+50=60$ кгс.

Твердость по Роквеллу определяется измерением разности между условной максимальной глубиной проникновения индентора и остаточной глубиной его внедрения $\ll e \gg$ под действием основной нагрузки P_1 после снятия этой нагрузки, но при сохранении предварительной нагрузки P_0 :

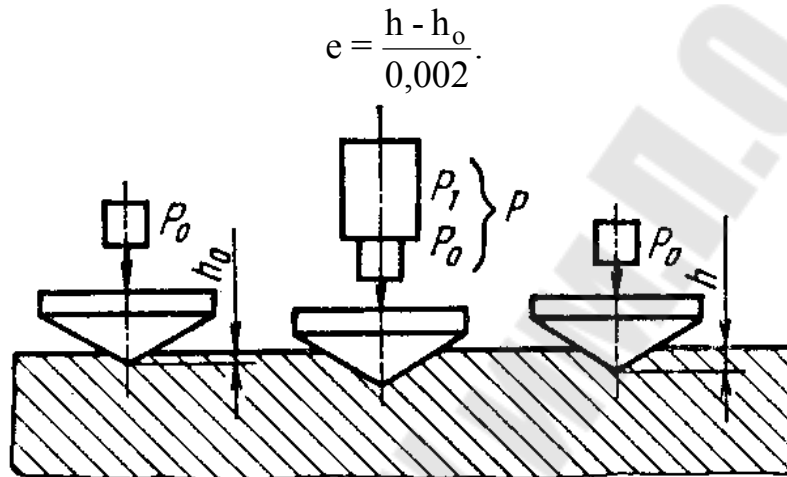


Рис. 3. Схема вдавливания наконечника при определении твердости по Роквеллу

Числа твердости по Роквеллу – числа отвлеченные и выражаются в условных единицах. За единицу твердости принята величина, соответствующая осевому перемещению индентора на 0,002 мм.

Твердость по Роквеллу обозначают HR с добавлением латинской буквы, обозначающей шкалу, по которой проводились измерения.

По шкале С измеряют твердость закаленных и отпущенных сплавов в диапазоне твердости HRC 22-68:

$$HRC = 100 - \frac{h - h_0}{0,002}$$

По шкале В измеряют твердость мягких сталей, латуней, бронз и других материалов в диапазоне твердости HRB 25-100:

$$HRB = 130 - \frac{h - h_0}{0,002}$$

По шкале А измеряют твердость самых твердых материалов в диапазоне HRA 70-85:

$$HRA = 100 - \frac{h - h_0}{0,002}$$

Характеристики измерения твердости способами Роквелла приведены в таблице 3.

На основании ГОСТа 8.064-94 проведена корректировка шкалы С и уточнены переводные числа твердости HRC в числа твердости HRC_Э, которая и используется сейчас в промышленности.

Твердость по Роквеллу измеряют на стационарных твердомерах (приборах Роквелла) с механическим и электрическим приводами (ТК-21Н, ТК-14-250).

Таблица 3

Обозначение шкалы	Форма индентора	Обозначение твердости по шкале	Нагрузка в кгс	Допускаемые пределы измерения	Примерная твердость, НВ	Область применения
А	▽	HRA	60	70 – 85	Свыше 700	Твердые сплавы, поверхность после ХТО
С	▽	HRC	150	22 – 68	250 – 700	Закаленные стали
В	○	HRB	100	25 – 100	60 – 250	Мягкие металлы и сплавы

Последовательность операций при измерении твердости на твердомерах Роквелла следующая:

1. Установить индентор и соответствующую нагрузку, включить прибор.
2. Установить образец на столик. Стрелки индикатора прибора находятся в произвольном положении.
3. Подвести образец к наконечнику таким образом, чтобы указатель маленькой стрелки индикатора совместился с красной точкой на его циферблате. На образец действует сила вдавливания $P_0 = 10$ кгс. Индентор внедрился на глубину h_0 .

Поворотом внешнего кольца индикатора устанавливаем нулевое деление шкалы С подвижного циферблата напротив указателя большой стрелки. Прибор готов к измерению твердости.

4. Включить автоматическое приложение основной нагрузки P_1 . Последнее отклонение большой стрелки фиксирует твердость на циферблате.

5. Произвести отсчет по соответствующей шкале на индикаторе и записать его в протокол испытаний.

Примечание. Поверхность образца должна быть зачищенной. Расстояние между центрами двух соседних отпечатков или расстояние до края образца должно быть не менее 3 мм. Измерения производятся не менее трех раз и принимают среднее значение.

Измерение твердости по Роквеллу получило широкое применение, вследствие простоты и быстроты измерений.

3. Определение ударной вязкости материалов (ГОСТ 9454-78)

Сопротивление материалов ударным нагрузкам характеризуется ударной вязкостью. Под ударной вязкостью следует понимать работу удара, отнесенную к начальной площади поперечного сечения образца в месте концентратора (надреза).

ГОСТ 9454 предусматривает 20 типов образцов длиной от 55 до 140 мм различного поперечного сечения (от 10 x 8 мм до 2 x 11 мм) и с различной формой концентратора (U, V, T), как показано на рис. 4.

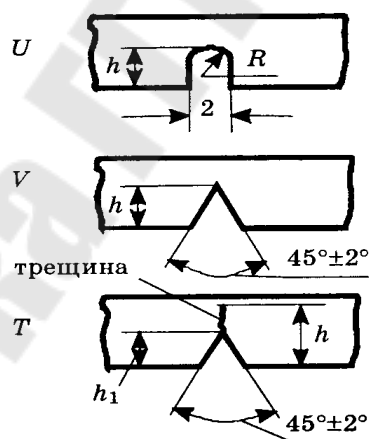


Рис. 4. Формы и размеры концентраторов

В качестве основного рекомендуется стандартный образец в виде бруска размерами 10x10x55 мм с надрезом посередине U-образной формы шириной и глубиной 2 мм с радиусом закругления 1 мм.

Ударная нагрузка и надрез в образце являются условиями, которые вызывают переход материала в хрупкое состояние, следова-

тельно ударную вязкость определяют для выявления хрупкости материалов.

Выбор вида концентратора зависит от требования к изделию:

- U – при обычных испытаниях материалов;
- V – для конструкций повышенной степени надежности (летательные аппараты, транспортные средства, трубопроводы, сосуды под давлением).

- T – для особо ответственных конструкций.

Чем острее надрез, тем сильнее действует концентратор напряжения.

Испытания проводят на маятниковых копрах. Маятник копра устанавливают в исходное положение на высоту A_0 (запас энергии K_0) и удерживают защелкой (рис. 5).

В нижней точке траектории маятника на опорах устанавливают образец так, чтобы надрез располагался с противоположной стороны ножа маятника. Освобожденный от защелки маятник свободно падает и, ударяя по образцу, разрушает его. На это расходуется часть энергии. Оставшаяся энергия поднимает маятник на некоторую высоту A_1 , что соответствует запасу энергии K_1 . Энергии маятника K_0 и K_1 , автоматически регистрируются указателями шкалы индикатора.

Ударная вязкость обозначается символом КС и вычисляется по формуле:

$$КС = \frac{K_0 - K_1}{S_0} = \frac{K}{S_0} \text{ [Дж/см}^2\text{]}$$

где K – работа удара, Дж; S_0 – начальная площадь поперечного сечения образца в месте надреза, см²; вычисляется по формуле

$$S_0 = H_1 \times B,$$

где H_1 – начальная высота рабочей части образца (в месте надреза), см; B – начальная ширина образца, см.

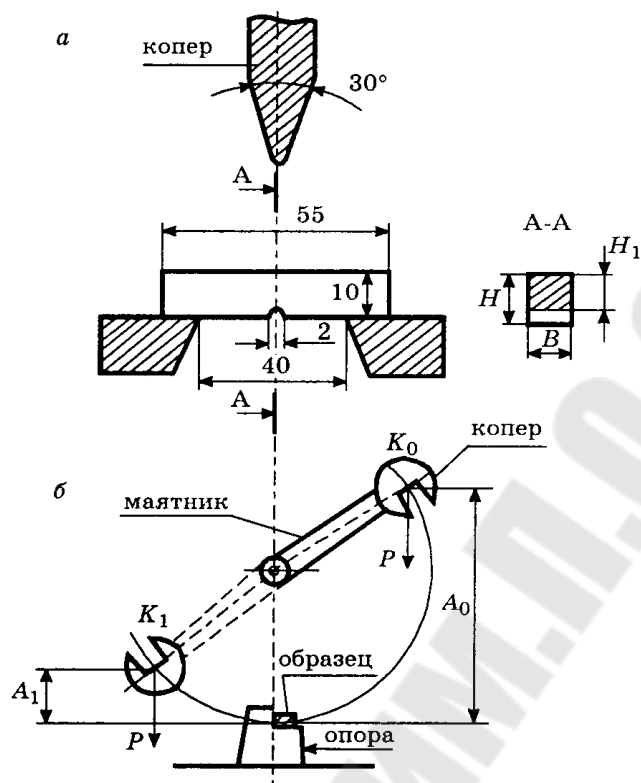


Рис. 5. Схема испытания на ударную вязкость:
 а – положение образца и маятника копра при испытании;
 б – схема работы маятникового копра

В зависимости от вида концентратора в обозначении ударной вязкости к символу КС добавляют буквы U, V или T: КСУ, КСV, КСТ. Например, КСУ=21 Дж/см²; КСТ=1,8 Кдж/м²; КСV=120 Дж/см². Стандартная размерность ударной вязкости Кдж/м² или Дж/см².

В отдельных случаях при определении ударной вязкости хрупких материалов (чугунов, сталей с твердостью более 50 HRC) допускают применение образцов с размерами 10x10x55 мм без предварительно нанесенных концентраторов, и ударная вязкость обозначается КС.

Примечание. Вид обработки материалов и сплавов влияет на ударную вязкость. Ковка и прокатка повышают ударную вязкость по сравнению с литьем. В результате отжига значительно повышается ударная вязкость стального литья. Ударная вязкость металла тем выше, чем тоньше и равномернее его структура.

4. Экспериментальная часть

1. Ознакомиться с устройством и принципом работы приборов для измерения твердости по Бринеллю и Роквеллу.
2. Выбрать метод измерения твердости испытания образцов различных материалов и провести измерения.
3. Рассчитать приближенное значение временного сопротивления s_b (прочности) испытываемых материалов.
4. Результаты оформить в виде таблиц 4 и 5.

Таблица 4

Экспериментальные данные измерения твердости по Бринеллю

№ п/п	Условия испытаний			Результаты испытаний		
	Нагрузка Р, кгс	Диаметр шарика D, мм	Время выдержки и t, с	Диаметр отпечатка a d, мм	Твердость по Бринеллю, HB	Предел прочности и σ_b

Таблица 5

Экспериментальные данные измерения твердости по Роквеллу

№ п/п	Условия испытаний		Результаты испытаний		
	Индентор	Нагрузка, кгс	Твердость, HRC	Твердость, HRC _Э	Твердость HB

5. Ознакомиться с устройством и принципом работы маятникового копра.
6. Изучить сущность метода испытаний на ударную вязкость.
7. Измерить с точностью $\pm 0,1$ мм размеры образцов Н₁ и В в месте надреза. Рассчитать площадь поперечного сечения S_0 . Результаты внести в таблицу 6.
8. Провести испытания на ударную вязкость. Энергии копра K_0 и K_1 внести в таблицу 6.
9. Рассчитать ударную вязкость образцов. Результаты внести в таблицу 6.

Результаты испытаний

№ п/п	Материал образцов	В, мм	H ₁ , мм	K ₀ , Дж	K ₁ , Дж	K, Дж	KС, Дж/см ²	Примечание

10. Оформить отчет.

5. Содержание отчета

1. Название работы.
2. Цель работы.
3. Теоретическое описание с рис. 1, 2, 3.
4. Практическая часть работы: результаты испытаний в виде таблиц №№ 1, 2, 3.

6. Контрольные вопросы

1. Характеристика испытаний материалов на твердость.
2. Основные методы измерения твердости и для каких материалов они применяются.
3. Характеристика метода Бринелля.
4. Характеристика метода Роквелла.
5. Какая связь твердости с другими механическими характеристиками?
6. Какая связь между различными числами твердости?
7. Что понимают под ударной вязкостью?
8. Как определяется и обозначается ударная вязкость различных изделий?

Лабораторная работа № 2 МАКРОСТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Цель работы: ознакомиться с методикой проведения макроструктурного анализа; изучить коллекцию макродефектов, коллекцию изломов и выявить распределение серы в макрошлифе стали или чугуна.

Приборы и материалы: коллекция макродефектов, коллекция изломов, коллекция макрошлифов, 5 % раствор серной кислоты в воде, 10 % раствор гипосульфита, фильтровальная бумага, вата, спирт, шлифовальная машина с набором наждачной бумаги различной зернистости.

Выполнение работы рекомендуется проводить в следующем порядке:

1. Ознакомиться по методическому указанию с назначением и методикой проведения макроструктурного анализа

Макроструктурный анализ (макроанализ) – это метод исследования металлов и сплавов, выполняемый невооруженным глазом или при небольшом увеличении (до 30 крат) с помощью лупы или специального микроскопа.

Существует три основных способа изучения макроструктуры:

1. Осмотр поверхности готового изделия.
2. Изучение специально приготовленных макрошлифов.
3. Изучение изломов.

Возможности макроструктурного анализа велики, по выполнению он прост и не требует сложного оборудования. Преимуществом макроанализа является то, что ему может быть подвергнут большой объем металла, т. е. все изделие или его основные части. Поэтому в ГОСТах на большинство металлоизделий различные виды макроанализа включены как обязательные.

Макроанализ проводится с целью изучения макроструктуры и выявления макродефектов, возникающих на различных этапах производства заготовок и изделий.

Оценка макроструктуры стали производится по ГОСТ 10243-75.

Макроанализ позволяет установить:

1. Строение металла или сплава в литых деталях и слитках; наличие дефектов и распределение зон кристаллизации.

2. Химическую неоднородность (ликвацию), получаемую в процессе кристаллизации.

3. Строение металла после горячей обработки давлением.

4. Неоднородность состава и структуры, созданной термической или химико-термической обработкой, глубину и характер распределения закаленного, цементированного, азотированного и других слоев.

5. Характер излома и характер разрушения.

2. Оценка поверхности металла

При осмотре поверхности отливки или детали можно обнаружить следующие основные дефекты:

Газовые раковины – пустоты, расположенные на поверхности или внутри отливки. Форма раковин сферическая или округленная. Причина их образования может быть связана с большим содержанием газов вследствие:

- а) плохого качества исходных материалов;
- б) пониженной газопроницаемости или повышенной влажности формовочных и стержневых материалов;
- в) недостаточной вентиляции форм и стержней;
- г) низкой температуры заливаемого сплава;
- д) чрезмерно быстрого заполнения формы.

Песочные раковины – закрытые или открытые раковины, полностью или частично заполненные формовочным материалом. Причинами их образования могут быть:

- а) недостаточная прочность формовочной и стержневой смеси;
- б) применение неисправных моделей;
- в) слабая или неравномерная набивка формы или стержней;
- г) местное разрушение и засорение формы при сборке;
- д) нетехнологичность конструкции отливки и др.

Пригар – поверхность отливки шероховатая или бугристая и связана с пригоранием формовочной земли к стенкам отливки из-за очень высокой температуры заливаемого металла.

Пористость или рыхлость – крупнозернистое и неплотное строение сплава с наличием межкристаллических пустот.

Причинами брака могут быть:

- а) неправильная конструкция отливки;
- б) недостаточное питание отливки жидким металлом в процессе затвердевания;

в) чрезмерно высокая температура заливки и др.

Спай – сквозные или поверхностные щели в теле отливки, образованные неслившимися потоками металла.

Причина их образования может быть связана с :

- а) низкой температурой расплава при заливке;
- б) неправильным устройством литниковой системы (встречные потоки);
- в) низкой скоростью заливки.

Трещины – сквозные или несквозные разрывы в стенках отливок или деталей.

Причинами трещин в отливках могут быть:

- а) неправильная конструкция отливки с резким переходом от толстых к тонким сечениям;
- б) острые углы в отливках;
- в) чрезмерная плотность набивки;
- г) неправильный состав формовочных и стержневых смесей;
- д) неправильный режим заливки.

Горячие трещины в отливках имеют “рваные”, а холодные – ровные и гладкие края.

Причинами трещин в стальных поковках и заготовках могут быть:

- а) большое загрязнение слитка неметаллическими включениями;
- б) наличие литейных дефектов;
- в) чрезмерные обжатия по сечению и др.

Трещины в термически обработанных деталях возникают из-за высоких напряжений термического или структурного характера вследствие:

- а) неправильного температурного режима термической обработки;
- б) неправильного выбора охлаждающей среды;
- в) нетехнологичности конструкции деталей и др.

Шлифовочные трещины в виде сетки на поверхности детали возникают в результате больших растягивающих напряжений при неправильных режимах шлифования. Такие трещины выявляются после шлифования и травления поверхности. В качестве травителя можно использовать 10-15 % спиртовой или водный раствор азотной кислоты или персульфата аммония.

Трещины в сварных швах возникают в результате больших внутренних растягивающих напряжений при охлаждении наплавленного металла в результате:

- а) неправильного режима сварки;
- б) насыщения шва водородом при использовании влажных электродных покрытий из флюсов и из окружающего воздуха;
- в) плохой свариваемости металлов.

3. Изучение макрошлифов

Макрошлифом (темплетом) называется образец, вырезанный в определенном месте детали и имеющий плоскую шлифованную поверхность, которая в зависимости от цели исследования протравливается специальным травителем.

Для изучения строения металла слитков, отливок, катаных и кованных заготовок и готовых деталей образцы вырезают в направлении, перпендикулярном продольной оси. При изучении строения сварного шва образцы вырезают в продольном направлении.

Контролируемую поверхность образцов торцуют, строгают и шлифуют. Шлифование ведут до полного уничтожения рисок, оставшихся после торцовки. Когда на шлифе останутся риски только от шлифовальной бумаги, шлифование прерывают и повторяют обработку поверхности на бумаге с более мелким зерном, каждый раз изменяя направление движения шлифа на 90° .

Уже на шлифованной поверхности можно обнаружить после внимательного исследования невооруженным глазом или в лупу некоторые внутренние дефекты металла: пузыри, пустоты, трещины и крупные шлаковые включения. Но такие дефекты, как мелкая пористость, волосовины – еле заметные трещины, мелкие раковины, неоднородность металла (ликвация), а также кристаллическая структура металла выявляются только в результате так называемого макрокопического травления растворами кислот (серной, азотной, соляной, пикриновой, хромистой или их смесями) или же специальными реактивами, среди которых наиболее распространены 10 % водный раствор персульфата аммония и реактивы, содержащие хлористую медь.

Для выявления кристаллической структуры литой стали наиболее подходящим реактивом является 10 – 20 % водный раствор персульфата аммония. Для выявления неравномерности в распределении фосфора и углерода рекомендуют реагент с хлористой медью.

Макротравлением можно определить способ изготовления изучаемой детали, в частности, является ли она литой или изготовлена ковкой (штамповкой), или резанием (рис. 1).

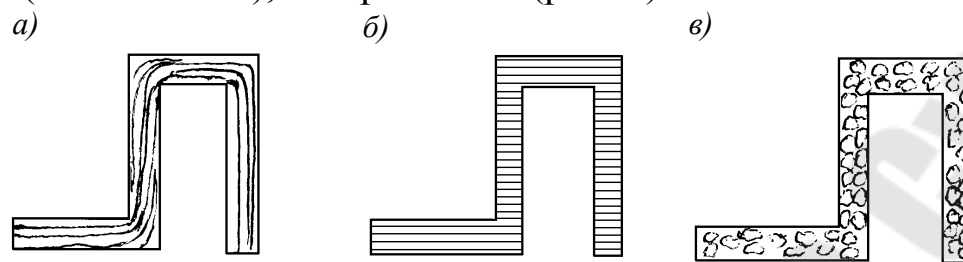


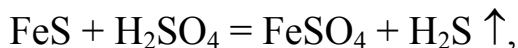
Рис. 1. Схема макроструктуры изделия, изготовленного:
а – штамповкой; б – резанием; в – литьем

Неметаллические включения в стали (сульфиды, оксиды, шлаки) и ликвационные участки, неоднородные по составу и структуре, при обработке давлением (прокатке, ковке, штамповке) частично раздробляются и вытягиваются вдоль направления деформации, образуя характерную продольную волокнистость. Волокна металла вследствие неодинакового состава и строения имеют различную травимость. Поэтому реактив, содержащий 85 г CuCl_2 и 54 г NH_4Cl на 1000 мл воды, хорошо выявляет полосчатость. Макрошлиф в этом случае надо изготавливать в продольном направлении.

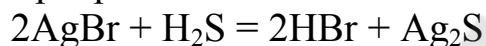
Ввиду важности направления волокон для конструкционной прочности изделия, этот способ получил широкое применение и послужил толчком для рациональной постановки процессовковки и штамповки специальных изделий (коленчатых валов, шестерен и пр.). Волокнистость, повторяющая конфигурацию сечения детали, свидетельствует о правильной технологии горячей обработки давлением. При несоответствии расположения волокон контуру детали в местах перехода от одной конфигурации к другой создаются напряжения, сокращающие эксплуатационный срок ее службы.

Макроанализ выявляет зональную (в различных частях) и дендритную (в пределах одного кристалла – дендрита) ликвацию в стали углерода и вредных примесей – серы и фосфора, а также ликвацию по удельному весу (гравитационную). Наиболее часто для выявления ликвации используется метод травления. Выявить ликвацию серы в стали или чугуне можно методом Баумана. Принцип метода заключается в следующем: обычную неотфиксированную фотобумагу при дневном свете пропитывают в течение 8-10 мин. 5 %-м раствором серной кислоты и затем лишнюю кислоту с фотобумаги

удаляют фильтровальной бумагой. Потом бумагу прижимают эмульсионным слоем приблизительно на 2 мин к предварительно отшлифованному, промытому и обезжиренному образцу, причем прикладывая фотобумагу необходимо плотно, чтобы не осталось пузырьков воздуха между бумагой и образцом. В результате реакции сернистого железа металла с серной кислотой фотобумаги образуется сероводород:



который реагирует с бромистым серебром фотоэмульсии и образует на бумаге сернистое серебро:



темного цвета. Фотобумага снимается со шлифа, промывается водой, фиксируется 6-10 мин в 10 %-м растворе гипосульфита, после чего снова промывается водой и просушивается.

Темно-коричневые пятна указывают на места, обогащенные серой и на форму скоплений сульфидов по сечению образца.

Для определения глубины поверхностного слоя, образованного после закалки или цементации, образец травят 20 %-м раствором соляной кислоты при 80 °С в течение 3 мин, а затем промывают водой. После травления цементованный или закаленный слой имеет более темную окраску.

4. Изучение изломов

Изломом называется поверхность, по которой произошло разрушение образца или детали.

Изучение излома позволяет выявить причины и характер эксплуатационного разрушения, оценить качество стали, выявить дефекты, которые не выявляются при анализе макроструктуры на темплетях, позволяет с достаточной для практических целей точностью выявить глубину закаленного и цементованного слоев, оценить вязкость материалов.

В зависимости от состава, строения, режима термической обработки и условий эксплуатации изделия могут разрушаться вязко или хрупко. В соответствии с этим изломы делятся на вязкие, хрупкие и смешанные. Большинство металлов и сплавов могут разрушаться и вязко, и хрупко. Состояние поверхности – один из важнейших факторов, влияющих на механические свойства материала. Поверхностные неровности при плохой обработке, небольшие выступы или впадины могут играть роль хрупких трещин и снижать прочность материала. На увеличение хрупкости материала влияет масштабный фактор, так

как вероятность существования опасного дефекта уменьшается при уменьшении размеров образца. Тщательная полировка поверхности, а также создание на поверхности сжимающих напряжений дробеструйной обработкой, обкаткой роликами, термической и химико-термической обработкой, препятствующих раскрытию поверхностных трещин, существенно увеличивает срок службы деталей. Для обеспечения конструктивной прочности изделий излом материала должен быть вязким, так как хрупкий излом происходит мгновенно и создает ситуацию, называемую “аварией”.

Вязкий излом (рис. 2а, 3а) (волоknистый) имеет пепельно-серый цвет.

На поверхности отсутствуют кристаллические фасетки. В связи с этим по излому нельзя судить о форме и размере зерна. Волокнистая структура образуется при длительном воздействии напряжения, превышающего предел текучести, и свидетельствует о пластической деформации зерен поликристалла. В результате вязкого разрушения образуется “косой” излом – его поверхность в макромасштабе наклонена под углом 45° к направлению действия максимального напряжения.

Вязкий излом может образоваться в результате :

- а) соскальзывания одной части кристалла по другой или уменьшения сечения при деформации до нуля;
- б) зарождения трещины и ее дальнейшего распространения.

Вязкому разрушению предшествует значительная макропластическая деформация. Вязкая трещина – тупая и скорость ее распространения мала. Волокнистый – матовый излом указывает на достаточную вязкость материала.

Хрупкий излом (рис. 2б, в, 3б, 4) имеет кристаллическое строение. Обычно в хрупком изломе можно видеть форму и размер зерен металла, т. к. излом происходит без значительной пластической деформации, и зерна при разрушении металла не искажаются. Такие изломы бывают крупно- и мелкокристаллические. Чем крупнее зерно на изломе, тем выше хрупкость материала.

Хрупкий излом прямой. По характеру отражения света излом может быть светлым, характерным для сталей и белых чугунов, серым, характерным для серых чугунов и темным, бархатистым, характерным для ковких и высокопрочных чугунов.

Хрупкий излом, как и вязкий, образуется в результате зарождения трещины и дальнейшего ее распространения. “Хрупкая” тре-

щина – острая, ветвящаяся, ее распространение происходит при низких напряжениях и рост трещины на определенной стадии становится неуправляемым. Скорость распространения трещины близка к скорости звука.

Разновидностями хрупкого излома является также шиферный или слоистый, нафталинистый и дендритный изломы.

Шиферный излом (рис. 5) – выявляется в кованой и катанной стали после закалки и отпуска. Получил свое название по аналогии с изломом шифера, легко раскалывающегося по плоскости в одном направлении.

Причинами шиферного излома являются:

а) наличие неметаллических включений, вытягивающихся вдоль направления прокатки;

б) наличие разнородных по пластическим свойствам участков металла, как результат неравномерного распределения примесей и фаз.

Таким образом, шиферный (слоистый) излом свидетельствует о загрязнении материала неметаллическими включениями и низком качестве материала.

Нафталинистый излом (рис. 6) характеризуется крупнозернистостью и наличием своеобразного блеска, напоминающего блеск чешуек нафталина. Такой излом указывает на повышенную хрупкость стали. Обнаруживается чаще всего у быстрорежущей стали при нарушении технологии ее обработки, а также у других сталей, как результат сильного перегрева.

Дендритный излом выявляется у литого металла. Разрушение в этом случае происходит по границам сопряженных дендритных кристаллов и наблюдается у белых чугунов.

Смешанный излом (рис. 2, г, 3, в) – излом кристаллический в одних участках и волокнистый в других. Смешанный излом наблюдается в условиях усталостного разрушения (усталостный излом) у сталей с несквозной прокаливаемостью.

Этот излом можно также наблюдать на образцах после ударных испытаний: темная каемка на периферии образца – вязкая составляющая – довольно резко отличается от светлой сердцевины, где имеет место хрупкое разрушение.

Усталостный излом всегда имеет две зоны разрушения. Одна из них соответствует участку развития усталостной трещины и имеет характерный (иногда блестящий) вид. На поверхности этой зоны часто

видны концентрические контуры фронта распространения трещин, которые сходятся в очаге разрушения. Вторая зона – зона долома – возникает в результате быстрого окончательного разрушения. Она может иметь либо хрупкое, либо вязкое, либо смешанное строение в зависимости от условий испытания или работы детали. Такой излом наблюдается у деталей, работающих в условиях повторно-переменных нагрузок (шатуны, коленчатые валы и др.).

На поверхности изломов можно обнаружить различные дефекты: поры – пузыри, грубую пятнистую ликвацию, которая в изломе имеет вид темных полос и флокены. Флокены (трещины, заполненные водородом) в изломе имеют вид светлых округлых пятен с кристаллической поверхностью серебристого или светлого оттенка, а на протравленном макрошлифе видны тонкие нитевидные трещины, соответствующие белым пятнам на изломе.

При оценке вида излома необходимо учитывать характер прилагаемой нагрузки, т. к. один и тот же материал в одном и том же структурном состоянии может иметь волокнистый излом при статическом нагружении и кристаллический излом – при ударном нагружении.



Рис. 2. Схема изломов: а – вязкого; б – мелкозернистого хрупкого; в – крупнозернистого хрупкого; г – смешанного

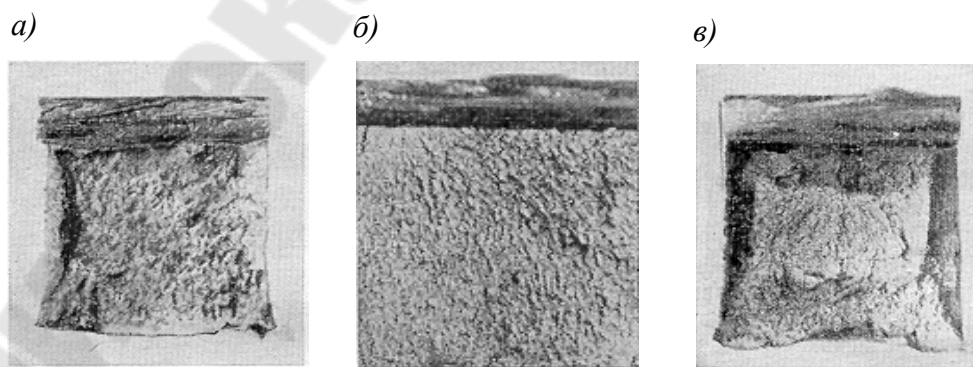


Рис. 3. Изломы стали: а – вязкий; б – хрупкий; в – смешанный

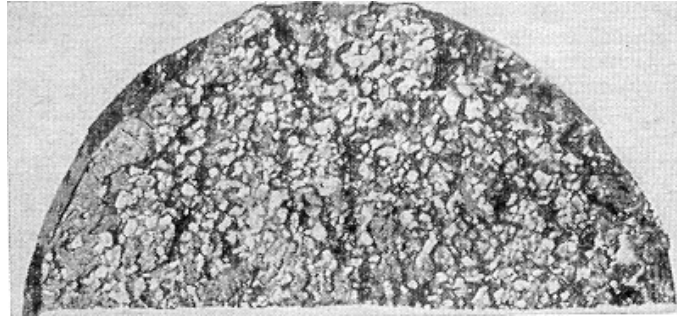


Рис. 4. Хрупкий межкристаллический излом

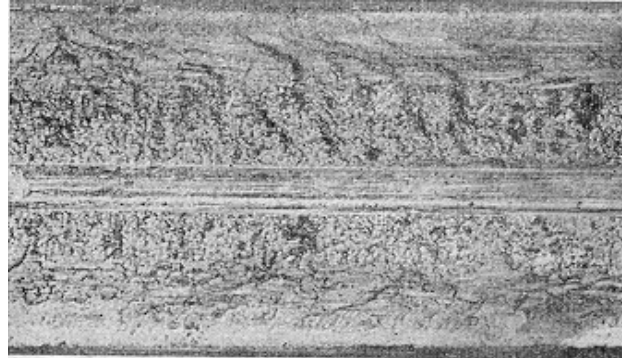


Рис. 5. Шиферный излом стали

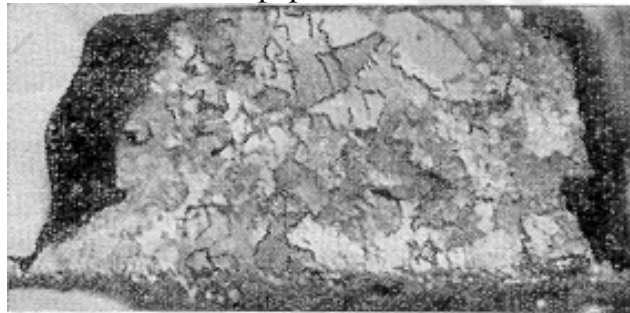


Рис. 6. Нафталинистый излом быстрорежущей стали

5. Экспериментальная часть

1. Изучить коллекцию макродефектов и перечислить обнаруженные макродефекты.
2. Изготовить макрошлиф и выявить распределение серы по методу Баумана.
3. Изучить и зарисовать коллекцию изломов.
4. Оформить отчет по работе.

6. Содержание отчета

1. Основные теоретические данные о назначении и методике проведения макроструктурного анализа.
2. Результаты изучения поверхности деталей.
3. Отпечаток макрошлифа на фотобумаге.
4. Рисунки макроструктуры коллекции изломов.

7. Контрольные вопросы

1. Назначение и задачи макроструктурного анализа.
2. Какими основными способами проводится макроструктурный анализ?
3. Какие дефекты можно обнаружить с помощью макроструктурного анализа?
4. Что такое ликвация, типы ликваций и методы их определения.
5. Виды изломов, их характеристика и связь со свойствами металла.
6. Что можно сказать о металле по его излому?

Лабораторная работа № 3

МИКРОСТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ МЕТАЛЛОВ, СПЛАВОВ И НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Цель работы: освоить технику проведения микроструктурного анализа в отраженном и проходящем свете.

Приборы и материалы: микроскопы ММУ-3, AMPLIVAL; шлифовальные и полировальные станки, травитель, спирт, фильтровальная бумага, вата, металлические образцы для приготовления микрошлифов и коллекция образцов из неметаллических материалов.

Выполнение работы рекомендуется проводить в следующем порядке:

1. Ознакомиться по методическому указанию с назначением микроанализа, устройством и работой микроскопов и методами подготовки образцов для микроанализа

Микроструктурный метод исследования материалов заключается в изучении строения при помощи микроскопа специально подготовленных образцов – микрошлифов.

Строение материала, изучаемого при микроанализе, называется **микроструктурой**. Элементами микроструктуры являются кристаллы.

Назначение микроанализа:

- выявить микроструктуру;
- определить количество структурных составляющих, их процентное соотношение, размер, форму и характер распределения отдельных составляющих;
- определить наличие неметаллических включений и микродефектов.

Анализ микроструктуры позволяет оценить влияние технологической операции (пластической деформации, термической и химико-термической обработки и др.) на свойства сплавов, а в ряде случаев определить причину разрушения изделия.

Микроанализ непрозрачных объектов проводится в отраженном, а прозрачных в проходящем свете:

а) микроанализ в отраженном свете

Примечание. Студентами микроструктурные исследования проводятся на микроскопах МИМ-3 и МЕТАМ-Р.

Принципиальная схема микроскопа представлена на рис. 1.

Объект (1) помещают перед объективом (2), который создает увеличенное и перевернутое изображение объекта (3). Это изображение расположено перед окуляром (4). Окуляр (4) создает увеличенное мнимое изображение (5) объекта, расположенное от глаза наблюдателя (6) на расстоянии наилучшего видения ($D = 250$ мм).

Величина увеличения микроскопа показывает, во сколько раз угол зрения, под которым наблюдаемый объект виден в микроскоп, больше угла зрения, под которым невооруженный глаз видит этот объект на расстоянии 250 мм.

Общее увеличение микроскопа V равно:

$$V = V_{об} \cdot V_{ок},$$

где $V_{об}$ – увеличение объектива; $V_{ок}$ – увеличение окуляра.

Увеличение микроскопа не может быть беспредельным. Оно ограничено величиной так называемой разрешающей способности микроскопа, под которой понимается минимальное расстояние между двумя точками на поверхности объекта, позволяющее различать их отдельно. Разрешающая способность микроскопа (δ) зависит от длины световой волны (λ):

$$\delta = \lambda / 2A,$$

где A – числовая апертура объектива, определяемая по формуле:

$$A = n \cdot \sin \alpha / 2,$$

где n – показатель преломления среды; α – угол раскрытия входящего светового пучка.

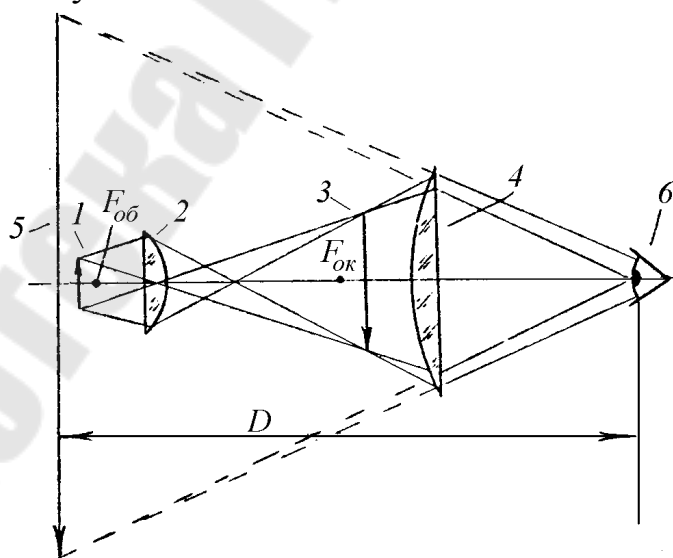


Рис. 1. Принципиальная схема микроскопа

Интервал увеличений, при котором две разрешаемые точки отчетливо воспринимаются глазом, называется **полезным увеличени-**

ем микроскопа. Повысить разрешающую способность микроскопа можно путем уменьшения длины световой волны (например используя микроскопы с ультрафиолетовым освещением) или увеличения апертуры. В последнем случае между шлифом и объективом помещают среду с большим показателем преломления, например, кедровое масло ($n=1,5$). Разрешающая способность современных оптических микроскопов не позволяет использовать увеличения, превышающие $1000 \div 2000$ крат.

На рис. 2 показана оптическая схема бинокулярного микроскопа ММУ-3. Лучи света от источника света (1) проходят через коллектор (2), теплофильтр (3), осветительную линзу (4), диафрагму (5), отражаются от плоскопараллельной полупрозрачной пластины (6) и направляются через объектив (7) на поверхность объекта (8). Лучи отражаются от полированной поверхности шлифа, снова попадают в объектив, который, совместно с линзой (9), проецирует изображение объекта в фокальную плоскость окуляров (10). Микроскоп ММУ-3 позволяет получить увеличение от 80 до 476 крат.

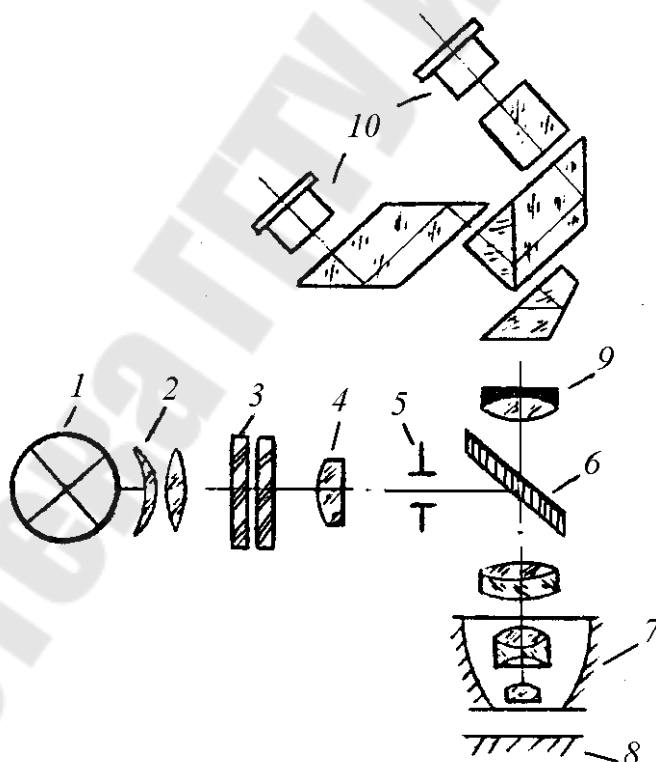


Рис. 2. Оптическая схема микроскопа ММУ-3

Примечание. Оптические микроскопы позволяют исследовать и фотографировать детали микроструктуры, размеры которых превышают $0,4 \div 0,6$ мкм. При необходимости изучения более мелких структурных образований используют электронную микроско-

пию, основанную на формировании изображения с помощью пучка электронов с увеличением от 600 до 150000 крат.

б) микроанализ в проходящем свете

Примечание. Студентами микроструктурные исследования проводятся на микроскопе AMPLIVAL.

На рис. 3 представлена принципиальная схема микроскопа. Коллектор 2 проецирует источник света 1 в плоскость апертурной диафрагмы 4 конденсора 5. Апертурная диафрагма установлена в передней фокальной плоскости конденсора и проецируется им в бесконечность. Как известно, входной зрачок микроскопа также находится в бесконечности, поэтому схема обеспечивает правильное соединение осветителя и микроскопа. После объектива микроскопа 7 изображение апертурной диафрагмы образуется в его выходном зрачке 8. Полевая диафрагма 3 проецируется конденсором в плоскость объекта 6. Через каждую точку объекта проходят лучи, вышедшие из всех точек источника, т. е. объект освещается равномерно. Кроме того, освещаемая часть поля зрения ограничивается с помощью полевой диафрагмы, что повышает контраст изображения.

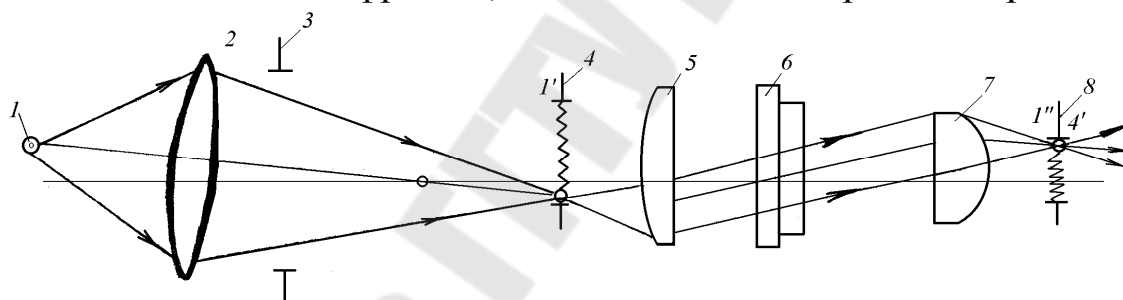


Рис. 3. Принципиальная схема микроскопа

Отбор образцов и их подготовка к микроанализу:

а) в отраженном свете

при исследовании микроструктуры крупного объекта (например, слитка) необходимо отобрать пробу (часть металлопродукции), из которой изготавливается образец – микрошлиф.

Пробы и образцы отбирают из наиболее характерных зон металлопродукции.

Примечание. При отборе проб и при изготовлении образцов должны быть предусмотрены все меры, предохраняющие образцы от нагрева и наклепа (упрочнения под действием пластической деформации), которые искажают структуру и изменяют свойства.

Высота используемых для микроанализа образцов обычно не превышает $10 \div 20$ мм, площадь изучаемой поверхности – $2 \div 3$ см².

Образцы, размеры которых значительно меньше общепринятых, помещают для удобства обращения с ними в различные оправки, зажимы, заливают легкоплавкими сплавами, запрессовывают в пластмассу. Поверхность отобранного образца подготавливают к микроанализу, подвергая ее шлифованию, полированию и травлению.

Для сухого шлифования применяют шкурку, отвечающую по характеристикам ГОСТ 6456-82. Перед шлифованием поверхность образца обрабатывают на токарном или фрезерном станке для придания ей приблизительно плоской формы. Для получения качественной поверхности микрошлифа при шлифовании последовательно переходят от крупнозернистых шкурок к мелкозернистым, поворачивая образец при каждой смене шкурки на 90° . Во избежание деформации поверхностного слоя мягкие материалы не следует слишком сильно прижимать к поверхности шкурки. Для очень мягких материалов поверхность шкурки перед шлифованием натирают парафином.

Полирование образцов может осуществляться несколькими способами. Применяется механическое, химико-механическое и электролитическое полирование.

Механическое полирование проводят на станках, снабженных вращающимся кругом, на который натянут полировальный материал – фетр, сукно, драп и др. Чем мягче полируемый материал, тем тоньше должно быть строение ткани. На ткань наносят водную суспензию абразивных материалов – оксидов алюминия, железа или хрома. Хорошие результаты при полировании черных металлов получают при использовании пасты ГОИ. Для полировки особо твердых материалов применяют алмазные пасты (ГОСТ 9206-80).

При электролитическом полировании образец в качестве анода помещается в электролитическую ванну. Полируемая поверхность устанавливается против катода. При прохождении постоянного тока выступы на полируемой поверхности растворяются, поверхность становится зеркальной. Состав электролита, а также режим полирования зависят от полируемого материала. Преимуществом этого метода является сохранение неискаженной структуры и отсутствие наклепанного слоя, возникающего при механическом полировании.

При химико-механическом полировании в состав полирующей смеси вводится химически активное вещество, воздействующее на поверхность образца и ускоряющее процесс полирования.

Примечание. Если полированная поверхность подвергается анализу не сразу после приготовления, то ее необходимо защищать от окисления. На поверхность наносят тонкий слой раствора кедрового масла в серном эфире. Подготовленные образцы хранят в эксикаторе – стеклянном сосуде с притертой крышкой, содержащем вещества, поглощающие влагу.

Травление микрошлифов

Для выявления полной картины микроструктуры образец подвергают травлению одним из способов:

– химическое травление, электролитическое травление, тепловое травление, травление в расплавленных солях, катодное травление, травление методом вакуумного испарения, методом окисления, магнитный метод. Выбор метода травления определяется природой сплава и целью исследования.

Примечание. В настоящей работе студентами используется химическое травление.

Выявление микроструктуры металла при химическом травлении проводят различными способами: погружением образца в травитель, втиранием травителя в поверхность шлифа и смачиванием поверхности шлифа травителем.

Химическое травление основано на различии физико-химических свойств отдельных фаз и пограничных участков зерен. Зерна различного химического состава растворяются при травлении в агрессивных средах (кислоты, соли, щелочи) с различной скоростью. Если же зерна не отличаются по составу (например, у чистого металла), то в первую очередь металл растворяется на границах зерен, где сосредоточено большое количество примесей, способствующих образованию гальванических пар. Все это приводит к формированию рельефа поверхности шлифа (рис. 4.). Если освещать такой шлиф падающим светом, то из-за присутствия косых лучей образуются теневые картины, по которым можно судить о структуре металла.

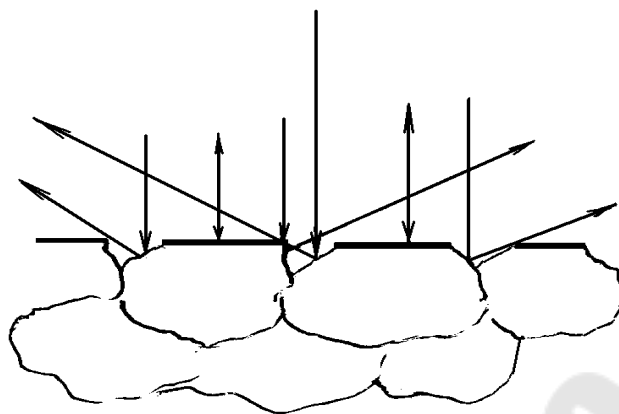


Рис. 4. Схема отражения лучей от полированной и протравленной поверхности микрошлифа

Травление считается законченным, когда полированная поверхность становится слегка матовой. Окончательно качество травления проверяется под микроскопом. Если наблюдаемая при этом поверхность шлифа очень светлая, отсутствует четкость контуров – шлиф недотравлен; если темная, с широкими затемненными границами структурных образований – шлиф перетравлен. В первом случае производят повторное травление, во втором – шлиф переполіровывают, снимая поверхностный слой и снова травят. После окончания травления шлиф, во избежание окисления, промывают проточной водой, а затем протирают спиртом и высушивают, прикладывая фильтровальную бумагу. Для химического травления используют множество разнообразных реактивов (табл. 1).

Таблица 1

Рекомендуемые составы травителей

№ п/п	Материал	Состав травителя
1	Стали и чугуны	– (1,5 – 4,0) % раствор азотной кислоты в воде или спирте (вода ускоряет травление);
2	Медь и ее сплавы	– 10 г хлорного железа, 25 см ³ соляной кислоты, 100 см ³ воды; – аммиачный раствор двойной соли – хлористой меди и хлористого аммония; 10 г двойной соли, 100 см ³ воды, аммиак – до получения нейтральной или щелочной реакции.
3	Алюминий и его сплавы	– 0,5 см ³ фтористой кислоты, 99,5 см ³ воды – 1,0 см ³ фтористой кислоты, 1,5 см ³ соляной кислоты; 2,5 см ³ азотной кислоты, 95,0 см ³ воды.

б) в проходящем свете

при исследовании микроструктуры объектом исследования являются тонкие прозрачные пленки или тонкие прозрачные срезы материала.

Анализ микроструктуры сплавов

Микроструктура сплава может быть однофазной и многофазной.

При изучении однофазной структуры можно наблюдать темные границы зерен, т. к. они более глубоко протравившись и больше рассеивают свет, а, следовательно, определить форму и размер зерен.

Примечание. Зерна имеют различную кристаллографическую ориентировку, и поэтому в поверхностном слое микрошлифа зерна будут срезаны по разным кристаллографическим плоскостям, которые будут травиться неодинаково, следовательно, на микроструктуре они будут несколько отличаться по цвету (рис. 4и.).

При исследовании формы зерна можно различать равноосную зернистую (рис. 5а), пластинчатую (рис. 5б), полиэдрическую (рис. 5в), шаровидную (рис. 5д), вермикулярную (рис. 5е), игольчатую (рис. 5ж) структуры.

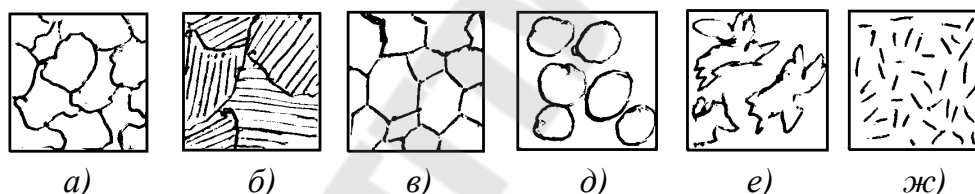


Рис. 5. Схема микроструктуры однофазных металлов и сплавов

Многофазная структура состоит из двух или более типов кристаллов, различающихся травимостью и формой (рис. 6а, б). Если кристаллизация фаз происходит одновременно, то можно наблюдать смеси с пластинчатым (рис. 6а) или с дендритным строением (рис. 6б), а если не одновременно, то вторая фаза выделяется по границам зерен в виде цепочки (рис. 6в) или сетки (рис. 6д).

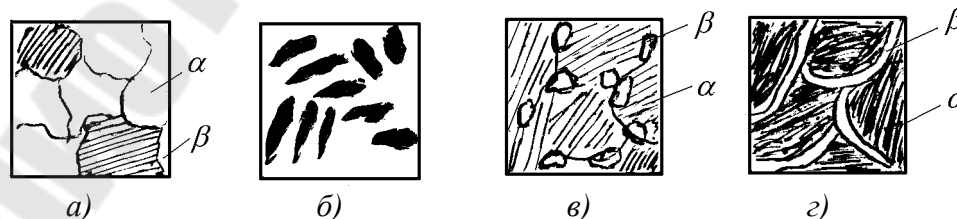


Рис. 6. Схема микроструктуры двухфазных сплавов

Пластическая деформация (вытяжка, осадка, прокатка и т. д.) приводит к появлению зерен, ориентированных по отношению на-

правления действия деформирующего усилия. Такая структура называется текстурой (рис. 7).

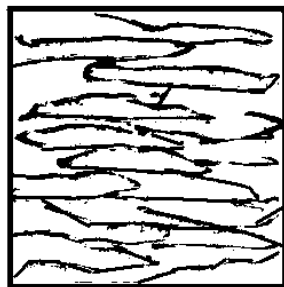


Рис. 7. Схема микроструктуры (текстуры) деформированного образца

В микроструктуре материала, изучаемого в проходящем свете, кристаллическая часть материала будет наблюдаться (рис. 8а), а аморфная – нет (рис. 8 б).

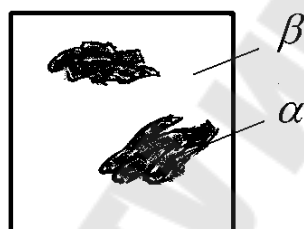


Рис. 8. Схема микроструктуры полиэтилена

Общий анализ неметаллических включений довольно сложен. Представление о природе неметаллических включений можно получить, используя некоторые признаки и свойства: форму, размер, цвет, твердость и т. п. Данные, характеризующие некоторые неметаллические включения в сталях, приведены в таблице 2.

Таблица 2

Название и состав вкл.	Внешний вид в литом состоянии	Оптические свойства
MnS	Правильные кристаллы в виде прямоугольника	Цвет серо-голубой
FeO	Глобулы размером до 20 мк	Цвет от серого до серо-корич.
MnO	Неправильной формы	Цвет темно-серый
Al ₂ O ₃	Мельчайшие включения в виде скоплений	Темно-серый с фиолетовым оттенком
SiO ₂	Разнообразной неправильной формы	Темно-серый

Величина зерна определяется составом металла, условиями его выплавки, кристаллизации, механической и термической обработки. Размеры зерен в металле влияют на многие его свойства. Для сплава с мелкими зернами характерны более высокие механические свойства: прочность, пластичность и вязкость. Связь прочности с размером зерен для сталей и цветных металлов описывается уравнением Холла-Петча:

$$\sigma_T = \sigma_0 + K / \sqrt{d},$$

где σ_T – предел текучести материала; σ_0 – напряжение, необходимое для перемещения свободной дислокации; K – постоянный коэффициент; d – диаметр зерна.

Методы выявления и определения величины зерна регламентированы ГОСТ 5639-82. Для определения величины зерна применяют три метода: сравнение видимых под микроскопом зерен с эталонными изображениями шкал; подсчет количества зерен на единице поверхности шлифа; измерение среднего диаметра зерна. По методу сравнения шлиф изучают под микроскопом при увеличении 100 раз и сравнивают величину зерна с эталонными изображениями на шкале (рис. 9)

Всего имеется 18 номеров зерна: от -3 до +14, которым соответствует изменение размеров зерен от 1мм до 0,003мм. С уменьшением величины зерна увеличивается номер. Между номером (N) зерна и количеством зерен (n), помещающихся на площади 1мм² шлифа, существует взаимосвязь: $n = 2^{N+3}$. Средний диаметр зерна и количество зерен на единице площади определяют при увеличении 100 раз на матовом стекле камеры микроскопа или на микрофотографии.

Металлографический анализ часто используют для оценки фазового состава сплава. Наиболее объективную оценку фазового состава сплава можно получить, используя количественные методы, например линейный метод Розиваля. В основе линейного метода лежит суммирование длин отрезков прямой линии (пересекающей изображение микроструктуры), попадающих на каждую фазу, с последующим делением суммарной длины отрезков, приходящихся на данную фазу, на общую длину прямой линии. Например, при исследовании двухфазной структуры (рис. 10) количество фазы А определяется отношением:

$$\frac{ml + ko + ph}{mn} \cdot 100\%,$$

количество фазы В отношении:

$$\frac{lk + op}{mn} \cdot 100\%$$

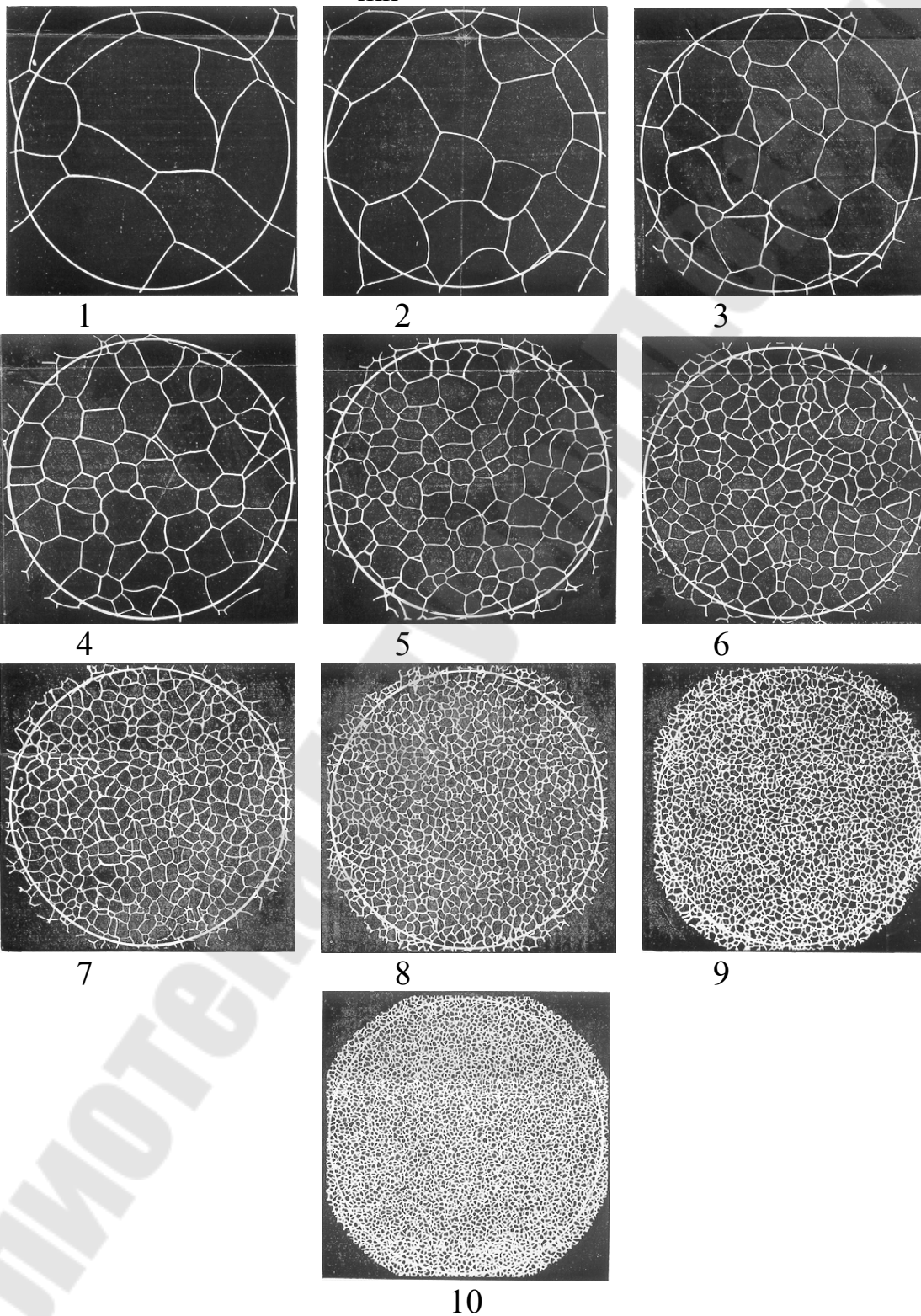


Рис. 9. Шкалы для определения величины зерна. Увеличение 100^x

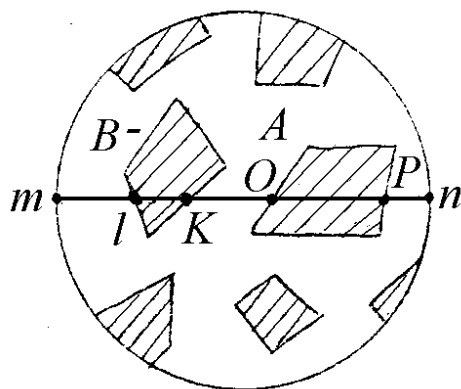


Рис. 10. Определение фазового состава линейным методом Розиваля

Любая обработка сплава влияет на его структуру, а следовательно, и на свойства.

Измерение среднего диаметра зерна проводится с помощью окуляр-микрометра и объект-микрометра. Объект-микрометр – стеклянная пластинка, на которую нанесена шкала длиной 1 мм и ценой 10 мкм. Для определения цены деления окуляр-микрометра объект-микрометр устанавливают вместо шлифа на предметный столик, левые риски обеих шкал совмещают и определяют следующее точное совмещение рисок шкал объект-микрометра и окуляр-микрометра.

Цена деления будет равна

$$Ц_{ок} = 10T / A \text{ мкм},$$

где T – число делений объект-микрометра; A – число делений окуляр-микрометра.

2. Получить у преподавателя образцы, подготовить микрошлифы и провести микроанализ.

3. Оформить отчет.

2. Содержание отчета

1. В теоретической части отчета описать назначение микроанализа, основные методы подготовки образцов к микроанализу, привести принципиальные схемы микроскопов и схему формирования изображения при наблюдении в микроскоп, охарактеризовать увеличение микроскопа и его разрешающую способность.

2. Зарисовать картину, наблюдаемую при изучении полированной, непротравленной поверхности образца. Сделать вывод о качестве подготовки поверхности и наличии неметаллических включений.

3. Зарисовать микроструктуру, наблюдаемую после химического травления поверхности образца. Сделать вывод о количестве присутствующих фаз и форме зерен.

4. Определить размер зерна.

5. Зарисовать микроструктуру неметаллического материала в проходящем свете и оценить степень его кристалличности.

3. Контрольные вопросы

1. На чем основан принцип работы металлографического микроскопа?

2. Рассказать устройство микроскопа и описать ход лучей в оптической схеме микроскопа.

3. Дать определение понятию “увеличение микроскопа”, рассказать каким образом можно его определить.

4. Что такое разрешающая способность микроскопа?

5. В чем заключается подготовка образца к микроанализу?

6. Охарактеризовать основные методы выявления структуры образцов.

7. Как влияют размеры зерна на свойства сплавов? Рассказать об основных методах определения величины зерна.

Лабораторная работа № 4 ИЗУЧЕНИЕ ДИАГРАММЫ СОСТОЯНИЯ СПЛАВОВ ЖЕЛЕЗО – ЦЕМЕНТИТ

Цель работы: изучить диаграмму состояния железо - цементит, проанализировать превращения, происходящие в сплавах.

Выполнение работы рекомендуется проводить в следующем порядке:

I. Изучить по методическим указаниям компоненты, фазы, их свойства и превращения, протекающие в системе Fe - Fe₃C.

Диаграмма состояния железо - цементит представлена на рис.1.

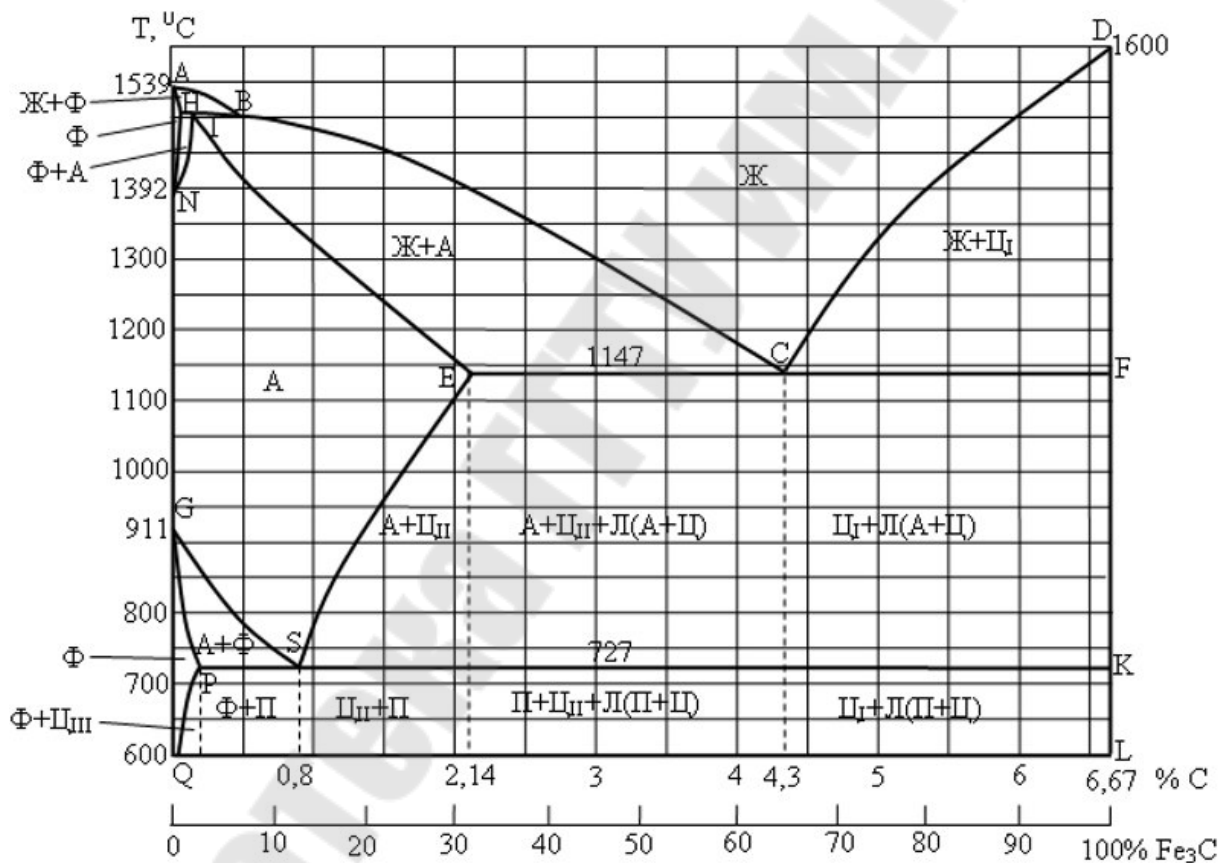


Рис. 1. Диаграмма состояния сплавов железо-цементит

точка	t, °C	C, %
A	1539	0
B	1499	0,51
H	1499	0,1
J	1499	0,16
N	1392	0
E	1147	2,14
C	1147	4,3
F	1147	6,67
D	1260	6,67
G	911	0
P	727	0,02
S	727	0,8
K	727	6,67
Q	600	0,006

Компонентами в данной системе являются железо и цементит.

Железо: металл серебристо - белого цвета. Атомный номер 26, атомный радиус 0,127 нм. Температура плавления железа 1539°C. Железо имеет две кристаллографические модификации: кубическую объемноцентрированную (ОЦК) и кубическую гранецентрированную (ГЦК). Железо с ОЦК решеткой существует в двух температурных интервалах: до 911°C и от 1392°C до 1539°C. До температуры 768°C железо ферромагнитно и его называют α - железо ($\alpha\text{-Fe}$), а выше этой температур - парамагнитно. Критическую точку (768°C), соответствующую магнитному превращению, т.е. переходу из ферромагнитного состояния в парамагнитное, называют точкой Кюри и обозначают A_2 . Парамагнитное железо с ОЦК решеткой обозначают β - железо ($\beta\text{-Fe}$). А железо в интервале температур 1392-1539°C обозначало δ - железо ($\delta\text{-Fe}$). Период ОЦК решетки зависит от температуры: у низкотемпературного $\alpha\text{-Fe}$ - 0,286 нм, а у высокотемпературного $\delta\text{-Fe}$ - 0,364 нм. В интервале температур 911°-1392°C железо имеет ГЦК - решетку и называется γ - железо ($\gamma\text{-Fe}$). Критическую точку G $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения при 911°C обозначают A_3 , а критическую точку N $\delta \rightarrow \gamma$ превращения при 1392°C обозначают A_4 .

Железо может растворять в себе различные элементы, образуя с неметаллами твердые растворы внедрения, а с металлами твердые растворы замещения. Механические свойства технического железа характеризуются следующими величинами: предел прочности при растяжении $\sigma_b \approx 120$ МПа, относительное удлинение при разрыве $\varepsilon \approx 50\%$, относительное сужение $\psi \approx 85\%$, твердость 80 НВ. Эти показатели могут изменяться в некоторых пределах, т.к. на свойства железа влияет размер зерна, температура, наличие примесей.

Цементит (обозначают **Ц**) - карбид железа (практически постоянного состава)-химическое соединение углерода с железом - Fe_3C , содержащее углерода 6,67%. Цементит имеет сложную ромбическую решетку с плотной упаковкой атомов. Цементит слабо ферромагнитен и теряет ферромагнетизм при температуре 210°C (кри-

тическая точка A_0). Температура плавления цементита считается равной 1260°C .

Цементит обладает высокой твердостью ($>800\text{HB}$), но чрезвычайно низкой, практически нулевой, пластичностью. Цементит способен образовывать твердые растворы замещения. Атомы углерода могут замещаться атомами неметаллов, а атомы железа - металлами. Такой твердый раствор на базе цементита называется легированным цементитом.

На диаграмме Fe - Fe_3C присутствуют следующие фазы: жидкий расплав (L), феррит (Φ), аустенит (A) и цементит (Ц).

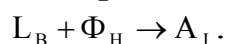
Феррит (Φ) - твердый раствор внедрения углерода в α -железе. Предельная растворимость углерода в низкотемпературном $\alpha\text{-Fe} = 0,02\%$ т. Р, а в высокотемпературном $\delta\text{-Fe} = 0,1\%$ т. Н. Столь низкая растворимость углерода в $\alpha\text{-Fe}$ обусловлена малым размером межатомных пор в ОЦК решетке. Значительная доля атомов углерода вынуждена размещаться в дефектах (вакансиях, дислокациях). Феррит - мягкая, пластичная фаза со следующими механическими свойствами: $\sigma_B = 300\text{МПа}$, $\epsilon = 40\%$, $\psi = 70\%$, $K_{CU} = 2,5\text{МДж/м}^2$, твердость до 100HB .

Аустенит (A)- твердый раствор внедрения углерода в γ -железе. Предельная растворимость углерода в $\gamma\text{-Fe} = 2,14\%$ т. Е. Механические свойства аустенита характеризуются меньшей пластичностью и большей прочностью ($\sigma_B = 300 - 350\text{МПа}$) и твердостью ($160-200\text{HB}$), чем у феррита.

Линии диаграммы (рис.1):

1. **ABCD** - линия ликвидус.
2. **АНЕСС** - линия солидус.
3. **НJB** - линия перитектического превращения ($t = 1499^\circ\text{C}$).

В результате перитектической реакции образуется аустенит:



Реакция наблюдается только у сплавов, содержащих углерода от $0,1$ до $0,51\%$. Причем, в сплавах, содержащих углерода от $0,1\%$ до $0,16\%$, после завершения реакции в избытке остается феррит, а в сплавах, содержащих углерода от $0,16\%$ до $0,51\%$, в избытке остается жидкость. Это связано с тем, что перитектическая реакция протекает при строгом количественном соотношении фаз. Необходимое количество реагирующих фаз в данной системе определяется т. J ($\Phi/L = JB/HJ$).

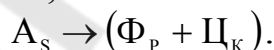
4. **ESF**- линия эвтектического превращения ($t = 1147^{\circ}\text{C}$). В результате эвтектической реакции из жидкой фазы образуется эвтектическая смесь аустенита и цементита, называемая **ледебуритом (Л)**



Реакция протекает у всех сплавов системы, содержащих углерода более 2,14%. Структура смеси при температуре 727°C изменяется, т.к. аустенит превращается в перлит и ниже этой температуры ледебурит представляет собой смесь перлита и цементита. В ледебурите цементит образует сплошную матрицу, в которой размещены колонии перлита. Такое строение ледебурита служит причиной его большой твердости $>700\text{HV}$ и хрупкости. Присутствие ледебурита в структуре сплавов обуславливает их неспособность к обработке давлением, затрудняет обработку резанием. Количественное соотношение фаз при эвтектическом превращении характеризует точка С ($C/A=EC/CF$). После завершения реакции, в доэвтектических сплавах, содержащих углерода от 2,14% до 4,3%, в избытке остается аустенит, а в заэвтектических сплавах, содержащих углерода от 4,3% до 6,67%, в избытке остается цементит.

5. **PSK** - линия эвтектоидного превращения ($t = 727^{\circ}\text{C}$). Обозначается A_1 .

В результате эвтектоидного превращения из аустенита образуется смесь феррита и цементита, называемая **перлитом (П)**.



Эвтектоидное превращение протекает во всех сплавах системы, содержащих углерода более 0,02%. Перлит может иметь зернистое, но чаще имеет пластинчатое строение и является прочной структурной составляющей со следующими механическими свойствами: $y_B = 800 - 900\text{MPa}$, $y_{0,2} = 450\text{MPa}$, $e \leq 16\%$, твердость 180-220HV;

6. **МО** - линия магнитного превращения ($t = 768^{\circ}\text{C}$). При нагреве выше этой линии ферромагнитный феррит превращается в парамагнитный, а при охлаждении - наоборот.

7. **ES** - линия сольвус (обозначается A_{CT}). Это линия характеризует изменения концентрации углерода в аустените при изменении температуры. С понижением температуры от 1147°C до 727°C предельная растворимость углерода в $\gamma\text{-Fe}$ понижается от 2,14% до 0,8%, вследствие чего выделяющийся углерод, взаимодействуя с железом, образует цементит, называемый вторичным (C_{II}). Цементит, кристаллизующийся из жидкого расплава, называется первичным.

Цементит вторичный образуется во всех сплавах, содержащих углерода более 0,8%.

8. PQ - линия сольвус. Эта линия характеризует изменение концентрации углерода в феррите при изменении температуры. С понижением температуры от 727°C до комнатной предельная растворимость углерода в феррите понижается от 0,02% до 0,006%, вследствие чего при охлаждении из феррита вытесняется углерод, образующий цементит, называемый третичным (Ц_{III}). Во всех сплавах, содержащих углерода более 0,02%, происходит образование Ц_{III}, но его пластинки нарастают на уже имеющиеся пластинки цементита, поэтому структурно неразличимы.

Все сплавы изучаемой системы можно разделить на две группы: стали и чугуны. **Стали** содержат углерода от 0,02% до 2,14%, а **чугуны** - от 2,14% до 6,67%.

Стали подразделяются на доэвтектоидные (от 0,02% до 0,8%C), эвтектоидные (0,8%C) и заэвтектоидные (от 0,8% до 2,14%C). Чугуны подразделяются на доэвтектические (от 2,14% до 4,3%C), эвтектические (4,3%C) и заэвтектические (4,3% - 6,67%C).

Рассмотрим кристаллизацию некоторых сплавов:

Сплав I (доэвтектоидная сталь, содержащая 0,12%C)

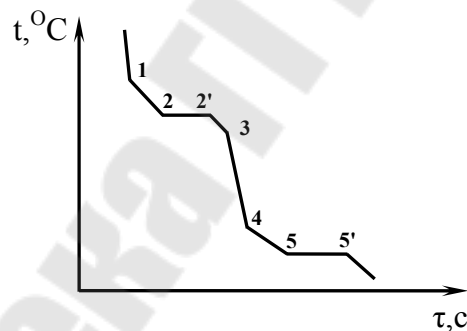


Рис. 2. Кривая охлаждения сплава, содержащего 0,12%C

Кристаллизация сплава начинается при температуре t_1 ($c_1 = 1$): из жидкой фазы кристаллизуется феррит, состав которого по мере кристаллизации до температуры t_2 ($c_2 = 0$) изменяется по линии (1'-Н), а состав жидкой фазы по линии (1-В). При температуре t_2 в сплаве протекает перитектическое превращение при избытке феррита, т.к. требуемое соотношение фаз для этого превращения

$\Phi/\text{Ж} = \text{ЖВ}/\text{НЖ}$, а в т.2 - $2\text{В}/\text{Н2} > \text{ЖВ}/\text{НЖ}$. Поэтому после превращения в системе будет кроме аустенита присутствовать еще и феррит.

При охлаждении сплава в интервале температур от т.2 до т.3 ($c=1$) происходит превращение оставшегося после перитектической реакции феррита в аустенит. Ниже температуры т.3 сплав состоит из однородного аустенита. При охлаждении сплава в интервале температур от т.3 до т.4 превращений в нем не происходит. При температуре т.4 ($c_4=1$) в сплаве начинается превращение аустенита в феррит, т.к. происходит полиморфное превращение $\gamma\text{-Fe} \rightarrow \alpha\text{-Fe}$, при этом состав оставшегося аустенита изменяется по линии (4-S), т.е. аустенит обогащается углеродом. Этот процесс продолжается до температуры 727°C . При этой температуре весь аустенит, содержащий $0,8\%\text{C}$, превращается в перлит, который вместе с выделившимся ранее ферритом образует конечную структуру стали ($\Phi+\text{П}$).

По мере охлаждения сплава от температуры т.5 до комнатной из феррита будет выделяться Ц_{III} , но он, как указывалось выше, будет структурно неразличим.

Сплав II (заэвтектоидная сталь, содержащая $1,8\%\text{C}$).

Кристаллизация сплава начинается при температуре т.1 ($c_1=1$) – на кривой охлаждения наблюдается точка перегиба: из жидкой фазы начинается кристаллизоваться аустенит, состав которого по мере снижения температуры изменяется по линии (1'-2), а состав жидкой фазы - по линии (1-2').

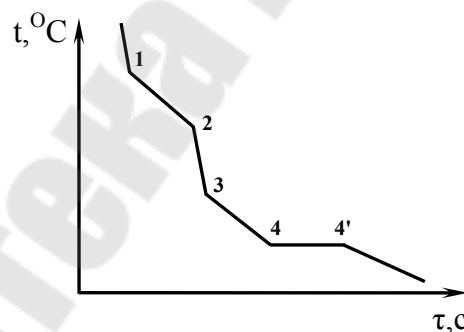


Рис. 3. Кривая охлаждения сплава, содержащего $1,8\%\text{C}$

При температуре т.2 первичная кристаллизация сплава заканчивается и его структура состоит из аустенита, состав которого, соответствует составу сплава. В интервале температур от т.2 до т.3 никаких превращений в сплаве не происходит. При дальнейшем охлаждении сплава в интервале температур от т.3 до т.4 из аустенита, вследствие понижения в нем растворимости углерода, выделяет-

ся цементит вторичный (Ц_{II}). Состав аустенита при этом изменяется по линии (3-S) и при температуре t_4 (727°C) в нем содержится $0,8\% \text{C}$. При температуре t_4 ($c_4 = 0$) весь аустенит превращается в перлит вследствие эвтектоидного превращения $A_s \rightarrow (\text{Ф}_p + \text{Ц}_k)$, который вместе с выделившимся ранее цементитом вторичным образует конечную структуру стали ($\text{П} + \text{Ц}_{\text{II}}$). При дальнейшем охлаждении сплава до комнатной температуры из феррита, входящего в состав перлита, выделяется углерод, образующий Ц_{III} , но он структурно неразличим и его количество незначительно.

Сплав III (заэвтектический чугун, содержащий $4,8\% \text{C}$).

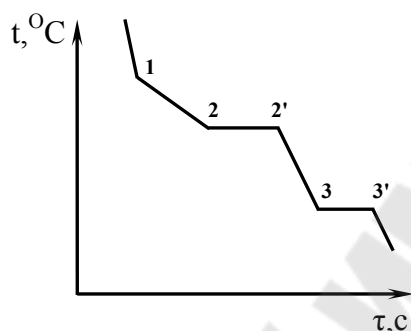
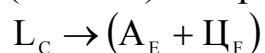


Рис. 4. Кривая охлаждения сплава, содержащего $4,8\% \text{C}$

Кристаллизация сплава начинается при температуре t_1 ($c_1 = 1$) из жидкой фазы кристаллизуется цементит, называемый первичным (Ц_I). Кристаллизация Ц_I протекает в интервале температур от t_1 до t_2 , при этом состав жидкой фазы изменяется по линии (1-C). Первичная кристаллизация заканчивается эвтектическим превращением в t_2 ($c_2 = 0$) при температуре (1147°C) с образованием ледебурита



При эвтектическом превращении соотношение цементита к аустениту находится в пропорции $\text{Ц}/A = \text{EC}/\text{CF}$. Так как в рассматриваемом сплаве в t_2 $2E/2F > \text{EC}/\text{CF}$, т.е. цементит находится в избытке и при температуре ниже 1147°C в структуре сплава будет находиться ледебурит и избыточный цементит первичный (Ц_I), выделившийся ранее.

При дальнейшем охлаждении сплава в интервале температур от t_2 до t_3 происходит выделение из аустенита Ц_{II} , но пластинки Ц_{II} структурно неразличимы, т.к. наслаиваются на пластинки цементита, входящего в состав ледебурита. При температуре t_3 ($c_3 = 0$) аустенит ледебурита превращается в перлит, т.е. ледебурит ниже температуры t_3 состоит из перлита и цементита. Конечная струк-

тура заэвтектического чугуна при комнатной температуре состоит из Ц_I и Л (П + Ц).

II. Получить у преподавателя вариант задания и проанализировать превращения, протекающие в сплаве, построив кривую охлаждения заданного сплава с применением правила фаз.

III. Определить составы и количественное соотношение (%) фаз (структурных составляющих) в сплаве при указанной в таб.1 температуре.

IV. Оформить отчет и защитить выполненную работу.

Таблица 1

вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
%С	0,01	0,04	0,12	0,3	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	2,3
°С	800	1400	780	1520	1200	740	760	900	1200	600
вариант	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
%С	2,5	2,8	3,0	3,5	3,8	4,2	4,3	4,5	5,2	6,0
°С	800	900	600	1200	750	800	950	1150	900	727

Контрольные вопросы

1. Дать определение и характеристику компонентов, фаз и структурных составляющих, присутствующих в изучаемой системе, указать их свойства

2. Назвать основные линии диаграммы охарактеризовать превращения, протекающие на этих линиях.

3. Для любой точки диаграммы определить состав фаз (структурных составляющих) и их количество.

Лабораторная работа № 5 ИЗУЧЕНИЕ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ В РАВНОВЕСНОМ СОСТОЯНИИ

Цель работы: исследовать микроструктуру углеродистых сталей в равновесном состоянии и установить связь между структурой сталей и диаграммой состояния; по микроструктуре определить марку стали; ознакомиться с маркировкой, назначением, свойствами и применением углеродистых сталей.

Приборы и материалы: микроскоп ММУ-3, травитель, спирт, фильтровальная бумага, вата, коллекция микрошлифов.

Выполнение работы рекомендуется проводить в следующем порядке:

1. По методическому указанию ознакомиться с микроструктурами сталей в равновесном состоянии и установить связь между структурой сталей и диаграммой состояния Fe-Fe₃C

Сталь – сплав железа с углеродом, в котором постоянно присутствуют примеси марганца, кремния, алюминия, фосфора, серы и газы: кислород, азот, водород. Если марганец, кремний, алюминий необходимы по условиям технологии выплавки, то сера, фосфор и газы относятся к вредным примесям, не поддающимся полному удалению. Чем меньше вредных примесей, тем выше качество стали.

Качество стали зависит от способа ее выплавки, разливки и обработки на металлургических заводах.

Углеродистые стали наиболее применимы в различных отраслях промышленности. Их доля в общем объеме производства сталей составляет ~ 80 %. Свойства сталей очень разнообразны и зависят от структуры стали.

Микроструктура углеродистых сталей в равновесном состоянии, полученная в результате оптимального нагрева и медленного охлаждения (отжига), может быть определена по диаграмме состояния железо-цементит (рис. 1).

Сплавы железа с углеродом, содержащие углерода до 0,025 %, называют **технически чистым железом**. Его структура состоит из светлых зерен феррита с хорошо видными темными границами (рис. 2а). Железоуглеродистые сплавы, содержащие углерода от 0,025 до 2,14 % называются **сталями**. По структуре в равновесном состоянии стали делят на доэвтектоидные, эвтектоидные и заэвтектоидные.

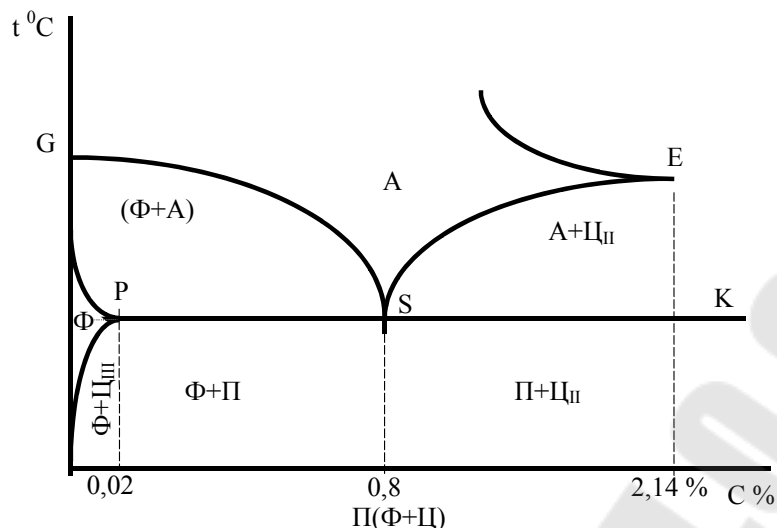


Рис. 1. Левый нижний угол диаграммы железо-цементит

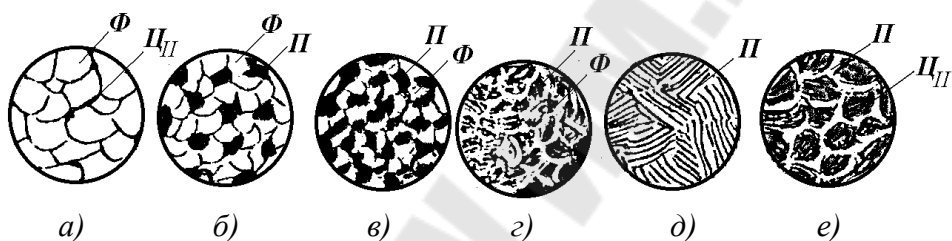


Рис. 2. Микроструктура стали в зависимости от содержания углерода:
 а – 0,01 % С; б – 0,3 % С; в – 0,5 % С; г – 0,6 % С;
 д – 0,8 % С; е – 1,2 % С

Доэвтектоидные стали содержат от 0,025 до 0,8 % углерода. Структура этих сталей состоит из светлых зерен феррита и темных зерен перлита (рис. 2 б,в,г). С увеличением содержания углерода уменьшается количество феррита, возрастает количество перлита.

Эвтектоидная сталь содержит 0,8 % углерода и состоит только из перлита (эвтектоидной смеси феррита и цементита), имеющего пластинчатое строение (рис. 2д).

Заэвтектоидные стали содержат от 0,8 % до 2,14 % углерода. Их структура состоит из перлита и вторичного цементита (рис. 2е). При медленном охлаждении вторичный цементит располагается по границам зерен перлита в виде сетки или ручейков белого цвета. Чтобы отличить цементит от феррита, применяют специальный реактив – пикрат натрия, который окрашивает цементит в темный цвет и совершенно не действует на феррит. Выделение вторичного цементита по границам зерен перлита нежелательно, т. к. такая структура обладает повышенной хрупкостью и плохо обрабатывается резанием.

Чем больше содержание углерода, тем более широкой получается цементитная сетка и меньше образуется перлита.

Таким образом, с увеличением содержания углерода в углеродистых сталях, находящихся в равновесном состоянии, меняются их структура и фазовый состав: уменьшается количество феррита (НВ80-100), увеличивается количество цементита (НВ800) и в соответствии с этим в сталях возрастают твердость НВ, предел прочности σ_b , уменьшается пластичность δ и ударная вязкость КСУ (рис. 3). При содержании углерода свыше 1 % предел прочности снижается, что объясняется образованием в структуре стали по границам зерен сплошной цементитной сетки.

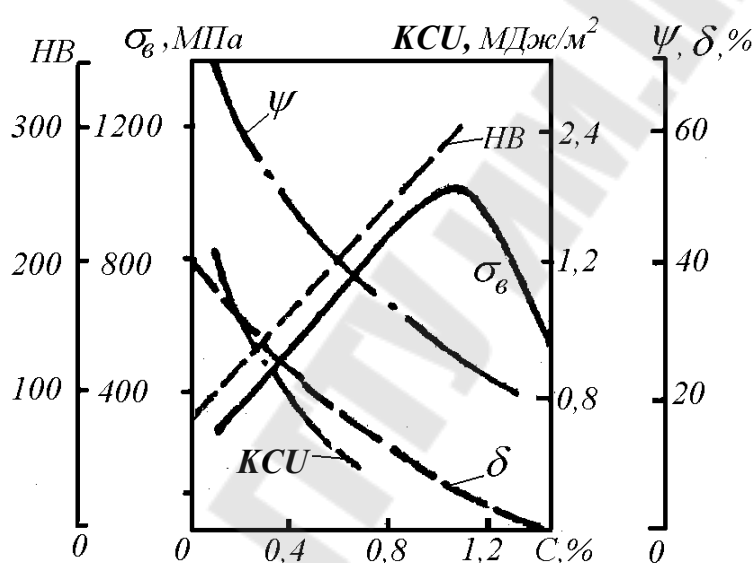


Рис. 3. Влияние углерода на механические свойства углеродистых сталей

По структуре стали, находящейся в равновесном состоянии, можно приблизительно определить содержание углерода, а затем установить марку стали. Для этого на микроструктуре, рассматриваемой под микроскопом, ориентировочно определяют площади, занимаемые перлитом, ферритом, цементитом. Принимают содержание углерода в феррите равным нулю, в 100 % перлита — 0,8 %, а в 100 % цементита — 6,67 % С.

Например, пусть в доэвтектоидной стали перлит занимает 25 % всей площади, феррит — 75 %. Тогда содержание углерода в стали можно определить из пропорции:

$$\begin{aligned} 100 \% \text{ перлита} &- 0,8 \% \text{ С,} \\ 25 \% \text{ перлита} &- x \% \text{ С, откуда} \end{aligned}$$

$$C = \frac{25 \cdot 0,8}{100} = 0,2 \% C.$$

Такое содержание углерода имеет конструкционная сталь марки 20. По структуре заэвтектоидной стали не рекомендуется определять содержание углерода, так как с увеличением его содержания мало изменяется площадь, занимаемая цементитом, и можно сделать грубую ошибку в расчете.

Что же представляют из себя структурные составляющие углеродистых сталей: феррит, перлит, цементит и аустенит?

Микроструктура феррита (Ф) дана на рис. 2а. Это почти чистое железо, модификации Fe_a с решеткой объемно-центрированного куба – ОЦК, в котором растворяется 0,006 % С. При повышении температуры растворимость углерода увеличивается до 0,02 % С. Это самая мягкая структурная составляющая сталей (HB80 – 100, $\sigma_B \approx 250$ МПа, $\delta \approx 50$ %, $\psi \approx 80$ %); стали с высоким содержанием феррита легко деформируются, но плохо обрабатываются резанием.

На рис. 2д дана **микроструктура перлита (П)**. Перлит присутствует во всех сталях. Из одного перлита состоит сталь с содержанием углерода 0,8 %. Перлит – это эвтектоид – смесь феррита и цементита, получающаяся при распаде аустенита с 0,8 % С. При травлении шлифа стали 0,8 % С, т. е. эвтектоидной стали, поверхность имеет перламутровый отлив, в связи с чем такую структуру и назвали перлитом.

В зависимости от режима отжига перлит имеет пластинчатое или зернистое строение.

Пластинчатым перлитом называют эвтектоидную смесь, в которой в кристаллах феррита равномерно распределены, чаще всего слегка изогнутые, параллельно расположенные, кристаллы цементита пластинчатой формы.

При больших увеличениях (в 500 – 1000 раз) при рассмотрении в оптический микроскоп пластинчатое строение различимо всегда. При меньших увеличениях пластинчатое строение различимо только при достаточной толщине, а если перлит тонкопластинчатый, то зерна перлита при рассмотрении в микроскоп имеют однородный темный цвет.

Пластинчатая форма перлита образуется при нагреве углеродистых сталей выше температур линии GSE и медленном охлаждении.

Зернистым перлитом называют эвтектоидную смесь, в которой в кристаллах перлита равномерно распределены округлые (глобу-

лярные) кристаллы цементита. Образуется при нагреве стали выше температур линии PSK и медленном охлаждении.

Строение зернистого перлита хорошо выявляется при средних (300 – 400 раз) и даже меньших увеличениях.

Механические свойства перлита зависят от размера (в случае пластинчатого перлита от толщины) кристалла цементита, возрастая с увеличением дисперсности строения, а также от формы кристалла цементита. Перлит пластинчатый характеризуется более высокой твердостью и прочностью (твердость перлита пластинчатого 180-250 НВ $\sigma_b \approx 550-820$ МПа; $\delta \approx 5-15$ %; твердость перлита зернистого 160-220 НВ; $\sigma_b \approx 630$ МПа, $\delta \approx 20$ %).

Цементит (Ц) – это химическое соединение Fe_3C – карбид железа. В цементите 6,67 % С. Характеризуется очень высокой твердостью (~ 800НВ) и практически нулевой пластичностью ($\delta \approx 0$ %), т. е. хрупкий. Чем больше цементита в сталях, тем большей твердостью и меньшей пластичностью они обладают.

Аустенит (А) – структурная составляющая, появляющаяся в углеродистой стали только при нагреве выше $727^\circ C$ (см. рис. 1). Это раствор углерода в другой модификации железа – Fe_γ с решеткой гранцентрированного куба (ГЦК). Аустенит пластичен, твердость его 160 – 200 НВ, $\delta \approx 40 - 50$ %, поэтому хорошо куется, штампуется, прокатывается.

2. Ознакомиться с классификацией и маркировкой углеродистых сталей

Каждая партия стали сопровождается документом (сертификатом), который удостоверяет соответствие стали заказу и требованиям ГОСТов или технических условий (ТУ).

В сертификате, в частности, должны содержаться следующие сведения – марка стали, ее химический состав; номер соответствующего стандарта (ГОСТа, ТУ); номер плавки и номер партии; результаты всех испытаний, предусмотренных стандартом; данные о группах и категориях стали по свойствам, по назначению, качеству поверхности и др.

По назначению углеродистые стали разделяют на конструкционные, инструментальные и специального назначения.

Конструкционные углеродистые стали по качеству бывают обыкновенного качества и качественные; инструментальные – качественные и высококачественные.

Стали углеродистые обыкновенного качества маркируют сочетанием букв "Ст" – сталь и цифрой (от 0 до 6) – условный номер стали. С увеличением номера возрастает содержание углерода, повышаются прочностные характеристики и одновременно снижается пластичность. Для обозначения степени раскисления после номера марки ставятся индексы: кп- кипящая, пс- полуспокойная, сп- спокойная (например: Ст3кп, Ст3пс, Ст3сп).

В обозначении марки качественной конструкционной стали две цифры указывают среднее содержание в ней углерода в сотых долях процента. Например, сталь 20 – (0,17-0,22 % С) – ~ 0,2 % С, сталь 45 – (0,42-0,5%) – ~ 0,45 % С.

Степень раскисления в марках спокойных сталей не отражается, а в марках полуспокойных и кипящих сталей, как и сталей обыкновенного качества, обозначается буквами "пс" и "кп" соответственно. В качественных конструкционных сталях всех марок допускается содержание серы не более 0,040 % и фосфора – не более 0,035 %.

Для обозначения инструментальных углеродистых сталей используется буква У. Содержание углерода указывается в десятых долях процента. Буква А, стоящая в конце марки стали, указывает, что сталь является высококачественной. Например, У7 – сталь инструментальная, углеродистая с содержанием углерода 0,7 %, У13А – сталь инструментальная углеродистая, среднее содержание углерода 1,3 %, высококачественная.

3. Ознакомиться с назначением и применением углеродистых сталей

Углеродистые стали обыкновенного качества (ГОСТ 380-94) относятся к числу наиболее дешевых и широко применяемых. Из них получают до 70 % всего проката – горячекатанного, сортового и фасонного, толсто- и тонколистового. Из этих сталей изготавливают трубы, поковки, штамповки, ленту, проволоку, металлические изделия (метизы): гвозди, канаты, сетки, болты, гайки, заклепки, а также мало- и средненагруженные детали, штифты, шайбы, шпонки, крышки, кожухи, а из стали номеров 4-6 – валы, винты, зубчатые колеса и шпиндели. Стали обыкновенного качества хорошо свариваются и обрабатываются резанием.

Из углеродистых качественных конструкционных сталей (ГОСТ 1050-88) производят прокат, поковки, калиброванную сталь, сталь серебрянку, сортовую сталь, штамповки и слитки. Эти стали явля-

ются основным материалом для изготовления таких деталей машин, как валы, шпиндели, оси, зубчатые колеса, шпонки, муфты, фланцы, фрикционные диски, винты, гайки, упоры, тяги, цилиндры гидроприводов, эксцентрики, звездочки цепных передач, т. е. деталей различной степени нагружения. Они хорошо обрабатываются давлением и резанием, лются и свариваются, подвергаются термической, термомеханической и химико-термической обработке. Различные специальные виды обработки обеспечивают вязкость, упругость и твердость сталей, позволяют делать из них детали, вязкие в сердцевине и твердые снаружи, что резко увеличивает их износостойкость и надежность.

Качественные конструкционные стали обладают более высокими механическими свойствами, чем стали обыкновенного качества, за счет меньшего содержания в них фосфора, серы и неметаллических включений. Но они на 10-15 % дороже сталей обыкновенного качества, поэтому используются преимущественно для изготовления более нагруженных деталей. По видам обработки их делят на горячекатанную, кованую, калиброванную и серебрянку (со специальной отделкой поверхности).

ГОСТ1050-94 предусматривает следующие марки качественных конструкционных сталей: 05кп, 08кп, 08пс, 08, 10кп, 10пс, 10, 11кп, 15кп, 15пс, 18кп, 20кп, 20пс, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 58 (55пп), 60. В стали 58 (55ПП) буквы обозначают пониженную прокаливаемость.

Из инструментальных углеродистых сталей (ГОСТ 1435-90) получают горячекатаную, кованую и калиброванную сталь, сталь серебрянку, сталь для сердечников, а также слитки, листы, ленту, проволоку и другую продукцию. Из этих сталей изготавливают режущий инструмент, штампы для холодного деформирования.

В качественных инструментальных углеродистых сталях допускается содержание 0,03 % серы и 0,035 % фосфора, в высококачественных – 0,02 % серы и 0,03 % фосфора. Стали, полученные методом электрошлакового переплава, содержат до 0,015 % серы.

Инструментальная сталь должна обладать высокой твердостью, значительно превышающей твердость обрабатываемого материала, износостойкостью и теплостойкостью (способностью сохранять свойства при высоких температурах). Измерительный инструмент, изготовленный из такой стали, должен быть твердым и длительное время сохранять заданные размеры и форму. Рабочие детали штампов и накатных роликов для

холодного деформирования (вытяжки, гибки, высадки, пробивки отверстий, накатки, раскатки), сделанные из этой стали, должны иметь высокую твердость, обладать износостойкостью при достаточной вязкости. Все это достигается путем закалки с отпуском, а для измерительного инструмента и за счет искусственного старения.

Из стали У9 производят деревообрабатывающий режущий инструмент (сверла, фрезы, ножи) и ножовочные полотна для обработки стали. Металлорежущий инструмент (фасонные резцы, сверла, метчики, плашки, развертки, фрезы, напильники и ходовые винты прецизионных станков) изготавливают из сталей У10, У11 и У12, бритвенные ножи, лезвийный хирургический инструмент и напильники – из стали У13, слесарные молотки, зубила, губки тисков – из сталей У7 и У8, шаблоны, скобы, детали микрометрического инструмента, гладкие и резьбовые калибры, цанги, фрикционные диски, штампы, пружины и др. – из сталей У8, У9 и У10. Как правило, изготовлению инструмента предшествуют отжиг на зернистый цемент, который способствует лучшей обрабатываемости резанием и уменьшает коробление деталей при закалке.

К углеродистым сталям специального назначения относятся рессорно-пружинные (ГОСТ 14959-79). Они выпускаются следующих марок: 65, 70, 75, 80, 85. Цифры показывают среднее содержание углерода в сотых долях процента. Стали нелегированные для отливок (ГОСТ 977-79) 15Л, 20Л, ..., 55Л используются для изготовления литых деталей, в том числе коленчатых валов (40Л, 45Л). В марке цифры соответствуют среднему содержанию углерода в сотых долях процента, буква Л означает сталь литейная.

Стали повышенной и высокой обрабатываемости резанием (автоматные) согласно ГОСТ 1414-75 выпускаются следующих марок:

- углеродистые сернистые (0,15-0,30 % S; 0,8-1,55 % Mn) – А12, А20, А30, А35, А40, А40Г;
- свинцовосодержащие (0,04-0,10 % Pb) – АС40, АС35Г и др.;
- сернистоселеновые с комплексным легированием S(0,09 %) и Se(0,07 %) – А35Е, А45Е и др.;
- кальцийсодержащие (0,2-0,35 % С; 0,04-0,07% S; 0,003-0,009 % Ca) – АЦ20 и др.

В марке буква А указывает, что сталь автоматная, цифры после нее показывают содержание углерода в сотых долях процента, затем следуют буквы, соответствующие легирующему элементу и цифры после них, показывающие его содержание. Введение серы или серы

совместно с другими элементами (селен, кальций) приводит к образованию по границам зерен ферритно-перлитной структуры сульфидов марганца MnS и кальция, селенидов или свинца – это облегчает резание, способствует дроблению и легкому отделению стружки; увеличивается срок службы режущего инструмента, улучшается качество обрабатываемой поверхности изделий. Из этих сталей изготавливают мелкие детали массового спроса: детали швейных, текстильных, счетных, пишущих машин; оси, валики, втулки, шестерни, винты, болты, гайки и другие детали, к которым предъявляются повышенные требования к шероховатости поверхностей и точности размеров. Автоматные стали по содержанию углерода – доэвтектоидные. В них (АС12ХН, АЦ20ХНМ и большинство других) введены легирующие элементы, позволяющие получать однородную структуру при термической обработке в любых по толщине деталях.

4. Экспериментальная часть

Изучить коллекцию углеродистых сталей, зарисовать схематично микроструктуры и по графику (рис. 3) определить прочность каждой марки стали. Установить связь между структурами сталей и диаграммой железо-цементит.

5. Содержание отчета

1. Левый нижний угол диаграммы железо-цементит и характеристику фаз, составляющих структуру стали.
2. Назначение и маркировку углеродистых сталей.
3. Рисунки микроструктур сталей со структурными составляющими.

6. Контрольные вопросы

1. Структурные составляющие сталей и их свойства.
2. Классификация углеродистых сталей по структуре, по назначению и по качеству.
3. Маркировка углеродистых сталей.
4. Назначение и применение углеродистых сталей.
5. Связь структуры и марки стали с диаграммой состояния железо-цементит.

Лабораторная работа № 6 ЗАКАЛКА СТАЛИ

Цель работы: ознакомиться с теорией и технологией проведения закалки и провести закалку углеродистой стали.

Необходимые приборы и материалы: микроскоп ММУ-3 или МЕТАМ-Р, шлифовальная и полировальная машины, твердомеры ТШ-2М и ТАК КАК-2, микроскоп ПМБ-6, электропечь СНОЛ, клещи, емкости с охлаждающими жидкостями, фильтровальная бумага, вата, травитель, спирт, паста ГОИ и образцы из углеродистой стали.

Задача работы:

1. Назначить режим закалки: а) температуру закалки в зависимости от марки стали; б) продолжительность нагрева и выдержки образца в печи; в) охлаждающую среду.

2. Замерить твердость до и после закалки и сделать вывод.

Теоретическая часть

Закалкой называется процесс термической обработки, состоящей из нагрева стали до температуры выше критической (выше A_{C3} для доэвтектоидных сталей и выше A_{C1} – для эвтектоидных и заэвтектоидных), выдержки при этой температуре и последующего охлаждения со скоростью, превышающей критическую. Закалка не является окончательной термической операцией. Чтобы уменьшить хрупкость и напряжения, вызванные закалкой и получить требуемые механические свойства, сталь после закалки подвергают отпуску.

Закалку с последующим отпуском инструментальных сталей проводят с целью получения твердости, прочности и износостойкости, а конструкционных - с целью получения достаточной прочности, твердости при высокой пластичности и вязкости, а для деталей, работающих в условиях износа, и высокой износостойкости.

Высокую твердость, прочность и износостойкость сталям после закалки обеспечивает образующаяся структура мартенсита. Мартенситом называется перенасыщенный твердый раствор углерода в альфа-железе с тетрагональной кристаллической решеткой (рис.1).

Механизм образования мартенсита

При комнатной температуре структура стали состоит из феррито-цементитной смеси, называемой перлитом, у эвтектоидной стали; из феррита и перлита у доэвтектоидной стали и перлита и цементита у заэвтектоидной стали.

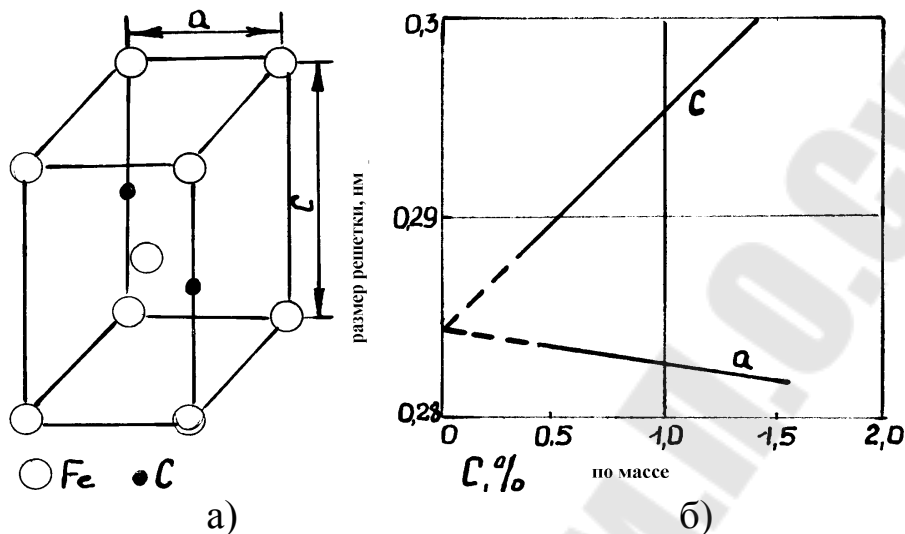


Рис. 1. а) Кристаллическая решетка мартенсита;

б) ее параметры в зависимости от содержания углерода в мартенсите

Феррит - твердый раствор углерода и других примесей в альфа-железе с объемноцентрированной кристаллической (О.Ц.К.) решеткой. Растворимость углерода мала и при комнатной температуре составляет 0,006 %.

Цементит - химическое соединение углерода с железом со сложной ромбической плотноупакованной решеткой, содержащее 6,67% углерода.

Температуру нагрева стали выбирают таким образом, чтобы образовалась структура аустенита.

Аустенит - твердый раствор углерода и других примесей в гамма-железе с кубической гранецентрированной (Г.Ц.К.) решеткой. Растворимость углерода зависит от температуры и изменяется в пределах от 0,8-2,14%.

При нагреве стали до температуры выше критической будет протекать полиморфное превращение альфа-железа в гамма-железо, т.е. превращение феррита в аустенит с одновременным растворением цементита в аустените, т.к. растворимость углерода в аустените велика, то весь углерод, находящийся в стали, будет в нем растворяться.

При нагреве доэвтектоидной или заэвтектоидной стали процесс аустенизации осложняется превращением структурно свободного феррита в аустенит или растворением избыточного цементита в ау-

стените. Чем больше в стали углерода, тем быстрее протекает процесс аустенизации, что объясняется увеличением количества цемента, а, следовательно и ростом суммарной поверхности раздела феррита и цемента, на которой образуются кристаллы аустенита.

Примечание: усталей, легированных тугоплавкими элементами, часть углерода будет оставаться в виде: WC , VC , TiC и т.д.

В процессе выдержки образца в печи происходит полный прогрев изделия и выравнивание состава аустенита, т.к. аустенит, образовавшийся на феррите, будет низкоуглеродистым, а на границе с цементитом - высокоуглеродистым.

Охлаждение нагретой стали ниже температуры 727 градусов (критическая $t. A1$) вызовет обратное превращение гамма-железа в альфа-железо. Чем выше скорость охлаждения, тем ниже температура этого превращения. При скорости охлаждения, превышающей критическую, превращение гамма- в альфа-железо протекает в области низких температур, и образующийся феррит будет содержать столько же углерода, сколько его содержалось в аустените, т.к. при низких температурах из-за малой подвижности атомов диффузия отсутствует. Следовательно, образующийся твердый раствор углеродом в альфа-железе будет перенасыщен. Атомы углерода занимают октаэдрические поры вдоль оси $[001]$ в решетке альфа-железа и сильно ее искажают, т.е. вместо О.Ц.К. решетки образуется твердый раствор с тетрагональной кристаллической решеткой (рис. 1а). Причем, чем выше содержание углерода в растворе, тем выше степень тетрагональности (C/a), т.к. параметр « C » увеличивается быстрее, чем параметр « a » понижается (рис.1б). При перестройке решетки атомы не обмениваются местами, а только смещаются друг относительно друга на расстояние, не превышающее межатомное. Таким образом, механизм мартенситного превращения бездиффузионный, сдвиговый.

Температура, при которой начинается превращение аустенита в мартенсит называется температурой начала мартенситного превращения (M_n). Превращение продолжается при непрерывном охлаждении до температуры конца мартенситного превращения (M_k). Температуры M_n и M_k не зависят от скорости охлаждения и определяются только химическим составом стали. Чем больше в стали содержание углерода, тем ниже по оси температур лежат точки M_n и M_k (рис. 2).

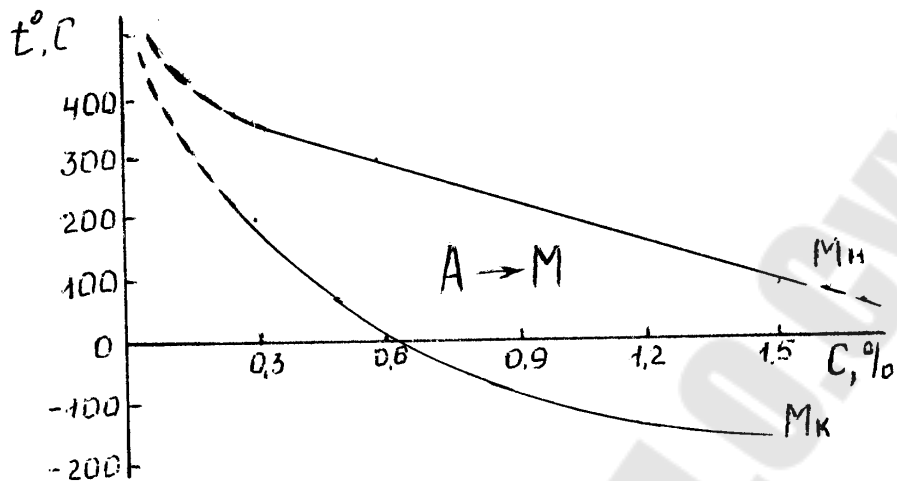


Рис. 2. Влияние углерода на температуры M_n и M_s

Влияние легирующих элементов на температуры M_n и M_s показано на рисунке 3.

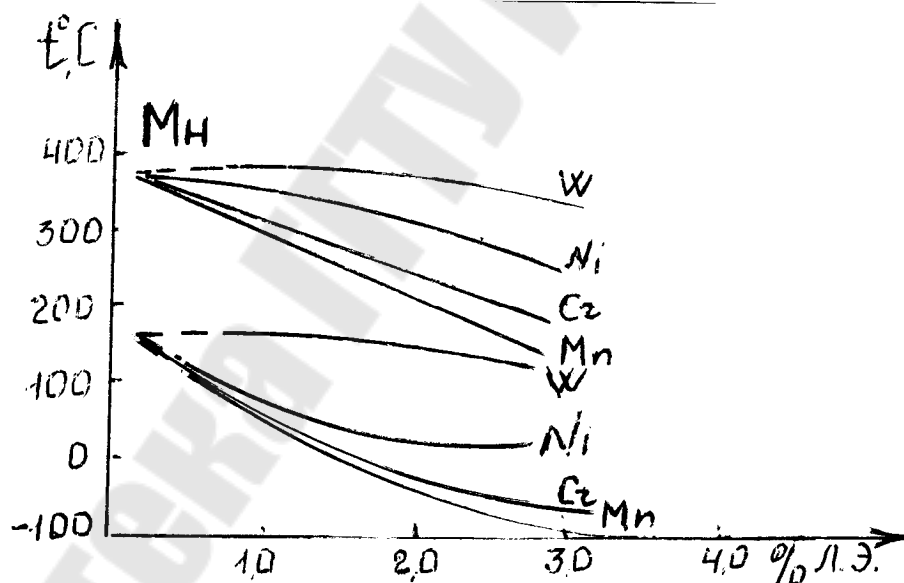


Рис. 3. Влияние легирующих элементов на температуры M_n и M_s

Мартенситное превращение отличается большой скоростью $\sim 10^6$ мм/с.

Однако кристаллы растут только до определенной величины, до границы зерна аустенита, а затем их рост прекращается, и дальнейшее развитие превращения осуществляется за счет образования новых кристаллов мартенсита. Мартенсит, по сравнению с другими структурными составляющими имеет наибольший удельный

объем. Увеличение удельного объема при образовании мартенсита является одной из основных причин возникновения больших внутренних напряжений, вызывающих коробление и деформацию изделий или даже появление трещин.

Высокая прочность (до 2300 МПа) и твердость (до 67 HRC) обусловлена влиянием внедренных атомов углерода в решетку альфа-фазы, созданием микро- и субмикроскопической неоднородности строения с повышенной плотностью дефектов кристаллического строения. Поверхности раздела кристаллов мартенсита представляют собой труднопреодолимые препятствия для движения дислокаций. Подвижность дислокаций затруднена и в связи с повышенной их плотностью из-за фазового наклепа. Хрупкость мартенсита связана с пониженной подвижностью заблокированных дислокаций, что уменьшает возможность пластической релаксации в местах концентрации напряжений.

Выбор температуры нагрева стали

При проведении закалки необходимо задать следующие параметры:

- выбрать температуру нагрева стали,
- определить время нагрева и выдержки образца в печи,
- выбрать охлаждающую среду.

Выбор температуры нагрева стали

Температура нагрева зависит от содержания в стали углерода. Доэв-тектоидные стали необходимо нагревать до температуры на 30-50 градусов выше критической точки АС3 (рис.4). В этом случае сталь с исходной феррито-перлитной структурой приобретает аустенитную структуру, которая при охлаждении со скоростью, превышающей критическую, превращается в мартенситную структуру. Закалку с температуры, лежащей между критическими точками АС1 - АС3, проводить не рекомендуется, т.к. после охлаждения, наряду с мартенситом, сохраняются участки феррита, не претерпевшего превращения в аустенит при нагреве. Присутствие феррита снижает твердость стали после закалки и ее механические свойства после отпуска. Нагрев стали значительно выше критической точки АС3 вызовет рост зерна аустенита, что в свою очередь приведет после охлаждения к образованию крупноигльчатого мартенсита и ухудшению вязкости.

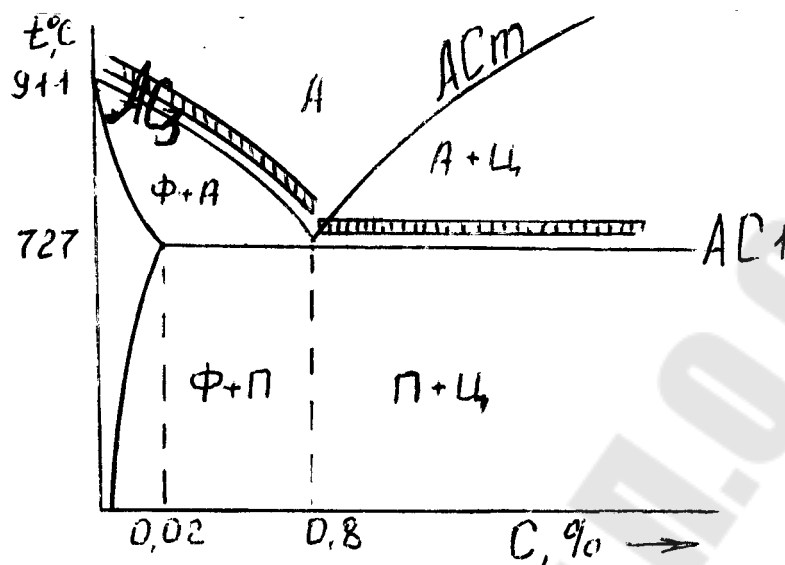


Рис. 4. Температурный интервал закалки на диаграмме Fe-Fe₃C

Заэвтектоидные стали нагревают до температуры на 10 - 30 градусов выше критической точки AC₁ (рис.4). В результате образуется структура аустенита с сохранением некоторого количества цементита. После охлаждения со скоростью выше критической, структура стали будет состоять из мартенсита, нерастворившихся пластинок цементита и аустенита остаточного (Аост.). Наличие в структуре Аост. объясняется тем, что температура M_к (рис.2) опускается ниже 20 градусов.

Присутствие пластинок цементита в структуре закаленной стали увеличивает ее износостойкость. Поэтому нагрев этих сталей выше критических точек AC_м нецелесообразен, т.к. в структуре увеличивается количество Аост и отсутствует цементит.

Примечание: температура нагрева под закалку высоколегированных сталей значительно превышает (на 150-250 градусов) критические точки AC₁ и AC₃, что необходимо для перевода в твердый раствор труднорастворимых карбидов. Такое повышение температуры нагрева не приведет к заметному росту зерна аустенита, т.к. частицы карбидов, располагаясь по границам зерна аустенита, сдерживают его рост.

Определение времени нагрева и времени выдержки образца в печи

Продолжительность нагрева зависит от размеров и формы образца, от химического состава стали, от нагревающей среды, от

типа печи, от способа нагрева, от количества образцов и способа их укладки и окончательно устанавливается экспериментальным путем.

Можно рекомендовать следующие практические нормы расчета времени нагрева под закалку образцов из углеродистой стали t_n (на 1 мм толщины или диаметра): в электрической печи - 1 мин; в соляной ванне - 0,3 мин; в свинцовой ванне - 0,15 мин.

Выдержка образцов в печи составляет $1/5$ от времени нагрева (t_v).

При нагреве деталей навалом указанные нормы необходимо увеличить

в 1,5-2 раза. Таким образом, общее время нахождения образцов в печи составляет сумму времени нагрева и времени выдержки:

$$t_{\text{общ.}} = t_n + t_v$$

Выбор охлаждающей среды

Скорость охлаждения при закалке необходимо выбирать превышающей скорость критическую.

Критической скоростью закалки называется минимальная скорость охлаждения, при которой аустенит превращается в мартенсит. Величина критической скорости зависит от устойчивости аустенита переохлажденного и, следовательно, зависит от химического состава стали. Углеродистые стали имеют высокую критическую скорость закалки (800 - 200 градусов в секунду). Чем выше температура нагрева, тем выше устойчивость переохлажденного аустенита и, следовательно, меньше критическая скорость закалки. Для многих легированных сталей критическая скорость закалки составляет 20-30 градусов в секунду и ниже.

Скорость охлаждения должна быть высокой при температурах наименьшей устойчивости аустенита (650 - 500 градусов), а в области мартенситного превращения (300-200 градусов) ее целесообразно уменьшать, чтобы предотвратить образование новых внутренних напряжений, вызывающих коробление и деформацию закаливаемых изделий и образование трещин.

В качестве охлаждающих (закаливающих) сред для углеродистых и низколегированных сталей используют воду и различные водные растворы, а для легированных сталей с высокой устойчивостью аустенита - масло и воздух.

Свойства воды как закалочной среды улучшаются при добавлении поваренной соли или щелочи, или серной кислоты, т.к. рас-

творы ускоряют охлаждение в области высоких температур и замедляют его в области мартенситного превращения по сравнению с охлаждением в чистой воде. Для равномерного охлаждения образцов необходимо их перемещать в закалочной среде.

Экспериментальная часть.

1. Получить у преподавателя образец из углеродистой стали.
2. Изготовить микрошлиф.
3. Замерить твердость на приборе Бринеля.
4. По микроструктуре стали определить содержание в ней углерода и, следовательно, марку стали.
5. Назначить температуру закалки.
6. Рассчитать время нагрева и выдержки образца в печи.
7. Выбрать охлаждающую среду.

Выбор охлаждающей среды необходимо согласовать с преподавателем, т.к. для дальнейшей работы необходимо иметь образцы с различной структурой.

8. Провести закалку образца.
9. Замерить твердость на приборе Роквелла.
10. Оформить отчет по работе.

Содержание отчета

1. Основные теоретические материалы по механизму образования мартенсита и выбору температуры, времени и скорости охлаждения.
2. Результаты выполненной работы внести в таблицу 1.

Таблица 1

Микроструктура	Марка стали	Температура закалки	Время нагрева	Время выдержки	Твердость до закалки	Охлаждающая среда	Твердость после закалки	
							HRC ₃	HB

- 3.
4. По изменению твердости после термической обработки сделать вывод.

Контрольные вопросы

1. Что такое закалка и ее назначение?
2. Каков механизм образования мартенсита и его структура?

3. Как определить температуру нагрева стали и обосновать правильность ее выбора?
4. Как определить время нахождения образца в печи и какие факторы на него влияют?
5. Как выбирается скорость охлаждения при закалке?

Лабораторная работа №7 СТРУКТУРА УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ В НЕРАВНОВЕСНОМ СОСТОЯНИИ

Цель работы: изучить микроструктуру углеродистых сталей в неравновесном состоянии и проанализировать влияние скорости охлаждения на микроструктуру и твердость термически обработанной стали.

Необходимые приборы и материалы: микроскоп ММУ-3, шлифовальная и полировальная машины, травитель, спирт, вата, фильтровальная бумага, твердомер ТК-2, образцы углеродистых сталей, подвергнутые термической обработке в лабораторной работе «Закалка стали».

Теоретическая часть

Неравновесное состояние сталей достигается при конечных скоростях охлаждения. Превращения в сплавах в этом случае будут протекать при температурах ниже 727 градусов, и чем выше скорость охлаждения, тем ниже температура превращений.

Примечание: равновесное состояние сплава достигается только при бесконечно малых скоростях охлаждения.

Для описания кинетики превращения аустенита переохлажденного и образующихся при различных скоростях охлаждения микроструктур пользуются экспериментально построенными диаграммами изотермического превращения аустенита (рис. 1).

На рис.1 пунктирная линия А1 (727 градусов) отвечает теоретической температуре превращения аустенита и разделяет область существования аустенита устойчивого (выше этой линии) и неустойчивого (ниже этой линии).

Линия 1 отвечает температурам начала распада, а линия 2 - конца распада аустенита на феррито-цементитную смесь при охлаждении сталей со скоростями меньше критической скорости закалки.

Критической скоростью $V_{\text{крит.}}$ закалки называется минимальная скорость охлаждения, при которой аустенит превращается в мартенсит. Линии Мн и Мк - отвечают температурам начала и конца мартенситного превращения соответственно. Линии V1, V2, V3, V4, V5 - кривые охлаждения.

Рассмотренная на рис.1 диаграмма является диаграммой изотермического распада аустенита для эвтектоидной стали. В до-

эвтектоидной и заэвтектоидной сталях в интервале температур между критическими точками А1 и А3 выделяются избыточные фазы: феррит (в доэвтектоидной) и цементит (в заэвтектоидной). Начало выделения избыточных фаз на диаграмме отмечается дополнительной линией (рис.2).

При охлаждении со скоростями $V_1 < V_2 < V_3 < V_4 < V_5$ из аустенита выделяется цементит, зародыши которого, как правило, образуются на границах зерен аустенита. Прилегающий к цементиту объем аустенита обедняется углеродом, и он испытывает полиморфное (гамма в альфа) прерращение, т.е. превращается в феррит. Следовательно, при скоростях охлаждения меньше $V_{крит.}$ происходит распад аустенита на феррито-цементитную ($\Phi + \Psi$) смесь, и превращение аустенита является диффузионным.

Чем выше скорость охлаждения, тем больше степень переохлаждения аустенита и тем более дисперсной образуется смесь (табл. 1), (рис.4).

Это превращение аустенита называется перлитным. Продукты перлит-

ного превращения имеют пластинчатое строение и различаются:

п е р л и т - грубая феррито-цементитная смесь;

с о р б и т - мелкозернистая феррито-цементитная смесь, различаемая в оптическом микроскопе при 500-кратном увеличении;

т р о о с т и т - высокодисперсная феррито-цементитная смесь, различаемая только в электронном микроскопе.

Таблица 1

Скорость охлаждения	R_0 , мкм	НВ	Микро-структура	Интервал превращения (градусов)
V_1	0,6 - 1,0	180 - 250	перлит	700 - 650
V_2	0,25 - 0,30	250 - 350	сорбит	650 - 550
V_3	0,1 - 0,15	350 - 450	троостит	550 - 400

R_0 - межпластинчатое расстояние, равное усредненной сумме толщин двух пластинок феррита и цементита.

Однако надо учитывать, что разделение феррито-цементитной структуры на перлит, сорбит и троостит условно и между этими структурами нет четкой границы.

При охлаждении стали со скоростью более $V_{кр}$ (кривая охлаждения V_5 рис.1) превращение аустенита начинается при низких температурах (250-200 градусов), причем, диффузия атомов и желе-

за, и углерода отсутствует, и образуется структура, называемая мартенситом. Твердость мартенсита 55-65 HRC. Превращение аустенита начинается при достижении температуры M_n (рис.1). Из-за отсутствия диффузии железа перестройка решетки ГЦК (аустенита) осуществляется направленным кооперативным смещением атомов, т.е. образуется твердый раствор углерода в ОЦК решетке с таким же содержанием углерода, как и в ГЦК решетке. Но растворимость углерода в ОЦК решетке мала (0,006%), следовательно, образующийся раствор углерода в альфа-железе является перенасыщенным. Перенасыщение углеродом вызывает превращение ОЦК решетки в тетрагональную кристаллическую решетку. Такой перенасыщенный раствор углерода в альфа-железе с тетрагональной решеткой называется мартенситом. Превращение заканчивается при температуре M_k (рис.1).

Кристаллы мартенсита представляют собой широкие тонкие пластины и в плоскости шлифа имеют вид игл (рис.5а), поэтому структуру мартенсита называют игольчатой. Размеры кристаллов мартенсита определяются величиной исходного зерна аустенита, т.к. имеют протяженность, соответствующую поперечному размеру зерна аустенита, т.е. чем крупнее зерно аустенита, тем крупнее зерно мартенсита.

Как указывалось в лабораторной работе «Закалка стали», в структуре закаленной стали, содержащей углерода более 0,5 %, наряду с мартенситом содержится аустенит остаточный ($A_{ост}$), т.к. температура M_k (рис.1) у этих сталей допускается ниже 20 градусов. Количество $A_{ост}$ тем больше, чем больше в стали углерода. На микроструктуре он наблюдается при больших увеличениях в виде светлых участков. Присутствие $A_{ост}$ в структуре закаленной стали является нежелательным, т.к. приводит к снижению твердости, прочности, износостойкости, а с течением времени и к изменению размеров детали из-за распада $A_{ост}$. Для уменьшения количества $A_{ост}$ непосредственно после закалки проводится обработка холодом, при которой сталь охлаждают ниже температуры M_k (рис.1), а, следовательно, происходит превращение $A_{ост}$ в мартенсит.

При охлаждении стали со скоростью V_4 (рис.1), превращение аустенита протекает в нижней части С-образных кривых при температурах 450-200 градусов. При таких температурах диффузия железа отсутствует, а самодиффузия углерода еще достаточно велика. В начале этого превращения происходит диффузионное пере-

распределение углерода в аустените, что приводит к образованию в нем объемов обедненных и обогащенных углеродом. Участки аустенита, обедненные углеродом, претерпевают гамма в альфа полиморфное превращение без диффузии железа только за счет направленного смещения атомов в процессе перестройки решетки, т.е. по мартенситному механизму. А из участков аустенита, обогащенных углеродом, выделяются частицы цементита, что соответственно, приводит к обеднению этих участков углеродом и к протеканию в них превращения по мартенситному механизму. Таким образом, рассмотренное превращение является промежуточным между перлитным и мартенситным и сочетает в себе элементы и диффузионного, и бездиффузионного превращений. Такое превращение называется бейнитным, а образующаяся структура - бейнитом или игольчатым трооститом. Твердость бейнита 45-50 HRC.

Бейнит - феррито-цементитная смесь игольчатой формы, различимая только в электронном микроскопе. Различают верхний и нижний бейнит.

Верхний бейнит образуется при распаде аустенита при температурах 500-350 градусов и имеет перистое строение, т.к. цементит выделяется не в виде пластинок, как в перлите, а в виде изолированных узких частиц. Нижний бейнит образуется при температурах от 350 градусов до точки Mn (рис.1) и имеет игольчатое строение.

Образование верхнего бейнита снижает пластичность стали по сравнению с получаемой для продуктов распада аустенита в перлитной области. Твердость и прочность при этом практически не изменяются. Это связано с выделением грубых карбидов по границам ферритных зерен.

Образование нижнего бейнита приводит к повышению прочности, твердости и пластичности по сравнению с продуктами распада аустенита в перлитной области. Это объясняется наличием внедренных атомов углерода и большей плотности дислокаций в мартенситной альфа-фазе, а также образованием включений дисперсных карбидов, расположенных в кристаллах этой фазы.

Экспериментальная часть

1. Изготовить микрошлиф закаленной в предыдущей работе стали.
2. Изучить и зарисовать микроструктуру.

3. Нарисовать диаграмму изотермического распада аустенита и нанести на нее кривую скорости охлаждения, позволяющей получить изученную микроструктуру.

4. Занести данные, полученные каждым студентом подгруппы, в таблицу 2.

Таблица 2

Охлаждающая среда Сталь	вода		масло		вода		вода+масло		воздух+вода	
	HR С	структура	HR С	структура	HRC	структура	HR С	структура	HR С	структура

5. Провести анализ таблицы и сделать вывод:

- о связи структуры и твердости стали;
- о влиянии скорости охлаждения на твердость и микроструктуру стали.

6. Оформить отчет по лабораторной работе.

Содержание отчета:

- Основные теоретические материалы о продуктах распада аустенита.
- Диаграмма изотермического распада аустенита с нанесенной на ней кривой охлаждения.
- Рисунок микроструктуры стали в равновесном состоянии.
- Заполненная таблица 2.

Контрольные вопросы:

- Какие структуры можно получить при охлаждении аустенита и каковы их свойства?
- Объясните механизм перлитного превращения.
- Объясните механизм мартенситного превращения.
- Объясните механизм бейнитного превращения.
- Почему у некоторых закаленных сталей в структуре обнаруживается $A_{ост}$, и как он влияет на свойства?

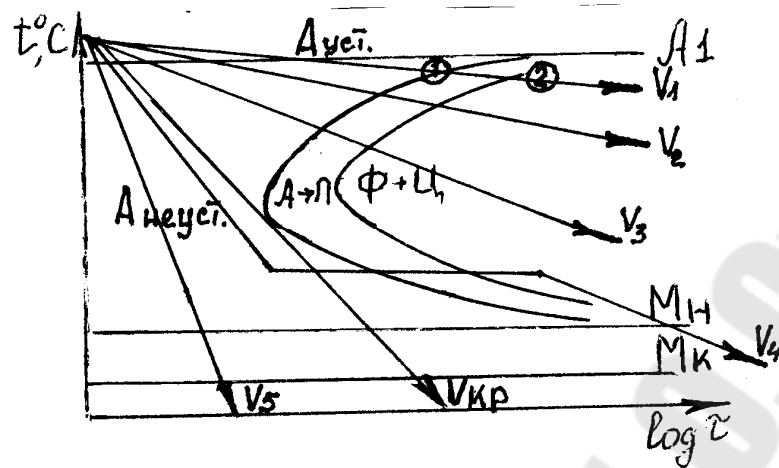


Рис. 1. Диаграмма изотермического превращения аустенита стали У8 с нанесенными на ней кривыми охлаждения

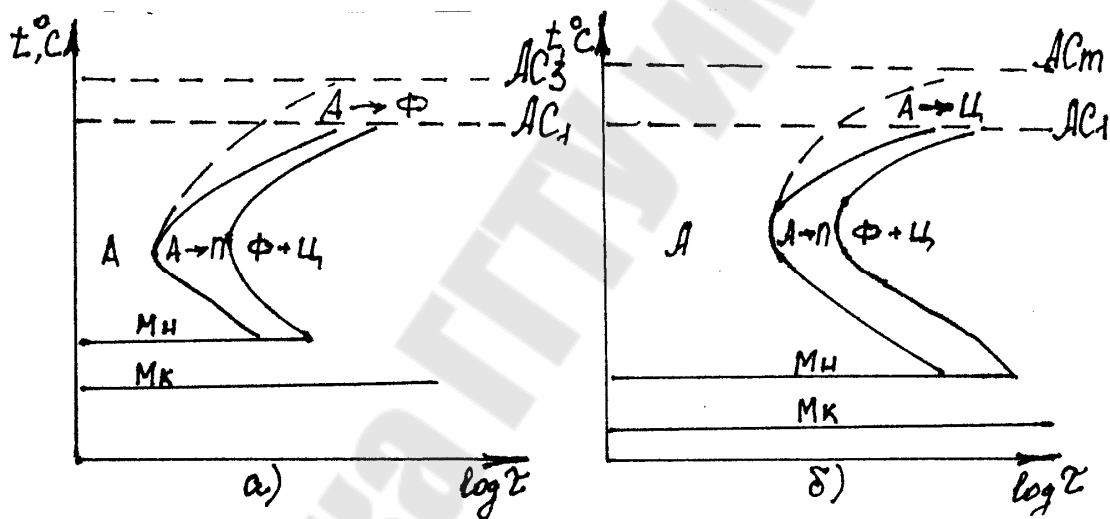


Рис. 2. Диаграмма изотермического распада аустенита в стали: а – доэвтектоидной, б – заэвтектоидной

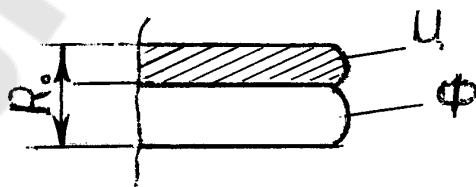


Рис. 3. Межпластинчатое расстояние

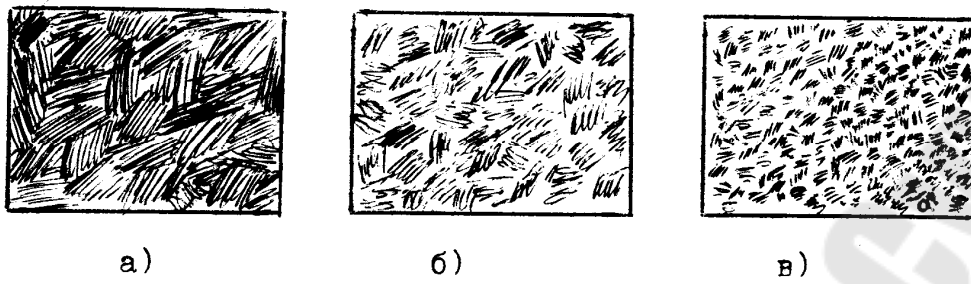


Рис. 4. Микроструктуры: а – перлита, б – сорбита, в – троостита

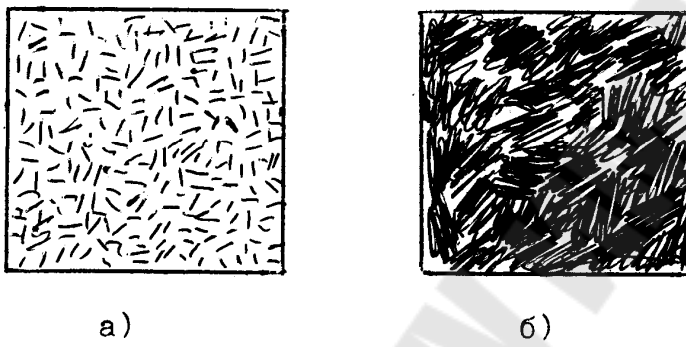


Рис. 5. Микроструктуры : а – мартенсита, б – бейнита

Лабораторная работа № 8 ОТПУСК СТАЛИ

Цель работы: исследовать влияние температуры отпуска на твердость закаленной стали.

Необходимые приборы и материалы: образцы закаленной стали, три лабораторные электропечи, шлифовальный круг, твердомер Роквелла.

Задача работы:

1. Исследовать влияние температуры отпуска на твердость стали.
2. По результатам исследования построить график зависимости твердости от температуры отпуска: 200, 400 и 600 градусов.

Теоретическая часть

Процесс отпуска состоит из нагрева закаленной стали до температуры ниже нижней критической точки (727 градусов), выдержки при этой температуре и последующего быстрого или медленного охлаждения.

Основное назначение отпуска - уменьшить или устранить внутренние закалочные напряжения, повысить вязкость и пластичность стали.

Закаленная на мартенсит сталь, имея высокую твердость, характеризуется низкими ударной вязкостью, пластичностью и пределом упругости, высокими внутренними напряжениями, и поэтому мало пригодна для использования. Окончательно свойства стали формируются отпуском. Основное влияние на свойства оказывает температура отпуска. Нагрев стали при отпуске увеличивает подвижность атомов и возможность их перемещения. Этим создаются условия для перехода стали из метастабильного состояния перенасыщенного твердого раствора в более стабильное. При отпуске происходит устранение напряжений, выделение углерода из твердого раствора, устранение искажений кристаллической решетки, образование цементита и коагуляция частичек цементита, а также и распад остаточного аустенита. Можно назвать следующие приближенные температурные районы протекания каждого из этих процессов в углеродистых и малолегированных сталях:

от 100 до 300 градусов - снятие тепловых напряжений;

от 150 до 250 градусов - устранение искажений кристаллической решетки твердого раствора;

от 150 до 500 градусов - выделение углерода и образование цементита;

от 300 до 400 градусов - распад остаточного аустенита;

от 400 до 650 градусов - коагуляция цементита.

В связи с этим, можно выделить четыре основные превращения при отпуске.

Первое превращение при отпуске - это превращение мартенсита закалки (тетрагонального) в отпущенный, и связано оно с уменьшением степени тетрагональности.

Уменьшение степени тетрагональности происходит за счет выделения углерода из мартенсита и образования карбидных частиц. Выделившиеся карбидные частички при этом сохраняют еще когерентную связь с основным твердым раствором. Когерентностью (соответствием) называется такая связь, когда пограничный слой атомов принадлежит одновременно и старой и новой фазам, в данном случае мартенситу и карбиду.

Скорость процесса распада мартенсита, а также концентрация углерода в нем зависят от температуры нагрева. Чем выше температура нагрева мартенсита, тем больше скорость превращения и тем меньше углерода будет содержаться в мартенсите. При температурах нагрева до 80 - 100 градусов скорость процесса ввиду малой подвижности атомов очень мала, поэтому заметных изменений в строении закаленной стали не наблюдается.

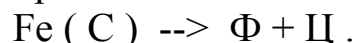
Заканчивается первое превращение при температурах около 300 градусов (температура зависит от содержания углерода в стали). Структура мартенсита отпуска состоит из мартенсита исходной концентрации, мелких карбидных частичек, окруженных пересыщенным твердым раствором «альфа» (мартенситом с меньшим содержанием углерода, чем исходный мартенсит). Кристаллическая решетка отпущенного мартенсита так же, как и мартенсита закалки, является тетрагональной, но с меньшей степенью тетрагональности.

Второе превращение при отпуске связано с превращением остаточного аустенита в мартенсит отпуска. На процесс выделения углерода из мартенсита при температурах 200-300 градусов накладывается процесс распада остаточного аустенита. Предполагают, что в результате распада остаточного аустенита в углеродистой стали образуются те же фазы, что и при распаде мартенсита

при тех же температурах. К концу второго превращения, т.е. при температуре 300 градусов в твердом растворе (мартенсите) содержится еще около 0,15-0,20 % углерода.

Третье превращение при отпуске, протекающее в интервале

температур 300-400 градусов, связано с окончательным распадом твердого раствора вследствие дальнейшего выделения углерода и образования обособленных частиц цементита. Сущность превращения может быть выражена схемой



Полученная структура (феррит + цементит) называется трооститом отпуска. Его образование сопровождается снятием внутренних напряжений.

Четвертое превращение при отпуске связано с процессом коагуляции - укрупнения и скругления цементитных частиц. При нагреве выше 450 градусов наряду с процессом укрупнения карбидных частичек, идет процесс сфероидизации (округления) карбидных частичек. При температурах 500-600 градусов структура феррито-цементитной смеси имеет зернистое строение средней степени дисперсности, которая называется сорбитом отпуска.

При температурах 650-700 градусов зернистое строение становится более грубым и переходит в перлит.

Превращения при отпуске протекают в очень малых объемах (внутри мартенситных игл), а поэтому обычный микроструктурный анализ не позволяет выявить происходящих структурных изменений до температур отпуска порядка 550 градусов. Структуры троостита и сорбита отпуска при увеличении в 500-600 раз трудно отличить от структуры мартенсита, т.к. эти структуры сохраняют мартенситную ориентировку, и только при увеличении больше 1000 раз отчетливо видно строение сорбита. При нагреве выше 550 градусов мартенситная ориентировка пропадает.

Как видно из рис.1 с повышением температуры отпуска показатели, характеризующие прочность стали (твердость, предел прочности, предел текучести) понижаются, а показатели пластичности и вязкости (относительное удлинение, сужение площади поперечного сечения и ударная вязкость) повышаются.

В зависимости от температуры нагрева различают три вида отпуска.

Н и з к о т е м п е р а т у р н ы й (низкий) отпуск (150-200 градусов, иногда 240-250 градусов) назначается для частичного снятия внутренних напряжений, некоторого повышения вязкости и пластичности без заметного снижения твердости. Структура - мартенсит отпуска. Низкотемпературному отпуску подвергают режущий и измерительный инструмент, а также детали машин, поверхностно закаленные и закаленные после цементации и цианирования.

С р е д н е т е м п е р а т у р н ы й (средний) отпуск выполняют при 350-500 градусах. Структура троостита отпуска обеспечивает высокий предел упругости, твердость 40-50 HRC. Поэтому среднему отпуску подвергают закаленные изделия, которые должны иметь максимальные упругие свойства при относительно высокой твердости: пружины, рессоры, ударный инструмент, зубила, штампы и др.

Охлаждение после отпуска при 400-450 градусах рекомендуется проводить в воде, что приводит к образованию в поверхностном слое остаточных напряжений сжатия, которые увеличивают предел выносливости деталей.

В ы с о к о т е м п е р а т у р н ы й (высокий) отпуск проводят при 500-650 градусах. Структура стали после высокого отпуска - сорбит отпуска. Высокий отпуск создает наилучшее соотношение прочности и вязкости стали, поэтому закалку с последующим высоким отпуском часто называют у л у ч - ш е н и е м с т а л и. Высокий отпуск применяется для нагруженных конструктивных деталей, испытывающих ударные и знакопеременные нагрузки: шатуны двигателей, полуоси, оси автомобилей и тракторов, болты, валы и многие другие детали.

Следует особо подчеркнуть, что хотя структуры, получаемые в результате отпуска, имеют те же названия, что и структуры, получаемые при распаде аустенита (троостит, сорбит), и также являются феррито-цементитными смесями, они имеют существенное отличие. Структуры, получаемые при отпуске мартенсита, являются зернистыми, в то время как одноименные структуры, получаемые при распаде аустенита, являются пластинчатыми.

Этим вызвано различие в свойствах одноименных структур. Зернистые структуры, при равном пределе прочности с пластинчатыми, обладают более высокими пределом текучести и пластичностью.

Время выдержки при отпуске зависит от температуры отпуска и размера деталей. Оно несколько больше, особенно легированных сталей, чем время выдержки при закалке, и при низких температурах больше, чем при высоких. Рекомендуется для высокого отпуска время выдержки от 30 минут до 1 часа, а для среднего отпуска - от 1 до 2 часов, для низкого отпуска - 2-3 часа.

Охлаждение углеродистых сталей после отпуска можно проводить с любой скоростью, структура не изменяется, однако очень быстрое охлаждение может вызвать термические напряжения. Поэтому охлаждение обычно проводят на воздухе.

Все вышесказанное относится к углеродистым сталям.

Отпуск легированных сталей имеет существенные особенности. До температуры 150 градусов легирующие элементы не оказывают существенного влияния на процесс отпуска. Но при более высоких температурах такие элементы, как хром, молибден, вольфрам, ванадий, титан и кремний тормозят распад мартенсита, а также образование и рост (коагуляцию) карбидных частиц. Объясняется это тем, что как для распада мартенсита, так и для роста карбидных частиц необходима диффузия (перемещение) атомов углерода, а легирующие элементы препятствуют этому. Поэтому в углеродистых сталях мартенсит сохраняется только до 300-350 градусов, в легированных сталях - до 450-500 градусов, а в высоколегированных он может сохраняться до еще более высоких температур. Это имеет важное практическое значение для деталей и инструментов, от которых требуется сохранение высокой твердости и износостойкости в условиях повышенной температуры. Охлаждение легированных сталей после отпуска часто ведут ускоренно.

Дополнительно следует отметить, что если при охлаждении стали из аустенитной области со скоростью меньше $V_{кр}$ получили структуры сорбита, троостита или бейнита, то при нагреве под отпуск в них будут происходить структурные изменения, т.е. они тоже «отпускаются».

При нагреве углеродистых сталей со структурой троостит или сорбит происходит коагуляция и сфероидизация карбидов.

В легированных сталях с карбидообразующими элементами происходят и карбидные превращения: например, при образовании троостита значительное переохлаждение аустенита затруднило образование специальных карбидов и отпуск при темпе-

ратуре 600-700 градусов вызовет превращение цементита в специальные карбиды.

При отпуске бейнитных структур, помимо указанных процессов происходит выделение карбидов из «альфа» - твердого раствора и изменение структуры феррита, как и при отпуске мартенсита.

Иногда закалку и отпуск стали совмещают в одной операции, которую называют закалкой с самоотпуском. Изделие одновременно погружают в воду или обрызгивают водой. Поверхностный слой закаливается на мартенсит и затем отпускается за счет тепла внутренних слоев изделия. Таким способом проводят сорбитизацию поверхностного слоя головки рельса.

В низкоуглеродистых сталях, в которых точка конца мартенситного превращения M_k находится выше 300 градусов, структурные изменения, характерные для отпуска, успевают протекать во время закалочного охлаждения в мартенситном интервале M_n-M_k и ниже температуры M_k .

Явление такого самоотпуска было использовано К.Ф.Стародубцевым в предложенном им процессе термического упрочнения проката. Этот процесс состоит в том, что в условиях непрерывного потока продукции прокатного стана прокат интенсивно охлаждается водой непосредственно на выходе из стана. Изделия из низкоуглеродистых сталей (арматура железобетона, листы и др.) после достижения температуры M_k охлаждаются на воздухе. При таком прерванном охлаждении происходит закалка с самоотпуском.

Исключение из технологического процесса самостоятельной операции отпуска позволило на крупных металлургических заводах избежать строительства большого числа отпускных печей. Дополнительное, по сравнению с обычной закалкой, упрочнение проката происходит благодаря тому, что в условиях интенсивного теплоотвода сразу по выходе из прокатного стана затруднено развитие рекристаллизации деформированного аустенита.

Экспериментальная часть

1. Измерить твердость HRC образцов закаленной стали. Результат занести в таблицу.

2. Положить образцы в печь с температурой примерно 200 градусов, выдержать 15-20 мин., охладить и замерить твердость. Данные занести в таблицу 1.

3. Такое же время выдержать образцы в печи с температурой 400 градусов. Замерить твердость, результаты измерения занести в таблицу 1.

4. Положить образцы в печь с температурой 600 градусов, выдержать 15-20 мин., охладить, замерить твердость HRC и данные занести в таблицу 1.

5. По полученным результатам построить график зависимости твердости от температуры отпуска, сделать выводы.

Таблица 1

Твердость после заковки	Низкий отпуск		Средний отпуск		Высокий отпуск	
	температура	HRC	температура	HRC	температура	HRC

Контрольные вопросы

1. Назначение отпуска и его виды.
2. Структурные изменения при отпуске (превращения при отпуске).
3. Отличие одноименных структур: сорбита отпуска и сорбита заковки, троостита отпуска и троостита заковки, мартенсита отпуска и мартенсита заковки.
4. Время выдержки и скорость охлаждения.
5. Что такое улучшение?

Лабораторная работа № 9 ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СТАЛИ

Цель работы - ознакомиться с видами химико-термической обработки и произвести цементацию стали.

Приборы и материалы: микроскоп ММУ-3, твердомеры Бригелля и Роквелла, электропечь, шлифовальная и полировальная машины, контейнер, карбюризатор, образцы из низкоуглеродистой стали, вата, фильтровальная бумага, травитель, спирт.

Выполнение работы рекомендуется производить в следующем порядке:

1. Ознакомиться с теоретическими положениями по химико-термической обработке

Химико-термической обработкой (ХТО) называется обработка, заключающаяся в сочетании термического и химического воздействия с целью изменения состава, структуры и свойств поверхностного слоя стали. Такая обработка позволяет повысить твердость, износостойкость, усталостную прочность и долговечность, а также стойкость изделия к окислению и электрохимической коррозии. При химико-термической обработке происходит поверхностное насыщение стали соответствующим элементом (С, N, Al, Cr, Si, и др) путем его диффузии в атомарном состоянии из внешней среды (твердой, газовой, паровой, жидкой) при высокой температуре.

ХТО включает три последовательные стадии:

- выделение диффундирующего элемента в атомарном виде из рабочей среды, вследствие химических реакций, обычно распада (диссоциации) молекул окружающей среды, например,
$$2NH_3 \leftrightarrow 2N_{am} + 3H_2;$$
- поглощение атомов диффундирующего элемента поверхностью детали (адсорбция);
- проникновение атомов вглубь от поверхности (диффузия).

Насыщение поверхности стали при ХТО возможно лишь химическими элементами, образующими твердые растворы или химические соединения. Скорость диффузии зависит от состава и кристаллического строения образующихся фаз. При насыщении стали элементами, образующими твердые растворы внедрения (С, N), диффузионные процессы идут быстрее, чем при насыщении элемен-

тами, образующими твердые растворы замещения, требующими больших энергетических затрат. Поэтому диффузионная металлизация проводится при более высоких температурах.

Слой материала детали у поверхности насыщения, отличающийся от исходного по химическому составу, называется *диффузионным слоем*, а материал под диффузионным слоем, не затронутый воздействием окружающей активной среды, называют сердцевинной. Под общей толщиной диффузионного слоя понимают кратчайшее расстояние от поверхности насыщения до сердцевины.

Качественной и количественной характеристикой ХТО являются толщина диффузионного слоя, распределение концентрации диффундирующего элемента по толщине слоя, фазовый состав и свойства слоя (твердость, пластичность, коррозионная стойкость и т.д.).

В подавляющем числе случаев рост эффективной толщины диффузионного слоя подчиняется параболической зависимости

$$d = \sqrt{k\tau},$$

где d - толщина диффузионного слоя; k - константа, учитывающая конкретные условия проведения химико-термической обработки;

τ – время.

Константа k , а следовательно, и толщина слоя экспоненциально зависят от температуры:

$$k = k_0 \exp\left(\frac{Q}{RT}\right),$$

где Q – эффективная энергия активации, Дж/моль;

$R = 8,31 \text{ Дж}/(\text{К} \cdot \text{моль})$ - газовая постоянная.

Толщина слоя при прочих равных условиях тем больше, чем выше концентрация диффундирующего элемента на поверхности металла.

Наиболее распространенными в промышленности процессами ХТО являются процессы диффузионного насыщения стали углеродом, азотом и совместно этими элементами.

Углерод и азот легко усваиваются поверхностью стали, образуют с железом твердые растворы внедрения и сравнительно быстро диффундируют в стали, образуя слои значительной толщины.

Цементацией называется процесс диффузионного насыщения поверхностного слоя углеродом при нагреве в углеродсодержащей среде.

Цементации подвергаются низкоуглеродистые и низколегированные конструкционные стали с содержанием углерода от 0,12 до 0,25%. Проводят ее с целью повышения твердости, износостойкости, предела выносливости поверхностных слоев детали при сохранении вязкой сердцевины. Для углеродистых сталей это достигается обогащением поверхности детали углеродом до 0,8÷1,0%, с последующей закалкой и низкотемпературным отпуском. В случае местной цементации (отдельных участков детали), остальную часть, не подвергающуюся цементации, защищают слоем меди толщиной 0,02÷0,05 мм, наносимой электролитическим способом, или покрывают огнеупорными обмазками.

Различают два вида цементации: в твердом карбюризаторе и в газовой среде.

Цементация в твердом карбюризаторе (науглероживающей среде) осуществляется при температуре 920-950°C в закрытых емкостях (металлических ящиках). Длительность выдержки при этой температуре назначают 7-9 минут на 1 см высоты ящика. В качестве твердых карбюризаторов используют древесные угли (дуб, береза), каменноугольный полукокс или торфяной кокс в смеси с углекислыми солями (BaCO₃, Na₂CO₃ и др.). Соли берут 10-40% массовых от общей загрузки.

Равномерно перемешанную смесь засыпают в ящик слоем толщиной 3-4 см, далее укладывается слой деталей с промежутком между ними и стенками ящика 3-4 см, засыпается слой карбюризатора аналогичной толщины, укладывается следующий слой деталей и т.д. Поверхность последнего слоя деталей также засыпается карбюризатором, ящик герметично закрывается и загружается в печь. Выделение активного атомарного углерода происходит вследствие следующих химических реакций. Кислород, имеющийся в ящике, взаимодействует с древесным углем и коксом, образуя угарный газ, который диссоциирует с выделением атомарного углерода



Углекислые соли также взаимодействуя с углем образуют CO и после его диссоциации атомарный углерод



Обычно цементацию проводят на глубину 0,5÷1,6 мм в зависимости от конкретных деталей и условий их работы.

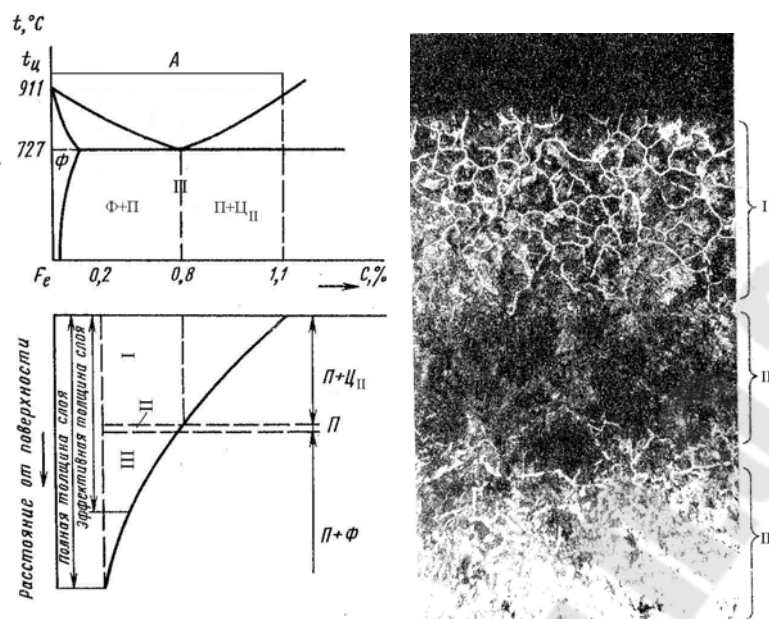


Рис. 1. Изменение содержания углерода и структуры по толщине цементованного слоя (схема)

Длительность процесса цементации составляет 6-14 часов. После насыщения углеродом ящик с деталями извлекается из печи и охлаждается на воздухе в закрытом виде до 400-500°С.

Содержание углерода после насыщения переменено по глубине детали, убывая по мере удаления от поверхности (рис. 1). В структуре цементованного слоя можно выделить три зоны: зона заэвтектоидной стали (I), содержащая 1-0,8% С, эвтектоидной (II), содержащая 0,7÷0,8% С, и доэвтектоидной – переходной (III), содержащая менее 0,7% С и простирающаяся до исходной структуры стали.

За *эффективную толщину* цементованного слоя $\delta_{эф}$ принимается слой, включающий заэвтектоидную ($\delta_{зэ}$), эвтектоидную ($\delta_э$) и половину переходной ($\delta_{пер}$) зоны

$$d_{эф} = d_{зэ} + d_э + 1/2d_{пер}.$$

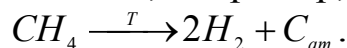
Для деталей, испытывающих контактную усталость (зубчатые колеса, шестерни, кулачки и др.), желательно проводить насыщение поверхности углеродом до 1,1÷1,2%, т.к. при этом достигается максимальное сопротивление контактной усталости стали.

Легирующие элементы Cr, Mn, W, Mo, V позволяют насыщать поверхность до 1,8÷2,0% С.

Процесс **цементации в газовой среде** осуществляется в специальных герметичных печах, в которые непрерывно подается угле-

родсодержащий газ (метан, пропан-бутановые смеси и др.). Производится также впрыскивание жидких углеводородов – керосина, синтина, спиртов.

Насыщение углеродом осуществляют при температуре 900-920°C в течение 6-12 часов. Атомарный углерод образуется при диссоциации углеродсодержащего газа, например,



Скорость газовой цементации 0,12-0,15 мм/ч при эффективной толщине слоя $1,5 \div 1,7$ мм.

Окончательные свойства цементованных изделий достигаются в результате термической обработки – закалки и низкотемпературного отпуска (рис. 2).

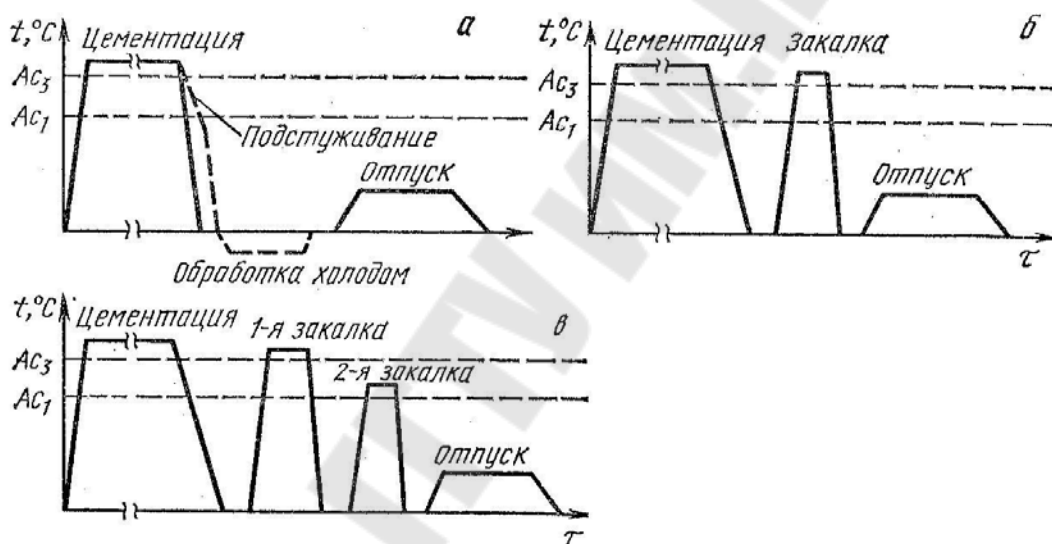


Рис. 2. Режимы термической обработки после цементации стали

Путем термообработки можно не только увеличить твердость, но и измельчить зерно, неизбежно увеличивающееся вследствие длительной выдержки при высокой температуре, устранить карбидную сетку в цементованном слое.

В большинстве случаев применяют одинарную закалку при температурах 820-850°C. При газовой цементации проводят закалку прямо из печи после подстуживания до 840-860°C (рис. 2а). Для уменьшения деформации изделий выполняют ступенчатую закалку в горячем масле ($T=160 \div 180^\circ C$). При цементации в твердом карбюризаторе необходим дополнительный нагрев деталей под закалку (рис. 2б).

Особо ответственные детали после цементации подвергают двойной закалке с низким отпуском (рис. 2в). При первой закалке с

нагревом выше линии A_{c3} (880-900°C) происходит перекристаллизация сердцевинны детали с образованием мелкого аустенитного зерна, а, соответственно, и образование мелкозернистых продуктов распада. Кроме того, при этом нагреве растворяется в поверхностном слое цементитная сетка. При нагреве под вторую закалку на 30-50°C выше температуры A_{c1} (760-780°C) происходит отпуск образовавшегося ранее мартенсита с образованием глобулярных карбидов и мелкого аустенитного зерна. После второй закалки и низкотемпературного отпуска поверхностный слой детали имеет структуру отпущенного мартенсита с включениями глобулярных карбидов. Структура сердцевинны детали зависит от химического состава и ее геометрических размеров и может быть от феррито-перлитной для углеродистых сталей, до сорбитной, трооститной и даже мартенситной, но с невысоким содержанием углерода, обладающим высокой ударной вязкостью, для легированных сталей.

Заключительной операцией при любом техпроцессе является низкотемпературный отпуск, после которого твердость поверхности составляет 58÷62 HRC.

При одинарной закалке высоколегированных сталей в структуре сохраняется большое количество остаточного аустенита (до 50÷60%). Для дальнейшего превращения остаточного аустенита в мартенсит и повышения твердости необходима дополнительная обработка холодом.

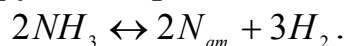
Цементации подвергают детали, работающие в условиях трения при высоких ударных и циклических нагрузках, от которых требуется высокая износостойкость и поверхностная твердость при вязкой сердцевине (шестерни, распределительные валы, кулачки, червяки, поршневые пальцы и др.). При назначении цементации необходимо для цементуемых поверхностей закладывать припуск 0,05÷0,10 мм на последующее шлифование. Цементованные поверхности могут эксплуатироваться при температурах не выше 250°C.

Азотирование представляет собой процесс диффузионного насыщения поверхностного слоя детали азотом в среде азотсодержащего газа (аммиака, аммиака с азотом и др.). Азотирование проводится с целью увеличения твердости поверхностного слоя, износостойкости и устойчивости против коррозии.

Азотированию подвергают среднеуглеродистые стали, содержащие 0,4-0,5% углерода, легированные Al, Cr, Mo, V, и другими элементами, образующими нитриды – Cr_2N , AlN , MoN . Весьма эф-

эффективно азотирование для сталей легированных алюминием. Длительность выдержки при насыщении азотом 24-60 часов. Азотирование производят на глубину до $0,3 \div 0,6$ мм. Твердость и толщина азотированного слоя зависят от температуры, давления газа, длительности процесса насыщения, химического состава стали.

Азотирование проводится в герметичных печах при температуре $500-700^\circ\text{C}$ чаще всего в среде аммиака, который при температуре выше 400°C диссоциирует с образованием атомарного азота



Аммиак пропускают со скоростью, обеспечивающей диссоциацию 25% его, с целью исключения обезуглероживания стали. Охлаждение детали после азотирования проводят вместе с печью в потоке аммиака до 200°C во избежание окисления поверхности.

В сплавах железа с азотом образуются следующие фазы: α -фаза – твердый раствор азота в α -Fe; γ -фаза – твердый раствор азота в γ -Fe (образуется при температурах выше эвтектоидной, составляющей 591°C); γ' -фаза – твердый раствор на базе Fe_4N , ε -фаза – твердый раствор на базе Fe_{2-3}N .

В случае азотирования при температуре ниже эвтектоидной (591°C) диффузионный слой состоит из трех участков: $\varepsilon + \gamma' + \alpha$.носителем твердости является нижний подслои α , в котором наблюдается выделение дисперсных нитридов легирующих элементов типа MeN , Me_2N . Слой γ' очень тонкий и под микроскопом трудно различим. Слой ε -фазы непрочный и хрупкий.

Легирующие элементы W, Mo, Cr, Ti, V повышают растворимость азота в α -фазе и образуют специальные нитриды типа MeN и Me_2N (VN , Cr_2N и др.), выделяющиеся в мелкодисперсном состоянии.

Твердость азотированного слоя выше, чем цементованного (до 70-75 HRA) и сохраняется до $550-600^\circ\text{C}$, в то время как цементованного до 250°C .

Азотирование является заключительной операцией. До азотирования выполняется вся механическая обработка детали, производится закалка и высокотемпературный отпуск (улучшение), окончательное шлифование. После азотирования детали могут подвергаться тонкому чистовому шлифованию или полированию.

Азотирование создает в поверхностном слое детали напряжения сжатия до $600 \div 800$ МПа, что приводит к увеличению предела

выносливости гладких образцов на 30-40%, а образцов с надрезом на 100%.

В промышленности применяется также *ионное азотирование* (азотирование в *тлеющем разряде*), которое проводится в разреженной азотсодержащей атмосфере аммиака или азота.

Одновременное диффузионное насыщение поверхности стали углеродом и азотом в расплавленных цианистых солях, называется *цианированием*, а в газовой среде – *нитроцементацией*. Диффузионное насыщение одновременно углеродом и азотом осуществляется с целью повышения твердости и износостойкости поверхностей деталей из среднеуглеродистых сталей. Большое применение получила нитроцементация.

Нитроцементация производится в среде науглероживающего газа и аммиака в специальных герметичных печах при температуре 850-860°C в течение 4-10 часов. В качестве рабочей среды используется эндогаз 80-90% с добавлением 5-15% природного газа и 5% аммиака или эндогаз с жидким карбюризатором-триэтаноломином $(C_2H_5O)_3N$. Эндогаз представляет смесь газов в следующей пропорции: 40% N_2 +40% H_2 +20% CO .

Нитроцементация осуществляется на глубину 0,2-0,8 мм. После насыщения сразу же из печи производится закалка и низкотемпературный отпуск при температуре 160-180°C. Нитроцементация проводится при температуре на 100°C ниже чем цементация при той же скорости процесса и обеспечивает такую же твердость поверхности 58÷64 HRC. Фазовый состав поверхностного слоя после закалки и низкого отпуска состоит из мелкокристаллического мартенсита, карбонитридов $Fe_3(N,C)$ и 25-30% остаточного аустенита. Большое количество аустенита способствует лучшей прирабатываемости деталей при трении, обеспечивая их бесшумную работу. Нитроцементованные детали обычно используют в нешлифованном виде. Процесс нитроцементации безвреден, позволяет регулирование химического состава. Однако, стоимость выше, чем цементации и необходимы специальные меры по охране труда.

Существует три вида цианирования: высокотемпературное ($T=930-960^\circ C$), среднетемпературное ($T=820-860^\circ C$) и низкотемпературное ($T=500-600^\circ C$), которые проводятся в циансодержащих ваннах, что требует повышенных мер безопасности.

Применяются в промышленности также борирование, силицирование, диффузионная металлизация.

Экспериментальная часть

1. Получить у преподавателя образец низкоуглеродистой стали. Приготовить микрошлиф и определить приблизительное содержание в стали углерода. Зарисовать наблюдаемую микроструктуру, замерить твердость поверхности на приборе Бринелля.

2. Произвести цементацию образцов в твердом карбюризаторе. Продолжительность цементации 8 часов^{*}; температура цементации 930-950°C; состав карбюризатора: 90% - древесный уголь, 10% - углекислый барий. Перед цементацией образец очистить от грязи, ржавчины и масел.

Образцы следует упаковать в ящики следующим образом: на дно ящика насыпать слой карбюризатора толщиной 30-40 мм и слегка утрамбовывать его, постукивая по стенкам ящика. Затем уложить образцы, соблюдая расстояние между ними и от стенок ящика в 30-35 мм и покрывать слоем карбюризатора 30-35 мм, утрамбовать его во избежание оголения деталей при цементации. Ящик закрыть крышкой и обмазать ее смесью огнеупорной глины с песком.

3. После цементации удалить с торца цементованного образца слой, толщиной 2мм. Приготовить микрошлиф, определить глубину цементованного слоя и каждой его зоны. Замерить твердость поверхности и сердцевины на приборе Бринелля; зарисовать наблюдаемую микроструктуру цементованного слоя и сердцевины образца.

4. Провести термообработку цементованных образцов; замерить твердость на приборе Роквелла. Приготовить микрошлиф. Замерить твердость цементованной поверхности и сердцевины и зарисовать микроструктуру.

Термообработку провести по следующему режиму: температура закалки: 840-860°C, охлаждающая среда-вода, температура отпуска 160-180°C.

5. Оформить отчет по работе и сделать вывод о влиянии цементации и последующей термической обработки на структуру и свойства стали.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Основные теоретические положения о химико-термической обработке.
3. Таблица результатов и исследований:

	Микро- структура	Твердость поверхности	Твердость сердцевины
До цементации			
После цементации			
После термической обработки			

4. Выводы.

Контрольные вопросы

1. В чем заключаются физические основы ХТО? Основные стадии процесса ХТО.
2. Какие стали подвергаются цементации и с какой целью? Какие науглероживающие среды используются при газовой цементации? Приведите технологические режимы, опишите химизм процесса.
3. Опишите процесс цементации в твердом карбюризаторе. Что используется в качестве карбюризаторов? Химизм происходящих процессов.
4. В чем особенности термообработки, проводимой после цементации в твердом карбюризаторе и в газовой среде?
5. Какие стали подвергаются азотированию и с какой целью? Химизм и технологические режимы азотирования.
6. В чем особенности нитроцементации и цианирования?

Лабораторная работа № 10 ИЗУЧЕНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ ЧУГУНОВ

Цель работы: ознакомиться с маркировкой, свойствами и применением чугунов; изучить микроструктуры чугунов.

Приборы и материалы: микроскоп ММУ-3, травитель, спирт, фильтровальная бумага, вата, коллекция микрошлифов чугунов.

Выполнение работы рекомендуется проводить в следующем порядке:

1. Ознакомиться по методическому указанию с маркировкой, свойствами, структурой и применением чугунов

Чугунами называются сплавы железа с углеродом, содержащие углерода от 2,14 % до 6,67 %. В состав чугунов входят также кремний (1,2-3,5 %), марганец (0,5-1,4 %), сера (0,05-0,2), фосфор (0,05-0,8 %).

Чугун – важнейший литейный материал, широко применяющийся в металлургии и машиностроении. Около 68 % отливок изготавливается из чугуна. Чугуны находят широкое применение в качестве конструкционного материала благодаря сочетанию высоких литейных свойств, достаточной прочности, износостойкости, а также невысокой стоимости. Чугуны отличаются низкой чувствительностью к качеству поверхности и надрезам; и благодаря этому, присутствующие в любой отливке отверстия, углы, резкие переходы, раковины, поры, неметаллические включения сравнительно мало влияют на ее реальную конструкционную прочность. Другими преимуществами чугуна являются: высокая прочность при сжатии, высокое значение предела выносливости при кручении (у высокопрочного чугуна даже на 20-30 % больше, чем у стали), хорошие антифрикционные свойства (графит выполняет роль смазки).

Особенностью чугунов является возможность существования двух высокоуглеродистых фаз: графита (стабильная фаза) и цементита (Fe_3C) (метастабильная фаза).

Цементит (Ц) – это химическое соединение Fe_3C – карбид железа. В цементите 6,67 % С. Характеризуется очень высокой твердостью (~ 800 НВ) и практически нулевой пластичностью ($\delta \approx 0$ %), т. е. хрупкий. Цементит имеет сложную ромбоэдрическую кристаллическую решетку.

Графит (Г) – одна из двух (алмаз, графит) кристаллических модификаций углерода (100 % С). Прочность и пластичность графита весьма низки. Кристаллическая структура гексагональная сло-

стая (рис. 1). (В чугунах встречается и менее устойчивая модификация графита – ромбическая). Из-за легкой подвижности слоев графит является наименее прочной и наименее пластичной фазой чугуна. Графит слабо электропроводен и химически стоек.

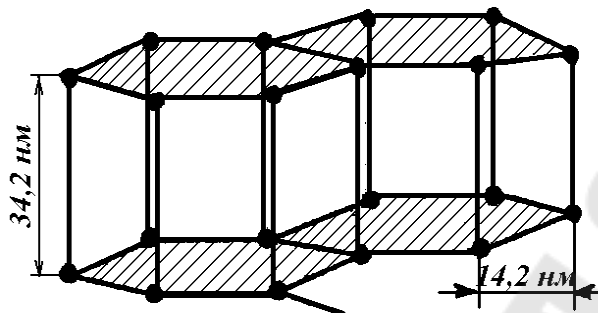


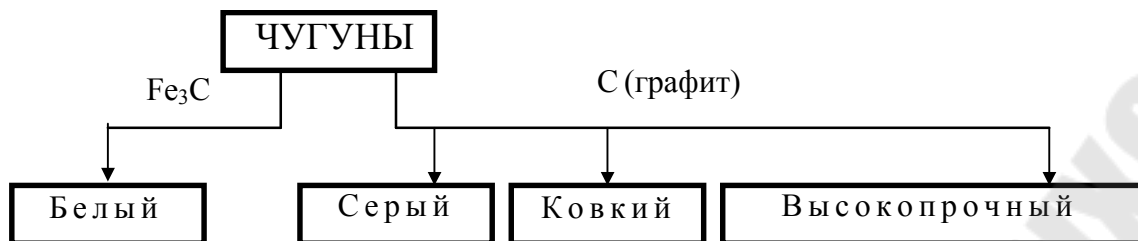
Рис. 1. Кристаллическая решетка графита

В зависимости от состояния углерода в чугуне различают:

- **белый чугун** – весь углерод находится в связанном состоянии в виде цементита;
- **серый чугун** – углерод в значительной степени или полностью находится в свободном состоянии в форме пластинчатого графита;
- **высокопрочный чугун** – углерод в значительной степени или полностью находится в свободном состоянии в форме шаровидного графита;
- **ковкий чугун** – углерод в значительной степени или полностью находится в свободном состоянии в форме хлопьевидного графита.

Примечание. В серых, ковких и высокопрочных чугунах та часть углерода, которая находится в связанном состоянии в виде цементита, входит в состав перлита – металлической основы чугуна.

Таким образом, чугун (кроме белого) отличается от стали наличием в структуре графитовых включений, а между собой чугуны различаются формой этих включений.



Белый чугун

Кристаллизация белых чугунов происходит в соответствии с метастабильной диаграммой Fe-Fe₃C (рис. 2), сплошные линии при больших скоростях охлаждения расплавов.

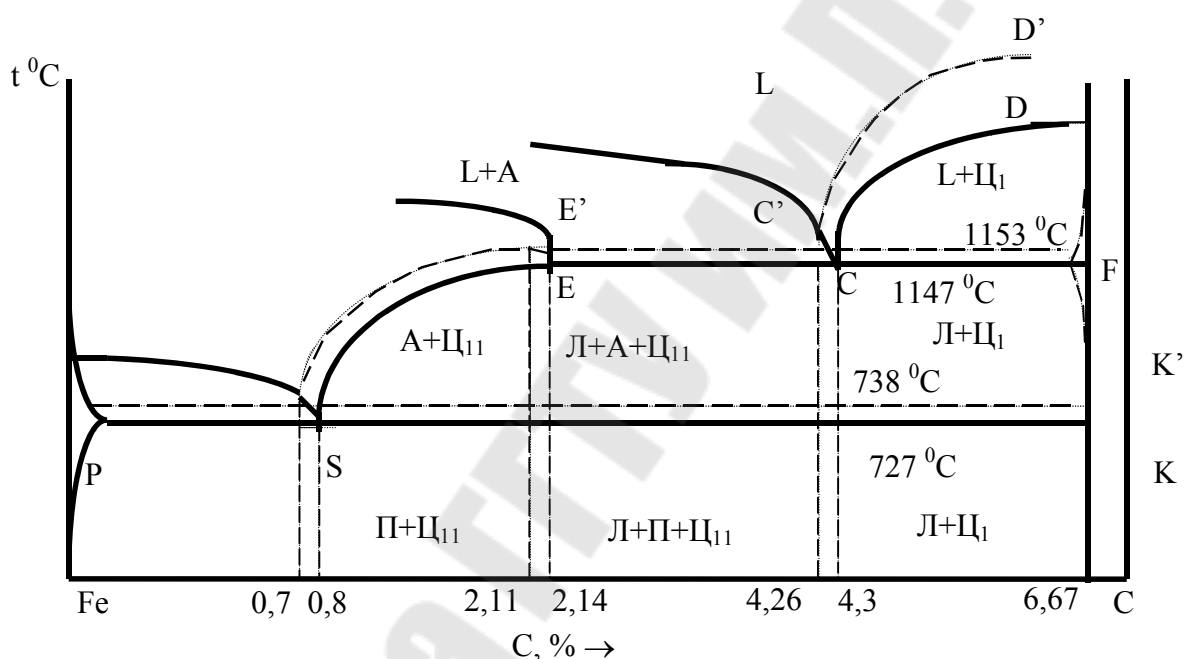


Рис. 2. Диаграмма состояния Fe – C сплавов

При температуре 1147 °C из металлической жидкости, содержащей 4,3 % C, одновременно выделяется аустенит состава точки E (рис. 2) и цементит. Образующаяся смесь этих фаз называется ледебуритом, а превращение эвтектическим $L_C \rightarrow L_C (A_E + Ц)$. При дальнейшем охлаждении концентрация углерода в аустените изменяется по линии ES (рис. 2) вследствие выделения вторичного цементита и к моменту достижения температуры эвтектоидного превращения (727 °C) принимает значение 0,8% C. При температуре 727 °C на линии PSK (рис. 2) аустенит, находящийся как в структурно-свободном состоянии, так и входящий в состав ледебурита, претерпевает эвтектоидное превращение в перлит $A_S \rightarrow П_S (Ф_P + Ц)$.

По структуре белые чугуны разделяются:

- доэвтектические, содержащие углерода до 4,3 %, со структурой ледебурит, перлит и цементит вторичный;
- эвтектические, содержащие углерода 4,3 %, со структурой ледебурит;
- заэвтектические, содержащие углерода более 4,3 %, со структурой ледебурит и цементит первичный.

Белые чугуны из-за присутствия в них большого количества цементита твердые (НВ 450-500), хрупкие и для изготовления деталей машин не используются. Ограниченное применение имеют отбеленные чугуны – отливки из серого чугуна со слоем белого чугуна в виде твердой корки на поверхности. Из них изготавливают: тормозные колодки, прокатные валики, лемехи плугов и др. детали, работающие в условиях износа.

Белые доэвтектические чугуны подвергаются специальной термической обработке, в результате которой происходит распад цементита с образованием графита хлопьевидной формы, и чугун наряду с высокой прочностью приобретает и удовлетворительную пластичность. Образующийся чугун называется ковким.

Ковкий чугун

Чугун с хлопьевидной формой графита называется **ковким**.

Отжиг белого чугуна на ковкий обычно ведут по графику, показанному на рис. 3.

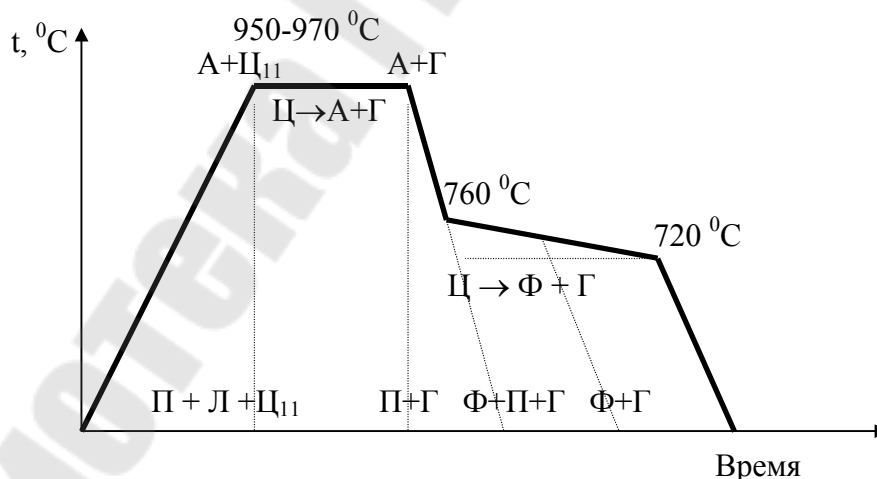


Рис. 3. График отжига белого доэвтектического чугуна на ковкий

Графит, образующийся в результате распада цементита, называют углеродом отжига.

Исходная структура доэвтектического чугуна состоит из перлита, ледебурита и цементита вторичного. При нагреве чугуна до температуры 950-1050 °С в сплаве протекает сначала превращение перлита в аустенит, а затем происходит растворение цементита вторичного в аустените. Во время длительной выдержки при указанных температурах цементит, являясь метастабильной фазой, распадается на аустенит и хлопьевидный графит.

Структура металлической основы чугуна зависит от режима охлаждения. Если после завершения графитизации провести охлаждение сразу до низких (комнатных) температур, то структура чугуна будет состоять из перлита и графита. Такой чугун называют перлитным ковким чугуном.

Если в температурном интервале 760-700 °С отливки охлаждать очень медленно (3-5 °С в час), то происходит распад аустенита на феррит и графит, который наслаивается на уже имеющиеся хлопья. Медленное охлаждение можно заменить изотермической выдержкой при температурах 720-700 °С, в результате которой происходит распад цементита, входящего в состав перлита, на феррит и графит. Такой режим отжига применяют чаще и называют второй стадией графитизации или второй стадией отжига. Структура чугуна после двухстадийного отжига состоит из феррита и графита, а чугун называют ферритным ковким чугуном. Если вторую стадию отжига сократить, то часть цементита, входящего в состав перлита, не распадется и структура чугуна будет состоять из перлита, феррита и графита – такой чугун называют феррито-перлитным ковким чугуном; чем короче вторая стадия отжига, тем больше в структуре содержится перлита. Ферритный ковкий чугун характеризуется большей пластичностью, но меньшей прочностью, чем перлитный чугун. Для повышения пластичности перлитного чугуна с сохранением высокой прочности его подвергают сфероидизирующему (неполному) отжигу. Чугуны, подвергающиеся сфероидизирующему отжигу, содержат повышенное количество марганца (0,9-1,0 %) или небольшие добавки хрома и никеля для предотвращения распада аустенита на феррит и графит. Ковкий чугун со структурой зернистого перлита обладает большей прочностью на разрыв ($\sigma_B = 400 - 600$ МПа), сравнительно хорошей пластичностью ($\delta = 10,0 - 4,0$ %), хорошей обрабатываемостью резанием, повышенными антифрикционными свойствами и более высокой, чем у серого и ковкого ферритного чугунов, коррозионной стойкостью.

Согласно ГОСТа 1215-79 имеются следующие марки ковкого чугуна:

- ферритные и ферритно-перлитные: КЧ30-6, КЧ33-10, КЧ37-12;
- перлитные: КЧ45-7, КЧ50-5, КЧ55-4, КЧ60-3, КЧ65-3, КЧ70-2, КЧ80-1,5, где буквы “КЧ” обозначают ковкий чугун; цифры до дефиса временное сопротивление разрыву в кгс/мм², а цифры после дефиса – относительное удлинение в %.

Ковкие чугуны нашли широкое применение в сельскохозяйственном, автомобильном и текстильном машиностроении, в судостроении, котло-, вагоно- и дизелестроении. Из них изготавливают: башмаки, коробки, муфты, фланцы, головки, хомутики, ступицы, картеры редукторов, тормозные колодки, звездочки и звенья приводных цепей и др. детали.

Все указанные детали изготавливают тонкостенными. Они не должны иметь сечение более 50 мм, иначе в сердцевине при кристаллизации выделяется пластинчатый графит и чугун отжигать не имеет смысла.

В настоящее время выпуск ковкого чугуна сокращается и происходит замена его высокопрочным чугуном, т. к. себестоимость 1 т. годных отливок из высокопрочного чугуна ниже. Масса отливки из ВЧ на 20-30 % меньше (благодаря более высоким механическим свойствам).

Серый чугун

Серым чугуном называется чугун с пластинчатой формой графита. Содержание углерода в серых чугунах колеблется в пределах 2,2 – 3,7 %. Чем выше концентрация углерода, тем больше выделений графита в чугуне и тем ниже его механические свойства. По этой причине его максимальное содержание ограничивается доэвтектической концентрацией. В то же время снижение содержания углерода отрицательно сказывается на жидкотекучести и, следовательно, на литейных свойствах. Нижний предел содержания углерода (2,2 %) принимают для толстостенных отливок, верхний (3,7 %) – для тонкостенных. Кристаллизация серого чугуна протекает в соответствии со стабильной диаграммой Fe-C рис. 2. (пунктирные линии).

В системе железо-графит эвтектика образуется при температуре 1153 °С. Она содержит 4,26 % С и состоит из аустенита и графита. Ее называют графитной эвтектикой.

В интервале температур 1153-738 °С из аустенита выделяется вторичный графит. При этом аустенит изменяет свой состав по линии E'S' (рис. 2). Эвтектоидное превращение у сплавов в этой системе протекает при температуре 738°С, причем эвтектоидная точка (S') (рис. 2) соответствует содержанию 0,7% С. Эвтектоид в этом случае является смесью феррита и графита и называется графитным.

Таким образом, диаграмма состояния железо-графит принципиально не отличается от диаграммы железо-цементит, за исключением того, что во всех случаях из сплавов выделяется не цементит, а графит. Т. к. графитизация происходит в соответствии с рис. 2 в узком температурном интервале, то для образования графитного зерна необходима малая скорость охлаждения и наличие примесей, способствующих графитизации.

Наиболее сильное влияние на графитизацию оказывает кремний, содержащийся в количестве 0,8-3 %. Кристаллизации графита пластинчатой формы также способствуют микродобавки алюминия, кальция, меди, церия.

Степень графитизации определяет характер металлической основы серого чугуна. В зависимости от того, какая часть углерода содержится в цементите, различают ферритные, феррито-перлитные и перлитные чугуны.

Значительное влияние на структуру чугуна также оказывают технологические факторы, главным из которых является скорость охлаждения. С уменьшением скорости охлаждения увеличивается количество графита. При выборе скорости охлаждения принимают во внимание толщину стенки отливки. Чем больше толщина стенки отливки, тем меньше скорость охлаждения и полнее протекает процесс графитизации.

Наличие пластинчатого графита всегда создает как бы внутренние надрезы, поэтому серый чугун характеризуется низкой прочностью и очень низкой пластичностью. Серый чугун обнаруживает заметные пластические деформации только в условиях сжатия (осадка 20-40 %). При растяжении максимальные пластические деформации в момент разрушения не превышают 1-2 %, так как разрушение происходит путем отрыва по выделениям графита. Чем мельче графитные пластины и чем больше они изолированы друг от друга, тем выше прочностные и пластические свойства чугуна при одной и той же металлической основе. Но в то же время наличие пластинчатого графита обеспечивает чугуну большую демпфирующую

щую способность и тем большую, чем больше графитных включений и чем они крупнее. Пластичность чугуна, в противоположность пластичности стали, может понижаться или, наоборот, возрастать с увеличением прочности: все зависит от того, за счет чего повышается прочность. Если увеличение прочности происходит за счет увеличения количества перлита и его измельчения, то пластичность уменьшается. Если увеличение прочности происходит за счет улучшения формы включений графита или уменьшения их количества, то увеличивается модуль упругости и пластичность повышается одновременно с прочностью. Сопротивление усталости у чугунов, как и у сталей, растет с увеличением статической прочности. Чем мельче графит и больше перлитной составляющей, тем больше предел выносливости. Наиболее высокое сопротивление усталости чугунов сжимающим напряжениям. При пульсирующем цикле сжатия оно в 5-6 раз выше, чем при пульсирующем цикле растяжения. Таким образом, чугуны целесообразнее использовать для деталей, работающих в условиях сжатия и вибраций.

Номенклатура отливок из серого чугуна и их масса разнообразна: от деталей в несколько граммов (например, поршневые кольца двигателей) до отливок в 100 т. и более (санины станков). Из серых чугунов изготавливают крышки, фланцы, маховики, корпуса редукторов, подшипников, насосов, а также блоки цилиндров, барабаны сцепления, санины станков, зубчатые колеса, шпиндели, поршни цилиндров, корпуса насосов и компрессоров и др. детали.

Согласно ГОСТа 1412-85 предусматриваются следующие марки серого чугуна: СЧ10, СЧ15, СЧ20, СЧ25, СЧ30, СЧ35, СЧ40, СЧ45, где буквы СЧ обозначают серый чугун, а цифры – минимальное значение временного сопротивления при разрыве в МПа · 10⁻¹.

Примечание. Иногда в одной отливке можно встретить все структурные виды чугуна: ускоренно охлажденная зона имеет структуру белого чугуна, медленно охлажденная – структуру серого чугуна, а зона, кристаллизующаяся при средних скоростях охлаждения, – структуру половинчатого чугуна. Такие чугуны называют отбеленными.

Высокопрочный чугун

Высокопрочным называют чугун, у которого графит имеет шаровидную, глобулярную форму. Чугуны с шаровидной формой графита получают модифицированием перед заливкой жидкого серого чугуна магнием в количестве 0,01-1,0 % к весу металла или церием в количест-

ве 0,03-0,08 %. Большую часть высокопрочного чугуна производят сейчас с помощью Fe-Si-Mg лигатур с 3-10 % Mg; такие лигатуры содержат до 11 % Ce и 0,2-4,0 % Ca. Совершенствование технологии процесса модифицирования – это один из методов улучшения качества высокопрочного чугуна. Чугун после модифицирования имеет следующий химический состав: 3,0-3,6% C; 1,1-2,9% Si; 0,3-0,7 Mn; до 0,02% S и до 0,1% P.

Высокопрочный чугун, получаемый в производственных условиях, как правило, не имеет 100 % глобулярности графита. Увеличение доли нешаровидного графита в структуре чугуна снижает предел текучести, предел прочности при растяжении, относительное удлинение и модуль упругости.

По структуре металлической основы высокопрочный чугун может быть ферритным (допускается до 20 % перлита) и перлитным (допускается до 20 % феррита).

Шаровидные включения графита являются меньшими концентраторами напряжений, чем пластинчатые, и поэтому меньше снижают механические свойства металлической основы. Металлическая основа является доминирующим фактором, определяющим величину ударной вязкости, в то время как изменение числа глобулярных включений графита не оказывает на нее влияние. Чем больше феррита и мельче перлит, тем выше ударная вязкость. Причем распределение феррита влияет на уровень ударной вязкости в большей степени, чем дисперсность перлита. Чугун с ферритной оторочкой вокруг шаровидного графита имеет более высокие показатели, чем чугун, в котором феррит распределен по границам зерен. Благоприятное влияние на ударную вязкость оказывает измельчение зерна феррита и увеличение чистоты границ зерен. Предел статической прочности увеличивается перлитной составляющей, но ферритный чугун обладает меньшей чувствительностью к надрезам, более высокой сопротивляемостью перегрузкам и большей эффективностью поверхностного упрочнения.

Примечание. Интересен факт, что предел текучести и относительное удлинение чугуна с шаровидным графитом выше, если заданная структура металлической основы получена за счет термообработки, а не в литом состоянии.

Высокопрочный чугун эффективно заменяет сталь во многих изделиях. Из него изготавливают: прокатные валки, траверсы прес-

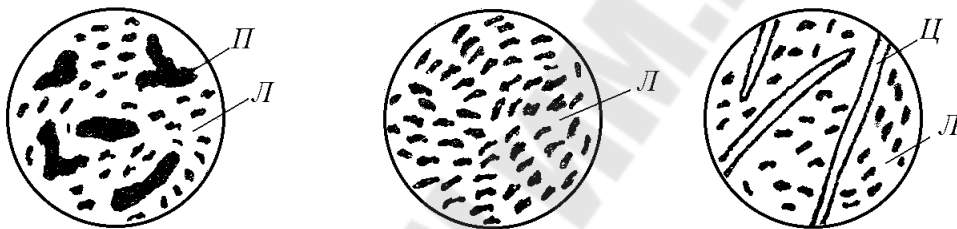
сов, лопатки турбин, коленчатые валы, поршни, шестерни, звездочки, ступицы, кронштейны рессор, корпуса вентиля и т. д.

Согласно ГОСТа 7293-85 высокопрочный чугун маркируется ВЧ35, ВЧ40, ВЧ45, ВЧ50, ВЧ60, ВЧ70, ВЧ80, ВЧ100, где буквы “ВЧ” обозначают высокопрочный чугун, а цифры – минимальное значение временного сопротивления при разрыве в МПа · 10⁻¹.

2. Получить коллекцию микрошлифов различных чугунов, изучить и зарисовать микроструктуры

Вначале по нетравленной поверхности изучить форму графитного зерна и определить, какой это чугун, а потом по протравленной поверхности шлифа определить металлическую основу чугуна.

Микроструктура белых чугунов



а) доэвтектического

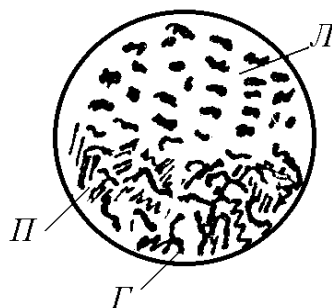
б) эвтектического

в) за-

эвтектического

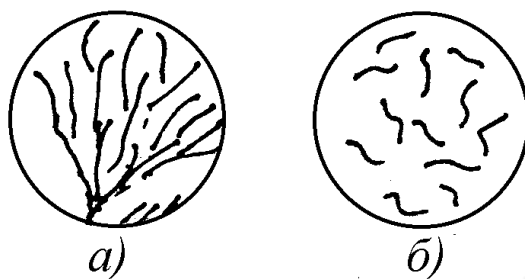
Перлит – темные зерна. Цементит первичный – крупные светлые пластины. Цементит вторичный – частично виден в виде светлых выделений по границам зерен перлита, а частично сливается с цементитом ледебурита. Ледеburит – светлые цементитные поля с равномерно расположенными на них темными перлитными участками.

Микроструктура отбеленных чугунов

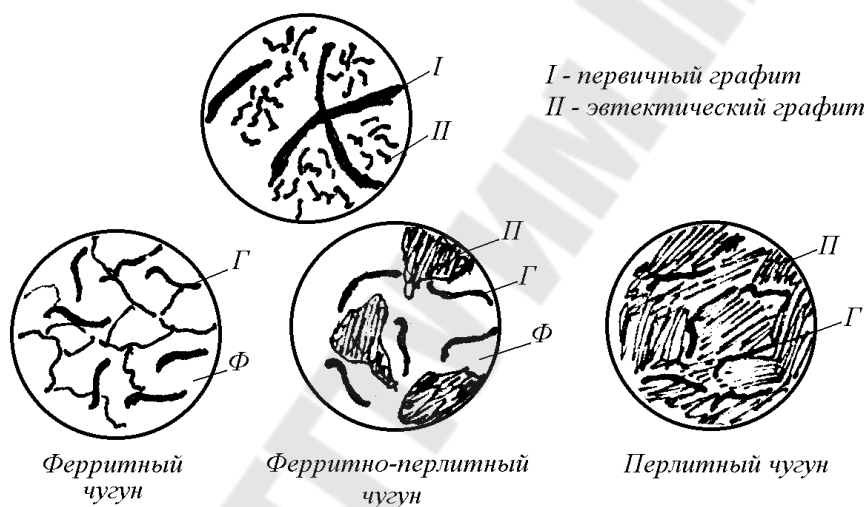


Микроструктура серых чугунов

Расположение пластин графита зависит от того, как плоскость шлифа разрезает колонию графита.



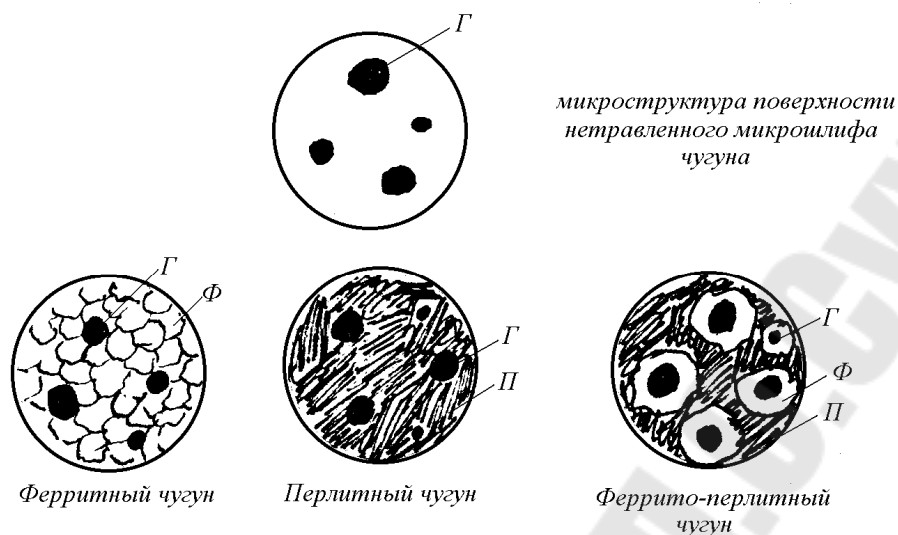
Участок колонии графита при разрезе через центр (а) и по периферии (б)



Микроструктура ковких чугунов



Микроструктура высокопрочных чугунов



3. Содержание отчета

1. Основные теоретические данные о применении, свойствах и маркировке чугунов.

2. Рисунки микроструктур чугунов из коллекции микрошлифов с указанием структурных составляющих.

4. Контрольные вопросы

1. Классификация чугунов по состоянию углерода, по форме графитного зерна и структуре металлической основы.

2. Маркировка и область применения белых, ковких, высокопрочных и серых чугунов.

3. Особенности получения белых, серых, ковких и высокопрочных чугунов.

4. Связь структуры чугуна с его свойствами.

Лабораторная работа № 11

ЛЕГИРОВАННЫЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ СТАЛИ

Цель работы: ознакомиться с маркировкой, свойствами и применением легированных конструкционных сталей общего и специального назначения; изучить микроструктуру легированных сталей.

Необходимые приборы и материалы:

- оптический металлографический микроскоп ММУ-3, МЕТАМ-Р;
- полировальная машина;
- паста ГОИ;
- вата, фильтровальная бумага;
- травитель; спирт;
- коллекция микрошлифов легированных сталей.

Теоретическая часть

Конструкционными называются стали, предназначенные для изготовления деталей машин, конструкций и сооружений. К конструкционным сталям относятся стали со специальными свойствами - износостойкие, пружинные, коррозионностойкие, жаростойкие, жаропрочные, шарикоподшипниковые и др.

Легированные конструкционные стали широко применяют в тракторном и сельскохозяйственном машиностроении, в автомобильной промышленности, в тяжелом и транспортном машиностроении и в меньшей степени в станкостроении. Эти стали широко применяют для тяжело нагруженных металлоконструкций.

В качестве легирующих элементов чаще используют сравнительно недорогие и недефицитные элементы - хром, марганец и кремний. Стали, содержащие эти элементы, нередко добавочно легируют титаном, ванадием и бором. Для изготовления высоконагруженных деталей стали легируют значительно более дорогими и дефицитными элементами, такими как никель, молибден, вольфрам, ниобий и др.

Использование легированных сталей, по сравнению с углеродистыми, позволяет при одинаковой термической обработке получить более высокие механические свойства в изделиях крупных сечений. Особенно сильно повышается предел текучести,

относительное сужение и ударная вязкость. Из этих сталей изготавливаются детали более сложной конфигурации, т.к. у них меньше деформация и опасность образования трещин. Это объясняется тем, что легированные стали обладают меньшей критической скоростью закалки, а следовательно, лучшей прокаливаемостью. Наибольшая прокаливаемость достигается при комплексном легировании стали. Однако следует иметь в виду, что при достижении необходимой для данного сечения прокаливаемости дальнейшее увеличение в стали легирующих элементов может не улучшить, а, наоборот, ухудшить механические и технологические свойства стали.

Распределение легирующих элементов в сталях и их влияние на свойства

Легирующие элементы, которые вводятся в сталь для получения требуемой структуры и свойств, могут образовывать следующие фазы:

1. Твердые растворы - раствор одного или нескольких легирующих элементов в феррите и аустените. Легирование феррита сопровождается его упрочнением и снижением ударной вязкости (за исключением никелем (рис.1)).
2. Легированный цементит и самостоятельные специальные карбиды. По отношению к углероду легирующие элементы подразделяются на две группы:
 - а) графитизирующие элементы: Si, Ni, Cu, Al (находятся в твердом растворе) ;
 - б) карбидообразующие элементы: Mn, Cr, Mo, W, V, Ti, Zr, Nb (расположены по возрастающей степени сродства к углероду и устойчивости карбидных фаз).

Условием карбидообразования является заполненность d-электронной оболочки меньше, чем у железа.

Различают карбиды двух групп:

- к первой группе относятся карбиды типа M_3C , M_7C_3 , $M_{23}C_6$, M_6C , имеющие сложные кристаллические решетки. Эти карбиды сравнительно легко растворяются в аустените при нагреве;
- ко второй группе относятся карбиды типа MC , M_2C . Эти карбиды относятся к фазам внедрения и практически нерастворимы в аустените.

При малом содержании в стали таких карбидообразующих элементов, как Cr, Mo, W, Mn происходит их растворение в цементите. Например, Cr до 2%; Mo до 1%; W до 0,2% и т.д.

Атомы легирующих элементов замещают атомы железа. Состав цементита в этом случае может быть выражен формулой $(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{C}$ или $(\text{Fe}, \text{Cr})_3\text{C}$. Более сильные карбидообразующие элементы (Ti, V, Nb, Zr) практически не растворяются в цементите и образуют самостоятельные карбиды. При повышенном содержании легирующих элементов в зависимости от содержания углерода в стали могут образовываться специальные карбиды: $(\text{Cr}, \text{Fe})_7\text{C}_6$; $(\text{Cr}, \text{Fe})_{23}\text{C}_6$; $\text{Fe}_3\text{Mo}_3\text{C}$; $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$; VC; TiC; WC; W_2C и др.

Образование легированного цементита или специальных карбидов понижает порог хладноломкости, повышают работу распространения трещины КСТ, уменьшает чувствительность к концентраторам напряжений, увеличивают теплостойкость, прочность и износостойкость сталей.

3. Интерметаллические соединения - при высоком (20% и более) содержании легирующие элементы образуют с железом или друг с другом соединения типа: Fe_7Mo_6 , Fe_3Nb_2 , Fe_3Ti и др. Эти фазы встречаются в специальных жаропрочных сталях и вызывают их упрочнение.

Структурные классы легированных сталей

Легированные стали по структуре в условиях равновесия можно разделить на следующие классы:

а) перлитные - содержащие в структуре эвтектоид или квазиэвтектоид (сорбид, троостит) и в зависимости от содержания углерода избыточный легированный феррит или легированный карбид (M_3C);

б) ледебуритные - имеют в структуре в литом состоянии эвтектоид типа ледебурит. Под влиянием легирующих элементов точки S и E диаграммы состояния железо-цементит перемещаются влево (рис. 2), т. е. снижается концентрация углерода в эвтектоиде и предельная растворимость его в аустените.

Например, при содержании в стали 10% хрома (рис. 2) концентрация углерода в эвтектоиде снижается до 0,25 %, а предельная растворимость углерода в аустените до 1,0%;

в) ферритные - структура этих сталей при любой температуре состоит из легированного феррита. При низком содержании углерода и большом количестве легирующих элементов : хрома, молибдена, вольфрама, ванадия, кремния, алюминия происходит замыкание области гамма-фазы (рис. 3, а).

г) аустенитные - при высоком содержании марганца и никеля в легированных сталях расширяется область гамма-фазы и выклинивается область альфа-фазы (рис. 3, б) и структура сталей при любой температуре состоит из аустенита чаще с некоторым количеством карбидов.

При повышенном содержании легирующих элементов возникают так же полуферритные или полуаустенитные стали (рис. 3, а, б).

Маркировка легированных сталей

Легированные конструкционные стали маркируются цифрами и буквами русского алфавита.

Двузначные цифры, приводимые в начале марки, указывают среднее содержание углерода в сотых долях процента; буквы обозначают легирующий элемент: Б - ниобий, В - вольфрам, Г - марганец, Д - медь, Е - селен, К - кобальт, Н - никель, М - молибден, П - фосфор, Р - бор, С - кремний, Т - титан, Ф - ванадий, Х - хром, Ц - цирконий, Ю - алюминий. Буква А в середине марки говорит о легировании стали азотом, а если буква А стоит в начале марки - сталь автоматная, а в конце марки - сталь высококачественная. Если в конце марки стоит буква Ш - сталь особо высококачественная.

Цифры после букв указывают примерное содержание легирующего элемента в целых процентах, а отсутствие цифры указывает на то, что среднее содержание легирующего элемента не превышает 1,5%.

И с к л ю ч е н и е: количество бора не превышает 0,005-0,006%, ниобия - 0,02-0,05%.

Цементуемые (нитроцементуемые) стали. ГОСТ 4543-71

Цементуемые (нитроцементуемые) стали широко применяют для изготовления среднеразмерных зубчатых колес, валов, коробки передач автомобилей, валов быстроходных станков, шпинделей и других деталей машин. Для изготовления этих деталей используют стали с содержанием 0,15-0,27 углерода, а количество легирующих элементов должно обеспечить требуемую прокаливаемость. После цементации, заковки в масле и низкого отпуска поверхностный слой имеет твердость 58-62 HRCэ, а сердцевина 30-42 HRCэ. Сердцевина должна обладать высокими механическими свойствами, особенно повышенным пределом текучести. Структура поверхностного слоя состоит из мартенсита и $A_{ост}$, а сердцевина имеет бейнитное строение.

Для изготовления изделий небольшой величины используются хромистые стали: 15X, 20X, но эти стали склонны к перегреву. Дополнительное их легирование ванадием (0,1-0,2%) уменьшает склонность к перегреву и улучшает механические свойства: 20 XФ.

Для изготовления крупных деталей ответственного назначения, испытывающих при работе значительные динамические нагрузки, применяют хро-моникелевые или более сложнолегированные стали 12XНЗА, 12X2Н4А, 18X2Н4МА и др. Эти стали малочувствительны к перегреву, имеют высокую прокаливаемость.

Вместо дорогих хромоникелевых сталей используют хромомарганцевые стали: 18ХГТ, 25ХГТ, 25ХГМ. Однако эти стали менее устойчивы к перегреву и имеют меньшую вязкость по сравнению с хромоникелевыми, поэтому применяется дополнительное легирование их никелем: 20ХГНМ, 19ХГН, 14ХГН.

Улучшаемые легированные стали. ГОСТ 4543-71

Легированные стали, содержащие 0,3-0,5% углерода и подвергающиеся закалке и высокому отпуску применяют для изготовления таких деталей машин, как оси, коленчатые и другие валы, штоки, шатуны, фланцы, тяги, ступицы, шестерни, поршни и другие детали машин и станков. Закалку деталей проводят с температуры 820-880 градусов в масле (крупные детали охлаждают в воде) и высокий отпуск при температуре 550-680 градусов. Структура стали после такой обработки - сорбит. При полной прокаливаемости сталь имеет

лучшие механические свойства, особенно сопротивление хрупкому разрушению.

Для средненагрузочных деталей небольших размеров применяют хро-мистые стали 30X, 38X, 40X, 50X. С увеличением содержания углерода возрастает прочность, но снижается пластичность и вязкость. Хромистые стали имеют небольшую прокаливаемость, склонны к отпускной хрупкости, поэтому после отпуска детали необходимо охладить быстро: мелкие детали - в масле, а крупные - в воде. Введение в хромистые стали 0,1-0,2% V (40XФА) повышает их механические свойства, главным образом вязкость, а бора в количестве 0,002-0,005% - увеличивает прокаливаемость 30XP, 40XP.

Совместное легирование хромом и марганцем (40XГ) и кремнием 30XГС, 25XГС позволяет получить стали с достаточно высокой прочностью и прокаливаемостью. Однако эти стали имеют пониженную вязкость и повышенный порог хладноломкости и склонны к отпускной хрупкости.

Для изготовления крупных изделий сложной конфигурации, работающих при динамических и вибрационных нагрузках, используют хромоникелевые стали (количество никеля не должно превышать 3,0%, т.к. при большем количестве в структуре после закалки остается много $A_{ост}$) 40XНА, 45XН, 50XН. Однако хромоникелевые стали склонны к отпускной хрупкости, поэтому они дополнительно легируются молибденом или вольфрамом:

40XН2МА, 38XН2ВА. Недостатком этих сталей является трудность их обработки резанием и большая склонность к образованию флокенов.

Рессорно-пружинные стали. ГОСТ 14959-79

Рессорно-пружинные стали предназначены для изготовления пружин, рессор различного назначения и упругих элементов. Стали должны обладать высоким сопротивлением малым пластическим деформациям, пределом выносливости и релаксационной стойкости при достаточной пластичности и вязкости. Для получения этих свойств стали должны содержать 0,5-0,7% углерода и подвергаться закалке и среднему отпуску. Структура после такой обработки - троостит. Присутствие в структуре феррита, карбидов или $A_{ост}$ ухудшает все пружинные свойства. Чем мельче зерно, тем выше сопротивление стали малым пластическим деформациям.

Наиболее часто для изготовления пружин вагонов, многих автомобильных рессор и т.п. используются стали 55С2, 60С2А, 70С3А, 65Г. Однако эти стали склонны к обезуглероживанию при горячей обработке, что снижает их предел выносливости. Дополнительное легирование Cr, Mn, W, Ni увеличивает их прокаливаемость и уменьшает склонность к обезуглероживанию.

Стали 60С2ХФА и 65С2ВА применяют для изготовления крупных высоко-нагруженных пружин и рессор. Для изготовления автомобильных рессор широко применяют сталь 50ХГА. Для клапанных пружин 50ХФА. Оптимальная твердость рессор для получения максимального предела выносливости 42-48 HRCэ. При более высокой твердости предел выносливости, а, следовательно, долговечность рессор и пружин резко снижается.

Шарикоподшипниковые стали. ГОСТ 801-78

Эти стали применяют для изготовления деталей подшипников качения:

шариков, роликов и подшипниковых колец. Стали после термической обработки (закалка и низкий отпуск) должны обладать высокой твердостью, износостойкостью и сопротивлением контактной усталости. В сталях недопустима карбидная неоднородность и неметаллические включения, т.к. они вызывают преждевременное усталостное разрушение. Для получения оптимального сочетания прочности и контактной выносливости кольцо и ролики подшипников должны иметь после закалки и отпуска твердость 60-65 HRCэ. Структура стали после термической обработки состоит из мартенсита, мелких вторичных карбидов и $A_{ост}$. Однако присутствие $A_{ост}$ в структуре уменьшает стабильность размеров подшипников. Поэтому для подшипников, которые должны иметь высокую стабильность размеров после закалки перед отпуском применяют обработку холодом при -70...-80 градусах. Для изготовления тел качения и подшипниковых колец используют высокоуглеродистые (0,95-1,05% углерода) хромистые стали ШХ15, ШХ15СГ, ШХ4. Буква Ш указывает, что это сталь шарикоподшипниковая, буквы Х, С и Г - легирующие элементы, цифра после буквы «Х» показывает содержание хрома в десятых долях процента.

Износостойкие стали. ГОСТ 2176-77

Износостойкие стали применяются для изготовления деталей, работающих на износ в условиях абразивного трения и высоких давлений и ударов, например, для траков гусеничных машин, щек дробилок, черпаков землечерпальных машин, лопастей смесеприготовительных машин, крестовин железнодорожных путей. Для их изготовления применяется сталь 110Г13Л. Структура стали после литья состоит из аустенита и избыточных карбидов $(Fe, Mn)_3C$, выделяющихся по границам зерен, что снижает прочность и вязкость стали. В связи с этим литые изделия закаливают с нагревом до температуры 1100 градусов и охлаждением в воде. При таком нагреве растворяются карбиды, и сталь после закалки приобретает более устойчивую аустенитную структуру. Сталь с аустенитной структурой характеризуется низким пределом текучести и сильно упрочняется под действием пластической деформации (наклепывается). Высокой износостойкостью сталь обладает только при ударных нагрузках, когда происходит деформационное упрочнение аустенита и образование Е-мартенсита с ГПУ решеткой.

При небольших ударных нагрузках в сочетании с абразивным изнашиванием либо при чистом абразивном изнашивании мартенситное превращение не протекает и износостойкость стали 110Г13Л невысокая. Твердость стали в процессе работы возрастает с 20-25 HRCэ до 50-55 HRCэ. Сталь трудно обрабатывается резанием и применяется после литья.

Коррозионные стали. (Нержавеющие стали). ГОСТ 5632-72

Нержавеющими называются стали устойчивые электрохимической коррозии, вызываемой воздействием атмосферных условий, речной и морской воды, растворами кислот, щелочей и солей.

Механизм электрохимической коррозии сводится к следующему: если в электролит (влажный воздух, водные растворы кислот, щелочей, солей) поместить два соприкасающихся металла, образуется гальванический элемент. При этом, металл, который легче, отдает электроны, служит анодом, а другой - катодом. В процессе работы гальванического элемента анод разрушается.

Микрогальванические элементы возникают также между различными фазами сплавов и даже в чистых металлах, где роль анодов играют границ зерен и другие дефектные участки, а роль катода - тело зерна. Чем больше отдельные фазы (участки) металла отличаются электрохимическими потенциалами, тем быстрее происходит

разрушение. В неоднородном металле различают местную (точечную, пятнистую) и интеркристаллическую, распространяющуюся по границам зерен, коррозии. Наиболее опасна последняя, т.к. резко снижает механические свойства без заметных внешних признаков.

Из вышесказанного следует, что материалы с однофазной крупнозернистой структурой без дефектов поверхности и с высокой чистотой обработки поверхности обладают высокой коррозионной стойкостью.

Сталь становится коррозионностойкой при введении в ее состав 13% и более хрома. Хром, растворяясь в железе, скачкообразно изменяет электрохимический потенциал стали. Потенциал из отрицательного становится резко положительным, а сталь из активного состояния переходит в пассивное. В этом случае хром образует на поверхности плотную защитную оксидную пленку типа $(Cr,Fe)_2O_3$.

Увеличение содержания углерода в стали снижает ее коррозионную стойкость, т.к. углерод связывает хром в карбиды и удаляет его из твердого раствора. Кроме того, выделение карбидов превращает структуру из однофазной в двухфазную. Коррозионная стойкость стали повышается термической обработкой: закалка с высоким отпуском.

Нержавеющие стали можно разделить на два основных класса:

- 1) хромистые, имеющие после охлаждения на воздухе ферритную (12X17, 15X25Т, 15X17Н2Б), мартенситно-ферритную (12X13) и мартенситную (20X13, 30X13, 40X13) структуры;
- 2) хромо-никелевые, имеющие аустенитную (12X18Н9, 10X14Г14Н4Т, 10X14АГ15), аустенитно-мартенситную (09X15Н8Ю) и аустенитно-ферритную (08X21Н6М2Т) структуры.

Применение нержавеющей сталей

12X13 и 20X13 применяются для изготовления деталей с повышенной пластичностью, подвергающихся ударным нагрузкам, клапанов гидравлических прессов, а также предметов домашнего обихода. В отожженном состоянии структура состоит из феррита и перлита.

30X13, 40X13 - для карбюраторных игл, пружин, хирургических инструментов и т.д. Первая в отожженном состоянии имеет структуру перлита, а вторая - перлита со вторичными карбидами.

15X25T, 015X17M2Б - используют без термической обработки для сварных конструкций и деталей, работающих в более агрессивных средах. После любой термообработки имеют ферритную структуру.

12X18Н9 - холоднокатанный лист и лента повышенной прочности для деталей и конструкций, свариваемых точечной сваркой, а также для изготовления труб и других деталей, работающих в коррозионной среде.

10X14Г14Н4Т - для изготовления разнообразного сварного оборудования, работающего в средах химических производств слабой агрессивности, криогенной техники до -253 градусов, а также в качестве жаростойкого и жаропрочного материала до 700 градусов.

08X22Н6Т, 08X18Н10Т - сварные аппараты и сосуды, камеры горения газовых турбин, фланцы, диски, детали внутренних устройств аппаратов, работающих при температуре от -10 градусов до +300 градусов под давлением в присутствии коррозионных сред.

08X21Н6М2Т - крепежные детали, работающие в средах повышенной агрессивности при 600 градусах.

Магнитомягкие стали. ГОСТ 21427-75

Эти стали применяют для изготовления магнитопроводов постоянного и переменного тока, якорей, роторов, статоров двигателей. К ним предъявляются требования высокой магнитной проницаемости, низкой коэрцитивной силы, малых потерь при перемагничивании и потерь на вихревые токи.

Для получения необходимых свойств ферромагнитный материал должен быть чистым от примесей и включений, иметь гомогенную (однофазную) крупнозернистую структуру. Даже слабый наклеп снижает магнитную проницаемость и повышает коэрцитивную силу (H_c), поэтому материал должен быть полностью рекристаллизован.

В качестве магнитомягких материалов используются низкоуглеродистые (0,05-0,005% углерода) стали. В состав сталей вводится кремний (0,8-4,8%). Кремний вызывает рост зерна феррита, тем самым снижает коэрцитивную силу, а, растворяясь в феррите, уменьшает потери на вихревые точки.

Электротехническая сталь маркируется цифрами: первая цифра определяет структуру и вид прокатки (1-горяче катаная изотропная, 2-холодно катаная изотропная); вторая цифра указывает содержание кремния (0 - до 0,4%; 1 - 0,4-0,8%; 2 - 0,8-1,8%; 3 - 1,8-2,8%; 4 - 2,8-

3,8%; 5 - 3,8-4,8%); третья цифра - потери на гистерезис и тепловые потери; четвертая цифра - код нормируемого параметра.

Примеры марок: 1212, 1511, 2011, 2212 и т.д.

Структура сталей ферритная.

Экспериментальная часть

1. Получить коллекцию легированных сталей.
2. Исследовать микроструктуру различных марок легированных сталей.
3. Схематично зарисовать микроструктуры сталей, обозначив структурные составляющие.
4. Связать микроструктуру со свойствами стали.
5. Объяснить, почему у сталей одинакового химического состава микроструктуры различны.
6. Расшифровать изучаемые марки сталей и указать их применение.
7. Оформить отчет.

Отчет по работе должен содержать теоретическую и экспериментальные части.

Контрольные вопросы

1. Преимущества легированных сталей по сравнению с углеродистыми.
2. Распределение легирующих элементов в сталях и их влияние на свойства.
3. Классификация легированных сталей по назначению и структуре.
4. Маркировка легированных сталей.
5. Строение, назначение и свойства изучаемых в работе сталей.

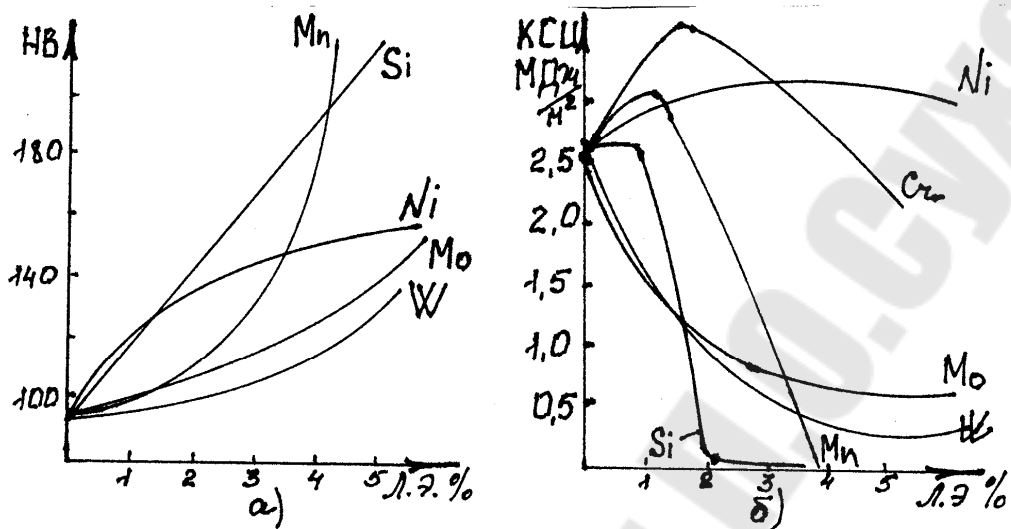


Рис. 1. Влияние легирующих элементов на изменение твердости (а) и ударной вязкости (б)

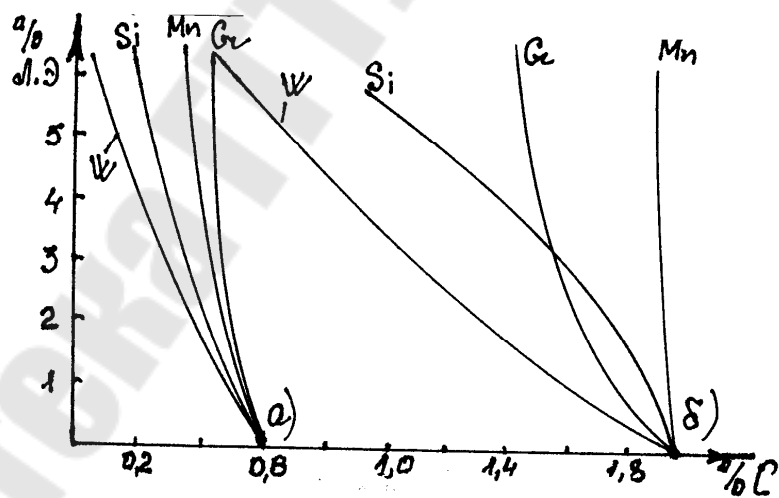


Рис. 2. Схема влияния легирующих элементов на точку (а) и точку (б)

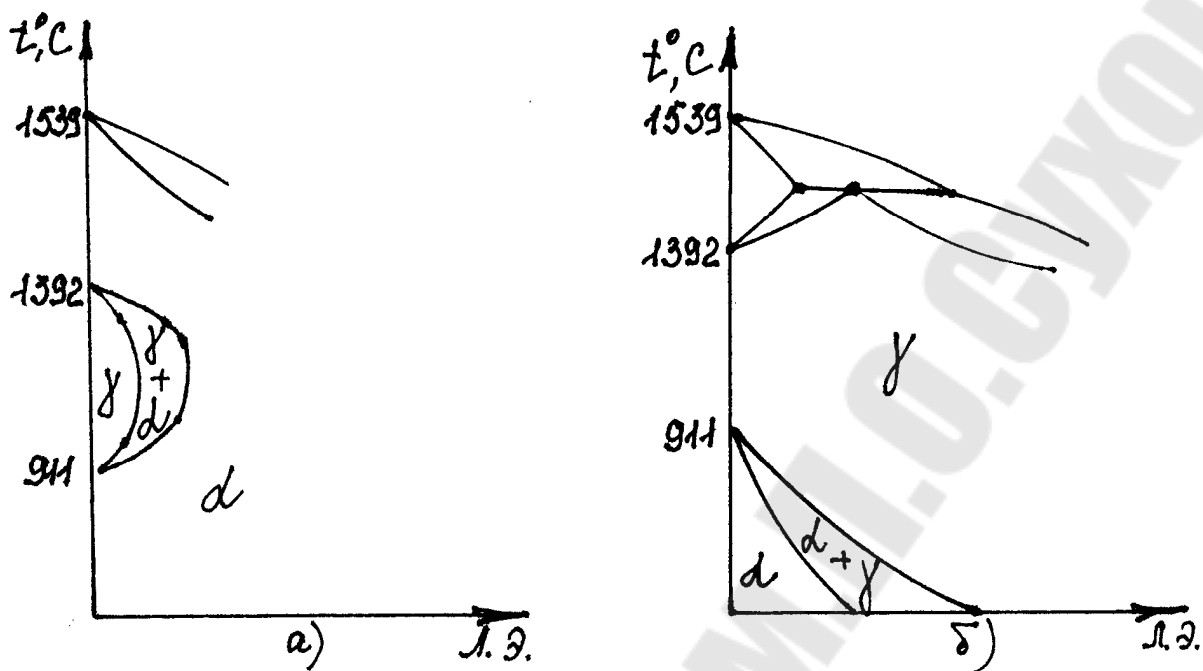


Рис. 3. Схема влияния легирующих элементов на полиморфизм железа

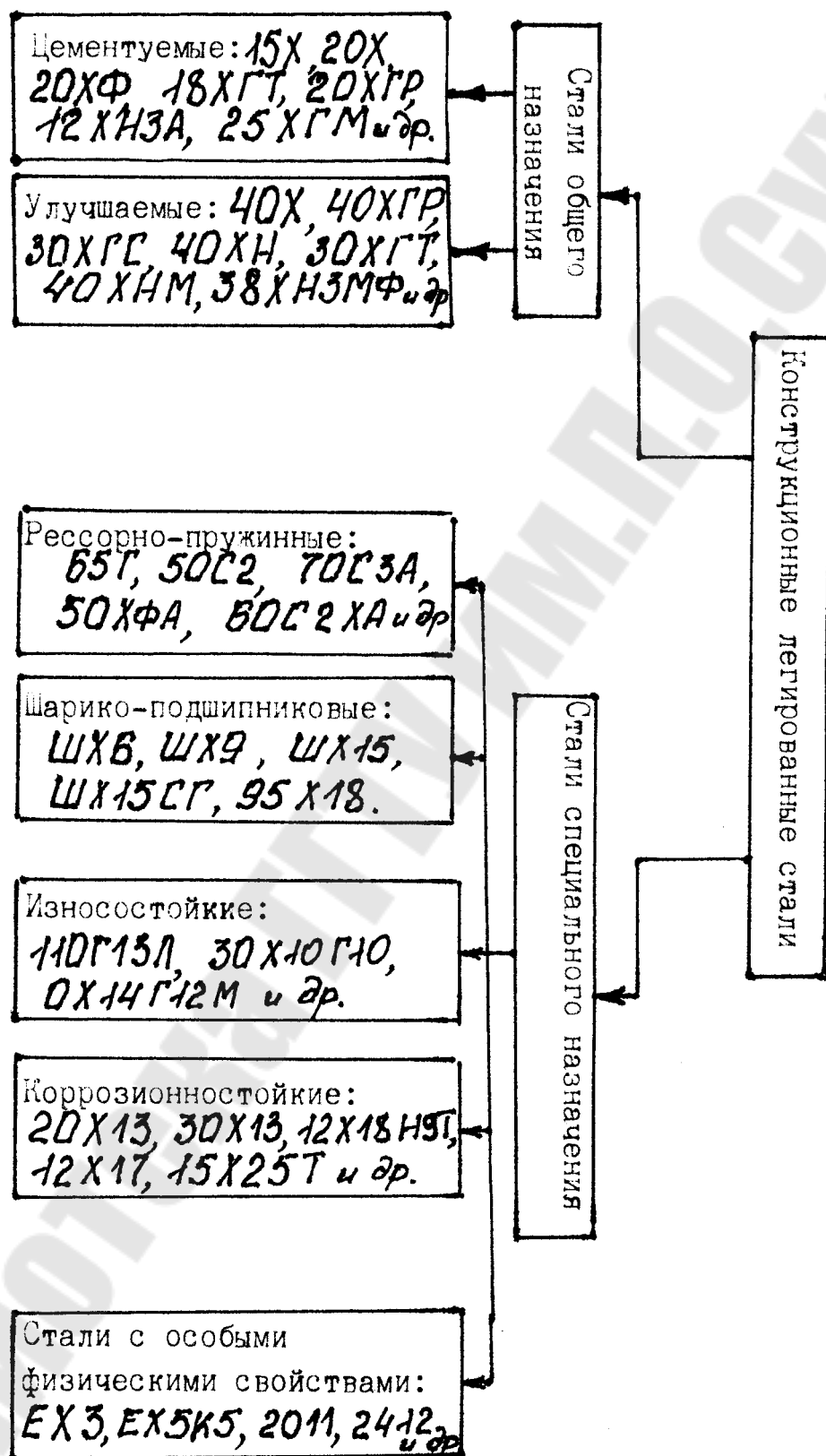


Рис. 4. Классификация легированных сталей

Лабораторная работа № 12 ЛЕГИРОВАННЫЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СТАЛИ

Цель работы: получить навыки по классификации и свойствам инструментальных сталей, изучить важнейшие марки инструментальных сталей и влияние легирующих элементов после различных видов термообработки.

Теоретическая часть

Основными материалами для изготовления инструментов являются инструментальные стали. Создание новых инструментальных материалов с более высокими свойствами не влечет за собой сильного сокращения производства ранее созданных инструментальных сталей, успешно применяемых в промышленности. Доля многих из них в общем производстве инструментальных сталей остается преобладающей и обеспечивающей производительность при обработке материалов, более мягких или с умеренным сопротивлением пластической деформации.

Таким образом, еще более возрастает число инструментальных сталей, различающихся по составу, свойствам и особенностям обработки и применения.

Любой инструмент в процессе работы изнашивается, поэтому к инструменту помимо требований, предъявляемых к конструкционным деталям, предъявляются требования высокой износостойкости, а в ряде случаев - теплостойкости, обеспечивающей сохранение высокой твердости при нагреве инструмента.

Для обеспечения высокой твердости и износостойкости большинство инструментальных сталей имеет высокое содержание углерода от 0,7 до 1,3%.

Для лучшей ориентации при выборе сталей для инструментов проводят классификацию инструментальных сталей по двум признакам : по свойствам и по назначению.

На рис. 1 приведена схема классификации инструментальных сталей по свойствам, предложенная Ю.А.Геллером.

За основное свойство при этой классификации принята теплостойкость стали, т.к. она определяет природу упрочнения стали при термообработке и во многих случаях условия использования стали. Теплостойкость характеризует температура нагрева, при которой сталь после закалки начинает интенсивно терять свою

твердость, а, значит, и износостойкость. По теплостойкости различают три группы инструментальных сталей: теплостойкие, полутеплостойкие, нетеплостойкие.

Нетеплостойкими являются углеродистые и легированные стали, которые после закалки имеют высокую твердость и износостойкость в результате мартенситного превращения. При нагреве до 200-300 градусов основное количество углерода выделяется из мартенсита и начинается коагуляция карбидов цементитного типа. В результате сталь теряет твердость, износостойкость.

Полутеплостойкими являются средние и высоколегированные (в основном хромом) стали. Твердость этих сталей также достигается закалкой на мартенсит. Однако при отпуске образуется более легированный цементит и специальные карбиды, благодаря чему сталь сохраняет повышенную твердость до 300-500 градусов.

Теплостойкими являются высоколегированные стали, которые приобретают твердость: а) в результате мартенситного превращения при закалке; б) дисперсионного твердения при высоком отпуске (500-625 градусов) за счет выделения дисперсных фазупрочнителей. Этими фазами являются сложные карбиды вольфрама, молибдена, ванадия.

Теплостойкие стали имеют преимущества перед нетеплостойкими не только потому, что инструмент из таких сталей допускает обработку при интенсивных режимах, когда остальные стали теряют твердость и износостойкость. Теплостойкие стали имеют и другие положительные особенности. Как известно, большинство инструментов после термообработки подвергают шлифованию для получения необходимой чистоты рабочей поверхности. Это повышает вязкость и прочность инструмента. В процессе шлифования имеет место достаточно высокий местный нагрев поверхностных слоев обрабатываемого изделия, что может привести к частичному распаду мартенсита. Естественно, что для теплостойких сталей местный нагрев менее опасен и менее влияет на понижение твердости и износостойкости.

При закалке инструментальных сталей, особенно легированных, наряду с мартенситом в структуре стали остается повышенное количество остаточного аустенита $A_{ост}$. При малых количествах он почти не снижает твердость инструмента, но снижает прочность (G_t , $S_{от}$, G_v , KCU) и шлифуемость стали (от разогрева поверхности

может иметь место превращение $A_{\text{ост}} \rightarrow M_{\text{отп}}$, что вызывает дополнительные напряжения и возможность образования шлифовочных трещин). Поэтому необходимо стремиться к снижению $A_{\text{ост}}$ при термообработке. Устранение $A_{\text{ост}}$ для нетеплостойких сталей отпуском без снижения твердости затруднительно. Применение обработки холодом значительно усложняет технологический процесс. В теплостойких сталях, подвергаемых отпуску при 500-600 градусах, остаточный аустенит переходит в мартенсит отпуска без потери твердости и износостойкости. Поэтому такие стали имеют более высокие показатели прочности, хорошо сопротивляются пластической деформации.

Исходя из перечисленных преимуществ теплостойких сталей следует сделать вывод о рациональности применения их не только в особых случаях, когда теплостойкость определяет эксплуатационные характеристики инструмента. Их применяют и для других инструментов, от которых требуется повышенная прочность. Естественно, что высоколегированные стали дорогие, но качество инструмента из таких сталей повышается в 10-15 раз. Отсюда тенденция к вытеснению высоколегированными теплостойкими сталями более дешевых, но менее качественных инструментальных сталей.

Следующими признаками классификации инструментальных сталей являются их твердость и вязкость (рис.1).

Стали высокой твердости не имеют достаточной вязкости и поэтому для инструмента, подвергаемого ударным нагрузкам, применять их не следует. По твердости инструментальные стали подразделяются на: а) стали высокой твердости ; б) стали повышенной вязкости. К сталям первой группы относятся стали с 0,7-1,5% углерода, которые после закалки и отпуска имеют твердость 58-65 HRC. Однако значение ударной вязкости этих сталей всего около 10 Дж/см² в квадрате. К сталям повышенной вязкости относятся стали с 0,4-0,7% углерода. Эти стали после закалки подвергают отпуску на твердость 45-50 HRC. Ударная вязкость в зависимости от состава этих сталей 20-80 Дж/см² в квадрате.

Важной характеристикой инструментальных сталей является прокаливаемость. Низкую прокаливаемость имеют углеродистые стали и стали, легированные вольфрамом. Все полутеплостойкие стали имеют высокую прокаливаемость.

По назначению различают следующие инструментальные стали:

1. Стали для режущего инструмента.
2. Штамповые стали для холодного деформирования.
3. Штамповые стали для горячего деформирования и прессформ для литья под давлением.
4. Стали для измерительного инструмента и деталей высокой прочности.

Стали для режущего инструмента

В зависимости от интенсивности режимов резания режущие инструменты изготавливают из нетеплостойких (углеродистых, малолегируемых) или теплостойких высоколегированных (быстрорежущих) сталей.

Нетеплостойкие стали для режущего инструмента

Из этих сталей можно изготавливать инструмент, который в процессе работы не разогревается выше 150 градусов. Такими инструментами являются деревообрабатывающие инструменты, ножовочные полотна, напильники, зубила, метчики, плашки и другой слесарный инструмент.

Легированная сталь для режущих элементов инструментов содержит углерода от 0,7 до 1,5% и легирующих элементов, таких как Cr, Si, W, V, Mn в сумме от 1 до 3% : X, 9XC, XBC, 7XF, 6XC, XBG, XBCG. Легирование в основном влияет на технологические свойства и на прокаливаемость стали. Особенно высокую прокаливаемость имеют сложнолегированные стали XBG, XBCG. Назначение - тормозить рост зерна аустенита при нагреве стали под закалку. Стали, содержащие кремний (9XC), имеют мало остаточного аустенита, менее чувствительны к перегреву, имеют большую стойкость к отпуску. Но они чувствительны к обезуглероживанию при термообработке, плохо обрабатываются резанием и деформированием из-за упрочнения феррита кремнием.

Для изготовления инструментов, работающих с ударными нагрузками, следует использовать стали повышенной вязкости с содержанием углерода 0,6-0,75% (6XC, 7XF и др.). По своим режущим свойствам легированные инструментальные стали мало отличаются от углеродистых сталей с таким же содержанием углерода. Но эти стали отличаются по своим технологическим свойствам: имеют

большую прокаливаемость до 30 мм, а поэтому закаливаются в масле, обладают деформацией при закалке и т.д.

Режимы термической обработки инструмента зависят от марки стали и устанавливаются по справочникам. Твердость после термообработки инструментов, работающих без ударных нагрузок, 60-63 HRCэ, что достигается низким отпуском (160-180 градусов) после закалки. Инструмент, от которого требуется повышенная вязкость, отпускается при более высокой температуре на твердость 52-57 HRCэ. Для деревообрабатывающего инструмента из сталей 6ХС, 9ХФ рекомендуется изотермическая закалка, значительно улучшающая вязкость.

Теплостойкие (быстрорежущие) стали для режущего инструмента.

Быстрорежущие стали имеют в своем составе сравнительно невысокое содержание углерода (0,7-0,95%) и весьма высокое содержание легирующих элементов (до 25%): Р9, Р6М5, Р6М3, Р18Ф2, Р18Ф5 (ГОСТ 19265-73). В этих сталях буква Р указывает, что сталь быстрорежущая (рапид), цифра, стоящая за буквой, обозначает количество вольфрама в процентах, следующие буквы и цифры показывают наличие и количество (в целых числах процента) легирующих элементов: Ф - ванадия, К - кобальта.

В равновесном состоянии быстрорежущие стали относятся к ледебуритному классу. Структура такой стали после литья будет состоять из перлита, ледебурита и вторичных карбидов.

Для разрушения ледебуритной эвтектики, размельчения и равномерного распределения карбидов, а также для подготовки структуры к последующей термической обработке эта сталь после литья подвергается ковке и отжигу. При этом происходит дробление карбидов эвтектики и достигается более однородное распределение карбидов по сечению заготовки. От однородности распределения карбидов и их величины во многом зависят свойства инструментов. Поэтому ГОСТом предусмотрена оценка степени карбидной неоднородности по десятибальной шкале. Наиболее качественной считается структура с баллом 1, наихудшей с баллом 10.

Структура стали послековки и отжига будет состоять из мелкозернистого (сорбитообразного) перлита + избыточные карбиды. Количество карбидов около 25%. Сталь с такой структурой хорошо обрабатывается резанием. Подавляющее количество легирующих элементов находится в карбидной фазе. Для получения оптимальных

свойств (в первую очередь теплостойкости) стали в готовом инструменте необходимо при термической обработке обеспечить по возможности максимальное насыщение мартенсита легирующими элементами. Такой высоколегированный мартенсит будет устойчив к отпуску и сохранится до 615-620 градусов, а значит, инструмент будет резать, разогреваясь в работе до указанных температур. Для этого необходимо прежде всего получить высокоуглеродистый и высоколегированный аустенит, что требует очень высоких температур нагрева под закалку (1220-1280 градусов).

Более высокий нагрев может привести к оплавлению кромок или к чрезмерному росту аустенитного зерна, появлению карбидной эвтектики.

Ввиду плохой теплопроводности стали во избежание получения трещин при нагреве, нагрев стали под закалку необходимо производить медленно. Практически нагрев ведут с 1-2 подогревами (рис. 3).

I режим - закалка с последующим трехкратным отпуском при 360 градусах;

II режим - закалка с последующей обработкой холодом и однократным отпуском при 560 градусах;

III режим - изотермическая закалка с последующим однократным отпуском при 560 градусах.

Соотношение времени первого, второго и третьего предварительного нагрева должно быть соответственно 3:1, 2:1, 1:1. После окончательного нагрева инструмент подвергают высокоступенчатой закалке в расплавах солей с температурой 500-650 градусов и выдержкой, равной выдержке при окончательном нагреве с последующим охлаждением на воздухе.

Для закалки быстрорежущих сталей применяются и другие способы:

- охлаждение в масле до 150-200 градусов и дальнейшее на спокойном воздухе; во избежание трещин можно перед погружением инструмента в масло подстуживать его на воздухе до 900 - 1000 градусов; этому соответствует оранжевый цвет излучения;
- охлаждение в струе вентиляторного воздуха; применяется для мелкого инструмента;
- охлаждение в селитровой ванне с температурой 450-500 градусов и последующее охлаждение на воздухе; применяется для инст-

румента сложной формы (фрез, протяжек), при этом уменьшается коробление.

Для удаления с поверхности инструмента соли и масла, остающихся после закалки, проводится промывка в водном растворе каустической соды, а для предотвращения ржавчины - пассивирование путем обработки в горячем растворе нитрита натрия с добавкой кальцинированной соды.

Штамповые стали для холодного деформирования

Основные требования, предъявляемые к этим инструментам, - высокая твердость, износостойкость, прочность, сопротивление пластическим деформациям и в случае больших ударных нагрузок также повышенная вязкость.

В табл.1 приведены данные о распространенных марках сталей, используемых для изготовления инструментов холодного деформирования.

Таблица 1

Тип инструмента	Рекомендуемая сталь
Стали для штампов объемной штамповки	
Высадочные штампы	У10, У12, Х, ХВСГ
Штампы для прессования	Х12М, Х12Ф, Р12, Р6М5, 5ХВ2С
Стали для штампов листовой штамповки	
Вытяжные штампы	У10...У12, Х, ХГ2ВМ, Х12Ф1, Х6ВФ
Вырубные штампы	Х12Ф1, Х6ВФ, Р12, 4Х5Ф, Х12Ф4М

Как видно из таблицы, при изготовлении штампов во многих случаях используются стали, применяемые для изготовления режущих инструментов. Эти стали относятся к ледебуритному классу и являются полутеплостойкими сталями.

Структура высокохромистых сталей в литом состоянии содержит первичные карбиды $(Fe,Cr)_7C_3$ с твердостью 1600...1800 НВ и легированный цементит $(Fe,Cr)3C$. Для однородного распределения карбидов, слитки из этих сталей должны подвергаться интенсивной пластической деформации. Стали Х12, Х12Ф1, Х12М имеют очень высокую прокаливаемость (200...300 мм), высокую твердость и износостойкость в термически обработанном состоянии. В структуре за-

каленной стали имеется много остаточного аустенита. Поэтому объемные изменения инструмента при закалке могут быть сведены к минимальным. Наибольшее распространение имеют стали X12M, X12Ф1 с содержанием углерода 1,2... 1,65%. Эти стали имеют меньшую карбидную неоднородность, чем сталь X12.

Новая сталь X12Ф4М, взамен стали типа X12, имеет в 1,5...2 раза более высокую износостойкость по сравнению со штампами из стали X12M при штамповке листов высокопрочной динамной стали. Молибден и ванадий в составе этих сталей способствуют сохранению мелкого зерна. Нагрев под закалку хромистых сталей производят при температуре 1000...1040 градусов, чтобы растворить в аустените карбиды хрома. Охлаждение инструмента малых сечений можно осуществлять на воздухе, крупных - в масле.

Следует иметь в виду, что полное отсутствие деформации инструмента из хромистых сталей обеспечить невозможно из-за неоднородного распределения карбидов в заготовке вдоль и поперек направления прокатки. Поэтому при устранении деформации в одном направлении она может сохраниться в другом направлении. Анизотропия деформации тем больше, чем больше хрома и углерода (карбидов) в стали и чем меньше предварительная деформация заготовок. Поэтому стали X6ВФ, 9Х5Ф по сравнению со сталями типа X12 меньше деформируются при термо-обработке, но прокаливаемость их ниже (70...80 мм).

В таблице 1 приведены инструменты, изготавливаемые из высокохромистых сталей.

Углеродистые стали рекомендуется использовать для изготовления относительно небольшого сечения (до 20 мм) пуансонов, работающих с динамическими нагрузками. После закалки и отпуска на твердость (57... 59 HRCэ) инструмент из этих сталей имеет хорошую износостойкость и ударную вязкость.

В случае более крупного сечения инструмента, работающего в условиях диаметрической нагрузки, применяются стали повышенной прокаливаемости (X, ХГС, ХВГ) или стали с пониженным содержанием углерода (6ХС, 7ХФ). Температура закалки штамповых сталей находится в пределах 870...900 градусов, температура отпуска 200...250 градусов (твердость 53...58 HRCэ). Для уменьшения брака при закалке необходимо медленное охлаждение в области температуры мартенситного превращения (например, закалка из во-

ды в масло для углеродистых сталей, ступеньчатая закалка для легированных сталей).

Теплостойкие стали типа быстрорежущих для штампов имеют преимущества по сравнению с остальными инструментальными сталями, т.к. после термообработки в структуре этих сталей практически отсутствует остаточный аустенит, что резко повышает прочность наряду с сохранением высокой твердости и износостойкости. Вязкость этих сталей понижена, поэтому инструмент из быстрорежущей стали не следует использовать в случае наличия повышенных ударных нагрузок.

Особую группу штамповых сталей составляют стали с повышенным содержанием хрома (от 6 до 12 %) : Х6ВФ, Х12, Х12М, Х12Ф.

Штамповые стали для горячего деформирования пресформ для литья под давлением

Дополнительно к общим требованиям от сталей этой группы требуется:

- 1) высокая разгаростойкость (устойчивость против образования трещин при многократном нагреве и охлаждении);
- 2) высокая окалиностойкость;
- 3) хорошая теплопроводимость для лучшего отвода теплоты от рабочей поверхности штампа;
- 4) высокая прокаливаемость для обеспечения высокой прочности по всему сечению инструмента.

В табл.2 приведены стали, применяемые для различных видов инструментов при деформации металла и пластмасс в горячем состоянии.

Таблица 2

Тип инструмента	Рекомендуемые марки стали
Молотовые штампы	5ХНВ, 5ХНМ, 5ХГМ, 4Х5В2ФС
Высадочные штампы	7Х3,4Х5В2ФС, 4Х2СВ2М9
Штампы прессования, вы- давливания, прошивки,	4Х5МС, 4Х5В4ФСМ, 3Х2В8Ф 2Х8В8М2К8

протяжки	
Ножи и пилы горячей резки	4X5B2ФС, 4X3BMC, 4X5B4ФСМ, 6ХС Для Мо-сплавов - 4X5МС, 4X3ВМФС
Пресс-формы для литья под давлением	Для Al-сплавов - 4X5B2ФС, 4X5МС Для Cu-сплавов - 3X2B8Ф, 4X5B4ФСМ 3X12B12Ф
Пресс-формы для прессования пластмасс	4X3BМФС (20X, 12ХН3А, цементруемые), 2X12B12Ф, 55Г, 6ХС, X12M, X, X12Ф, 5XB2C

Стали для штампов горячего прессования имеют длительный контакт с горячим металлом. Поэтому они работают при значительно более тяжелых условиях, чем молотовые штампы. Для штампов горячего прессования необходимо применять стали повышенной теплостойкости. В некоторых случаях для таких штампов применяется сталь 3X2B8Ф, теплостойкость которой сохраняется до 650 градусов. Но наличие значительного количества карбидов вольфрама в составе снижает вязкость стали.

Наличие различной степени карбидной неоднородности в заготовках стали 3X2B8Ф разного сечения приводит к тому, что ударная вязкость для заготовок диаметром 20 мм составляет 30 Дж на кв.метр, для заготовок диаметром 75 мм - всего 15 Дж на кв.метр. Сталь 3X2B8Ф имеет также пониженную разгаростойкость и, кроме того, весьма дефицитна.

Взамен ее применяется легированная вольфрамом сталь 4X5B2ФС, которая по сравнению со сталью 3X2B8Ф имеет в 3...4 раза большую разгаростойкость и в два раза большую вязкость. Эта сталь менее чувствительна и к масштабному фактору. Наличие повышенного содержания хрома и кремния в составе стали 4X5B2ФС увеличивает окалиностойкость стали.

Разработана сталь 2X8BM2K8 взамен стали 3X2B8Ф, которая в штампах для прессования высокопрочных и нержавеющей сталей имеет стойкость в 5...15 раз выше, чем сталь 3X2B8Ф.

Штампы отпускаются на твердость 45...50 HRCэ. Ножи и пилы отпускаются на твердость 48...53 HRC.

Твердость пресс-форм для литья под давлением составляет 40...

45 HRCэ; твердость пресс-форм для пластмасс - от 30 до 56 HRCэ в зависимости от используемого материала. Однако следует иметь в виду, что методы оценки работоспособности штамповых сталей по значениям твердости не являются достаточно обоснованными, т.к. показатели механических свойств, которые выявляются при изменении твердости, тем более при нормальных температурах, не отражают условий напряженного состояния штампа в процессе работы.

Стали для измерительного инструмента деталей высокой прочности

Основными требованиями, предъявляемыми к сталям для измерительных инструментов, являются высокая твердость, износостойкость и стабильность в размерах в течение длительного срока эксплуатации. Наиболее трудно обеспечить последнее требование, т.к. закаленная сталь со временем претерпевает старение. Сущность старения заключается в том, что в объеме металла происходит: а) перераспределение напряжений, что может вызвать деформацию; б) уменьшение тетрагональности мартенсита из-за выделения углерода, что приводит к уменьшению объема и размеров; в) превращение остаточного аустенита в мартенсит отпуска, что увеличивает размеры.

Для изготовления измерительных инструментов применяются стали X, XГ, 50, 55. 15, 20 и др. Высокоуглеродистые стали подвергаются закалке и очень длительному низкому отпуску. Желательно до отпуска провести обработку холодом. Малоуглеродистые стали подвергаются цементации и закалке с низким отпуском. Возможно применение нитралоев (38ХМЮА) с азотированием на высокую твердость.

Длительный низкий отпуск (несколько десятков часов) уменьшает содержание углерода в мартенсите и снижает внутреннее напряжение до уровня, при котором они не вызывают изменения формы и размеров инструмента. Вместе с тем низкий отпуск практически не изменяет количество аустенита остаточного, что при эксплуатации ведет к незначительному увеличению длины инструмента. Для уменьшения количества аустенита остаточного применяют обработку холодом (охлаждение ведут до минус 70 градусов) с последующим низким отпуском при 120-125 градусах в течение 2-3 час. Для значи-

тельного уменьшения аустенита остаточного рекомендуется 2-3-кратное повторение обработки холодом и низкого отпуска.

Структура инструментальной стали в исходном

Металлическая основа инструментальной стали в исходном состоянии - перлитная - с наименьшей твердостью, что обеспечивает возможность обработки резанием и давлением в холодном состоянии. Остальные свойства перлита, в том числе и его влияние на формирование структуры стали, получаемой при последующей закалке, обусловлены концентрацией в нем углерода. Она, в свою очередь, зависит от содержания в стали легирующих элементов, которые способствуют уменьшению концентрации углерода в перлите. Некоторые свойства перлита зависят, кроме того, от формы и размеров присутствующих в нем цементитных частиц. Форма карбидов может быть зернистой, пластинчатой или смешанной. В углеродистых и малолегированных сталях она обусловлена главным образом температурой отжига.

Карбиды, не растворившиеся при нагреве, служат центрами кристаллизации карбидных частиц, выделяющихся при охлаждении и выдержке в температурном интервале перлитного превращения. Это способствует получению **з е р н и с т о г о** перлита. Следовательно, в заэвтектоидной стали, нагреваемой для отжига лишь немного выше A_1 , аустенит при охлаждении распадается с образованием зернистой структуры.

При повышенном нагреве во время отжига образуется **п л а с т и н ч а т ы й** перлит вследствие растворения большого числа карбидов и уменьшения возможных центров кристаллизации, а также из-за роста зерна аустенита. При последующем замедленном охлаждении больше карбидов выделяется по границам зерен; поэтому получение пластинчатого перлита сопровождается образованием карбидной сетки, сохраняющейся в закаленной стали и ухудшающей ее свойства. К образованию пластинчатого перлита, даже при небольшом перегреве, более чувствительны стали близкие к эвтектоидным и имеющие мало избыточных карбидов. Стали со структурой зернистого перлита имеют меньшую твердость и лучше обрабатываются резанием, чем стали со структурой пластинчатого или точечного перлита.

Вязкость стали с зернистым перлитом также больше, а порог хладноломкости стали с зернистым перлитом - ниже.

Д и с п е р с н о с т ь перлита зависит от условий охлаждения и выдержки ниже A_1 и от состава стали. При замедленном охлаждении или длительной выдержке при более высокой температуре усиливается коагуляция карбидов, и они становятся крупнозернистыми (или крупно-пластинчатыми). При повышенной скорости охлаждения или выдержке при более низких температурах структура перлита точечная.

У углеродистых и менее легированных сталей, цементит которых легче коагулирует, наблюдаются большие различия в дисперсности перлита. Строение перлита этих сталей характеризуется по десятибальной шкале. Баллы 1 и 2 отвечают стали с точечным перлитом и повышенной твердостью; баллы 3-6 - стали с зернистым перлитом; баллы 7-8 - с менее однородным крупнозернистым перлитом, но с пониженной твердостью и баллы 9-10 - с пластинчатым перлитом.

Твердость отожженных сталей, естественно, возрастает с увеличением дисперсности перлита. У углеродистых сталей У10-У12 с зернистым перлитом она составляет НВ 160-170 при балле 5-6 и НВ 185-190 при балле 3-4.

У легированных сталей твердость перлита определяется кроме того, составом ферритной составляющей. Твердость возрастает с увеличением содержания хрома и особенно кремния.

В результате повышенного легирования, например, у быстрорежущих сталей, перлит содержит мало углерода (0,2-0,3%) и превращение перлит-аустенит незначительно насыщает твердый раствор. Оно достигается растворением вторичных карбидов при нагреве выше A_1 . Поэтому явление перлита на структуру закаленной стали менее заметно.

Форма перлита - зернистая (из-за влияния большого числа вторичных карбидов) и его дисперсность больше, чем у нетеплоустойчивых сталей.

Благодаря большей дисперсности, присутствию легирующих элементов в ферритной составляющей твердость перлита повышенная.

Экспериментальная часть

1. Исследовать микроструктуру различных марок легированных сталей.

2. Схематично зарисовать микроструктуру сталей, обозначив структурные составляющие.
3. Сделать вывод о карбидной неоднородности сталей.
4. Связать микроструктуру со свойствами стали.
5. Объяснить почему у сталей одинакового химического состава микроструктуры разные.

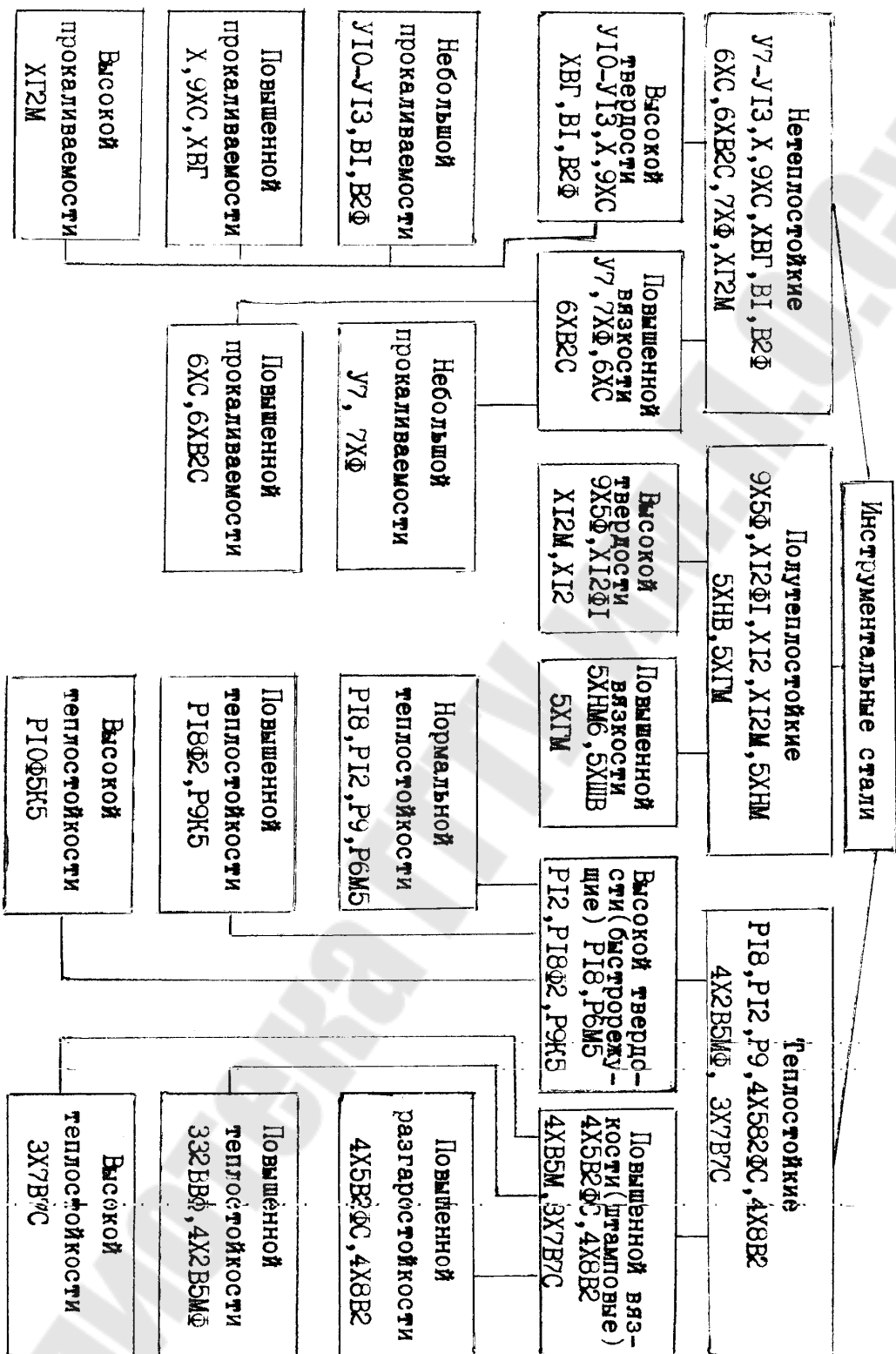


Рис. 1. Схема классификации инструментальных сталей

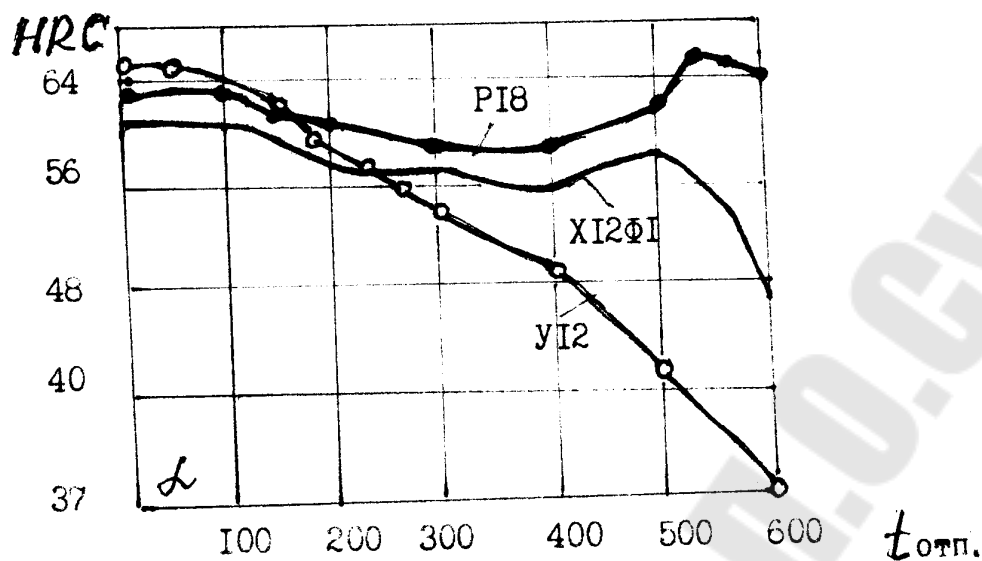


Рис. 2. Изменение твердости инструментальных сталей в зависимости от температуры отпуска

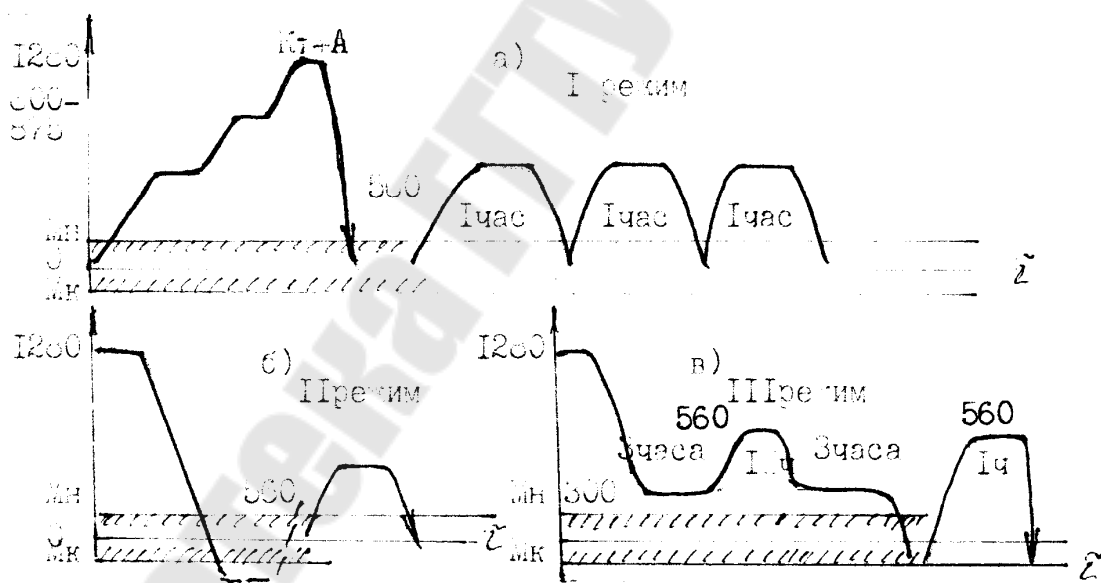


Рис. 3. Графики термической обработки быстрорежущей стали P18

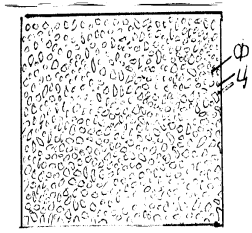


Рис. 4. Перлит зернистый У8

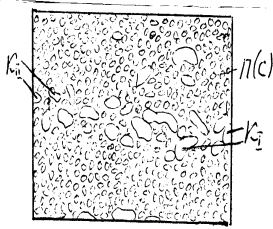


Рис. 5. Карбидная неоднородность в стали X12Ф1

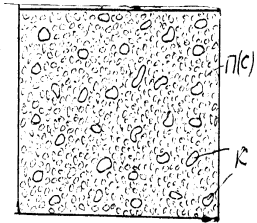


Рис. 6. Сталь P6M5 обычного производства без карбидной неоднородности



Лабораторная работа № 13

МИКРОСТРУКТУРА МЕДИ И МЕДНЫХ СПЛАВОВ

Цель работы: ознакомиться с маркировкой, свойствами и применением меди и медных сплавов; научиться по диаграмме состояния выбирать вид термической обработки и ее режим для получения у сплава определенных свойств.

Приборы и материалы: микроскоп ММУ-3, коллекция микрошлифов меди и медных сплавов, травитель, спирт, фильтровальная бумага, вата.

Выполнение работы рекомендуется проводить в следующем порядке:

1. Ознакомиться по методическому указанию с маркировкой, применением и свойствами меди и медных сплавов

Все металлы, за исключением железа и его сплавов, называются цветными. Среди цветных сплавов широкое применение получили сплавы на медной основе, которые по сравнению со сплавами железа имеют более низкие механические свойства, но характеризуются более высокой коррозионной стойкостью в атмосфере, очень высокой тепло-, электропроводностью и антифрикционностью. Эти сплавы немагнитны.

Медь

Медь, согласно ГОСТа 859-2001, маркируется буквой М, за которой следует одна из цифр: 0, 1, 2, 3, 4. Чем выше цифра – тем больше примесей в меди, например, медь марки М00 содержит меди 99,99 %, марки М0-99,95 %, марки М1-99,90 %, М2р-99,70 %.

Буква «б» в названиях марок означает – бескислородная, а «р» – раскисленная.

Примеси в меди оказывают большое влияние на ее свойства. Примеси Ni, Zn, Sb, Sn, Al, As, Fe, P и другие образуют с медью твердые растворы, повышая ее прочность и снижая тепло- и электропроводность, а особенно резко As, Sb, поэтому для проводников применяется медь марок М0 и М1.

Примеси Pb и Bi образуют с медью легкоплавкие эвтектики, располагающиеся по границам зерен, рис. 1а, которые делают медь

хрупкой, причем Pb при горячей обработке давлением, а Bi – при холодной, а на электро- и теплопроводность влияют слабо.

Примеси O₂ и S образуют с медью хрупкие химические соединения Cu₂O и Cu₂S, которые выделяются по границам зерен рис. 1б и ухудшают ее механические свойства, а на электропроводность влияют слабо.

Медь обладает наибольшей (после серебра) электро- и теплопроводностью. Эти свойства меди принято принимать за 100 %, а все другие технические металлы сравнивать с медью. Механические свойства меди низки:

- в литом состоянии $\sigma_{\text{в}} \approx 160$ МПа, $\sigma_{0,2} \approx 35$ МПа, $\delta = 25$ %;
- в горяче-деформированном состоянии $\sigma_{\text{в}} \approx 240$ МПа, $\sigma_{0,2} \approx 95$ МПа, $\delta = 45$ %;
- в холодно-деформированном состоянии $\sigma_{\text{в}} \approx 450$ МПа, $\delta = 3$ %.

Чистая медь является одним из основных металлов электротехнической промышленности и приборостроения, и не находит широкого применения как конструкционный материал.

Медь хорошо деформируется в холодном и горячем состоянии, плохо обрабатывается резанием, имеет низкие литейные свойства, плохо сваривается.

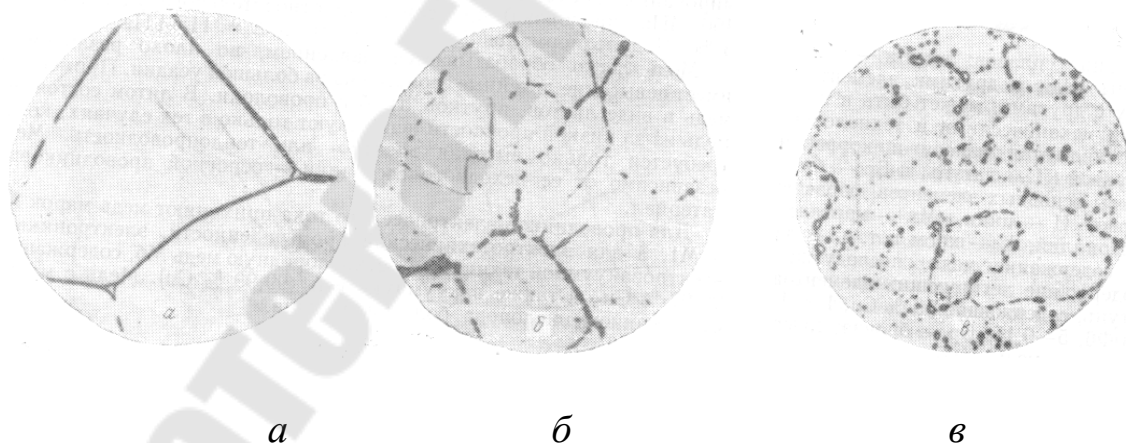


Рис. 1. Микроструктура меди

- микроструктура литой меди; по границам зерен располагается легкоплавкая эвтектика (рис. 1, а);
- микроструктура литой меди с выделением по границам соединения Cu₂S (рис. 1, б);

- микроструктура деформированной и отожженной меди (светлые полиэдры меди, темные точки – включения Cu_2O , внутри зерен прямые линии – линии сдвига и двойники – следы пластической деформации) (рис. 1, в).

В качестве конструкционных материалов используются медные сплавы, имеющие более высокие механические свойства, чем чистая медь. Различают две группы конструкционных медных сплавов.

- 1) Латунни.
- 2) Бронзы.

Латунни

Латуннями называют сплавы меди с цинком. Такие сплавы – простые латунни. С введением третьего, четвертого и более компонентов латунни именуют сложными или специальными, и они получили название алюминиевой, железомарганцевой и т. д. по вводимому компоненту. Технические латунни содержат до 40 – 45 % Zn. Зависимость механических свойств латунни от содержания Zn показана на рис. 2.

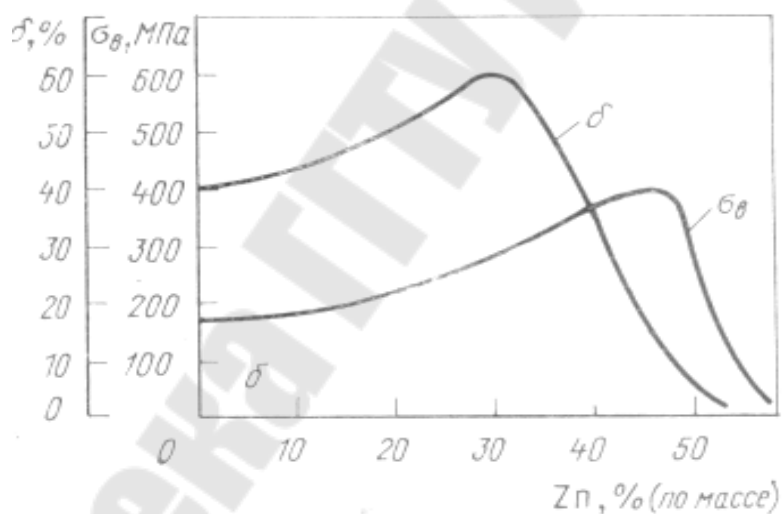


Рис. 2. Зависимость механических свойств латунни от содержания цинка

По технологическому назначению латунни подразделяют на обрабатываемые давлением, согласно ГОСТа 15527-70 маркируются буквой «Л», следующие буквы показывают присутствие в латунни легирующих элементов: А – алюминия, Ж – железа, Мц – марганца, К – кремния, С – свинца, О – олова; первая цифра – среднее содержание меди в %, последующие цифры – содержание компонентов в % в той последова-

тельности, в какой они приведены в буквенной части условного обозначения, а остальное до 100 % составляет содержание Zn. И литейные латуни, поставляемые в виде чушек по ГОСТ 1020-97, а также фасонных отливок, ГОСТ 177011-72 имеют иную маркировку. Например, марки: ЛЦ40Мц3, ЛЦ38Мц2Ж; буква Л – латунь, Ц – цинк, цифра за буквой Ц показывает содержание цинка, все другие буквы показывают присутствие легирующих элементов, а цифра после буквы показывает количество этого элемента, если цифры нет, как в примере после буквы Ж, то этого элемента ≈ 1 %, а остальное до 100 % составляет содержание меди.

Механическая прочность простых латуней невысока: $\sigma_b \cong 200 \div 400$ МПа, $\delta = 40 \div 50$ %.

Латуни с высоким содержанием меди (96-90 %, – томпак, 85 и 80 % – полутомпак) имеют цвет золота и используются для изготовления ювелирных и декоративных изделий. Л70 хорошо деформируется в холодном состоянии, пригодна для пайки и нанесения на сталь. Л62, Л63, Л68 используются для изготовления полуфабрикатов: тонких листов, лент, прутков, проволоки и т. д., из которых штампуют различные детали: прокладки, кольца, шайбы, заклепки, трубки, пружины.

Содержащиеся в сложных латунях элементы придают им специальные свойства. Введение свинца (ЛС 59-1) улучшает обрабатываемость латуней резанием – это автоматные латуни, из них изготавливают втулки, гайки, краны, штуцера, винты и другие детали для работы в коррозионных средах. Введение олова повышает коррозионную и эрозионную стойкость (ЛО70-1, ЛО62-1) – морские латуни. Из них изготавливают детали, работающие в морской воде и в химическом машиностроении, детали конденсационно-холодильного оборудования.

Алюминий, никель, марганец, железо повышают механические свойства латуней – σ_b увеличивается до 550 МПа.

Марганец и кремний делают латуни полноценными заменителями оловянистых бронз, в производстве разнообразной арматуры, работающей в морской воде. ЛАЖМц 60-6-3-2 используется для изготовления винтов, работающих в морской воде, втулок; ЛМ_цОС 58-2-2-2 – для изготовления шестерен, зубчатых колес; ЛН 65-5 – обладает повышенной прочностью и вязкостью, высокими антикоррозионными и антифрикционными свойствами и используется для изго-

товления манометрических и конденсаторных трубок в морском судостроении.

Микроструктура латуней

Микроструктура латуни в зависимости от содержания Zn (рис. 3) может быть однофазной α (при содержании Zn до 39 %) и двухфазной $\alpha + \beta$ (в интервале концентраций 39 – 46 %).

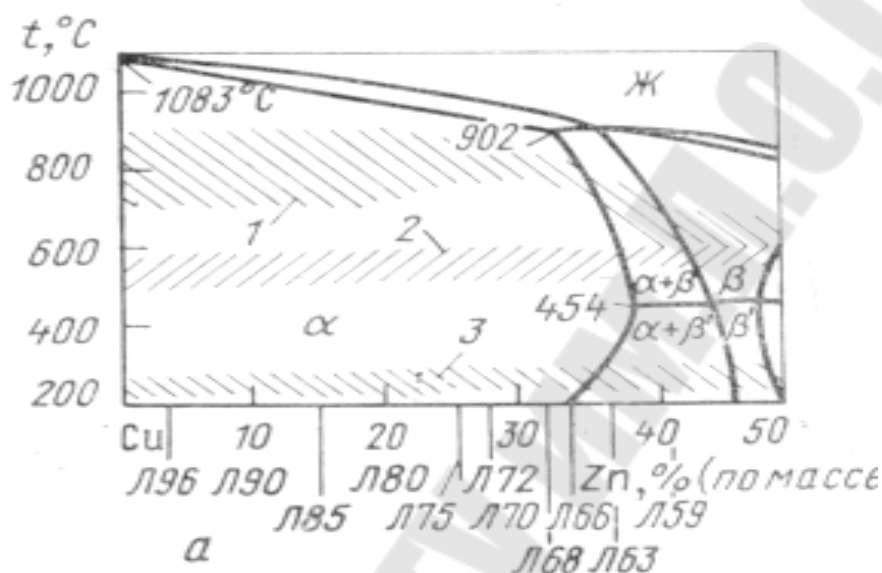
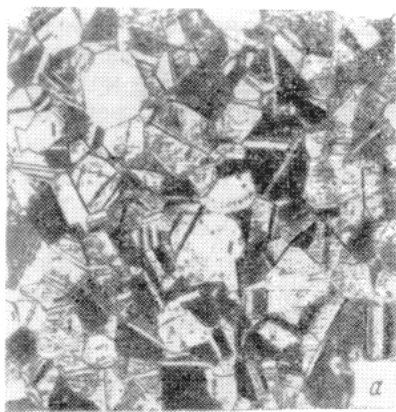


Рис. 3. Диаграммы состояния Cu – Zn (левая часть)

α -фаза – твердый раствор Zn в Cu.

β -фаза представляет твердый раствор на основе электронного соединения с высокой твердостью и, следовательно, значительно увеличивает хрупкость латуни. При температуре $454^\circ - 468^\circ\text{C}$ происходит упорядочение расположения атомов меди и цинка в кубической объемноцентрированной кристаллической решетке. Явление упорядочения сопровождается падением пластичности и повышением хрупкости сплавов. Этот упорядоченный раствор обозначается β' . Введение легирующих элементов в латунь смещает линии фазовых превращений влево по оси концентраций на диаграмме Cu – Zn т. е. присадка всех элементов (кроме Ni) равносильна увеличению содержания цинка. Для оценки влияния элементов используют коэффициенты Гийе, по которым $1\% \text{ Si} = 10\% \text{ Zn}$, $1\% \text{ Al} = 5\%$, $1\% \text{ Sn}$ и $\text{Mg} = 2\% \text{ Zn}$, $1\% \text{ Cd}$, Pb и $\text{Fe} = 1\% \text{ Zn}$, $1\% \text{ Ni} = -1,5\% \text{ Zn}$.

Например, структуру ЛО60-2 можно определить по рис. 3 при содержании Zn = 42 %.



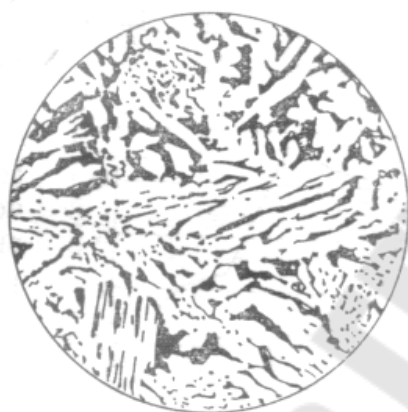
a



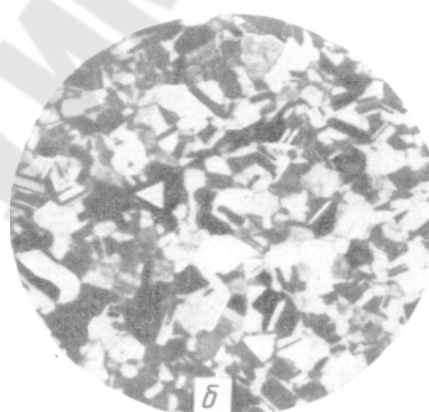
б

Рис. 4. Микроструктуры:

a – однофазной α латуни; *б* – после холодной пластической деформации и отжига при 600 °С (на микроструктуре видны характерные полосы двойников)



a



б

Рис. 5. Микроструктуры двухфазной латуни:

a – литой; *б* – деформированной и отожженной.
Светлая составляющая – α -фаза, темная – β -фаза

Бронзы

Бронзами называются сплавы меди с такими элементами как олово, алюминий, свинец, бериллий и т. д. В зависимости от элементов, присутствующих в сплаве, различают оловянистые и безоловянистые: алюминиевые, свинцовистые, бериллиевые и другие бронзы. Бронзы, так же как и латуни, подразделяются на деформируемые и литейные. Обозначение бронз начинается с букв Бр. Далее в деформируемых бронзах (ГОСТ 18175-78, ГОСТ 5017-74) следуют буквы, указывающие на элементы, образующие бронзу, а потом со-

держание компонентов в %, в той последовательности, в какой они приведены в буквенной части условного обозначения. Остальное до 100 % медь. В бронзах чушковых по ГОСТ 17328-78, ГОСТ 614-73 после букв Бр стоит буква, указывающая элемент, образующий бронзу и цифра – содержание этого элемента в %, а затем следующий элемент и его содержание в % и т. д. Остальное до 100 % составляет медь.

Оловянистые бронзы

Бр010, БрОФ10-1, БрОЦС5-5-5, БрОЦСН-3-7-5-1 и др. обладают высокой коррозионной стойкостью, достаточной прочностью (500 – 800 МПа), обладают стойкостью против истирания, т. е. являются антифрикционным материалом. Бронзы обладают высокими литейными свойствами: высокой жидкотекучестью и малой усадкой. Влияние олова на механические свойства меди аналогично влиянию цинка, но проявляется более резко (рис. 6).

Уже при 5 % Sn пластичность начинает падать, а прочность после 20 %. Сопротивление коррозии улучшается при увеличении содержания олова.

Цинк вводится в количестве 5 – 10 % для удешевления бронз, свинец в количестве 3 – 5 % улучшает обрабатываемость, а фосфор вводится как раскислитель и увеличивает упругие свойства. Из оловянистых бронз изготавливают водяную и морскую арматуру, подшипники, шестерни, венцы, втулки, вкладыши, пружины и пружинящие детали в точной механике, химической и пищевой промышленности.

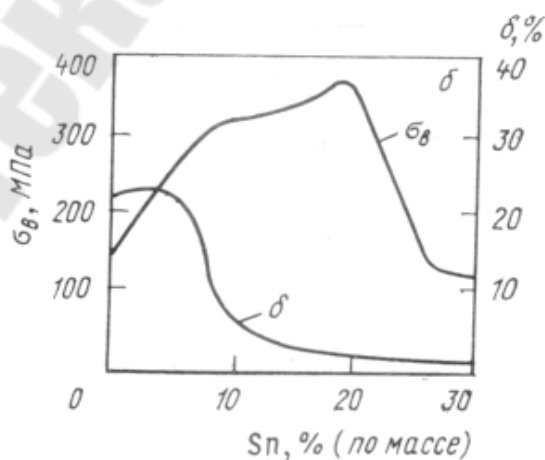


Рис. 6. Влияние олова на механические свойства бронз

Микроструктура бронзы

Характер взаимодействия меди с оловом определяется диаграммой состояния (рис. 7).

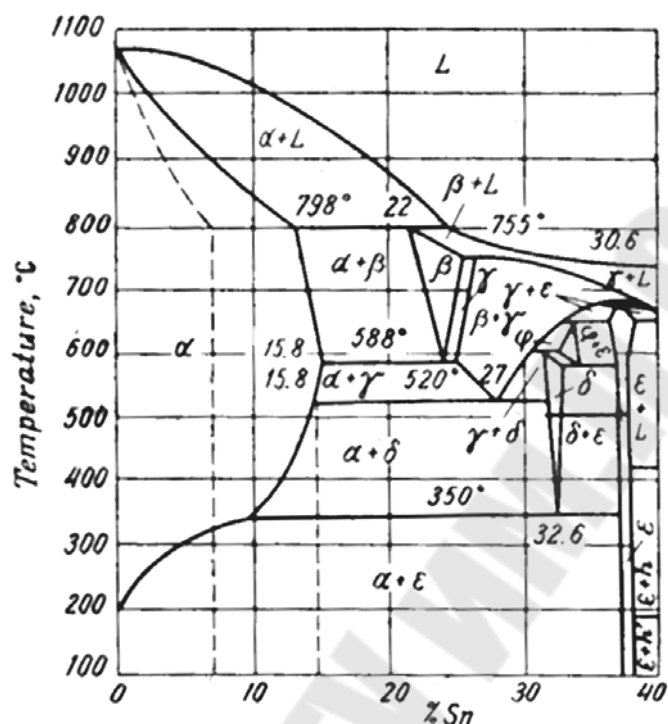


Рис. 7. Диаграмма состояния медь-олово (левая часть):
 α – твердый раствор Sn в Cu; ϵ – Cu_3Sn

Сплошные линии соответствуют равновесному состоянию, которое достигается после значительной деформации и длительного отжига, а штриховые линии отвечают состоянию сплавов ускоренного охлаждения.

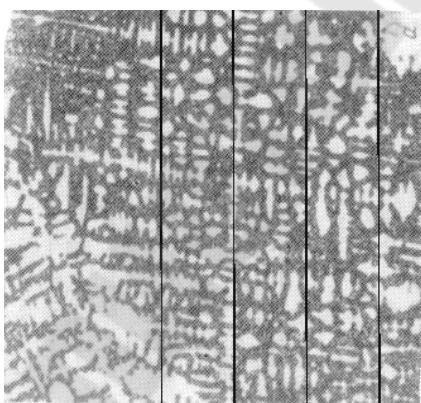


Рис. 8. Микроструктура литой оловянистой бронзы (темные участки эвтектоида ($\alpha + \text{Cu}_3\text{Sn}$) на светлом фоне α -твердого раствора



Рис. 9. Микроструктуры оловянистой бронзы после деформации и отжига

Присутствие твердых включений эвтектоида в пластичной матрице α -твердого раствора обеспечивает хорошие антифрикционные свойства сплавов, но делает невозможной их пластическую деформацию. Количество эвтектоида тем больше, чем выше концентрация олова и легирующих элементов Zn, Ni и P, которые самостоятельных фаз не образуют и присутствуют в α -твердом растворе. Свинец, добавленный в оловянистые бронзы, присутствует в структуре в виде отдельных темных включений более или менее округлой формы.

Алюминиевые бронзы

Применяют в виде двойных (Cu – Al) и многокомпонентных сплавов с добавками Ni, Mn, Fe. Влияние алюминия на механические свойства бронз показано на рис. 10.

Присадки Fe, Mn и никеля повышают прочность, твердость, антифрикционные и технологические свойства алюминиевых бронз; никель влияет на фазовые превращения и делает алюминиевые бронзы, упрочняемыми термической обработкой.

Марганец повышает также и коррозионную стойкость бронз. Свинец повышает антифрикционные свойства литейных алюминиевых бронз и вводится в них при изготовлении деталей, работающих на трение таких как, подшипники и втулки.

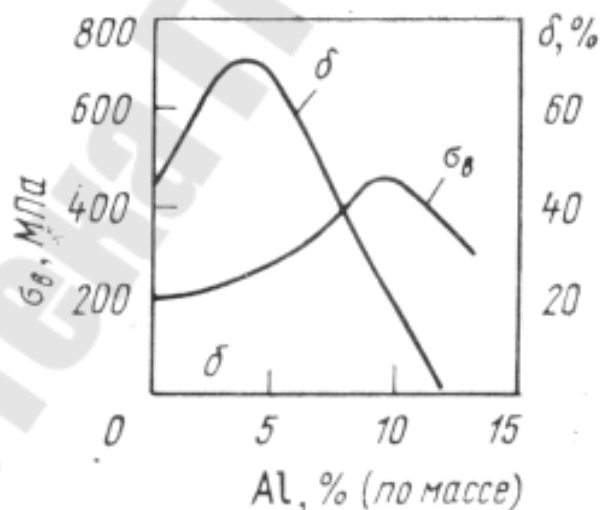


Рис. 10. Влияние Al на механические свойства бронз

Алюминиевые бронзы кристаллизуются в узком интервале температур, поэтому обладают высокой жидкотекучестью и дают концентрированную усадочную раковину. По величине усадки они уступают оловянистым бронзам, но зато превосходят их по химиче-

ской стойкости и механическим свойствам. Из алюминиевых бронз: БрА5, БрАЖ9-4, БрАЖ7-1, БрАЖМц10-3-1,5, БрАМц9-2Л, БрАЖН10-4-4, БрА9Ж4 изготавливают различные втулки, фланцы, шестерни, подшипники, фасонное литье и др.

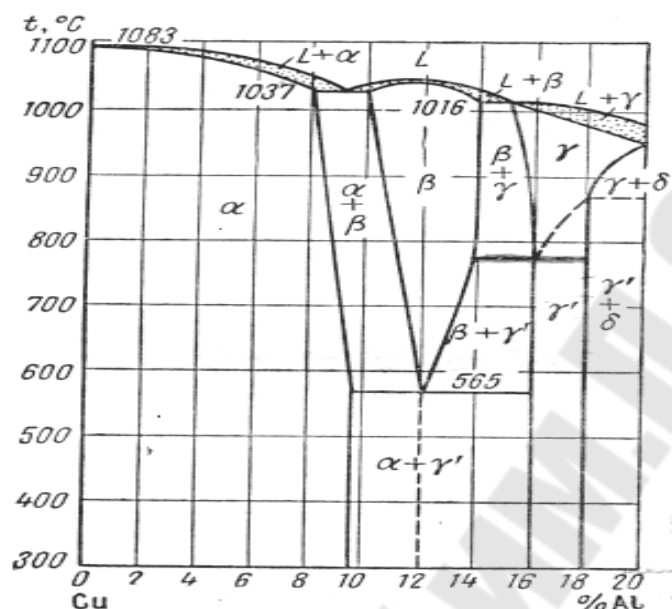


Рис. 11. Диаграммы состояния медь – алюминий (левая часть):
 α - твердый раствор Al в Cu; γ - $\text{Cu}_{32}\text{Al}_{13}$

Микроструктура сплавов, содержащих до 9,4 % алюминия, согласно рис. 11, после медленного охлаждения состоит из однородного α -твердого раствора (рис. 13). При ускоренном охлаждении в сплавах, содержащих более 7 – 8 % алюминия, превращение $\beta \rightarrow \alpha$ не успевает полностью произойти, и оставшаяся β -фаза претерпевает эвтектоидное превращение. Микроструктура сплава в этом случае будет двухфазной, т. е. будет состоять из α -твердого раствора и эвтектоида ($\alpha + \gamma$) (рис. 12). Присутствие эвтектоида в структуре повышает прочность и понижает пластичность бронзы. Легирование сплава железом приводит к измельчению зерна, а следовательно, к повышению прочности и твердости бронзы.

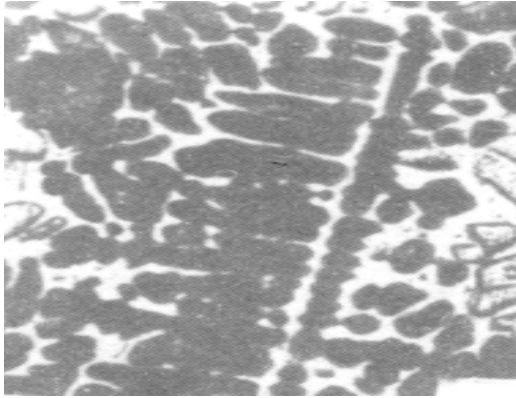


Рис. 12. Микроструктура двухфазной алюминиевой бронзы: α -фаза – светлые зерна; $\alpha + \gamma$ – темные зерна



Рис. 13. Микроструктура литой однофазной алюминиевой бронзы

Кремнистые бронзы

Содержат кремний (1-3 %), а также никель, цинк, свинец и марганец. Они отличаются высокими механическими свойствами ($\sigma_{\text{в}} = 500 - 600$ МПа) при комнатной и повышенных температурах, высокой коррозионной стойкостью и антифрикционными свойствами. Кремнистые бронзы удовлетворительно свариваются, паяются и обрабатываются давлением, способны к упрочнению при термической обработке. Чаще из них изготавливают прутки, полосы, проволоку, а реже фасонные отливки, т. к. они уступают по литейным свойствам другим бронзам и латуням.

БрКМц3-1 – для пружин и пружинящих деталей и приборов радиооборудования; деталей работающих в морской, пресной воде и паре при температурах до 250 °С: сеток, решеток, труб и втулок в судостроении.

БрКН1-3 – прутки для изготовления направляющих втулок и ответственных антифрикционных деталей.

Бериллиевые бронзы

Содержат 1,7 – 2,5 % бериллия и легированны небольшие добавки Ni, Co, Mn, Ti. Бронзы обладают высокой химической стойкостью, износоустойчивостью и упругостью в сочетании с прочностью и твердостью после термической обработки, равной свойствам легированных сталей, а также высоким сопротивлением ползучести и усталости. Для них характерна высокая электропроводность, теплопроводность и способность не давать искры при ударе. Бронза

термически упрочняется, наиболее высокие механические свойства приобретает после закалки с 760 – 780 °С в воде и старении 300 – 350 °С, 2 часа. Бр.Б2, Бр.Б2.5 применяются в виде полос, лент и других полуфабрикатов для изготовления особоответственных деталей авиационных приборов и специального оборудования (мембран, пружин, пружинящих контактов, кулачков полуавтоматов, в электронной технике, в часовой промышленности). Бериллиевая бронза наиболее дорогая и дефицитная из всех медных сплавов.

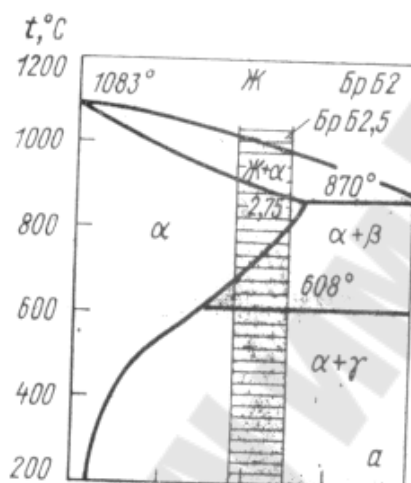


Рис. 14. Диаграммы медь-бериллий (левая часть)

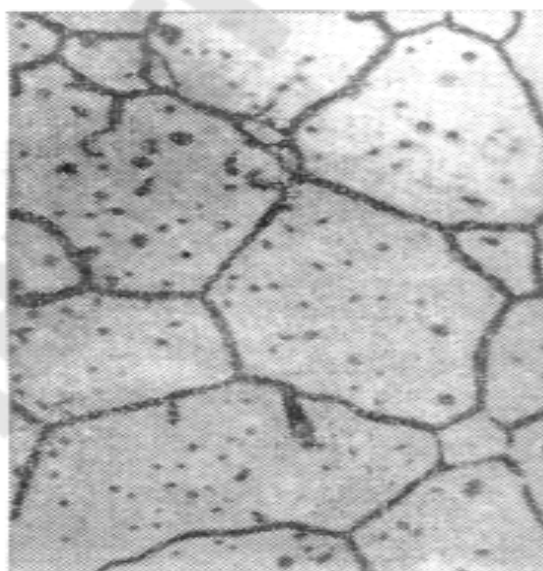


Рис. 15. Микроструктура бериллиевой бронзы после закалки и отпуски:
 α -фаза – светлые зерна; γ -фаза – темные включения

2. Экспериментальная часть

1). Получить у преподавателя коллекцию микрошлифов меди и медных сплавов, изучить и зарисовать микроструктуры.

2). Определить для одного из изучаемых сплавов (по заданию преподавателя) возможность изменения свойств термической обработкой.

3. Содержание отчета

1. В теоретической части отчета охарактеризовать свойства медных сплавов и область их применения.

2. Начертить соответствующие диаграммы состояния и нанести на них фигуративные линии изучаемых сплавов.

3. Зарисовать микроструктуры изучаемых сплавов и определить их структурные составляющие и фазы по диаграммам состояния.

4. Указать марки изучаемых сплавов, их свойства и области применения.

4. Контрольные вопросы

1. Как маркируется медь в зависимости от примесей и где применяется?

2. Маркировка, свойства и область применения латуней.

3. Маркировка, свойства и область применения бронз.

Лабораторная работа № 14

ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ, НАКЛЁП И РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИЯ МЕТАЛЛОВ

Цель работы Изучить влияние пластической деформации на структуру и механические свойства металлов. Изучить влияние нагрева на свойства деформированного металла.

Оборудование и материалы для выполнения работы

1. Нагревательные печи с термопарами и автоматическими приборами для регулирования температуры.
2. Пневматический ковочный молот.
3. Твердомеры Бринеля ТШ-2.
4. Образцы технической чистой меди.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с основными положениями работы.
2. Выполнить экспериментальную часть работы.
3. Проанализировать полученные результаты и на основании теоретического материала сделать необходимые выводы.
4. Выполнить одну из задач (по указанию преподавателя) и пояснить решение.

Теоретическая часть

Пластическая деформация металлов

Важнейшим и наиболее характерным свойством металлов является *пластичность* - способность претерпевать деформацию (изменять форму и размеры) без разрушения. В сочетании с высокой прочностью это свойство делает металлы незаменимыми для современной техники. Деформация, которая исчезает после снятия нагрузки, - это *упругая деформация*. Часть деформации, которая остается после снятия нагрузки, - это *пластическая деформация*. Чем больше остаточная деформация металла до разрушения, тем выше его пластичность.

При упругом деформировании под действием внешней силы изменяется расстояние между атомами, и в кристаллической решётке возникают дополнительные силы притяжения или отталкивания. Снятие нагрузки устраняет причину изменения межатомного расстояния, атомы становятся на прежние места под

действием дополнительных сил, существующих между ними, и упругая деформация исчезает.

Значительно более сложно проходит процесс пластической деформации, которая осуществляется при напряжениях, бóльших предела упругости металла.

В конечном итоге пластическая деформация представляет собой сдвиг одной части кристалла относительно другой. Каков же механизм этого процесса? Естественно предположить одновременное смещение всех атомов одного слоя по отношению к атомам соседнего слоя по плоскости сдвига MM – так скользят бумажные листы в пачке бумаги при сдвиге её верхней части. Усилие, которое надо приложить для осуществления такого сдвига, можно подсчитать и таким образом определить теоретическую прочность. Такой расчёт был сделан Я.И. Френкелем, и получилось, что для железа прочность должна быть равна 1300 кгс/мм^2 , тогда как в действительности предел прочности железа 15 кгс/мм^2 , т. е. в 100 раз меньше.

Объяснение реального механизма сдвиговых процессов даёт теория **дислокаций** – особого рода линейных несовершенств (дефектов) кристаллической решётки. Представления о дислокациях были введены в металлофизику для того, чтобы объяснить несоответствие между наблюдаемой и теоретической прочностью кристаллов и описать механизм скольжения атомных слоёв при пластической деформации кристаллов. Если на первых этапах развития этой теории представления о дислокациях были предположительными, то затем были получены прямые доказательства их существования, а в настоящее время имеются многочисленные данные наблюдения дислокаций.

Наиболее простой и наглядный способ образования дислокаций в кристалле – сдвиг. Атомная плоскость, перпендикулярная к плоскости скольжения, является как бы лишней и её называют **экстраплоскостью** или **краевой дислокацией**.

Возможны и другие виды дислокаций, например, **винтовая** или **смешанная**. Винтовая дислокация получила свое название из-за того, что кристалл при этом можно считать состоящим из одной атомной плоскости, закрученной по винтовой поверхности.

Нетрудно увидеть, что движение дислокаций через кристалл вызывает пластическую (необратимую) деформацию кристалла.

Для перемещения дислокации на одно межатомное расстояние каждый атом экстраплоскости и плоскости в нижней части кристалла смещается на величину значительно меньше межатомного расстояния. При поочерёдном (эстафетном) смещении атомов дислокация может скользить на большие расстояния (через весь кристалл), вызывая его пластическую деформацию.

Для сдвига одной части идеального кристалла относительно другой необходимо одновременно разорвать все межатомные связи между граничными атомами по обе стороны от плоскости скольжения. В реальном металле при перемещении дислокации по плоскости скольжения одновременно разрываются межатомные связи только между двумя соседними цепочками атомов .

Именно этим объясняется более низкое значение сдвигающего напряжения и прочности у реальных металлов.

Интересно, что и в живой природе используется дислокационный принцип движения, например, змеи и гусеницы обычно ползают за счет образования складки («положительной дислокации») около хвоста и продвижения этой складки в сторону головы.

Наклёп и рекристаллизация металлов

Наиболее впечатляющее свойство металлов – способность их к деформационному упрочнению.

Явление упрочнения металла в процессе пластической деформации называется *наклёпом*, или нагартовкой.

Из дислокационной теории следует, что для *повышения* прочности металлов необходимо каким-либо образом *затруднить движение* дислокаций. Существует несколько способов упрочнения или закрепления дислокаций, одним из них является упрочнение кристалла пластической деформацией.

Ранее рассмотренный простейший способ введения дислокаций в кристалл при сдвиге показывает, что рост пластической деформации увеличивает количество дислокаций в кристалле. Чем сильнее воздействие на металл, тем больше в нём образуется дислокаций.

На начальной стадии деформация происходит за счёт скольжения относительно небольшого количества дислокаций. В процессе деформирования количество движущихся в кристалле дислокаций постоянно увеличивается, что затрудняет их скольжение. Возникают скопления дислокаций, которые уже неспособны перемещаться по кристаллу.

Такие закреплённые дислокации затрудняют движение вновь возникающих дислокаций, т. е. упрочнение металла создается самими дислокациями. В этом случае говорят об упрочнении металла пластической деформацией или просто о *наклёпе* металла.

Пластическая деформация оказывает существенное влияние на механические свойства металла и его структуру (рис. 1).

На рис. 1 показано, как под действием приложенной нагрузки зёрна, из которых состоят все технические металлы, начинают деформироваться и вытягиваться; объём зёрен и их количество при этом не изменяется. Внутри каждого зерна, особенно по его границам, сосредотачивается большое количество дислокаций, плотность которых возрастает от $10^6-10^7 \text{ см}^{-2}$ (недеформированный металл) до $10^{10}-10^{12} \text{ см}^{-2}$ (после деформации). Кристаллическая решётка зёрен становится искажённой (несовершенной), это состояние является структурно неустойчивым.

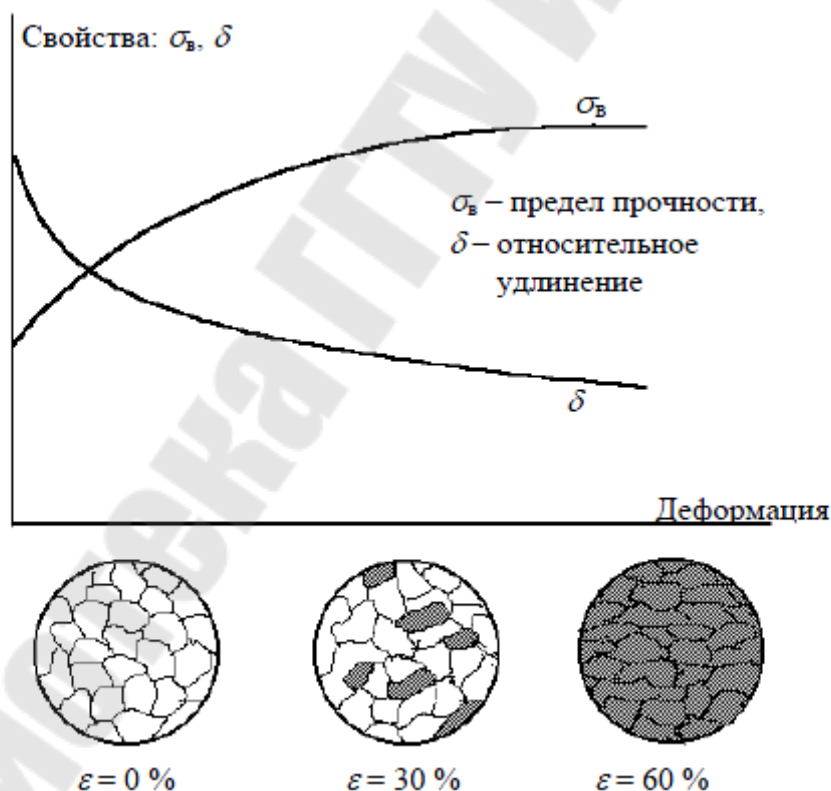


Рис. 1 Изменение структуры и свойств деформированного металла в зависимости от степени деформации

С увеличением степени деформации прочность металла увеличивается, но уменьшается пластичность – он становится хрупким, что может привести к возникновению трещин и разрушению (при увеличении деформации).

Для снятия наклёпа деформированный металл нагревают, в результате сначала происходят процессы **возврата** и **полигонизации**, приводящие к перераспределению и уменьшению концентрации структурных несовершенств (точечных и линейных дефектов) в кристаллической решётке. При дальнейшем повышении температуры начинается основной процесс, возвращающий наклёпанный металл в устойчивое состояние – рекристаллизация.

Рекристаллизация – это полная или частичная замена деформированных зёрен данной фазы новыми зёрнами той же фазы, имеющими меньшее количество **дефектов** в кристаллической решётке (рис.2).

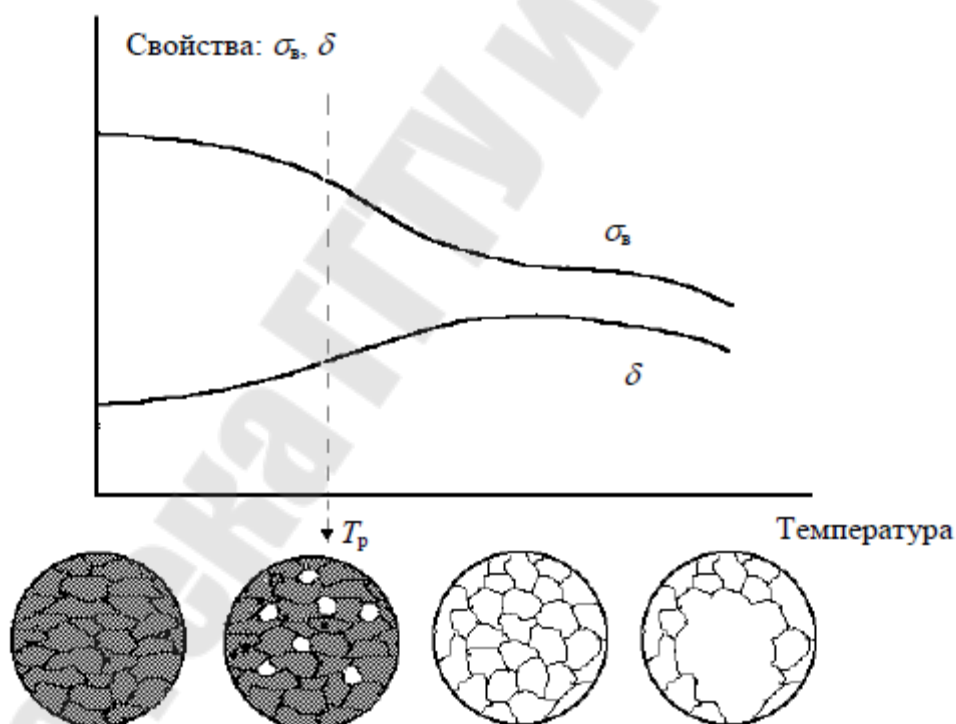


Рис. 2. Изменение структуры и свойств деформированного металла при нагреве

Новые зёрна, зарождающиеся при рекристаллизации, отличаются от деформированных **меньшей плотностью дислокаций**. В качестве центров новых зёрен выступают области дислокаций, скопившиеся на границах старых зёрен при наклёпе. Рекристалли-

зация – диффузионный процесс, протекающий в течение ка-кого-то времени (чем выше температура, тем быстрее).

Наименьшую температуру, при которой начинается процесс рекристаллизации и происходит разупрочнение, называют **температурой рекристаллизации**. Между температурой рекристаллизации (T_p) и температурой плавления ($T_{пл}$) металлов существует простая зависимость, определенная металловедом А.А. Бочваром:

$$T_p = a \times T_{пл}, \text{ К.}$$

Ниже приведена температура рекристаллизации металлов и сплавов:

$$T_p = (0,1,0,2) \times T_{пл} - \text{для чистых металлов,}$$

$$T_p = 0,4 \cdot T_{пл} - \text{для технически чистых металлов,}$$

$$T_p = (0,5,0,6) \times T_{пл} - \text{для сплавов (твёрдых растворов).}$$

Температуру начала рекристаллизации определяют металлографическим и рентгеноструктурным методами, а также по изменению свойств. Если T_p определяют по изменению твёрдости, то за T_p принимают температуру, при которой прирост твёрдости, созданный деформацией, уменьшается вдвое (рис. 3).

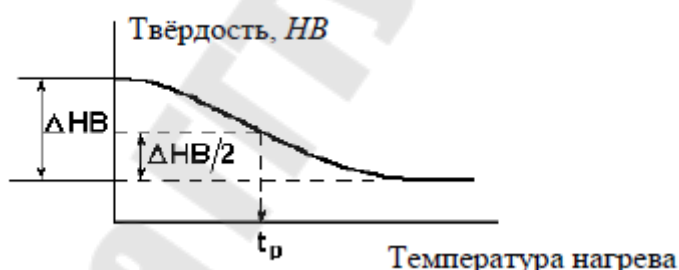


Рис. 3. Определение температуры рекристаллизации по изменению твёрдости при нагреве

Определение температуры рекристаллизации необходимо для назначения режимов **рекристаллизационного отжига** – термической обработки для снятия наклёпа. Температура такого отжига должна быть выше температуры рекристаллизации для данного сплава.

Величина зёрен после рекристаллизации (рекристаллизационного отжига) напрямую зависит от степени деформации металла при наклёпе.

Существует небольшая степень деформации (до 10 %), называемая **критической**, после которой размер новых зёрен, образующихся при рекристаллизации, в несколько десятков раз пре-

вышает исходное, недеформированное зерно. Это явление очень часто встречается в деталях машин, которые подвергались обработке давлением с разной степенью деформации: от нуля до больших степеней, и его следует учитывать, так как на участках с крупнозернистой структурой сильно снижается ударная вязкость. Хотя в некоторых других случаях (например, для повышения жаропрочности, получения требуемых электромагнитных свойств) увеличение размера зерна является положительным. Формирование аномально крупных рекристаллизованных зёрен в области критической деформации обусловлено наличием малого числа центров рекристаллизации (центров новых зёрен). Новые зёрна зарождаются в первую очередь там, где при наклёпе возникла наибольшая плотность дислокаций. Так как движущиеся дислокации задерживаются и скапливаются на границах зёрен, то именно здесь начнут образовываться и расти новые зёрна в процессе рекристаллизации.

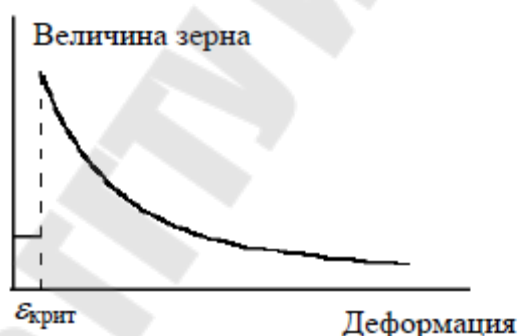


Рис. 4. Влияние степени деформации на величину рекристаллизованного зерна

С увеличением степени деформации размер новых, образовавшихся зёрен уменьшается. Это связано с увеличением плотности дислокаций в деформированном металле и, соответственно, с увеличением числа центров рекристаллизации (центров новых зёрен).

В зависимости от температуры, при которой выполняется обработка давлением, пластическую деформацию разделяют на холодную и горячую.

Холодная деформация – деформация металла, которая осуществляется при температуре ниже температуры рекристаллизации. При холодной деформации увеличивается плотность дис-

локаций, зёрна вытягиваются в направлении деформации, увеличивается прочность металла и снижается пластичность.

Горячая деформация – деформация металла, которая осуществляется при температуре выше температуры рекристаллизации. При горячей деформации металла (прокатке, ковке, штамповке, прессовании) упрочнение (наклёп), создаваемое в процессе деформации, снимается в результате рекристаллизации в ходе самой деформации.

Задания для выполнения работы

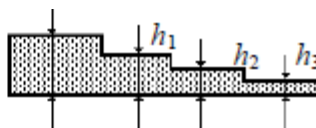
1. Для образцов меди, деформированных на 30–40 %, определить температуру рекристаллизации меди по изменению твёрдости после нагрева на различную температуру (по графической зависимости «твёрдость – температура»). За центр температурного интервала принять температуру рекристаллизации меди, определенную по формуле А.А. Бочвара. Температурный шаг от центра интервала в сторону уменьшения и увеличения температуры принять 50 °С.

Сравнить температуру рекристаллизации меди, определённую по формуле А.А. Бочвара, и найденную экспериментально; если они отличаются, объяснить причину. Температура плавления меди 1083 °С.

2. Провести холодную деформацию образцов технической чистой меди на различную степень деформации и определить изменение твёрдости деформированных образцов в зависимости от степени деформации.

Степень деформации рассчитывается по формуле:

$$\varepsilon = (h_0 - h_K) \cdot 100 / h_0, \%$$



где h_0 – толщина образца до деформации, h_K – толщина образца после деформации.

Результаты измерений внести в табл. 1 и построить графическую зависимость твёрдости от степени деформации.

Таблица 1

Результаты эксперимента: твёрдость деформированной меди

№ п/п	Исходная толщина h_0 , мм	Конечная толщина h_K , мм	Степень де- формации e , %	Твёрдость, HV	Примеча- ние

3. Провести горячую деформацию образцов технической чистой меди с различной степенью деформации и определить изменение твёрдости горячедеформированных образцов в зависимости от степени деформации. Результаты измерений внести в табл. 1 и построить графическую зависимость твёрдости от степени горячей деформации.

Холоднодеформированные образцы меди подвергнуть рекристаллизации-онному отжигу в течение 10 минут и определить изменение твёрдости отожжённых образцов в зависимости от степени деформации. Результаты измерений внести в табл. 1 и построить графическую зависимость.

Содержание отчёта

1. Наименование и цель работы.
2. Оборудование и материалы, используемые в работе.
3. Основные положения по деформации, наклёпу и рекристаллизации металлов (кратко).
4. Описание экспериментальной части работы и полученные результаты с необходимым графическим материалом, анализом, выводами.
5. Обоснованное решение указанной преподавателем задачи.

Лабораторная работа № 15 ИДЕНТИФИКАЦИЯ ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Теоретическая часть:

Необходимость идентификации полимеров возникла практически одновременно с появлением промышленной полимерной химии. В связи с широким применением пластмасс в различных областях систематически приходится идентифицировать полимерные продукты в зависимости от их целевого назначения. Для идентификации полимеров и полимерной основы композиций используются различные методы: простые, основанные на физико-химических и физико-механических свойствах полимеров, химические, инструментальные. Наибольшее распространение из инструментальных методов получили ИК-спектроскопия, пиролитическая газовая хроматография, ЯМР-спектроскопия, термический анализ.

Все чаще при выборе метода для идентификации полимеров наряду с качеством аналитической информации приходится учитывать стоимость аппаратуры и ее эксплуатации, уровень и стоимость подготовки специалистов и их труда при работе на сложных приборах и оборудовании. Одним из первых и необходимых этапов является предварительная идентификация с использованием простых методов. Установление с их помощью класса полимерной основы образца в значительной степени облегчает задачу последующего выбора инструментального метода. После предварительной идентификации рассматривается уже более узкий круг возможных полимеров, конкретизируется работа с атласами и справочниками.

Для установления природы полимерного материала в готовом изделии проводят систематический качественный и количественный анализ материала и идентификацию его с известными типами полимеров.

Образец полимерного материала обычно исследуют по определенной схеме:

- внешний осмотр образца;
- определение температуры размягчения;
- анализ поведения образца в пламени;
- определение растворимости образца;
- осуществление цветной реакции на полимеры.

Прежде всего отмечают внешний вид образца, его физическое состояние, цвет, запах, прозрачность, твердость, эластичность, плотность.

Далее выясняют, плавится ли исследуемая пластмасса вообще. Для этого ее вносят в струю горячего воздуха или нагревают образец на металлической или асбестовой подставке.

Пластмассу, в зависимости от того, как она будет вести себя, можно отнести к термопластам или реактопластам. Для дальнейшей идентификации материала исследуют его поведение в пламени горелки. Для этого небольшое количество материала осторожно и ненадолго вносят на шпателе в верхнюю часть высокотемпературной зоны пламени газовой горелки. При этом отмечают характерные особенности горения: воспламеняемость, обугливание, плавление, запах, цвет пламени, наличие копоти, дыма, самогашения, наличие золы, ее окраску и т. п.

По растворимости материала в определенных растворителях судят о принадлежности его к тому или иному классу полимеров (см. справочные данные).

Многие смолы при добавлении уксусного ангидрида и серной кислоты образуют различного цвета окрашенные соединения. На этом основана реакция Либермана – Шторха – Моравского (приложение).

Цель работы: Цель работы: по внешнему виду, органолептической и

визуальной оценке, физическим свойствам, поведению в пламени и нагреванию, химическим цветным реакциям, растворимости в воде и органических растворителях, пользуясь таблицами и справочными данными определить природу и основные характерные особенности полимерных материалов.

Экспериментальная часть:

Объекты и оборудование: тиски, лабораторный зажим, металлическая спица, полимерные материалы различной природы в виде дисперсии, гранул, порошка, пластинок, кусочков жгутов, пленки; растворитель – бензин, ацетон, вода, этиловый спирт, уксусная кислота, соляная кислота, серная кислота.

1. Идентификация полимера по внешнему виду и физическим свойствам.

По физическому состоянию и внешнему виду образца (твердый, полужесткий, эластичный, воскообразный, дисперсный, прозрачный, мутный, непрозрачный и т. п.) можно сделать некоторые предположения о природе полимера. Полимеры эластичных образцов, как правило, являются полимеры эластомеры. Наиболее типичные представители эластомеров - полибутадиеновые, полиизопрено-

вые, полисилоксановые, полиуретановые каучуки резины на их основе.

Цвет образца не является достоверной характеристикой принадлежности образца полимера к тому или иному классу, поскольку красители, пигменты и добавки могут изменить природную окраску полимера. Однако для фенопластов коричневый и черный цвета являются естественными, что отличает их от других полимерных композиций с красителями, техническим углеродом и графитом.

Характерные свойства реактопластов – высокая твердость, жесткость, хрупкость, не плавкость, незначительная растворимость в органических растворителях. Их излом имеет характерную зернистую структуру. Типичные реактопласты - фенопласты, эпоксидные смолы.

Полимеры в виде прозрачных твердых, полужестких образцов и пленок, как правило, являются термопластами. Воскообразные образцы обычно относятся к полиолефинам.

В дисперсиях дисперсной фазой могут быть полиолефины, поливинилацетатные пластики, фторполимеры, а дисперсионной средой органические растворители, вода или их смеси.

Газонаполненные полимеры, которые имеют промышленное значение, могут быть представлены эластичными и жесткими пенополиуретанами на основе простых и сложных полиэфиров, пенополиолефинами, вспененными полистиролами, пенополивинилхлоридом, вспененными мочевиноформальдегидными смолами, пенополиэпоксидами, пенофенопластами.

Производят внешний осмотр образцов полимеров, пользуясь рекомендациями, изложенными выше. Результаты внешнего наблюдения сравнивают с данными таблицы 1. и вносят в таблицу 4.

Отличительные признаки полимеров

Вид полимера	Прозрачность	Состояние поверхности	Агрегатное физическое состояние
Полипропилен (ПП)	непрозрачный	гладкий, блестящий	твердый, эластичный
Полиэтилен высокого давления (ПЭВД)	Непрозрачный (НП), полупрозрачный (ПП) и прозрачный (П) в тонких пленках	средней гладкости, парафиноподобный на ощупь	эластичный
Полиэтилен низкого давления (ПЭНД)			средней твердости
Поливинилхлорид (ПВХ) - винипласт	НП, ПП, П	гладкая	жесткий, иногда стекловидный
- пластикат	НП, П	гладкая, матовая с фактурным рисунком	мягкий эластичный
Полистирол (ПС) Ударопрочный полистирол (УПС),	НП, ПП, П, стекловидный	очень гладкая, блестящая. с зеркальным блеском, менее блестящая у УПС	стеклообразный, твердый, однородный
АБС			
Полиамид (ПА)	преимущественно ПП, НП	чуть шероховатая, после полировки гладкая	твердость невысокая, полужесткий
Поликарбонат (ПК)	высокая прозрачность. стеклоподобный	гладкая, блестящая	высокая твердость
Полиметилметакрилат (ПММК)	прозрачный, стеклоподобный, приглушенно окрашенный, чаще белый	очень гладкая, блестящая	стекловидный, однородный, жесткий

Образцы термопластов в отличие от реактопластов можно проткнуть насквозь нагретой металлической спицей. После этих испытаний твердый образец, отнесенный к термопластам, можно подвергнуть испытанию на изгиб, характер которого свойственен определенным видам полимеров. Для этого один конец образца размером 10*100*2 мм (при сравнительных испытаниях желательно иметь образцы одинаковых размеров) зажимают в тиски или лабораторный зажим и изгибают под прямым углом. Образцы из полиэтилена, АБС-пластика (акрилонитрилбутадиенстирольного пластика) изгибаются и сохраняют изгиб; образцы из полистирола изгибаются с растрескиванием в месте изгиба и сохраняют изгиб; образцы из полиметилметакрилата и сополимера стирола с метилметакрилатом растрескиваются при изгибе; образцы из жесткого поливинилхлорида, сополимеров этилена с пропиленом, композиции из смеси АБС-пластика и поливинилхлорида легко изгибаются и выпрямляются; образцы из политетрафторэтилена и полиамида изгибаются и пружинят при сгибании; образцы из полипропилена, пентапласта практически не изгибаются. Данные испытаний на изгиб вносятся в таблицу 4.

Твердые полимерные образцы (без наполнителя) можно различить по разнице в плотности (табл. 2).

Таблица 2

Плотность полимеров

Полимер	Плотность, г/м ³	Идентификация по плотности	
		вода	Тиосульфат натрия
Полипропилен (ПП)	0,9	Образец плавает	-
Полиэтилен высокого давления (ПЭВД)	0,92	- // -	-
Полиэтилен низкого давления (ПЭНД)	0,95	- // -	-
Полистирол (ПС)	1,07	Образец тонет	Образец плавает
Ударопрочный полистирол (УПС)	1,07	- // -	- // -
АБС	1,05	- // -	- // -
Полиамид (ПА)	1,13	- // -	- // -
Поликарбонат (ПК)	1,20	- // -	Образец тонет
Полиметилметакрилат (ПММК)	1,20	- // -	- // -
Поливинилхлорид (ПВХ)	1,49	- // -	- // -

Проводят следующие дополнительные испытания.

В один из подготовленных двух стаканов вместимостью 100 мл наливают 70 мл дистиллированной воды, в другой – раствор тиосульфата натрия (70 г тиосульфата натрия в 60 мл воды). Образец размером не более 2*10*10 мм помещают вначале в стакан с водой. В зависимости от плотности образец либо погрузится на дно стакана, либо будет плавать на поверхности воды. Образцы, погрузившиеся на дно, извлекают из стакана с водой и помещают в стакан с раствором тиосульфата натрия. На этот раз на дно опускаются образцы, плотность которых больше 1,1, остальные плавают на поверхности раствора (таблица 2).

Оценить плотность полимера более точно можно путем измерения его массы и объема. Образец полимера взвешивают на аналитических весах. Так как образцы неправильной формы, различных геометрических размеров, то проще всего измерить объем по объему вытесненной воды. Конечно, это относится только к полимерам, чья плотность больше 1,0 г/м³.

Рассчитывают плотность по формуле:

$$m/V, \text{ г/м}^3,$$

где ρ - плотность вещества в г/см³ или кг/м³;

m – масса вещества в г или кг;

V – объем вещества см³ или м³.

Результаты записывают в таблицу 3 и сравнивают со справочными данными делают выводы, ориентировочно идентифицируют образцы полимера.

Таблица 3

Результаты измерения плотности полимера

Номер образца полимера	Плотность (справочные данные)	Плотность (измеренная)

Для пленочных материалов проводится проба на раздир. Кусочек пленки размером 15*50 мм слегка надрезают с любой стороны ножницами и тянут в противоположные стороны за концы надреза, пытаясь разорвать пленку. Это же испытание проводят при надрезе пленки с другой стороны, перпендикулярно первому. Легко и прямо разрываются пленки, изготовленные из ацетата целлюлозы, целлофана. Также без особых усилий рвутся пленки из полистирола с об-

разованием неровных краев. Пленки из полиэтилена и полипропилена при разрывании становятся вязкими, растягиваются перед разрывом (сильнее – полипропиленовые пленки), образуют при обрыве волнистые края; пленки из поливинилхлорида растягиваются и разрываются с образованием рваных краев; пленки из поливинилового спирта растягиваются, затем под влиянием усилия разрыв сдвигается в сторону; пленки из политетрафторэтилена и других фторполимеров разрываются с треском. Для высокопрочных ориентированных пленочных материалов это испытание не подходит. Полученные данные вносят в таблицу 4.

2. Горение и нагревание

Если природу образца пластмассы трудно однозначно идентифицировать по внешним признакам, то проводят экспертизу на отношение пластмассы к горению и нагреванию. Представление о химической природе полимерного материала можно получить при рассмотрении характера его горения, цвета и вида пламени, а также по запаху продуктов пиролиза и их качественным реакциям. Это проводят одновременно, в начале нагревая образец, а затем сжигая. Образец полимера подносят к пламени горелки и устанавливают изменения: размягчается образец или нет, вытягивается в нить, оплавляется, светлеет или чернеет. Это дает возможность определить тип пластмассы – термо- или реактопласт. Затем образец вносят в пламя и наблюдают за процессами разложения и характером пламени. Ароматические соединения дают коптящее пламя, кислородосодержащие – голубоватое, галогеносодержащие – коптящее пламя с зеленой каймой. Горение нитросоединений сопровождается хлопками и взрывами. Результаты опытов сравнивают с данными о поведении пластмасс приведенным в таблицах к данной работе.

3. Воздействие пламени и высокой температуры

Поведение полимерного образца в пламени изучают следующим образом. На конце предварительно очищенной медной проволоки диаметром 0,5 мм делают небольшую петлю; на другой конек проволоки надевают корковую или резиновую пробку, за которую держат проволоку в процессе испытания. Проволочную петлю прокалывают в пламени спиртовки. На охлажденную петлю помещают небольшой (1 - 2мм) образец полимера и вносят в среднюю часть бесцветного пламени. Если образец воспламеняется и горит, выводят проволочную петлю из пламени на 5 - 6 см и продолжают наблюдение. Отмечают характер горения (горит, не горит, самозатухает), цвет пламени, его форму, наличие дыма, копоти, зольного остатка. Свои наблюдения

сопоставляют с данными табл.5, 6 и делают соответствующие выводы. Следует учесть, что присутствие галогенсолеержащих антипиренов (добавки в полимеры, снижающие горючесть) в самозатухающих полимерных материалах может привести к ошибочным выводам, поскольку они дают такую же окраску пламени при сгорании полимерной композиции, как и галогенсодержащие полимеры. При термическом разложении полимерных образцов образуются разнообразные низкомолекулярные продукты. Органолептическая характеристика по запаху продуктов термического разложения является довольно субъективной оценкой и требует практического опыта и сравнения с известными образцами. Для проведения этого испытания небольшой образец полимера (0,02 г) помещают на дно пробирки из термостойкого стекла со шлифом и нагревают в средней части пламени спиртовки в течение 5 мин. Во время этой процедуры полимер начинает разлагаться, и образующиеся летучие продукты заполняют объем пробирки. Перед определением запаха продуктов разложения отверстие пробирки закрывают стеклянной пробкой и переворачивают пробирку вверх дном. Это облегчает определение запаха в случае образования небольшого количества паров. Через 1 - 2 мин пробку открывают и осторожно вдыхают запах продуктов разложения. Свои впечатления сопоставляют с данными таблицы. Одновременно наблюдают за поведением образца при нагревании (размягчается, растекается, пузырится и т.п.), а также за видом продуктов, конденсировавшихся на стенках пробирки. Полученные результаты вносят в таблицу 4, сравнивают с данными таблицы 3 и делают предположительный вывод о полимере образца.

Таблица 3

Идентификация полимеров по воздействию пламени и высокой температуры

Полимер	Поведение в пламени (термопласт или реакт-пласт)	Характеристика пламени	Поведение при пиролизе	Характер горения	Запах продуктов термического разложения
Полипропилен (ПП)	Горит и после удаления из пламени (термопласт)	Голубое с желтой верхушкой, светящееся	Небольшое количество копоти, рас-	Плавится, на стенках пробирки	Горящего парафина более ароматический

			плав капает	конденсируется жидкость, застывающая при охлаждении	
Полиэтилен высокого давления (ПЭВД) Полиэтилен низкого давления (ПЭНД)	Горит и после удаления из пламени (термопласт)	Голубое с желтой верхушкой, светящееся	Небольшое количество копоти, расплав капает	Плавится, на стенках пробирки конденсируется жидкость, застывающая при охлаждении	Горящего парафина
Полистирол (ПС) Ударопрочный полистирол (УПС)	Жженого рога или горелых растений	Оранжево-желтое, светящееся	Много копоти, при поджигании вспыхивает, горит легко	Плавится, на стенках пробирки конденсируется жидкость	Цветочный (стирола)
АБС (акрилонитрил бутадиен стирол)	Жженого рога или горелых растений	Оранжево-желтое		Плавится, разлагается	Горящей резины и цветочный (стирола)

Полиамид (ПА)	Жженого рога или горелых растений	Синеватое снизу, с желтыми краями			Жженого рога или горелых растений
Поликарбонат (ПК)	Горит и после удаления из пламени (термопласт)	Желтое, светящееся, неспокойное		Плавится, пузырится, разлагается	Фенол
Полиметилметакрилат (ПММК)	Горит и после удаления из пламени (термопласт)	Синее	Небольшое количество копоти, горит с потрескиванием	Плавится, пузырится при разложении	Сильный цветочно-плодовый
Поливинилхлорид (ПВХ)	Горит, но при удалении из пламени горелки гаснет (термопласт)	Зеленое с голубой верхушкой	Немного белого дыма	Размягчается, разлагается с выделением белого дыма	Очень резкий (хлороводород)

Кроме пиролитических исследований полимеры можно идентифицировать по цветным реакциям

3. Цветная реакция на полимеры.

Многие смолы при добавлении уксусного ангидрида и серной кислоты образуют различно окрашенные соединения. На этом основана реакция Либермана-Шторха-Моравского. На фарфоровую пластинку помещают небольшой кусочек исследуемого полимера и наносят на него несколько капель уксусного ангидрида, а затем каплю концентрированной серной кислоты. В течение 30 мин наблюдают за

окраской жидкости и поверхности смолы, отмечая цвета и последовательность их изменения. Окраски различных полимеров приведены в таблице. Однако, как выше отмечается, не для всех термопластичных полимеров используются цветные реакции ввиду их химической стойкости. Полученные результаты позволяют уточнить данные по идентификации.

Таблица 4

Результаты идентификации полимера по внешнему виду и физическим свойствам.

№ образца полимера	1	2	3	4	5	6	7	8
Цвет								
Физическое состояние								
Прозрачность								
Проба на раздир								
Класс пластмассы								
Проба на изгиб								
Плотность								
Данные испытаний на раздир								
Данные испытаний на изгиб								
Данные по горению и нагреванию								
Данные цветных реакций								

На основании полученных результатов делают окончательный вывод о материалах исследуемых полимерных образцов.

Контрольные вопросы

1. Чем отличаются термопласты от реактопластов?
2. Основные представители термопластов и реактопластов.
3. Основные методы идентификации полимеров.
4. Как по цвету пламени определить полимер?
5. Основные отличия термопластов и реактопластов при испытаниях на изгиб.
6. Почему не все полимеры дают цветные реакции по методу Либермана-Шторха-Моравского?
7. Что такое самозатухающий полимер?

Лабораторная работа № 16

ИССЛЕДОВАНИЕ НАБУХАНИЯ, РАСТВОРИМОСТИ И ХИМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ ПОЛИМЕРОВ

Теоретическая часть:

После предварительных заключений о принадлежности полимера к тому или иному классу проводят определение способности полимера набухать и растворяться в органических растворителях, что дополняет сведения о его свойствах. Использование данных по растворимости или набуханию пластмасс позволяет получить достоверные результаты при экспертизе, если внешний осмотр или характер горения пластмассы приводит к спорным выводам.

Химическая стойкость – способность пластических масс противостоять химическим воздействиям, т.е. не растворяться, не набухать, не вступать в химическую реакцию при воздействии различных веществ. При этом не должны изменяться внешний вид, цвет, блеск, не должна изменяться форма изделия, происходить размягчения или коробление.

По химической стойкости пластмассы подразделяют на: химически стойкие (полиэтилентерефталат, полиакрилонитрил, полиэтилен, фторопласт, аминопласты, фенопласты); малостойкие (полистирол акриловые полимеры); нестойкие (не вулканизированные каучуки на основе изопрена, бутилкаучук, поливинилацетали).

Химическая стойкость пластических масс зависит от молекулярной массы полимерной основы, степени наполнения, от степени кристалличности и физического состояния полимера, химической природы растворителя и полимера и температуры растворения. Рассмотрим процесс набухания и растворения более подробно. Полимеры подобно низкомолекулярным веществам обладают избирательной растворимостью, т.е. в одних жидкостях растворяются, а в других - нет. Так НК – каучук растворяется в бензоле, бензине, но не растворяется в воде. Желатин растворяется в воде, но не растворяется в этиловом спирте. Из этого примера можно заключить, что между полимером и растворителем должно наблюдаться определенное сродство, в этом случае будет происходить набухание, и если такое сродство отсутствует, то набухания, а, следовательно, и растворения полимера не будет. В первом случае мы получим истинный раствор, во втором – коллоидный. Процесс растворения полимеров своеобразен и отличается от растворения низкомолекулярных веществ. Растворению поли-

мера предшествует – набухание. Оно характерно для всех ВМС и никогда не наблюдается у низкомолекулярных веществ. То есть существует правило, согласно которому подобное растворяется в подобном. Другими словами, между полимером и растворителем должна быть определенное химическое строение, т.е. сродство между химическим строением полимера и химическим строением растворителя. Но этого еще недостаточно, чтобы с уверенностью сказать, что данный полимер растворяется в данном растворителе. Следует учитывать также плотность упаковки полимера, его надмолекулярную структуру, степень кристалличности и полярность полимера и растворителя. Например, кристаллический полиэтилен не растворяется практически ни в одном из известных растворителей при комнатной температуре, даже в близких по полярности растворителях (алифатические углеводороды). С увеличением молекулярной массы полимера в полимергомологическом ряду способность к растворению всегда уменьшается. Наполненные полимеры растворяются хуже, чем не наполненные. В справочных данных приведены числовые значения по растворимости основных видов полимерных материалов в органических и неорганических растворителях. Известно, что линейные полимеры перед растворением сильно набухают, т.е. поглощают большое количество растворителя и резко увеличиваются при этом в объеме. Поэтому набухание линейных полимеров есть не что иное как результат влияния различных скоростей диффузии малых и больших молекул. Малые молекулы растворителя быстро диффундируют в массу полимера, в то время как большие молекулы полимера очень медленно проникают в объем, занятый чистым растворителем, и будучи длинными и гибкими способны длительно сохранять связность и удерживать форму тела, подобную исходной форме, даже при большом количестве растворителя, продиффундившего внутрь полимерного тела. Лишь через продолжительное время, когда пространственное разделение цепных макромолекул становится значительным, теряется их связность и исчезают остатки твердости исходного полимерного тела – происходит переход от набухания к полному смешению с растворителем, т.е. растворение. Набухание полимера приводит к резкому возрастанию объема образца и его массы. Различают ограниченное и неограниченное набухание. Ограниченным набуханием называется процесс взаимодействия полимеров с низкомолекулярными жидкостями, ограниченный только стадией их поглощения полимером; самопроизвольного растворения полимеров не происходит, т.е. цепи полимера полностью друг от друга не отделяется. Вследствие этого в

конце процесса набухания образуют две фазы. Одна фаза представляет собой раствор низкомолекулярной жидкости в полимере, другая является ясно видимой поверхностью раздела и находится в равновесии. Ограниченное набухание линейных аморфных полимеров можно объяснить тем, что энергия взаимодействия цепей между собой больше энергии их взаимодействия с молекулами растворителя, вследствие чего цепи полностью не отделяются. Ограниченное растворение можно объяснить и тем, что плохой растворитель не в силах разрушить межмолекулярные связи или способен разрушить их частично, что находит свое выражение в ограниченном набухании. Количественной характеристикой набухания является степень набухания и скорость набухания. Степень набухания может быть определена весовым или объемным методом. Весовой метод заключается во взвешивании образца до и после набухания и вычисляется по формуле (1) или (2)

$$\alpha = (m - m_0) / m_0 \quad (1)$$

или в %

$$\alpha = (m - m_0) / m_0 * 100 \quad (2),$$

где α - степень набухания;

m и m_0 – масса образца после набухания и до набухания соответственно.

Растворимость полимеров зависит от следующих факторов:

- природы полимера и растворителя;
- гибкости цепи полимера;
- молекулярной массы полимера;
- химического состава полимера;
- кристаллической структуры полимера;
- наличия поперечных химических связей;
- температуры растворения.

Растворение полимеров определяется строением полимера и низко молекулярной жидкости, прежде всего полярностью. При близких значениях полярности полимера и растворителя может происходить набухание и растворение. Если полярность полимера и низкомолекулярной жидкости существенно различны, то растворения не происходит. Протекание процесса растворения зависит от гибкости цепи, определяемой структурой полимера. Упрощая несколько механизм растворения, можно предположить, что для жестко цепных полимеров требуется одновременный отрыв большого числа звеньев, чтобы переместить макромолекулу в растворитель. Поэтому их растворение возможно в сильно взаимодействующих с ними растворите-

лях или при повышенной температуре. Гибкоцепная макромолекула легко диффундирует в растворитель. У всех полимеров растворимость падает с увеличением молекулярной массы. Разветвленность полимерных молекул не одинаково сказывается на их растворимости. Небольшие количества коротких разветвлений, как правило, улучшают растворимость, тогда как длинные разветвления - снижают. Значительное влияние на растворимость оказывает надмолекулярная структура полимеров. Аморфные полимеры быстрее и лучше растворяются, чем аморфно-кристаллические, т.к. кристаллические участки полимеров характеризуются плотной упаковкой макромолекул за счет большего числа межмолекулярных связей, разрушить которые при комнатной температуре затруднительно. Растворяются такие полимеры при повышенных температурах в жидкостях, энергия взаимодействия которых с полимером достаточно высока. Растворение полимеров определяется их химическим составом, наличием функциональных групп, частичное замещение которых приводит к изменению межмолекулярного взаимодействия как в полимере, так и в системе полимер - растворитель, изменяя, таким образом, способность полимера растворяться. На растворимость полимера влияет не только количество функциональных групп, но и равномерность их распределения: чем она выше, тем лучше растворяется полимер. Наличие в полимере даже небольшого количества поперечных связей (1-2 связи на полимерную цепь) всегда приводит к снижению растворимости, а при их достаточном числе – и к полной ее потере.

Относительно влияния температуры на процессы растворения следует отметить, что для большинства полимеров повышение температуры способствует растворению.

Очень важно при идентификации полимера, а также при оценке эксплуатационных его свойств количественное определение величины водопоглощения. Сравнение величин водопоглощения служит также для проведения идентификации упаковочных пленок: целлофана лавсана и полиэтилена.

При эксплуатации изделий из полимеров важно предельное определение стойкости в горячей воде, маслах, жирах и агрессивных средах, что позволяет определить и может быть ограничить его применение.

Цель работы: определить: 1) степень и кинетику набухания полимера в органических растворителях; 2) растворимость полимера в различных растворителях; 3) водопоглощение полимера в горячей воде и стойкости в кипящей; 4) стойкость полимера к действию ма-

сел, жиров; 5) стойкость полимера к действию различных агрессивных сред.

Экспериментальная часть:

Объекты и оборудование: В качестве объектов используются водорастворимые полимеры – поливиниловый спирт (ПВС), карбоксиметилцеллюлоза (КМЦ), образцы различных полимеров в виде кусочков, брусочков, пленок, жгутиков, ацетон, этиловый спирт, гексан, бензол, толуол, четыреххлористый углерод, HCl, HNO₃, H₂SO₄, NaOH, CH₃COOH, NaCl, Na₂CO₃ (10 % растворы), вазелиновое, трансформаторное, подсолнечное и др. минеральные масла, диоктилфталат, дибутилфталат или др. пластификаторы, жиры, мыльно-содовый раствор. Приспособления: пробирки, микробюретка или градуированная пипетка емкостью 2 - 5 мл, бюксы

1. Определение степени набухания пластических масс весовым методом

Весовой метод определения степени набухания заключается в том, что исходный образец взвешивается на аналитических или торсионных весах с точностью до 0,001гр - это исходная масса образца m_0 . Затем образец помещается в пробирку с растворителем. Через определенные промежутки времени (5, 10, 15, 20 и т.д. мин) образец взвешивается. Набухание продолжают до тех пор пока масса образца с течением времени не будет постоянной $m_{\text{равн}}$. Измененная масса образца обозначается как m . Расчет производится по формуле (2). На основании экспериментальных данных строится график зависимости изменения массы образца в % от времени, данные заносятся в таблицу 1.

Таблица 1.

Результаты набухания полимеров

Время от начала опыта, мин	Исходная масса образца, m_0	Масса образца после набухания, m	Степень набухания, %	Равновесная степень набухания, %
0				
5				
10				
15				

2. Определение растворимости полимера в различных растворителях.

Образцы полимеров в виде мелких кусочков не более 0,5 г, гранул, порошков помещают в пробирку или бюкс с притертой пробкой и добавляют 2 – 3 мл органического растворителя (ацетон, этиловый спирт, гексан, бензол, толуол, четыреххлористый углерод, диоксан и т.п.). Пробирку оставляют на 1 ч для набухания при комнатной температуре. По истечении этого времени отмечают, какие изменения произошли с образцом: набухает полимер или нет. Затем ставят пробирку на водяную баню, нагревают, но не выше температуры кипения растворителя. Отмечают, происходит ли набухание или растворение полимера. Поскольку процесс растворения высокомолекулярных соединений является длительным, заключение о нерастворимости или растворимости полимера следует делать не ранее чем через 24 ч. Поэтому закрытые пробирки или бюксы с растворителем оставляют до следующего занятия. Результаты наблюдения записывают в таблицу 2 и сравнивают полученные результаты со справочными данными, объясняя результаты. Особое внимание следует обратить на стойкость полимеров к действию органических растворителей, используемых для химической чистки одежды. Если полимер не растворяется при комнатной температуре, смесь осторожно нагревают до температуры кипения растворителя. В случае растворения полимера при нагревании раствор охлаждают, чтобы выяснить, остается полимер в растворе или осаждается. Если полимер набухает, но не растворяется, необходимо испытать родственные растворители и их смеси. Набухание без растворения даже в растворителях, наиболее сильно действующих на данный тип полимера, обычно свидетельствует о наличии трехмерной структуры. Каждый полимер пробуют растворить в нескольких растворителях. Результаты записывают после проведения опытов в таблицу, используя обозначения:

Р – растворим; Нр – нерастворим; Чр – частично растворим; Нб – набухает; Рг – растворим в горячем растворителе; Рз – разрушается.

Таблица 2

Растворимость полимеров

По-ли-мер	Растворители								
						Кислоты			Масла, жиры
	бен-зин	ацетон	этанол	ССL ₄	Во-да кип. /хол	фенол	сер-ная	соля-ная	вазели-новое
ПП									

ПЭ НД									
ПЭ ВД									
ПА									
АБС									
ПС									
ПК									

3. Определение водопоглощения в горячей воде. Количественное определение величины водопоглощения образцов пластмассы позволяет оценить ее природу. Сравнение величин водопоглощения служит для проведения идентификации упаковочных пленок: целлофана лавсана и полиэтилена.

Образцы испытуемые пластмасс в виде кусочков или пленок размером 2 * 2 см предварительно взвешивают на аналитических весах, записывают вес как W_0 . Взвешенные образцы погружают в стаканчик с кипящей дистиллированной водой и выдерживают в ней в течение 30 мин, затем переносят в стаканчик с холодной дистиллированной водой для охлаждения и через 5 мин вынимают, аккуратно вытирают фильтровальной бумагой и снова взвешивают на аналитических весах, записывая вес как W_1 . Водопоглощение вычисляют по формуле 3.

$$(W_1 - W_0) / W_0 * 100\% . \quad (3)$$

При определении водопоглощения в холодной воде предварительно взвешенный образец выдерживают в стакане при комнатной температуре, после чего образец вынимают, вытирают фильтровальной бумагой и вновь взвешивают. Водопоглощение рассчитывают аналогично по вышеприведенной формуле и вносят данные в табл. 2.

4. Определение стойкости к кипящей воде.

Берут два кусочка одной пластмассы. Исследуемый образец пластмассы погружают в стаканчик с кипящей дистиллированной водой и кипятят его в течение 10 мин извлекают образец из воды, охлаждают, вытирают фильтровальной бумагой. Испытуемый образец сравнивают с контрольным и отмечают изменения внешнего вида. У пластмасс, стойких к действию кипящей воды, не должны изменяться цвет, блеск, появляться трещины, вздутия, коробления. Следует обратить внимание на воду после кипячения образца – вода не должна окрашиваться и изменять запах. Данные вписывают в таблицу 2.

5. Стойкость пластмасс к действию масел, жиров. Стойкость пластмассовой посуды проверяют путем обработки поверхности образцов различными маслами (вазелиновое, трансформаторное, подсолнечное и т.п.) или пластификаторами (диоктилфталат, диметилфталат и т.п.) или жирами по выбору. Сравнивают действие указанных веществ сравнением с контрольным образцом. Отмечают изменение характера поверхности: появление липкости, вздутия, коробления, трещин. Данные вписывают в таблицу 2.

6. Определение стойкости пластмасс к действию различных агрессивных сред.

Агрессивные химические среды как правило представляют собой водные растворы неорганических или органических кислот, оснований или солей: HCl , HNO_3 , H_2SO_4 , NaOH , KOH , CH_3COOH , NaCl , Na_2CO_3 и др. Образцы пластмасс в виде кусочков помещают в пробирки или бюксы с притертыми пробками и добавляют 10%-ные растворы соляной, серной, азотной, уксусной кислот, едкого натрия или едкого калия (по выбору). Пробирки оставляют в штативе под тягой при комнатной температуре на 2 часа изредка осторожно встряхивая. Через 2 часа отмечают изменения, происходящие с образцом. Если видимых изменений нет, то образцы осторожно вынимают, ополаскивают проточной водой и вытирают фильтровальной бумагой и сравнивают с контрольным образцом. Проверяют изменение цвета раствора химического реагента. Результаты эксперимента записывают в таблицу 2 и сравнивают со справочными данными. Делают вывод о стойкости испытуемого полимера к тому или иному химическому реагенту.

Контрольные вопросы

1. Особенности растворения полимеров?
2. Назовите основные химически стойкие пластмассы?
3. Чем отличается ограниченное набухание от неограниченного набухания?
4. Как влияет молекулярная масса на растворимость полимеров?
5. Какие факторы влияют на процесс растворения?
6. Почему набухание полимеров носит кинетический характер?
7. Отличие растворимости кристаллических и аморфных полимеров.

Лабораторная работа № 17 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЯЗКОСТИ РАСТВОРОВ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Теоретическая часть:

Реология –это наука о деформации и течении материалов. К реологическим свойствам относят вязкость и текучесть. Вязкость –это внутреннее трение между слоями жидкости или газа, которое возникает когда слои движутся с разными скоростями. Вязкость (η) является результатом межмолекулярного взаимодействия, и она тем выше, чем больше силы молекулярного притяжения. Поэтому вязкость полярных веществ всегда больше, чем неполярных. Зависимость реологических свойств от различных факторов выражают графически в виде реологических кривых (кривых течения):

$$\eta = f(P) \text{ или } v = f(P),$$

где v –скорость сдвигового течения жидкости;

P —напряжение сдвига(аналог –давление).

Для жидкостей характерны два основных типа течения: ламинарное и турбулентное. Ламинарным называют течение жидкости в виде параллельных слоев, не перемешивающихся между собой. Примером ламинарнотекущей жидкости может служить спокойная равнинная река. Турбулентное течение –это бурное течение, сопровождающееся образованием завихрений, воронок и взаимным перемешиванием слоев жидкости. Все реальные системы делят на жидко и твердообразные. Жидкообразные системы проявляют способность течь при сколь угодно малом напряжении сдвига, как говорят, их предел текучести равен нулю. Такие системы в свою очередь подразделяют на ньютоновские и неньютоновские, т. е. на те системы, которые подчиняются и не подчиняются закону Ньютона. Закон Ньютона описывает зависимость градиента скорости течения dv/dx от величины P . Рассмотрим течение жидкости через капилляр. Около стенок капилляра из-за сил адгезии (адгезия –взаимодействие молекул жидкости с молекулами стенки сосуда) скорость течения равна нулю, она возрастает по мере удаления от стенок и максимальна в центре капилляра. Для ньютоновской жидкости профиль (эпюра)скоростей в таком капилляре будет параболическим.

Для ньютоновских жидкостей вязкость в области ламинарного течения не зависит от напряжения сдвига и градиента скорости. Эти жидкости подчиняются и закону Пуазейля, который связывает объем

протекающей через капилляр жидкости V за время t с вязкостью, где K – константа, зависящая от геометрии капилляра, а P здесь – давление на конце капилляра. Закон Пуазейля позволяет характеризовать вязкость по времени истечения определенного объема жидкости через капилляр. Это принцип действия капиллярных вискозиметров. Неньютоновские жидкости проявляют некие аномалии (отклонения от закона Ньютона), заключающиеся в непостоянстве вязкости при изменении напряжения сдвига, что связано с особенностями их внутреннего строения. На рис. 1. приведены некоторые варианты кривых течения неньютоновских жидкостей. По характеру этих зависимостей их можно подразделить на псевдопластические, дилатантные и твердообразные. Для псевдопластических жидкостей характерно, что их вязкость растет с увеличением скорости течения (рис. 1, кривая 3) или напряжения сдвига. Кривая течения такой жидкости также проходит через начало координат, но идет ниже кривой течения ньютоновской жидкости. Растворы многих полимеров ведут себя подобным образом, что связано с проявлением эффекта зацепления макромолекул.

Типы реологического поведения полимеров

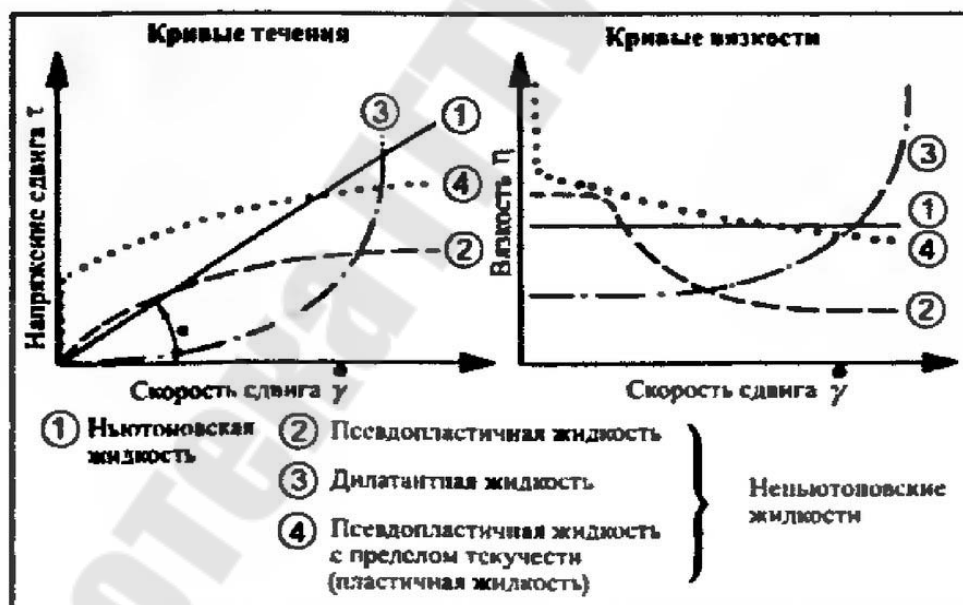


Рис. 1. Кривые течения ньютоновской (1), дилатантной (2), псевдопластической (3) и твердообразной (4) жидкостей

Вязкость η , полученную из уравнений Ньютона и Пуазейля, называют динамической вязкостью. Это размерная величина.

Абсолютная (или динамическая) вязкость жидкости может быть вычислена также по времени, необходимому для истечения опреде-

ленного объема жидкости через капиллярную трубку. Истечение может происходить или под действием тяжести (когда сила, действующая на жидкость, пропорциональна ее плотности), или под действием давления. При этом пользуются формулой Пуазейля:

$$\eta = \frac{\pi \cdot \Delta P \cdot r^4 \cdot \tau}{8 \cdot l \cdot V},$$

где η – динамическая вязкость, пз;

ΔP – разность давлений на концах капилляра, дин/см²;

r – радиус капилляра, см;

l – длина капилляра, см;

V – объем жидкости (см³), вытекающий в течение времени τ (с).

Кинематическая вязкость ν – это динамическая вязкость среды η , разделенная на ее плотность ρ :

$$\nu = \eta / \rho.$$

Единица измерения кинематической вязкости в СИ: $[\nu] = \text{м}^2/\text{с}$

На практике часто пользуются относительной вязкостью $\eta_{\text{отн}}$ (отношение вязкости раствора к вязкости чистого растворителя при той же температуре) и удельной вязкостью $\eta_{\text{уд}}$, представляющей собой относительное увеличение вязкости растворителя за счет введения растворенного вещества. Относительная и удельная вязкость – безразмерные величины. Вязкость жидкостей легко определяется экспериментально.

Одним из наиболее простых приборов является капиллярный вискозиметр, который представляет собой мерную емкость, соединенную с капилляром. Жидкости из мерной емкости дают свободно вытекать через капилляр и измеряют время истечения. Согласно закону Пуазейля это время пропорционально вязкости.

Вискозиметр капиллярный ВПЖ-2 (рис.2) (технические характеристики даны в таблице 1) – прибор в виде U-образной трубки, колено (1) спаяно с капилляром (7). Измерение вязкости вискозиметром основано на определении времени, за которое определенный объем жидкости истечет через капилляр.

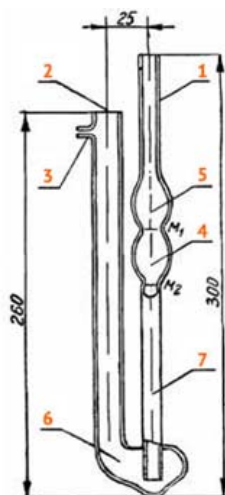


Рис. 2. Вискозиметр капиллярный ВПЖ-2

Таблица 1

Технические характеристики ВПЖ-2	
Диаметр капилляра, мм	0,34 ... 4,66
Постоянная вискозиметра К, мм ² /с ²	определяется индивидуально
Кинематическая вязкость жидкости вычисляется по формуле: $V = (g/9.807) T * K$, где	
К- постоянная вискозиметра, мм ² /с ² ;	
V- кинематическая вязкость жидкости, мм ² /с;	
T- время истечения жидкости, с;	
g- ускорение свободного падения в месте измерений в м/с ² .	

Вискозиметр Гепплера (рис 3.) предназначен для точного измерения вязкости прозрачных ньютоновских жидкостей. В сочетании с циркуляционным термостатом обеспечивает точность, недостижимую ни на каком другом приборе. Принцип работы этого вида прибора базируется на применении закона Стокса. Так, за определенный отрезок времени шарик проходит отрезок расстояния. Отличительной характеристикой здесь служит движение под действием только собственного веса шарика.



Рис. 3. Вискозиметр Гепплера

Динамическую вязкость исследуемой жидкости η (Па·с) при заданной температуре вычисляют по формуле Стокса:

$$\eta = \frac{d_{\text{ш}}^2 \cdot (\rho_{\text{ш}} - \rho_{\text{св}}) \cdot D \cdot g \cdot t_{\text{ср}}}{18 \cdot L \cdot (D + 2,104 \cdot d_{\text{ш}})}$$

где $d_{\text{ш}}$ – диаметр шарика, м;

$\rho_{\text{ш}}$ – плотность материала шарика (для стали 7856 кг/м³), кг/м³;

$\rho_{\text{св}}$ – плотность связующего, определяется расчетным путем по правилу смеси или экспериментально, кг/м³;

D – диаметр пробирки, м;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

$t_{\text{ср}}$ – среднее значение времени прохождения шариком расстояния между метками, с;

L – расстояние между метками, м.

Принцип ротационного метода заключается в измерении силы, действующей на ротор (вращающий момент) во время его вращения с постоянной угловой скоростью (скорость вращения) в жидкости. Ротационные вискозиметры (рис.4) используются для измерения вязкости ньютоновских жидкостей (вязкость не зависит от напряжения сдвига) и неньютоновских жидкостей (вязкость зависит от напряжения сдвига, кажущаяся вязкость).



Рис. 4. Ротационные вискозиметры

Вязкость растворов полимеров.

Характерной особенностью растворов полимеров является их высокая вязкость даже при очень больших разбавлениях. Они подчиняются закону Ньютона только при самых малых концентрациях (0,1–0,01 вес. %). Такое поведение связано с особенностями строения ВМС. В растворе молекула полимера может принимать самые различные формы: от плотно упакованной глобулы до выпрямленной молекулы. При хорошем взаимодействии молекулы полимера с растворителем она принимает форму статистического клубка (представьте себе хаотично спутанную нитку). При этом форма клубка может изменяться при его попадании в поток с градиентом скорости. Кроме того, молекулы ВМС могут взаимодействовать друг с другом, образуя ассоциаты и легко разрушаемые структуры. Наконец, молекулы полимера могут зацепляться друг за друга (как спутанные нитки) и такие зацепления разрушить уже достаточно трудно. При всей многообразии и неоднозначности поведения ВМС в растворах вязкость этих растворов зависит от молекулярной массы полимера, степени полимеризации, строения молекулы, концентрации растворов и др.

Изменение вязкости в зависимости от концентрации полимеров (в частности водорастворимых) и температуры имеет большое значение при использовании их в качестве поддерживающих материалов. Так как зачастую постобработка полученных аддитивными технологиями объектов занимает значительную часть времени получения, то очень важно изучение динамики процессов растворе-

ния поддержки. Известны как синтетические например: поливинилацетат (ПВА), поливиниловый спирт (ПВС) так и биологические водорастворимые полимеры, например: карбоксиметилцеллюлоза (КМЦ), желатин. Выбор более эффективного полимера в качестве поддерживающего материала зависит от гидрофильных характеристик и их температурно – временных зависимостях.

Цель работы: определить вязкость растворов полимеров и ее зависимость от концентрации полимера и температуры.

Экспериментальная часть

Объекты и оборудование: В качестве объектов использовать растворы водорастворимых полимеров – поливинилового спирта (ПВС) и карбоксиметилцеллюлозы (КМЦ).

Вискозиметр ВЗ 246 (рис 5.) представляет собой емкость конусообразного типа с открытым верхом. Изготавливается данный прибор из специального материала, который не влияет на скорость течения анализируемой пробы. В комплекте аппарата имеются три сопла с разными диаметрами отверстий. Принцип работы прибора заключается в измерении времени, за которое жидкость вытекает из воронки. Изначально в резервуар заливается точно известное количество анализируемой пробы, которое равно 100 миллилитрам, когда время определено по его значению отмечают вязкость по прилагаемому графику.



Рис. 5. Общий вид вискозиметра ВЗ 246

Основным преимуществом вискозиметров ВЗ-246 является их простота в использовании.

Перед введением аппарата в эксплуатацию его необходимо откалибровать. Для этих целей используют стандартный образец - индустриальное масло с известным значением измеряемой величины. Стандартную калибровочную пробу заливают в резервуар лабораторного прибора и засекают время. Таким образом, проводят три испытания, меняя сопла. По результатам данных измерений выстраивают графики. На графике находят точку, которая соответствует времени истечения масла и сравнивают со значением из графиков, которые прилагаются к паспорту на прибор. Если значения совпадают, то вискозиметр ВЗ-246 пригоден к работе. Следует учитывать, что результаты, полученные на вискозиметре ВЗ, являются приблизительными, а разница между двумя измерениями может достигать 3%. Если значение вязкости отличается, то выводят поправочный коэффициент для расчета вязкости, равный частному от деления измеренной вязкости на справочную величину. В дальнейших опытах при обработке результатов – расчете вязкости коэффициент учитывают умножая полученное значение в опыте на него.

$$\eta_{\text{действ.}} = K\eta_{\text{изм.}}$$

Определение условной вязкости по вискозиметру типа ВЗ-246. Вискозиметр помещают в штатив и с помощью уровня устанавливают в горизонтальном положении. Под сопло вискозиметра ставят сосуд. Отверстие сопла закрывают пальцем, испытуемый материал наливают в вискозиметр с избытком, чтобы образовался выпуклый мениск над верхним краем вискозиметра. Наполняют вискозиметр медленно, чтобы предотвратить образование пузырьков воздуха. Избыток материала и образовавшиеся пузырьки воздуха удаляют при помощи стеклянной пластинки или алюминиевого диска, сдвигаемых по верхнему краю воронки в горизонтальном направлении таким образом, чтобы не образовалась воздушная прослойка. Открывают отверстие сопла и одновременно с появлением испытуемого материала из сопла включают секундомер. В момент первого прерывания струи испытуемого материала секундомер останавливают и отсчитывают время истечения.

Для проведения опыта по определению зависимости вязкости полимера от концентрации готовят растворы полимеров с различной концентрацией (например: 1; 3; 5%).

Опыты проводят, начиная с растворов с меньшей концентрацией, с разными соплами, пользуясь рекомендациями таблицы 2.

Таблица 2

**Оптимальное время истечения из вискозиметра типа ВЗ-246
с соплами разного диаметра (ориентировочные показатели)**

Тип вискозиметра	Диаметр сопла вискозиметра, мм	Оптимальный диапазон времени истечения, с
ВЗ-246	2	От 70 до 300
	4	" 20 " 200
	6	" 20 " 200

Примечание. Допускается измерять вискозиметром с диаметром сопла 4 мм время истечения от 12 до 200 с при разбавлении материала до рабочей вязкости.

Для каждой концентрации и сопла опыт повторяют 3 раза. Для определения вязкости используют среднее арифметическое. По времени истечения, пользуясь графиком (рис. 6), находят вязкость раствора (при необходимости используют поправочный коэффициент).

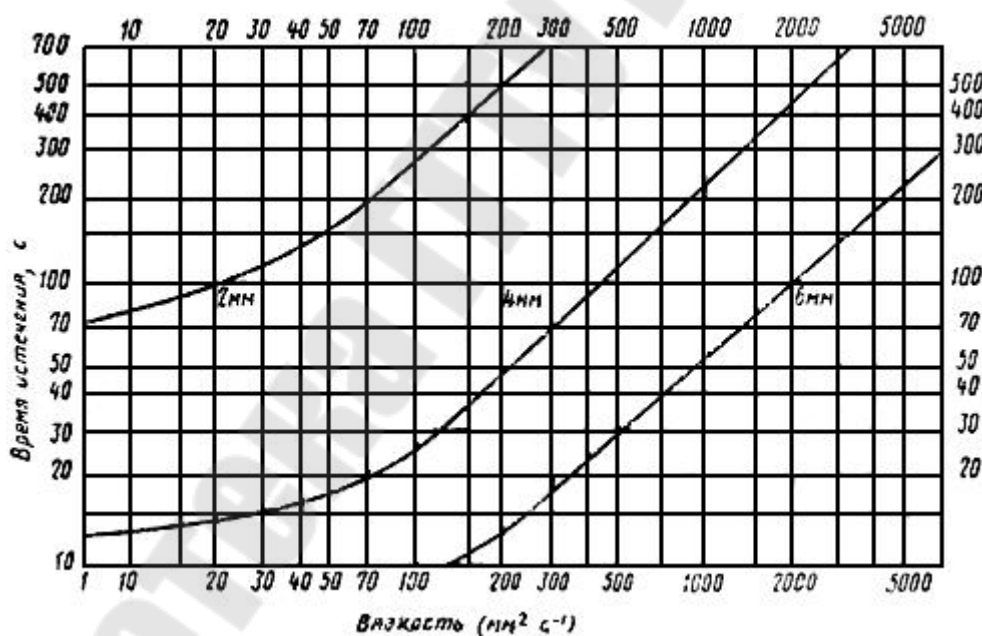


Рис. 6. Зависимость времени истечения (τ) от вязкости ($\text{мм}^2/\text{с}$) материала в вискозиметрах с различным диаметром сопла

Для проведения опыта по определению зависимости вязкости раствора полимера от температуры раствор определенной концентрации помещают в водяную баню и при перемешивании доводят раствор до температуры (например: 60; 40; 20 °С), проводят быстрые измерения времени истечения раствора при каждой температу-

ре. По времени истечения раствора, пользуясь графиком (рис.6) находят вязкость раствора (при необходимости используют поправочный коэффициент).

Данные опытов вписывают в таблицу 3.

Таблица 3

Результаты измерения вязкости

Полимер	ПВС									КМЦ								
	2			4			6			2			4			6		
Диаметр сопла, мм																		
Концентрация полимера в растворе, %	1	3	5	1	3	5	1	3	5	1	3	5	1	3	5	1	3	5
Вязкость, мм ² /с																		
Температура, °С	20	40	60	20	40	60	20	40	60	20	40	60	20	40	60	20	40	60
Вязкость мм ² /с																		

По результатам опыта строят графики:

- 1) зависимости вязкости раствора от концентрации полимера;
- 2) зависимости вязкости раствора от температуры.

Примечание: За результат испытания принимают среднее арифметическое результатов не менее трех измерений времени истечения или вязкости.

Допускаемые отклонения отдельных определений времени истечения от среднеарифметического значения при проведении испытания одним исполнителем не должны превышать $\pm 3\%$, при проведении испытания разными исполнителями $\pm 5\%$.

Контрольные вопросы

1. Какие параметры характеризуют реологические свойства жидкостей?
2. Какими опытами можно определить является раствор ньютоновской или неньютоновской жидкостью?
3. От каких факторов зависит вязкость растворов полимеров?
4. Какие существуют виды вязкости?
5. Какие методы измерения вязкости вы знаете?
6. Опишите реологические особенности растворов полимеров?

Лабораторная работа № 18

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ И ВРЕМЕНИ ОТВЕРЖДЕНИЯ ТЕРМОРЕАКТИВНЫХ ПОЛИМЕРОВ

Теоретическая часть:

При получении композиционных материалов термореактивные полимеры используют в виде связующего.

Термореактивное полимерное связующее представляет собой двух- или многокомпонентную систему, состоящую из синтетической смолы (полимерной или олигомерной составляющей) и отвердителей или инициаторов, катализаторов, ускорителей отверждения. Часто полимерные связующие содержат также пассивные или активные растворители (разбавители), пигменты и красители, пластификаторы, стабилизаторы и другие компоненты, вводимые с целью придания связующим и полимерным композиционным материалам необходимых технологических и эксплуатационных свойств.

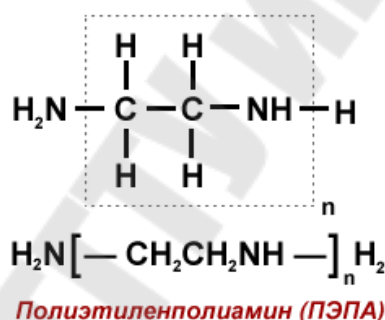
Состав связующего зависит от механизма прохождения реакции отверждения и от необходимых механических свойств отвержденного продукта.

Для изготовления композиционных материалов наиболее часто применяют полиэфирные, эпоксидные или фенолоформальдегидные связующие, как наиболее эффективные, имеющие достаточно высокие прочностные показатели в отвержденном состоянии и не выделяющие большого количества вредных веществ.

Неотвержденные эпоксидные смолы – продукты, бесцветные или окрашенные в желтый (до светло-коричневого) цвет, и консистенцию от вязкой жидкости до твердого хрупкого вещества. Они растворяются в кетонах (ацетон, метилэтилкетон, метилцикло-гексанон), сложных эфирах (этилацетат), простых эфирах (диоксан, этилцеллозольв). Низкомолекулярные смолы растворяются в спиртах и ароматических углеводородах (бензол, толуол, ксилолы). В отвержденном состоянии эпоксидные смолы обладают комплексом ценных технических свойств: механической прочностью, химической стойкостью, высокой адгезией к самым различным материалам, при определенной модификации эластичностью, хорошими диэлектрическими показателями, низкой усадкой (при 100 °С составляет 0,5%, а при 200 °С – 2,3%). Отвержденные эпоксидные смолы имеют небольшое число сшивок, находящихся на значительном расстоянии друг от друга, поэтому сегменты цепей между сшивками обладают некоторой подвижностью. Вследствие этого эпоксидные смолы менее хрупки, чем, например,

отвержденные фенолформальдегидные смолы, и отличаются от других смол более высокой прочностью при изгибе. Эпоксидиановые смолы используются в промышленности в чистом виде, или в качестве компонентов композиционных материалов – заливочных и пропиточных компаундов, клеев, герметиков, связующих для армированных пластиков (в том числе стеклопластика, углепластика, слоистых пластиков), защитных покрытий.

Важнейшим свойством эпоксидных смол является их способность к быстрому необратимому переходу из жидкого состояния в твердое при взаимодействии с самыми разнообразными соединениями. Это обусловлено наличием в молекулах эпоксидных олигомеров эпоксидных и гидроксильных групп. В зависимости от типа отвердителя отверждение может протекать при комнатной температуре (холодное отверждение) или при нагревании (горячее отверждение). Наиболее распространенными отвердителями являются: первичные и вторичные амины, полиамины (например: ПЭПА)



Каждый отвердитель имеет свой режим отверждения. В случае ПЭПА после смешивания компонентов начинает возрастать вязкость. Время жизни смолы при 20 – 25 °С составляет 50 – 60 мин. Через 2 – 4 часа она становится твердой, отверждение заканчивается через 24 часа, но оптимальные свойства достигаются через 5 – 7 суток. При нагревании время отверждения значительно сокращается.

Реакция отверждения эпоксидной смолы



При тепловом воздействии на термореактивные полимеры их вязкость с некоторого момента времени начинает интенсивно возрастать, что свидетельствует о начале процесса гелеобразования. Использовать полимер – реактопласт в качестве связующего для изготовления изделий или для пропитки необходимо в промежутке времени от момента приготовления связующего до момента, когда оно переходит в гелеобразное состояние. Такой промежуток времени называется временем жизни (жизнеспособность). Значения времени жизни (время гелеобразования) определяется экспериментально или рассчитывается. При нормальных условиях процесс гелеобразования достаточно длительный, поэтому в экспериментах определяют время до начала гелеобразования при повышенных температурах, а затем пересчитывают на заданные внешние условия. За время гелеобразования принимают промежуток времени от момента заливки связующего в емкость до момента, когда вытягиваемое из емкости связующее обрывается (вытягивание не выше 20 мм над поверхностью связующего).

Зависимость времени гелеобразования от температуры описывается уравнением

$$t = t_0 \cdot \exp\left(\frac{E_{ao}}{R \cdot T}\right),$$

где t – время гелеобразования, с;

t_0 – некоторый параметр;

E_{ao} – энергия активации процесса отверждения;

R – универсальная газовая постоянная ($R = 8,314$ кДж/(моль·К));

T – термодинамическая температура.

Для определения энергии активации процесса отверждения необходимо построить зависимость времени гелеобразования от температуры. Из уравнения следует линейная зависимость логарифма времени от обратной температуры (рис.1).

Из приведенной формулы можно определить энергию активации по экспериментальным данным. Разница между температурами должна составлять не менее 20К, тогда энергия активации определяется более точно.

Зная энергию активации процесса отверждения и вид зависимости время гелеобразования – температура, можно методом интерполяции определить время жизни связующего при различных значениях температуры.

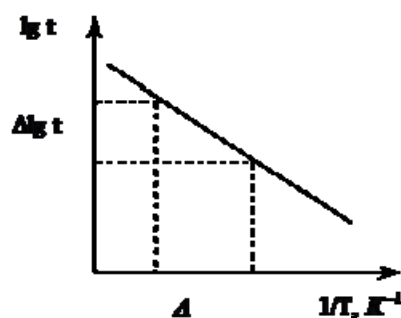


Рис. 1. Зависимость $\lg t - 1/T$ для определения энергии активации процесса отверждения

Процесс гелеобразования заканчивается отверждением реактопласта – эпоксидной смолы. За скорость отверждения (жизнеспособность) эпоксидного полимера принимают время от момента его смешивания с отвердителем до момента резкого возрастания вязкости состава (не позволяющего отформовать образцы).

Цель работы: определить время жизни и время отверждения эпоксидной смолы с использованием отвердителя ПЭПА.

Экспериментальная часть:

Объекты и оборудование: эпоксидная смола ЭД-20, отвердитель ПЭПА. Весы, часы, нагревательный прибор, пластиковые формочки или кюветы 100 мл, пробирки, пластиковые ложки, стеклянные палочки, секундомер, бумажные салфетки.

Для определения времени гелеобразования и скорости отверждения композиций необходимо приготовить составы, в которых на 100 масс. частей эпоксидного полимера приходится соответственно 5, 10, 20 масс. ч. отвердителя. Определение проводят следующим образом. В фарфоровые чашечки взвешивают по 10 г. эпоксидной смолы и соответственно 0,5, 1 и 2 г отвердителя. Записывают время. Нагревают, используя нагревательный прибор. Свяжующее непрерывно перемешивают для предотвращения перегрева. Стеклянной палочкой периодически производят вытягивание связующего из кюветы, в момент, когда связующее хрупко обрывается на высоте примерно 20 мм от поверхности, останавливают секундомер и отсчитывают время. Определяют по предложенной методике время гелеобразования полимерного связующего не менее чем при трех значениях температуры, различающихся более чем на 20°C , за результат измерений принимают среднее значение не менее 3 экспериментов при каждой температуре.

По результатам эксперимента строят зависимости времени гелеобразования от температуры и $\lg t - 1/T$. По наклону прямой по-

следней зависимости рассчитывают энергию активации вязкого течения, используя формулу:

$$E_{ao} = \frac{R \cdot \lg(t_1/t_2)}{1/T_1 - 1/T_2}$$

где R – универсальная газовая постоянная ($R = 8,314$ кДж/(моль·К));
 t_1, t_2 – экспериментальные значения времени гелеобразования, с;
 T_1, T_2 – температуры, при которых определено время гелеобразования, К.

Полученные значения времени гелеобразования сравнивают с справочными данными и делают выводы.

Результаты экспериментов и расчетов заносят в таблицу 1

Таблица 1

Результаты экспериментов и расчетов, опыт 1

№ п/п	Рецептура	$T, ^\circ\text{C}$	$t, \text{с}$	$E_{ao},$ кДж/моль

Для определения скорости отверждения готовят такие же составы, как и в опыте 1. Перемешивают составы стеклянной полочкой и переносят их в пробирки. При непрерывном перемешивании опускают пробирки в кипящую воду или под нагревательный прибор и выдерживают до достижения вязкости полимерных составов, не позволяющей отформовать образцы. Отмечают время отверждения, заносят в таблицу 2, рассчитывают среднее арифметическое, сравнивают полученные результаты со справочными данными, делают выводы

Таблица 2

Результаты экспериментов и расчетов опыт 2

№ п/п	Рецептура	$T, ^\circ\text{C}$	$t, \text{с}$

Контрольные вопросы

1. Какие компоненты входят в состав полимерных связующих?
2. Какие параметры характеризуют функциональность связующего?
3. Как влияет температура на время гелеобразования полимеров? Каким уравнением данная зависимость выражается?

4. Как экспериментально определяется энергия активации вязкого течения?

5. Как экспериментально определяется энергия активации процесса отверждения?

6. Что называют временем жизни полимерного связующего?

Лабораторная работа № 19 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА НАПОЛНИТЕЛЯ

Теоретическая часть:

Одним из эффективных методов повышения эксплуатационных свойств и снижения стоимости полимеров является применение минеральных, органических, синтетических и др. наполнителей. Наполнители вызывают значительные изменения свойств полимеров (структурных механических реологических и др.). Целенаправленное применение наполнителя требует изучения его свойств, которые не только обеспечили его совместимость с полимером, но и реализовали требуемые функции.

Наиболее распространенная физическая форма наполнителей – порошки. Чтобы получить порошок материал его измельчают различными способами. На рис. 1 представлены различные наполнители различной дисперсности. Дисперсность — физическая величина, характеризующая размер взвешенных частиц в дисперсных системах. Это величина, показывающая какое число частиц можно уложить вплотную в одном кубическом метре. Чем меньше размер частиц, тем больше дисперсность.

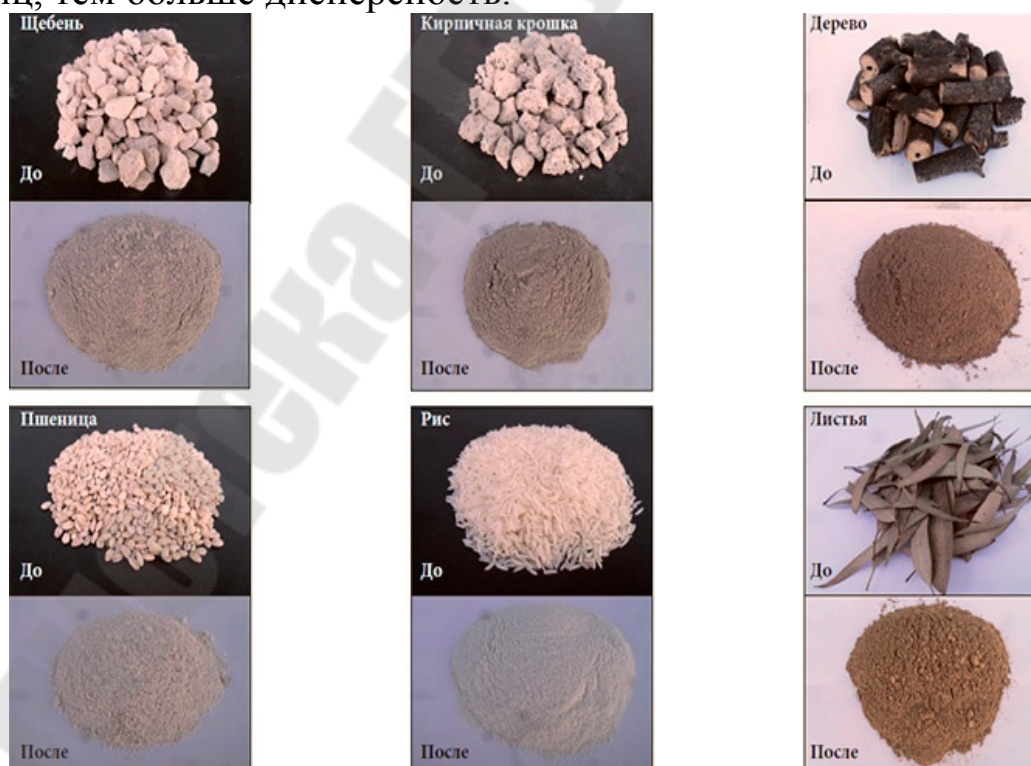


Рис. 1. Наполнители различной дисперсности

Однако для большей эффективности используемого наполнителя необходима оптимизация их по дисперсности т.к. очень маленькие размеры частиц (наноразмерность) приводят к их агрегации (слипанию), большие (больше микрона) – нарушают однородность и структуру полимера.

Как правило, сыпучие материалы характеризуются неодинаковыми размерами отдельных частиц. Количественной мерой этой неоднородности и одновременно степени дисперсности служит гранулометрический состав сыпучего материала (количественное соотношение объема или массы частиц различных размеров к общему объему или массе порошка), который характеризует содержание частиц разных размеров в сыпучем материале и определяется, как правило, ситовым анализом.

Существуют и другие методы анализа, которые применяются в зависимости от размеров частиц наполнителя:

- оптическая микроскопия - от 1 до 60 мкм;
- седиментационный анализ - от 0,1 до 10 мкм;
- электронная микроскопия – от 10^{-8} до 0,1 мкм.

Ситовый метод заключается в разделении пробы материала по фракциям путем просева через набор стандартных сит с различными ячейками и определения остатка на каждом сите. Однако ситовый анализ не дает представления об истинных размерах частиц, т. к. через отверстие сетки могут пройти такие частицы, длина которых больше, а ширина меньше, чем размер ячейки. Таким образом, результаты ситового анализа характеризуют не средний, а наименьший размер частиц. Результаты, получаемые при ситовом анализе, должны быть приведены в соответствие с результатами, получаемыми по другим методам, если частицы не имеют сферической формы.

Ситовой анализ применяется для материалов с размером частиц не менее 75-35 мкм. Его точность находится в пределах 0,5-1% и зависит от ошибок в отборе проб, колебаний в размерах ячеек сит и других факторов. Для ситового анализа применяется набор сит с различными размерами стороны ячейки (квадратной формы). Сита устанавливаются одно над другим так, что вверху располагаются сита с большим размером ячеек. В верхнее сито загружается сыпучий материал (100-200 г), который рассеивается посредством колебаний набора сит с определенной амплитудой и частотой. Сыпучий материал считается рассеянным, если при встряхивании в течение 1 минуты через сто проходит не более 1% порошка. По окончании рассеивания сыпучий материал распределится по ситам с различными размерами

ячеек. При этом количество материала, находящееся на данном сите, характеризует содержание частиц с размерами, находящимися в интервале от d_i до d_{i-1} , где d_i и d_{i-1} – размер ячеек данного сита и сита, находящегося над ним, соответственно. Относительное содержание частиц данного размера (т.е. данной фракции) можно определить из соотношения массы материала на данном сите к массе исходного материала, загруженного на верхнее сито.

Результаты ситового анализа удобно представлять графически в виде зависимостей степени разделения D (рис. 2, а) и относительного содержания фракции dD (рис. 2, б) от размера частиц δ .

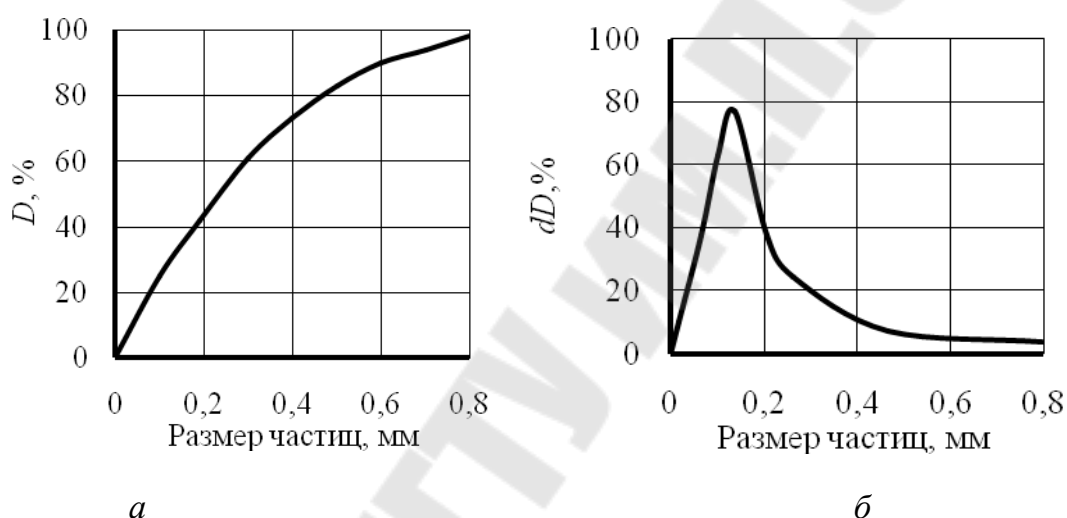


Рис. 2. Вид функций распределения степени разделения (а) и относительного содержания фракций (б) от размера частиц материала δ

Функция D определяется как отношение массы частиц, размер которых меньше δ к общей массе материала и выражается в процентах или долях единицы. Функция dD определяется как отношение массы частиц каждой фракции к общей массе материала и выражается в процентах или долях единицы.

Цель работы: Изучить метод измельчения и фракционный состав наполнителя для полимерных материалов.

Экспериментальная часть:

Объекты и оборудование: В лабораторной работе используются образцы глины до и после размола.

При измельчении применялась планетарная мельница фирмы «FRITSCH», которая позволяет достигнуть требуемой дисперсности порошковых компонентов. В основу работы планетарной мельницы

(рис. 3.) заложены принципы барабанно - шарового измельчителя. Отличие состоит только в наличии не 4-х барабанов, а в данном случае стаканов. Стаканы вращаются вокруг центральной оси планетарного механизма, а кроме того, каждый из них вращается в противоположном направлении вокруг собственной продольной оси. Благодаря движению барабана вокруг своей оси, помещенные в него шары, получают центробежное ускорение, намного превышающее ускорение силы тяжести. Интенсивность измельчения материала увеличивается на порядки, а изменение скоростных режимов мельницы и размеров шаров позволяет более тонко регулировать размер частиц. Для измельчения до конкретных размеров частиц следует регулировать частоту вращения мельницы (скорость), реверс, время измельчения, диаметр шаров.



Рис. 3. Планетарная мельница

Для классификации (рассева) глины до измельчения и после в работе использовался классификатор также фирмы «FRITSCH» (рис. 4.). Он позволяет произвести рассев порошка и достичь необходимой дисперсности. Он состоит из вертикального ряда сит с шагом соответствующим определенной дисперсности порошка. При работе прибора происходит просеивание вещества с одновременным его распределением по фракциям.



Рис. 4. Классификатор

Гранулометрический анализ состоит в определении размеров частиц порошка глины до размола и после. Образец глины перед помолом взвешивался (для заполнения объема стакана требуется не менее 250 г) и для определения начальной фракционности рассеивался на классификаторе, данные заносились в таблицу. Затем образец диспергировался (размалывался) (режимы рекомендовались преподавателем) на планетарной мельнице в течение 12 минут. Масса образца составляла 250 г, количество шаров – 50 шт., диаметр шара – 10 мм, скорость вращения барабана – 400 об/мин. Реверс при измельчении не применялся. Для исследований результатов помола (дисперсности частиц) снова производился рассев, данные также заносились в таблицу 1.

Дисперсность образцов глины до помола и после

Размер ячеек сита, мкм (δ)	Граничные размеры частиц фракций, мкм	Масса фракции до размола		Масса фракции после размола	
		<i>m</i> , г	% фрак- ции	<i>m</i> , г	% фрак- ции
140	140-200				
100	100-140				
60	60-100				
40	40-60				

По полученным результатам строились графики распределения степени разделения D (рис. 1, *a*) до и после помола и зависимость относительного содержания фракции dD (рис. 1, *б*) до и после помола от размера частиц δ . Сравнивая эти показатели делались выводы о изменении содержания каждой фракции в результате помола.

Контрольные вопросы

1. Какие функции наполнителя в составе полимера?
2. Какой физической формы бывают частицы наполнители для полимеров?
3. Что такое дисперсность порошка?
4. Какими методами можно оценить дисперсность порошкового наполнителя?
5. Что такое ситовый анализ порошка и как его проводят?
6. Какие параметры характеризуют гранулометрический состав порошкового наполнителя?
7. Как опытным путем определить показатели гранулометрического состава порошкового наполнителя?

Лабораторная работа № 20 КЛАССИФИКАЦИЯ И ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Теоретическая часть:

Керамика –искусственный материал, получаемый обжигом до спекания минерального (в основном глинистого) сырья, прошедшего специальную технологическую подготовку.

Керамическими называют искусственные каменные материалы, полученные из минерального глинистого сырья путем его добычи, тонкого измельчения, формования изделий с последующей их сушкой и обжигом. Сушка изделий обеспечивает первоначальную прочность, достаточную для сохранения формы, целостности при транспортировке в печь обжига, а также снижает усадочные деформации, возникающие в процессе спекания. Обжиг проводят при температуре 900 –1100 °С для придания высокой водостойкости и прочности керамическим материалам. В зависимости от свойств используемой глины и назначения материалов и изделий их формуют методом полусухого прессования, пластичного формования и литья (шликерный). Влажность массы при этом составляет 8 –12; 20 –25; до 60 % соответственно. Первый метод применяют, используя тонкие, мало пластичные глины для получения изделий точного размера с ровной поверхностью (кирпич и камни облицовочные), а также изделий, обладающих высокой прочностью и плотностью (плитка половая). Вторым методом (при наличии пластичных жирных глин) используют для изготовления кирпича и камня обыкновенного, труб, черепицы, плитки фасадной. Шликерный способ предусматривает заливку высокоподвижной глинистой массы в специальные высокопористые гипсовые формы сложной конфигурации (ванны, раковины и т.д.) или заполнение ею специальных форм-матриц (тонкие коврово-мозаичные плитки).

По назначению керамические материалы можно разделить на следующие классы:

- строительная керамика;
- тонкая керамика;
- техническая керамика;
- огнеупоры.

Строительная керамика:

- стеновые материалы (кирпич и керамические камни, с целью улучшения теплоизоляционных свойств, снижения массы, расхода

сырья и топлива выпускаются со сквозными или несквозными пустотами, водопоглощение кирпича и камней составляет 6–8%;

- кровельные материалы (керамическая черепица - ленточная, коньковая, отличающаяся высокой огнестойкостью и малой теплопроводностью);

- изделия для облицовки фасадов, (фасадная керамика – прекрасный облицовочный материал, имеющий хороший внешний вид, долговечность, невысокую стоимость, лицевая керамика (кирпич и камни), которые, кроме конструктивных, выполняют и декоративные функции, фасадные керамические плитки выпускают широкой цветовой гаммы, неглазурованные и покрытые глазурью, водопоглощение их составляет 8–10%, должны обладать требуемой морозостойкостью);

- изделия для внутренней облицовки (плитки керамические для полов, используемые в помещениях с влажным режимом, агрессивными, разрушающими средами, там, где полы подвергаются значительному истиранию, или к чистоте помещений предъявляются повышенные требования, а также плитки для внутренней облицовки стен–для отделки внутренних вертикальных поверхностей зданий, водопоглощение не должно превышать 16 - 24%;

- изделия для подземных коммуникаций (дренажные трубы служат основным материалом при мелиоративных работах для устройства водоотводных сетей, понижающих уровень грунтовых вод а сельском хозяйстве, строительстве сооружений и дорог, черепок труб пористый с водопоглощением не более 18%), канализационные керамические трубы предназначены для транспортировки сточных вод и жидких отходов производств в хозяйственных и промышленных канализационных сетях, керамический черепок труб плотный, водопоглощение не более 9%), водонепроницаемый и химически стойкий;

- санитарные керамические изделия, (санитарные керамические изделия–умывальники, унитазы, бачки смывные и др., устанавливаемые в санитарных узлах жилых, общественных и промышленных зданий, изготавливают из фаянсовых, полуфарфоровых и фарфоровых масс);

- пористые (керамзит–гранулированный вспученный материал, имеющий в изломе структуру застывшей пены. Его выпускают в виде гравия (размер зерен составляет 5–40 мм) и песка (менее 5 мм), аглопорит–искусственный пористый материал, выпускаемый в виде щебня (фракции 5-40 мм) и песка (менее 5 мм). Для пористых запол-

нителей –керамзита и аглопорита применяются легкоплавкие глинистые породы (лесс, суглинок, сланцы глинистые) с добавками угля, шлака, опилок и др. Глинистая составляющая должна обладать способностью вспучиваться при нагревании за счет образования вязкого силикатного расплава и одновременного выгорания газообразующих продуктов).

Строительная керамика – искусственный камнеподобный материал, получаемый из рыхлого глинистого сырья путем его измельчения, увлажнения с последующими операциями формования, сушки и обжига при высоких температурах. Глинистое сырье – смесь глинообразующих минералов (водные алюмосиликаты) и примесей. Важнейшими минералами являются каолинит ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), гидрослюда ($\text{K}_2\text{O} \cdot \text{MgO} \cdot 4\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 7\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) и монтмориллонит ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) и др. Примесями считаются кварцевые, карбонатные, железистые, гипсовые, органические включения. Разнообразие свойств керамических материалов и изделий зависит от вида сырья, от его химико-минералогического и зернового составов, состава сырьевой шихты, особенностей технологии и условий обжига. В процессе сушки отформованных изделий из глиняного теста испаряется вода, частицы глины сближаются, что сопровождается воздушной усадкой – уменьшением линейных размеров и объема изделий. Для регулирования отдельных технологических параметров глинистого сырья в керамическую шихту вводят различные добавки: отощители (снижают пластичность и уменьшают воздушную усадку), пластификаторы (повышают пластичность и связность массы), плавни (снижают температуру спекания); выгорающие добавки (повышают пористость изделий при обжиге) и др. При обжиге происходят изменения в глинообразующих минералах, примесях и добавках. Рост плотности и прочности изделий при обжиге объясняется прослойками образующегося расплава, который за счет энергии поверхностного натяжения сближает и связывает твердые частицы. Уплотнение и упрочнение керамических изделий при обжиге называется спеканием, сопровождаемое огневой усадкой (до 6 %). Обжиг изделий, которые должны обладать прочностью и пористостью, ведут в условиях, когда в изделиях образуется минимальное количество расплава, что обеспечивает лишь цементацию всей системы и достаточную прочность керамического черепка ($R_{сж} > 5 \text{ МПа}$). Обжиг изделий, которые в условиях эксплуатации должны быть плотными, прочными, износостойкими и водонепроницаемыми (плитки для полов), ведется при более высоких температурах (до 1250 °С) до полного спекания. Это позволяет полу-

чить плотный спекшийся черепок с малыми значениями пористости и водопоглощения.

Тонкая керамика:

- фарфор—важнейший керамический материал. Черепок его плотный, спекшийся, в изломе раковистый, просвечивающийся в тонком слое. Открытая пористость фарфора менее 0,5%, истинная – 35%. Он обладает высокой прочностью, устойчивостью к действию кислот и щелочей;

- фаянс—керамические изделия, имеющие плотный микропористый черенок (обычно белый) и покрытый бесцветной прозрачной глазурью, фаянс, не покрытый глазурью, имеет водопоглощение около 10–14%, впитывает и пропускает жидкости и газы, в связи с чем его использование в технике ограничено, используют в бактериологических фильтрах, глазурование улучшает технические характеристики фаянса;

- майолика и художественная керамика, изготавливается из естественно окрашенных легкоплавких глин, имеет различную окраску черепка с последующим декорированием глухими глазурями, а также цветными глазурями. Водопоглощение до 15%. Невысокая механическая прочность и большая пористость данного вида керамики определяют и ассортимент, это в основном изделия декоративного назначения – вазы, кашпо, скульптура, панно, из более качественных майоликовых масс изготавливают питьевые наборы, кувшины и т.п.;

- глазури –это тонкое стекловидное покрытие толщиной 0,1–0,3мм, образующееся на керамических изделиях в результате нанесения на них суспензий из легкоплавкой шихты с последующим обжигом изделий при высоких температурах. Глазурь придает керамическим изделиям водонепроницаемость, предохраняет от загрязнений, от действия кислот и щелочей, а также используется для декоративных целей;

- керамические краски и пигменты, керамические краски представляют собой смеси минеральных пигментов с силикатами. В качестве пигментов в керамике используются оксиды некоторых металлов.

Техническая керамика

В основу классификации технической керамики положен признак наличия в изготовленном керамическом изделии определенного химического состава кристаллической фазы, преобладающей в этом виде керамики. Такой признак классификации позволяет объединить

все существующие виды технической керамики в несколько основных классов:

- оксидная керамика, к этому классу относится керамика из высокоогнеупорных оксидов (огнеупорные изделия, конструкционные детали, химически стойкие и электроизоляционные изделия, атомная энергетика, авиация), оксидную керамику изготавливают на основе оксидов Al_2O_3 , ZrO_2 , BeO , MgO , CaO , SiO_2 , ThO_2 , UO_2 ;

- керамика на основе силикатов и алюмосиликатов, (применяется в электронике, радио и электротехнике, вакуумной технике);

- керамика на основе диоксида титана, титанатов, цирконатов, ниобатов и их соединений с пьезоэлектрическими свойствами (применяется в радио-и электронике, конденсаторной технике для пьезоэлементов, в радиоэлектронике);

- керамика на основе шпинелей (магнезиальная шпинель) (применяется в качестве огнеупоров, в электровакуумной и радиоэлектронике);

- керамика на основе хромитов редкоземельных элементов следующих видов: феррошпинель, хромитов лантана и иттрия (используется в качестве высокотемпературных нагревателей, электропроводящих элементов, электронике и радиотехнике);

- керамика на основе тугоплавких бескислородных соединений (карбиды, нитриды, бориды, силициды) (применяются как огнеупорные изделия, конструкционные детали, электронагреватели);

- композиционные материалы (применяются в качестве огнеупорных и конструкционных материалов, электронагревателей), исходными компонентами для производства технической керамики являются чистые оксиды, которые подвергают, как правило, прокаливанию с целью стабилизации фазового состава, улетучивания влаги и легкоплавких примесей.

Огнеупоры. К огнеупорам относятся материалы и изделия, способные выдерживать механические и физико-химические воздействия при высоких температурах и применяемые для кладки различных теплотехнических агрегатах. Различают изделия огнеупорные ($1580-1750^{\circ}C$), высокоогнеупорные ($1770-2000^{\circ}C$) и высшей огнеупорности ($>2000^{\circ}C$). По химическому составу огнеупоры делят на 11 типов: кремнеземистые, алюмосиликатные, магнезиальные, магнезиально-известковые, магнезиально-шпинелидные, магнезиально-силикатные, углеродистые, карбидкремниевые, цирконистые, оксидные, бескислородные.

Керамика третий по значимости материал в аддитивных технологиях. Благодаря своей способности выдерживать очень высокие температуры, существенно большей, чем у металлов твердости, высочайшей удельной прочности и удельной жесткости, керамика широко используется для изготовления облицовки двигателей, компонентов ракет, режущих кромок инструментов, специальной прозрачной и непрозрачной защиты, что, безусловно, является одним из приоритетных направлений развития систем военного назначения.

Цель работы: - изучить основные свойства образцов из керамики; определить показатели плотности, пористости и водопоглощения; сравнить полученные результаты со справочными данными.

Экспериментальная часть:

Объекты и оборудование: разные виды керамики (кирпич плитка для облицовки, посуда и др.), весы, сосуд с водой, мерная химическая посуда.

Лабораторная работа заключается в контроле внешнего вида керамических материалов и изделий; определения физико-механических свойств керамики стандартными и ускоренными методами; работы с испытательными приборами и оборудованием. Результаты испытаний записывают в таблицу, анализируются, устанавливаются зависимости свойств керамических материалов от различных факторов.

1. Определение керамических материалов по классам. Оценка качества керамических материалов по внешнему осмотру.

Внешним осмотром, по виду изделия разделяют представленные образцы керамики на строительную, тонкую, техническую керамику, огнеупоры. Отмечают, какое применение мог бы иметь данный вид керамики и какими функциональными свойствами она должна обладать.

Показатели, по которым оценивают качество перечисленных материалов, зависят от условий эксплуатации изделий. Дефекты формы, отклонения от размеров, наличие трещин, отбитостей не только ухудшают эстетический вид изделий, но и снижают эксплуатационные свойства, их долговечность. Кроме того, конечно, важны функциональные характеристики. Так, например, кирпич должен быть прочным по отношению к сжимающим и изгибающим нагрузкам, а при кладке наружных стен обладать низкой теплопроводностью и определенной морозостойкостью. Для облицовочных половых плиток важны декоративность, высокая износостойкость,

низкое водопоглощение. Керамзитовый гравий должен быть определенной плотности, теплопроводности и прочности.

2. Определение плотности образцов.

При определении плотности образцов неправильной формы используют метод, основанный на измерении объема вытесненной образцом из сосуда жидкости, в которую образец погружают.

Цилиндр наполняют водой. Отмечают ее объем. Образец высушивают, взвешивают,

При погружении испытуемого образца уровень воды в цилиндре увеличивается, отмечают ее объем. Плотность образца (г/см^3) вычисляют следующим образом:

$$\rho_0 = m / (V_2 - V_1),$$

где m — масса сухого образца, г;

V_2 — объем воды с погруженным образцом, см^3 ;

V_1 , — первоначальный объем воды, см^3 .

Результаты опытов заносят в таблицу

Таблица 1

Результаты определения средней плотности образцов неправильной геометрической формы

Образец	Масса образца $m, \text{г}$	Объем воды $V_1, \text{см}^3$	Объем воды с погруженным образцом $V_2, \text{см}^3$	Объем образца $V_2 - V_1$	Плотность материала, г/см^3

3. Определение показателей водопоглощения.

Образцы высушиваются до постоянной массы, очищаются и взвешиваются: кирпичи с погрешностью 1 г, а другие образцы с погрешностью 0,01 г. Для определения водопоглощения кирпичи насыщают водой в течение 48 часов. Предварительно определяют геометрические размеры кирпича с погрешностью 0,1 мм. Каждый линейный размер вычисляют как среднее арифметическое трех измерений — двух параллельных друг другу ребер и средней линии между ними. Затем образцы укладывают в мерную емкость с водой на сетку в один ряд. Уровень воды в сосуде должен быть выше верха образцов в пределах 2...10 см. Расстояние между образцами должно быть не менее 2 см. Через 48 часов образцы вынимают из сосуда с водой, обтирают влажной мягкой тканью, взвешивают не позднее чем через 5

минут. Образцы плиток насыщаются водой при кипячении в течение 3 часов. Допускается насыщение кирпича производить в течение 2 часов, а плиток в течение 1 часа кипячением, при этом процесс насыщения остается неизменным, а установленный показатель водопоглощения по массе в процентах умножается на коэффициент 1,1 (установлен сравнительными определениями водопоглощения).

Водопоглощение по массе W_m , %, вычисляют по формуле:

$$W_m = (m_2 - m_1) / m_1 * 100\%,$$

где m_2 – масса насыщенного водой образца, г;

m_1 – масса высушенного образца, г.

Полученные результаты сравнивают с данными таблицы 2

Таблица 2

Водопоглощение керамических материалов

Наименование материала	Водопоглощение по массе W_m , %
Кирпич глиняный:	
полнотелый рядовой лицевой	не менее 8
пустотелый рядовой лицевой	не менее 6
Керамзитовый гравий по насыпной плотности:	
марка по насыпной плотности до 400	не более 25
марка по насыпной плотности 450 – 800	не более 20
Плитка для полов:	
неглазурованная	не более 3,5
глазурованная	не более 1,5

Существует ускоренный способ определения водопоглощения, который состоит в том, что на поверхность материала капают воду или чернила. Водопоглощение оценивают по скорости впитывания капли. При водопоглощении до 3 % капля практически не впитывается, при 5 – 8 % – впитывается частично, более 10 % – капля впитывается быстро.

4. Определение пористости.

Для определения открытой пористости образца, равной его водопоглощению по объему $W_{об}$, и средней плотности образца необходимо определить его объем. Для образцов неправильной геометрической формы применяют метод вытеснения воды: объем образца равен объему вытесненной воды – это разность объема воды с помещенным в нее образцом и объема воды, измеренные до опыта в мерном стакане. Водопоглощение по объему W_o показывает степень заполнения водой объема образца и характеризует величину открытой пористости $П$. Пористость материала — свойство материала образовывать в сво-

ем объеме незаполненные полости (поры). Пористость определяется степенью заполнения его объема порами и исчисляется в процентах. Пористость (общая) Π – степень заполнения материала порами:

$$\Pi = V_{\text{п}} / V_{\text{о}},$$

где $V_{\text{п}}$ – объем пор в материале;

$V_{\text{о}}$ – объем материала в естественном состоянии.

Открытая пористость $\Pi_{\text{о}}$ определяется как отношение суммарного объема пор, насыщающихся водой, $V_{\text{п}}^{\text{вод}}$ к объему материала $V_{\text{о}}$, т.е.

$$\Pi_{\text{о}} = V_{\text{п}}^{\text{вод}} / V_{\text{о}}.$$

Закрытая пористость $\Pi_{\text{з}}$:

$$\Pi_{\text{з}} = \Pi - \Pi_{\text{о}}.$$

Существует два способа определения общей пористости: экспериментальный и экспериментально-расчетный.

Экспериментальный (прямой) способ основан на замещении порового пространства в материале сжиженным гелием и требует сложной аппаратуры для испытаний.

Экспериментально-расчетный метод определения пористости использует найденные опытным путем значения истинной плотности материала ρ и его средней плотности $\rho_{\text{о}}$ в сухом состоянии. Пористость Π (%) вычисляют по формуле:

$$\Pi = (1 - \frac{\rho_{\text{о}}}{\rho}) \cdot 100$$

Открытую пористость $\Pi_{\text{ок}}$ (%) определяют по формуле:

$$\Pi_{\text{ок}} = B_{\text{о}},$$

где $B_{\text{о}}$ – объемное водопоглощение материала;

$$B_{\text{о}} = (W - W_{\text{о}}) / W_{\text{о}} \cdot 100\%;$$

$W_{\text{о}}$ – объем образца в сухом состоянии;

W – объем образца в насыщенном состоянии.

Закрытую пористость $\Pi_{\text{з}}$ (%) вычисляют по вышеприведенной формуле

Результаты вычислений пористости материала заносят в табл. 3.

Таблица 3

Результаты вычислений пористости материала

Наименование материала	Общая пористость образца, %	Открытая пористость образца, %	Закрытая пористость образца, %

Контрольные вопросы

1. Что такое керамические изделия?
2. Основное сырье для производства керамики.
3. Классификация керамических изделий по их назначению.
4. Что относится к строительной керамике?
5. Что такое тонкая керамика?
6. Области применения и свойства электротехнического фарфора.
7. Какие стеновые керамические материалы Вы знаете?
8. По каким свойствам оценивают качество стеновых материалов?
9. Какие отделочные керамические материалы Вы знаете?
10. Какие свойства определяют качество материалов, применяемых для внутренней отделки пола и стен?
11. С какой целью при производстве керамических изделий применяют глазурирование?

Лабораторная работа № 21
ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
МАТЕРИАЛОВ ПРИ СТАТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ
НА РАСТЯЖЕНИЕ

Теоретическая часть:

Статические испытания материалов на одноосное растяжение являются наиболее распространенным видом испытаний для одновременного определения важнейших механических свойств. Проведение испытаний жестко регламентировано государственными стандартами, в которых указаны оцениваемые характеристики и способы их расчета, приведены типовые формы и размеры образцов, сформулированы основные требования к испытательному оборудованию, описана последовательность проведения и анализа результатов испытаний. Статические испытания на растяжение основаны на построении кривой растяжения с последующей обработкой полученной информации.

Механические характеристики, определяемые при испытаниях. При статических испытаниях на растяжение определяют следующие механические свойства (рис. 1):

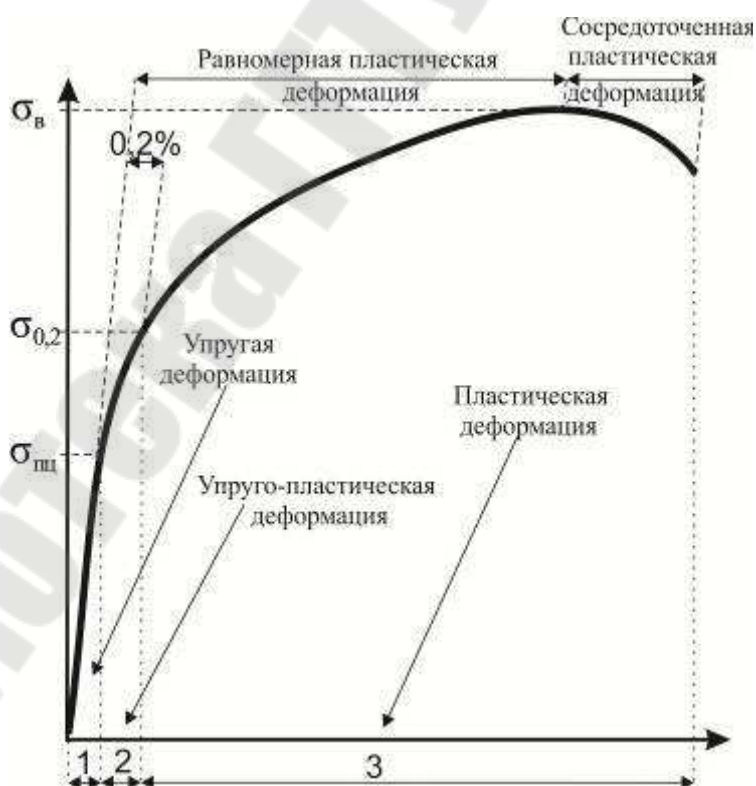


Рис. 1. Кривая растяжения образца при статическом растяжении

$\sigma_{\text{пл}}$ - предел пропорциональности – напряжение, которое материал образца выдерживает без отклонения от закона Гука;

$\sigma_{\text{упр}}$ - условный предел упругости – напряжение, при котором остаточное удлинение достигает величины 0,005 % или 0,05 %;

$\sigma_{0,2}$ - условный предел текучести – напряжение, при котором остаточное удлинение достигает величины 0,2 %;

$\sigma_{\text{в}}$ (предел прочности) - временное сопротивление – максимальное напряжение, которое способен выдержать материал до разрушения;

δ, ψ - относительное удлинение ϵ и относительное сужение в месте разрушения образца.

Максимальное напряжение, при котором сохраняется линейная зависимость между относительным удлинением и напряжением, называется пределом пропорциональности $\sigma_{\text{пл}}$.

Под пределом упругости понимается напряжение, при котором остаточная деформация после снятия нагрузки не превышает допустимую по техническим условиям на изделие (обычно не более 0,01), что указывается соответствующим индексом, например 0,01, 0,005.

При напряжениях выше предела упругости остаточная деформация увеличивается. Для пластичных материалов на диаграмме «напряжение – деформация» наблюдается площадка текучести, где деформация растет без заметного изменения нагрузки. Минимальное напряжение, при котором образец деформируется без заметного увеличения растягивающей нагрузки, называется пределом текучести. Вследствие того что трудно точно зафиксировать эти значения для большинства материалов, не имеющих явно выраженной площадки текучести, используется условный предел текучести, т. е. напряжение, при котором остаточное удлинение достигает значения 0,2 % расчетной длины образца. Дальнейшее пластическое деформирование протекает с увеличением нагрузки, т. к. материал упрочняется в процессе деформирования. Упрочнение металла при пластическом деформировании называется наклепом.

Напряжение, соответствующее наибольшей нагрузке P_{max} , предшествующей разрушению образца, отнесенной к начальной площади его поперечного сечения F_0 до испытания, называется пределом прочности, или временным сопротивлением (разрушающим напряжением при растяжении) и обозначается $\sigma_{\text{в}}$. Это напряжение является условным. Для определения истинного предела прочности $S_{\text{к}}$ необходимо нагрузку отнести к действительной площади поперечного сечения $F_{\text{к}}$, которую имеет образец в месте разрушения.

Предел упругости и предел текучести характеризуют сопротивление материалов малым пластическим деформациям. Временное сопротивление дает представление о предельной несущей способности материала.

Представленная зависимость имеет прямолинейный участок, на котором приращение деформации сопровождается прямо пропорциональным приращением приложенного усилия, что соответствует закону Гука. Эта деформация упругая. Упругие свойства проявляются пластмассами при очень малых численных значениях относительных деформаций. Форма образца и размер сечения рабочей части не изменяются. Следующий участок криволинеен. Отклонение от прямолинейности свидетельствует о проявлении пластической составляющей, вклад которой возрастает. Затем происходит резкое изменение хода зависимости, когда приращение деформации происходит без увеличения силы. Это вызвано изменением поперечного сечения образца, которое сужается. Участок снижения приложенного усилия, сопровождается развитием деформации. В точке минимального напряжения появляется так называемая шейка. Её сечение меньше начального по крайней мере в 10 раз. После образования шейки, вся рабочая часть образца вытягивается до перехода по всей длине в ленту. После снятия нагрузки восстанавливаются упругие деформации,

Цель работы: ознакомиться с испытательным оборудованием для определения основных механических характеристик; провести механические испытания предложенных видов образцов полимеров; по результатам испытаний определить предел прочности, предел текучести, предел пропорциональности, относительное удлинение.

Экспериментальная часть

Объекты и оборудование: образцы различных полимеров, Испытание на растяжение проводят на специальных круглых образцах, а для листового материала на плоских образцах (лопатка или полоса) (рис. 2).

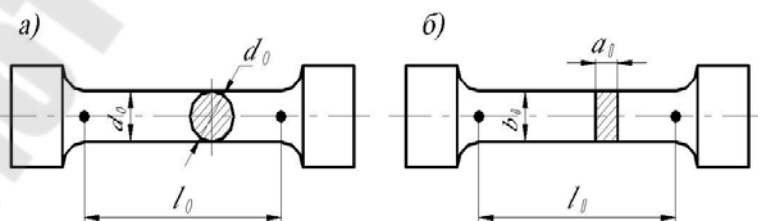


Рис. 2. Образцы для испытаний на разрыв:
а – круглый; б – плоский

Испытательная машина Instron. Instron — известная фирма производитель испытательного оборудования для оценки механических свойств материалов и деталей. Назначение оборудования: механические испытания полимеров, композитов, металла (сжатие, растяжение, сдвиг, изгиб) (рис.3).



Рис. 3. Испытательная машина Instron

Испытательный комплекс «Instron 300» имеет гидравлический привод и позволяет проводить испытания с максимальным усилием 300 кН. Подвижный захват связан с поршнем, который перемещается в рабочем цилиндре под давлением минерального масла, создаваемым насосом.

Испытание на растяжение относится к числу наиболее распространенных статических испытаний, позволяющих определить основные характеристики механических свойств материала. К преимуществам такого испытания относятся: сравнительная простота эксперимента и возможность получить растяжение в чистом виде.

Образцы полимерного материала нумеруются. Для проведения опыта берутся 3 образца вида (один вид материала) “лопатка” и 3 образца вида ”полоса”. У каждого образца измеряется толщина, ширина и расчетная длина l_0 (см. р1 данные заносятся в таблицу 1.

Таблица 1

Характеристики образцов.

Образец 1	Толщина, мм	Ширина, мм	Расчетная длина, мм
Лопатка 1			
Лопатка 2			
Лопатка 3			

Полоса 1			
Полоса 2			
Полоса 3			

Перед испытанием образец закрепляют в испытательной машине в вертикальном положении и выставляется нагрузка, заданную преподавателем. В процессе испытаний на растяжение диаграммный механизм машины непрерывно регистрирует так называемую диаграмму растяжения в координатах нагрузка – перемещение (рис. 4 и 5).

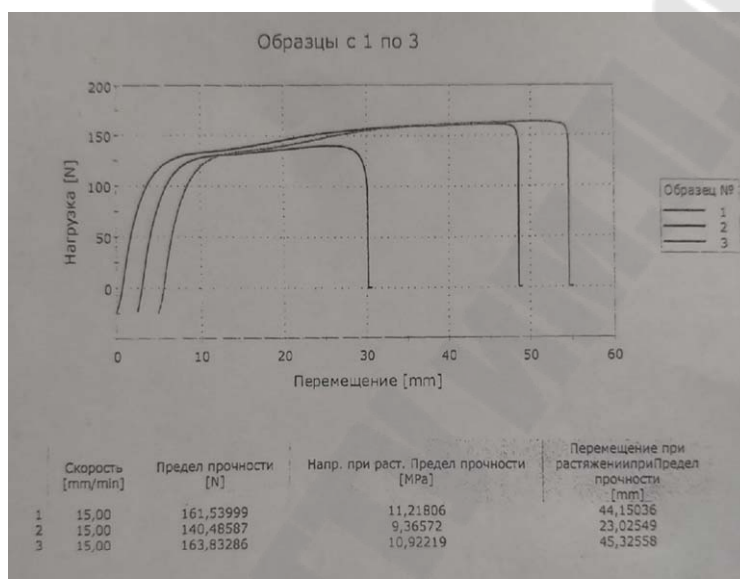


Рис. 4. Кривая растяжения для образцов вида «лопатка»

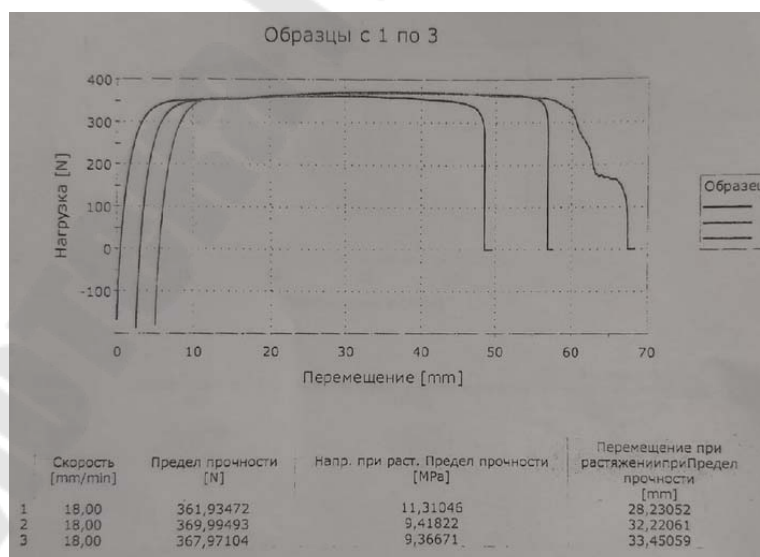


Рис. 5. Кривая растяжения для образцов вида «полоса»

На диаграмме растяжения материалов можно выделить несколько характерных участков. Прямолинейный участок соответствует упругой деформации образца. Дальнейшее возрастание нагрузки приводит к появлению пластической (остаточной) деформации. Причем у некоторых материалов наблюдается интенсивная пластическая деформация при неизменной нагрузке. Такой участок диаграммы называется площадкой текучести. До максимальной нагрузки происходит равномерная деформация образца по всей его рабочей части. А затем образец в наиболее слабом месте утончается (это место называется шейкой), и на следующем участке идет пластическая деформация при снижении нагрузки. В некоторой точке происходит окончательное разрушение образца с разделением его на две части. Проведя анализ полученных диаграмм, описанные выше участки обозначают точками – А,В,С,Д.

По диаграмме определяют характеристики механических свойств полимерного материала. Причем в качестве характеристики прочности принимают не нагрузку P , а σ - условное напряжение определяемое отношением нагрузки к площади начального поперечного сечения образца F_0 :

$$\sigma = \frac{P}{F_0}$$

По оси абсцисс откладывается относительное удлинение δ или $\epsilon = \Delta l / l_0$ (в о. е.) или $\epsilon \Delta = \Delta l / l_0 \cdot 100 \%$.

Диаграмма напряжений называется условной, потому что напряжения найдены по начальной площади поперечного сечения образца F_0 , и не учитывает уменьшения сечения. По этой диаграмме определяются основные характеристики прочности и пластичности. Если в процессе испытания постоянно измерять диаметр образца и вычислять истинное напряжение с учетом сужения, то на этой диаграмме напряжение возрастает вплоть до разрыва образца (рис.6).

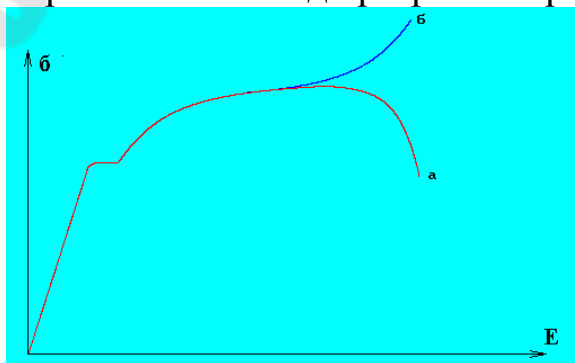


Рис. 6. Диаграммы напряжений:
а – условная; б – истинная

На кривых полученных диаграмм наносят точки, соответствующие:

- пределу прочности материала;
- пределу пропорциональности;
- пределу текучести.

По данным измерений образцов и диаграмм рассчитывают относительное удлинение при разрыве.

В выводах приводят числовые данные по прочности материалов.

Контрольные вопросы

1. Из каких основных элементов состоит испытательная машина?
2. Какие образцы используются для испытания?
3. Какой вид имеет диаграмма растяжения $P = f(d^{\ell_m})$?
4. Какой вид имеют условная и истинная диаграммы $\sigma = f(\delta)$?
5. Как определяется предел пропорциональности?
6. Как определяется предел текучести?
7. Как определяются предел прочности и напряжение при разрыве?
9. Как определяется относительное остаточное удлинение?

Лабораторная работа № 22

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТВЕРДОСТИ (МИКРОТВЕРДОСТИ) ПОЛИМЕРНЫХ И КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Теоретическая часть

Твердостью называется свойство материала оказывать сопротивление проникновению в него другого более твердого тела (индентора), не испытывающего остаточной деформации. Внедряемый (вдавливается) индентор имеет определенную форму и размеры и не должен получать остаточную деформацию от действия прикладываемых к нему статических или динамических нагрузок. Измерение твердости является одним из самых распространенных и доступных методов механических испытаний, который широко используется в исследовательских целях и как средство (способ) контроля качества свойств материалов в производстве. В отличие от других, испытания на твердость очень разнообразны и отличаются друг от друга по форме используемого индентора, условиям приложения нагрузки, способам расчета величины твердости, времени нагружения, твердости испытываемого материала, размерами детали (образца), толщине слоя, твердость которого нужно замерить и т. д. В зависимости от этих факторов твердость может характеризовать упругие и упруго-пластические свойства, сопротивление малым или большим деформациям, а также разрушению. Общим моментом для них является приложение нагрузки при контакте индентора и испытываемого материала. Условия определения твердости, требования к оборудованию, приборам и образцам и т. д. регламентируются государственными стандартами (ГОСТами).

Оценивается твердость так называемыми числами твердости, размерность которых определяется принципом измерения. Числа твердости являются вторичными, производными характеристиками механических свойств, зависящими от первичных, основных – модуля упругости, временного сопротивления и др., от продолжительности действия нагрузки, от способа испытаний и вычисления твердости. Поэтому сравнимые результаты, даже в пределах одного метода, получаются при строгой регламентации процедуры испытаний, которая часто определяется стандартом. Числа твердости для одного и того же материала, определяемые различными способами, получаются различным как по величине, так и по размерности. С помощью специальных таблиц, номограмм или эмпирических формул можно осуществлять пересчет чисел твердости.

В настоящее время существует около 30 разновидностей испытаний на твердость, но наибольшее распространение получили три из них – это методы измерения твердости по Бринеллю, Роквеллу, Виккерсу, а также метод измерения микротвердости. Во всех случаях контакт осуществляется вдавливанием индентора определенной формы и размера со степенью деформации 30...40%. При этом реализуется состояние всестороннего неравномерного сжатия с коэффициентом “мягкости” $\alpha > 2$, что позволяет производить оценку твердости практически любых, в том числе и очень хрупких материалов.

Учитывая неизбежный разброс значений твердости, обусловленный как ошибками измерения, так и неоднородностью механических свойств материала, испытаниям подвергается обычно несколько образцов, а на каждом образце делают несколько вдавливаний индентора. Затем проводят статистическую обработку результатов испытаний, без которой нельзя делать достоверные выводы. При этом число измерений принято называть «выборкой».

Испытание на твердость – простой метод неразрушающего контроля. Экспериментально доказано, что его результаты коррелируют со статистическими характеристиками механических свойств, например, можно статистически достоверно, т.е. с определенной статистической погрешностью – стандартной ошибкой, определять временное сопротивление σ_v . Она также служит для косвенного суждения с определенной точностью о других характеристиках материала – пределе текучести, временном сопротивлении, склонности к ползучести и др.

Измерение твердости получило широкое распространение, как в заводской практике, так и при выполнении научных исследований. Такие испытания используются в следующих целях:

- для оценки твердости сплавов как характеристики, косвенно отражающей механические свойства;
- для контроля за качеством термических обработок, вызывающих изменение свойств в поверхностном слое, например, цементации, поверхностной закалки, электрохимической обработки и др.;
- для контроля за изменением механических свойств с течением времени эксплуатации (например, контроль за состоянием трубопроводов).

Испытания на твердость менее сложны и не дорогостоящи: они позволяют определять механические свойства и в небольших объемах, допускают текущий контроль изделий в процессе производства и эксплуатации, не влияют на их работоспособность и, что особенно

ценно, относятся к неразрушающим методам механических испытаний.

Цель работы: изучить оборудование и методики для определения твердости металлов, определить применимость этих методов для полимерных и композиционных материалов, определить твердость (микротвердость) образцов различных полимерных материалов.

Экспериментальная часть

Объекты и оборудование: в качестве объектов использовались различные виды полимеров и композиционных материалов, а также для сравнения металлические образцы. Требования к образцам и приборам при определении твердости оговариваются соответствующими ГОСТами. Стандарты предусматривают следующие основные требования при измерении твердости.

1) Поверхность испытываемого образца должна быть тщательно подготовлена и свободна от окалины и других посторонних веществ. При подготовке поверхности надо принять меры предосторожности против возможного наклепа или нагрева поверхностного слоя в результате механической обработки.

2) Испытуемый образец должен быть без короблений и лежать на столике прибора устойчиво. Необходимо обращать особое внимание на качество поверхности образца не только со стороны внедрения индентора, но и с обратной стороны, которой он кладется на предметный столик прибора – она должна быть ровной, без местных выступов (например, не допускается с этой стороны наличие даже мелких отпечатков от шарика, конуса или пирамиды). Это объясняется тем, что под действием нагрузки выступы будут сминаться, что приведет к кажущемуся уменьшению твердости в результате увеличения размера h . Требования этого пункта имеют особое значение при определении твердости по Роквеллу.

Используемое оборудование было представлено твердомерами типа ТВ 5004 (Бринелль) и ТК (Роквелл) для определения твердости материалов по Бринеллю, Роквеллу и Виккерсу.

Устройство и принцип работы прибора Бринелля приведены на рис. 1.

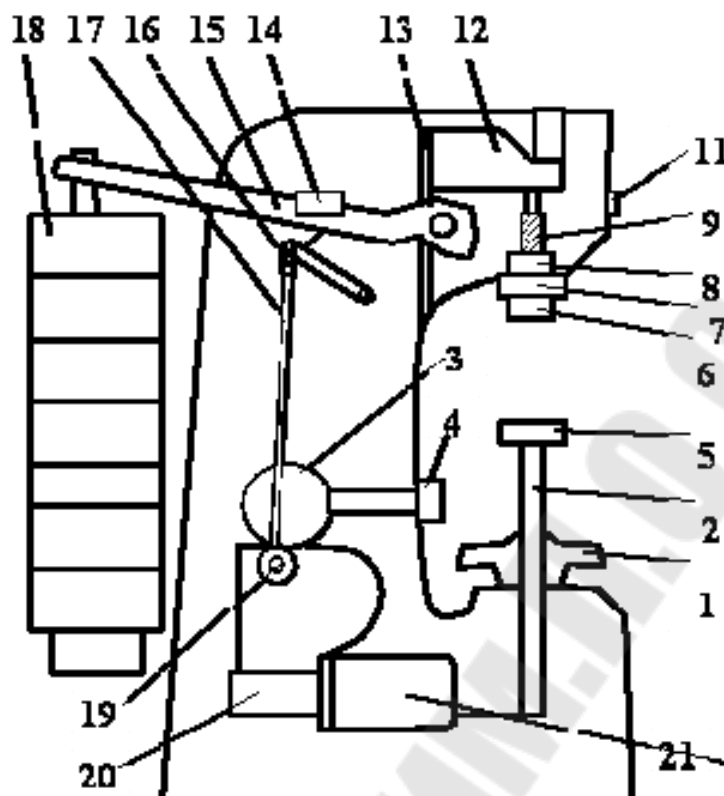


Рис. 1. Схема прибора для определения твердости по Бринеллю

Основными частями прибора являются:

1. Шпиндель 6, в который вставляются сменные инденторы с шариками разного диаметра.
2. Подвеска 18 с набором грузов.
3. Маховик 1, перемещающий опорный столик 5 с образцом в вертикальном направлении.
4. Система рычагов 12, 15, 17-19, передающих нагрузку на испытуемый образец.
5. Электродвигатель 21, обеспечивающий работу прибора.
6. Пульт управления с переключателями режима работы, сигнальными лампами “контроль”, “выдержка”, “сеть”, реле времени.
7. Кнопки “пуск” и “стоп”.

Устройство и принципиальная схема твердомера Роквелла приведена на рис. 2.

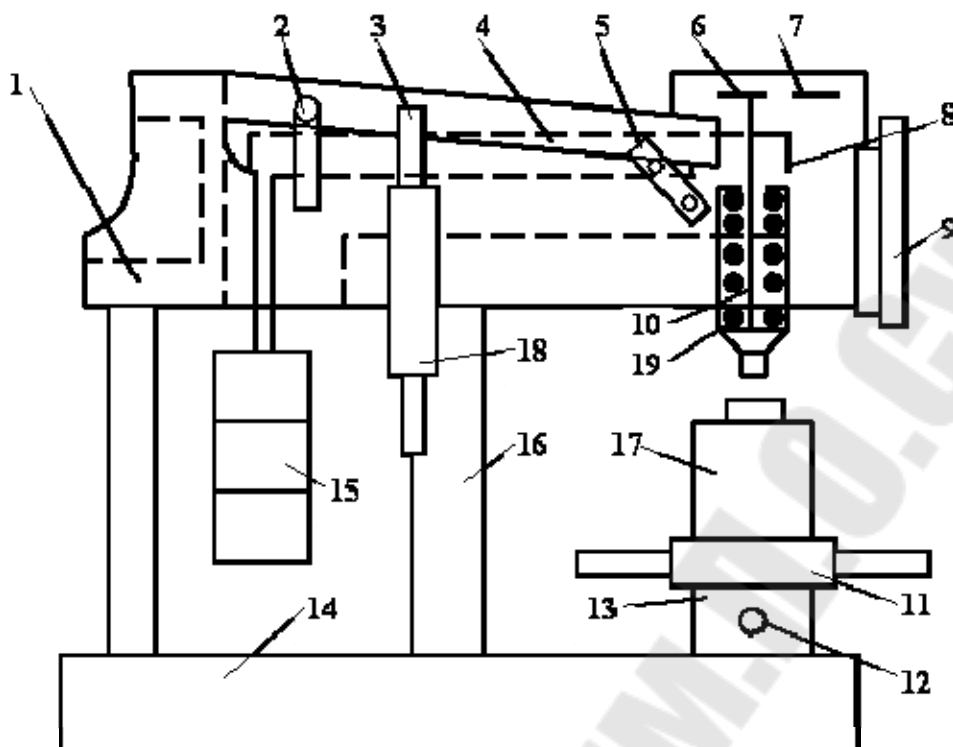


Рис. 2. Прибор для измерения твердости по Роквеллу

Основными его частями являются: поперечина 1, подвеска 2, шток амортизатора 3, рычаг 4, рукоятка 5, винт 6, крышка 7, рычажок 8, призма 9, шпиндель 10 с закрепленным на его конце индентором, маховик 11 для перемещения образца, шпонка 12, направляющая втулка 13, станина 14, грузы 15, стойка 16, подъемный винт 17, масляный амортизатор 18, пружина 19, индикатор с двумя шкалами – черной (С) и красной (В). При этом с большой стрелкой индикатора всегда совмещается нуль черной шкалы, и ни в коем случае – красной. Барабан для точной установки шкалы индикатора на нуль, электромотор, обеспечивающий работу прибора.

Устройство для измерения микротвердости по Виккерсу показаны на рис. 3.

Прибор для определения микротвердости состоит из механизма для вдавливания алмазной пирамиды под небольшой нагрузкой и металлографического микроскопа.



Рис. 3. Прибор для определения микротвердости по Виккерсу

Определение твердости по Бринеллю. Метод измерения твердости металлов по Бринеллю заключается во вдавливании индентора (шарика) стального, твердого сплава, полимера или композиционного материала диаметром D в образец (изделие) под действием силы, приложенной перпендикулярно поверхности образца в течение определенного времени, и измерении диаметра отпечатка d после снятия силы (рис. 4).

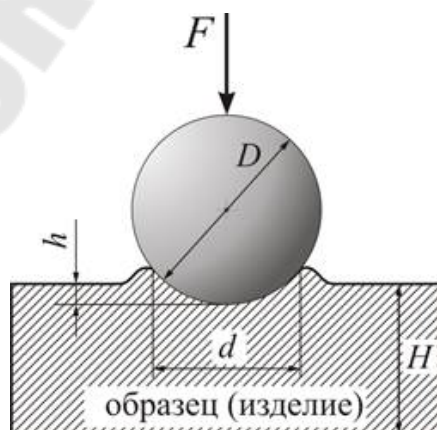


Рис. 4. Вид деформированного образца после вдавливания шарика

Измерение твердости по методу Бринелля осуществляется на твердомере типа ТВ 5004 по стандартизированной методике. В качестве индентора применяются шарики диаметром 1; 2,5; 5,0 и 10 мм, изготовленные из термически обработанной высокоуглеродистой стали с чистотой поверхности по двенадцатому классу. Выбор диаметра шарика, нагрузки и времени нагружения производится по таблице 1.

Величину твердости по Бринеллю рассчитывают как отношение усилия F , действующего на шарик, к площади поверхности сферического отпечатка A :

$$HB (HBW) = F/A = 2F / \pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2}), \quad (1)$$

где HB – твердость по Бринеллю при применении стального шарика; (HBW твердость по Бринеллю при применении шарика из твердого сплава), МПа (кгс);

F – усилие, действующее на шарик, Н (кгс);

A – площадь поверхности сферического отпечатка, мм²;

D – диаметр шарика, мм;

d – диаметр отпечатка, мм.

Одинаковые результаты измерения твердости при различных размерах шариков получаются только в том случае, если отношения усилия к квадратам диаметров шариков остаются постоянными. Исходя из этого, усилие на шарик необходимо подбирать по следующей формуле:

$$F = K \cdot D \quad (2)$$

Диаметр шарика D и соответствующее усилие F выбирают таким образом, чтобы диаметр отпечатка находился в пределах:

$$0,24 \cdot D \leq d \leq 0,6 \cdot D \quad (3)$$

Если отпечаток на образце получается меньше или больше допустимого значения d , то нужно увеличить или уменьшить усилие F и произвести испытание снова. Коэффициент K имеет различное значение для материалов разных групп по твердости. Численное, же значение его должно быть таким, чтобы обеспечивалось выполнение требования, предъявляемого к размеру отпечатка (3). Толщина образца должна не менее, чем в 8 раз превышать глубину отпечатка.

Твердость по Бринеллю выражается в кг/мм², но по стандарту размерность обычно не записывается. В то же время в системе СИ она указывается – МПа. Верхний предел измерения твердости этим методом составляет $HB 450$, так как при испытании более твердых мате-

риалов происходит деформация шарика, превышающая стандартизированный допуск.

Для получения одинаковых значений твердости при испытаниях одного и того же материала инденторами разных диаметров необходимо, чтобы соблюдалось соотношение между размером шарика и действующей на него нагрузкой $K=F/D^2$. Отношение K подбирается из ряда значений, приводимых в ГОСТе, с учетом свойств испытуемого металла так, чтобы соотношение между диаметрами шарика и отпечатка было в некотором диапазоне ($d/D=0,24\dots 0,6$). Например, для сталей и высокопрочных сплавов ГОСТ рекомендует принимать отношение $K=30$, для цветных металлов и сплавов принимают $K=10$, а для очень мягких металлов $K=2,5$ (подшипниковые сплавы) или $K=1$ (свинец, олово, полимеры).

На практике по диаметру d отпечатка находят число твердости HV , используя таблицы, составленные для каждого из рекомендуемых соотношений F и D . Возможно определять глубину h внедрения шарика путем расчетов.

Пластическое деформирование материала в окрестности внедряемого индентора связано со структурными изменениями, происходящими в нем. Длительность протекания этих изменений зависит от свойств материала. Для черных металлов достаточно 10...15 секунд выдержки под нагрузкой, для большинства цветных – 30 секунд. В некоторых случаях для завершения пластического течения устанавливают 180 секунд или особо оговаривают условия испытания.

Когда твердость испытуемого металла соизмерима с твердостью индентора – стального шарика, то вследствие деформации шарика искажается форма отпечатка, что влияет на точность результатов. Во избежание существенных ошибок (из-за смятия шарика) обычно вводится ограничение на применение метода Бринелля: испытывают материалы с твердостью не превышающей 450 HV . Для испытаний более твердых материалов используют либо шарик из твердого сплава, либо другие методы, например, Виккерса или Роквелла, где индентором служит алмаз – самый твердый материал из известных в природе.

Твердость по Бринеллю обозначают символом HV (*Hardness Brinell*) или HBW (*Hardness Brinell Wolfram carbide*):

- HV – при применении стального шарика (твердость детали менее 450 единиц);

- HBW – при применении шарика из твердого сплава (твердость детали более 450 единиц).

Символу *HB* (*HBW*) предшествует числовое значение твердости (с округлением до трех значащих разрядов), а после символа указывают диаметр шарика [мм], значение приложенной силы [кгс], продолжительность выдержки [с], если она отличается от 10 или 15 секунд.

Примеры обозначений:

- 250 *HB* 5/750 – твердость по Бринеллю 250, измеренная стальным шариком диаметром 5 мм, при нагрузке 750 кгс (7355 Н) и продолжительности выдержки 10-15 с;

- 575 *HBW* 2,5/187,5/30 – твердость по Бринеллю 575, измеренная шариком из твердого сплава диаметром 2,5 мм, при нагрузке 187,5 кгс (1839 Н) и продолжительности выдержки под нагрузкой 30 с.

При определении твердости стальным шариком (или шариком из твердого сплава) диаметром 10 мм при нагрузке 3000 кгс (29420 Н) и продолжительности выдержки 10...15 секунд твердость по Бринеллю обозначают только числовым значением твердости и символом *HB* или *HBW* (например, 300 *HB*).

Таблица 1.

Определение твердости различных материалов методом Бринелля

Материал	Интервал чисел твердости по Бринеллю, HB	Толщина испытуемого образца, мм	Диаметр шарика, мм	Нагрузка, кН	Выдержка под нагрузкой, с
Черные металлы	130...450	От 6 до 3 вкл.	10	29420	От 10 до 15
		От 4 до 2 вкл.	5	7355	
		Менее 2	2,5	1839	
	140 и менее	Более 6	10	9807	
		От 6 до 3 вкл.	5	2452	
Цветные металлы и сплавы (медь, латунь, бронза и т.д.)	130 и более	От 6 до 3 вкл.	10	29420	От 10 до 180
		От 4 до 2 вкл.	5	7355	
		Менее 2	2,5	1839	
	35...130	От 9 до 3 вкл.	10	9807	
		От 6 до 3 вкл.	5	2452	

Цветные металлы и сплавы (алюминий, подшипниковые сплавы и т.д.)	8...35	Более 6	10	2452	
Олово, свинец	4...20	Более 6	10	981	
Алюминий, магний и их сплавы	16...100	От 6,4 до 1 вкл.	10	4903 1226	
Титан губчатый	ГОСТ 9853.8-79		10	14710	30

На приборе Бринелля проводятся 5 замеров. Образец с нанесенными отпечатками снимается с предметного столика прессы Бринелля. Измерение диаметров отпечатков производится с помощью специального отсчетного микроскопа на лабораторном столе. На рис. 5 показано изображение отпечатка, видимое в микроскоп (увеличение микроскопа обычно равно 24). Один из краев отпечатка необходимо совместить с нулевым штрихом шкалы и произвести отсчет по шкале с точностью до 1/2 деления. Видимое в микроскоп расстояние между большими штрихами соответствует одному миллиметру. Полученный размер диаметра отпечатка записывают сразу в миллиметрах. Так, на рис. 5 имеем: $d=3,40$ мм. Результаты измерения диаметров отпечатков рекомендуется записать в таблицу 2, приведенную ниже.

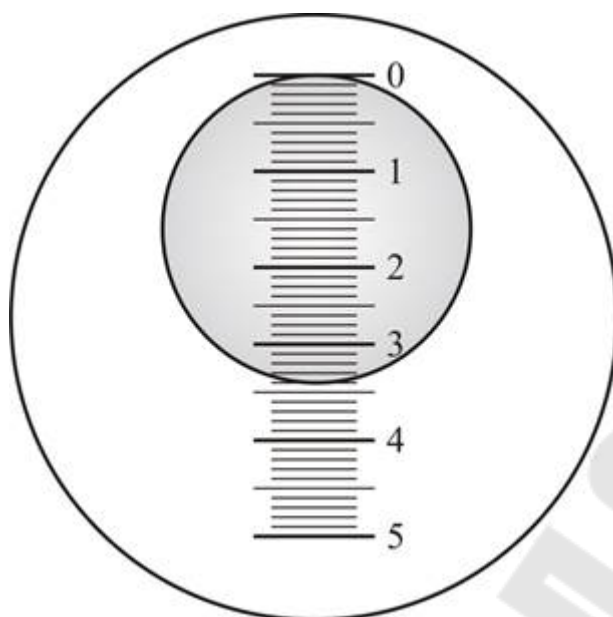


Рис. 5. Изображение отпечатка, видимое в микроскоп

Определение *НВ* по диаметру отпечатка предлагается провести с помощью таблиц или рассчитать по формуле (3).

Определение твердости по Роквеллу. Метод Роквелла был предложен в 1920 г. и в настоящее время получил самое широкое распространение. Это объясняется, во-первых, упрощенной процедурой определения твердости, когда число твердости считывается непосредственно со шкалы прибора, а во-вторых, его универсальностью – с его помощью можно испытывать массивные и тонкие образцы из твердых и мягких материалов. В качестве индентора используется алмазный конус с углом при вершине 120° и радиусом закругления 0,2 мм (шкалы А и С) и стальной шарик диаметром 1,5875 мм (1/16 дюйма) (шкала В). Процесс нагружения осуществляется под действием двух последовательно прилагаемых нагрузок – предварительной $F_0=98$ Н (10кГс) и общей F_1 .

$$F=F_0+F_1.$$

Предварительная нагрузка подается вручную и не снимается до конца испытаний, что обеспечивает повышенную точность измерений, т.к. исключается влияние вибраций и поверхностного слоя.

Нагрузка на индентор и диапазоны измерений твердости

Шкалы Роквелла	Нагрузка на индентор, кгс			Диапазоны измерений
	Предварительная	Основная	Общая	
A	10	50	60	70...85 HRA
B	10	90	100	25...100 HRB
C	10	140	150	20...67 HRC

Измерение твердости по шкале С. Если индентор внедрится в материал на глубину $h=0,2$ мм, то твердость такого материала условно считается равной нулю. Если же под действием той же нагрузки F индентор не внедряется в материал (пластическая деформация равна нулю), то твердость такого материала принято считать равной 100 единицам Роквелла. Таким образом, за единицу твердости принята величина, соответствующая перемещению индентора на 0,002 мм. Применение такой «перевернутой» шкалы обосновано тем, что глубина внедрения индентора обратно пропорциональна твердости материала. Поэтому твердость материала будет характеризоваться величиной $(h-e, \text{мм})$ или числом делений по шкале:

$$HRC = (h-e)/h * 100 \quad (3)$$

Из формулы (3) очевидно, что «единица Роквелла» (в отличие от единиц Бринелля и Виккерса) оказывается величиной безразмерной.

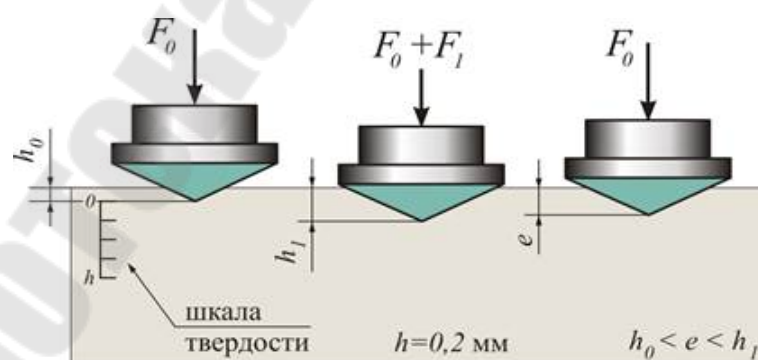


Рис. 6. Схема определения твердости методом Роквелла (шкалы А, С)

Измерение твердости по шкале А. Шкалу *A* (идентична шкале *C*) применяют для измерения твердости преимущественно листовых материалов. Из-за снижения нагрузки на индентор в 2,5 раза и уменьшения вследствие этого глубины проникновения индентора минимальную толщину испытуемого образца или изделия удается снизить до 0,4...0,7 мм.

Измерение твердости по шкале В. Для многих мягких металлов и сплавов внедрение алмазного конуса может оказаться бóльшим, чем 0,2 мм. В этом случае число твердости, вычисляемое по формуле (6), станет отрицательным (поскольку $h < e$), что лишено физического смысла и не может характеризовать твердость материала. В этих случаях применяют следующие меры:

- заменяют конический индентор на сферический;
- снижают нагрузку на индентор в 1,5 раза (со 150 кгс до 100 кгс);
- смещают шкалу на 30 единиц (шкала *B* красного цвета).

Число твердости определяется при этом по формуле:

$$HRC = (h - e) / h * 100 + 30. \quad (4)$$

Шкала *B* применяется для измерения твердости не закаленной стали, бронзы, латуней и других нетвердых материалов. Для твердых – например, закаленные стали, используется шкала *C*, вдавливание осуществляется алмазным конусом под нагрузкой 1470 Н (150 кгс). Испытания очень твердых материалов и тонких поверхностных слоев также осуществляется алмазным конусом, но по шкале *A* под нагрузкой 588 Н (60 кгс). К достоинствам метода относится простота определения твердости, высокая производительность, возможность полной автоматизации процедуры испытаний. К недостаткам – многошкальность, отсутствие геометрического подобия отпечатков, условность и безразмерность величины *HR*, сравнительно низкая чувствительность. Все эти факторы делают метод Роквелла лишь средством быстрого упрощенного технического контроля.

Твердость указывается в единицах *HR* (*Hardness Rockwell*) с добавлением обозначения шкалы (*HRA*, *HRB*, *HRC*), которому предшествует числовое значение твердости из трех значащих цифр.

Пример обозначения: 61 *HRC* – твердость 61 единиц Роквелла по шкале *C*.

Определение твердости по Виккерсу.

Определение микротвердости (твердости в микроскопически малых объемах) проводят при исследовании отдельных структурных

составляющих сплавов, тонких покрытий, а также при измерении твердости мелких деталей, пластмасс. Прибор для определения микротвердости состоит из механизма для вдавливания алмазной пирамиды под небольшой нагрузкой и металлографического микроскопа. В испытываемую поверхность вдавливают алмазную пирамиду под нагрузкой 0,05...5 Н.

Микротвердость измеряют путем вдавливания в образец (изделие) алмазного индентора под действием статической нагрузки P в течение определенного времени выдержки. Число твердости определяют (как и по Виккерсу) делением приложенной нагрузки в Н или кгс на условную площадь боковой поверхности полученного отпечатка в мм^2 .

Основным вариантом испытания является так называемый метод восстановленного отпечатка, когда размеры отпечатков определяются после снятия нагрузки. Для случая, когда требуется определение дополнительных характеристик материала (упругое восстановление, релаксация, ползучесть при комнатной температуре и др.) допускается проводить испытание по методу не восстановленного отпечатка. При этом размеры отпечатка определяют на глубине вдавливания индентора в процессе приложения нагрузки.

Практически микротвердость определяют по стандартным таблицам для конкретной формы индентора, нагрузки P и полученных в испытании размеров диагоналей отпечатка. В качестве инденторов используют алмазные наконечники разных форм и размеров в зависимости от назначения испытания микротвердости. Основным и наиболее распространенным наконечником является четырехгранная алмазная пирамида с квадратным основанием (по форме подобна индентору, применяющемуся при определении твердости по Виккерсу). Число микротвердости обозначают цифрами, характеризующими величину твердости со стоящим перед ними символом H с указанием индекса формы наконечника, например, $H_{\square} = 3000$. Допускается указывать после индекса формы наконечника величину прилагаемой нагрузки, например: $H_{\square 0,196} = 3000$ - число микротвердости 3000 Н/мм^2 , полученное при испытании с четырехгранной пирамидой при нагрузке 0,196 Н. Размерность микротвердости (Н/мм^2 или кгс/мм^2) обычно не указывают. Если микротвердость определяли по методу невосстановленного отпечатка, то к индексу формы наконечника добавляют букву h ($H_{\square h}$).

Метод Виккерса является одним из наиболее совершенных и распространенных в лабораторной практике методов определения

твердости. Высокая твердость и недеформируемость алмаза обеспечивает большую точность определения твердости. Это особенно важно при испытании твердых материалов (более $500 \text{ кгс/мм}^2 \approx 4904 \text{ Н}$). Ценность метода состоит также в том, что вследствие малых нагрузок вдавливания удается испытывать тонкие образцы, а также определять твердость непосредственно поверхностных слоев (например, поверхности азотированной стали). Можно определять твердость мелких готовых изделий, не разрушая и не портя их вследствие малой величины отпечатка.

Твердость по Виккерсу указывается в единицах HV (*Hardness Vickers*) и определяется как частное от деления нагрузки F [кгс], приложенной к пирамиде, на площадь поверхности отпечатка A [мм^2], т. е. к поверхности углубления в форме пирамиды:

$$HV = 1,854 (F/d^2), \text{ кгс/мм}^2, \quad (5),$$

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

Измерение диагоналей производят с помощью микроскопа. Число твердости находят по специальным таблицам.

Твердость по Виккерсу при силовом воздействии 30 кгс (294,2 Н) и времени выдержки под нагрузкой 10...15 секунд обозначают цифрами, характеризующими величину твердости и буквами HV . При этом окончательный результат принято округлять до трех значащих разрядов (как и по Бринеллю).

Пример обозначения: 500 HV – твердость по Виккерсу, измеренная при нагрузке 30 кгс и времени выдержки 10...15 секунд.

При других условиях испытания после букв HV указывают нагрузку и время выдержки.

Числа твердости по Бринеллю и по Виккерсу имеют одинаковую размерность (кгс/мм^2) и до HV 350...400 их величины совпадают между собой. При HV больше 400 твердость по Бринеллю оказывается заниженной. Для получения точных результатов при измерении твердости по Виккерсу необходимо строго соблюдать следующие условия:

1. отношение толщины образца к диагонали отпечатка должно быть не менее 1,5;
2. отношение глубины отпечатка к его диагоналям – 1/7;
3. расстояние между центром и краем образца, а также краем соседнего отпечатка должно быть не менее 2,5 диагоналей отпечатка;

4. испытания проводить на тщательно отшлифованной или полированной поверхности.

На приборе Виккерса можно измерять твердость образцов толщиной до 0,3...0,5 мм или поверхностных слоев толщиной до 0,03...0,05 мм. Однако следует учитывать, что при небольшой нагрузке (1 кгс) отпечаток пирамиды может быть недостаточно отчетливым. Поэтому при измерении твердости очень тонких поверхностных слоев, например, цианированного слоя толщиной 0,04...0,06 мм, лучше применять нагрузку 5 кгс, а для измерения твердости азотированного слоя стали толщиной до 0,05 мм – нагрузку 5 или 10 кгс. При обозначении твердости по Виккерсу указывают величину применяемой нагрузки: *HV5*, *HV10* и т. д. При испытании твердых и других слоев (азотированного, цианированного) около углов отпечатка иногда появляются трещины, по виду которых можно судить о хрупкости исследуемого слоя.

Очевидно, что для полимеров ввиду их низкой твердости лучше всего использовать метод Виккерса. Для измерения нагрузку от 1 до 500 г (от 0,01 до 5 Н). В качестве индентора использовать алмазную пирамиду и измерять величину отпечатка с помощью микроскопа. Отпечаток твердомера Виккерса показан на рис.7 в светлом и темном поле. Его размер по диагонали составляет порядка 300 мкм.

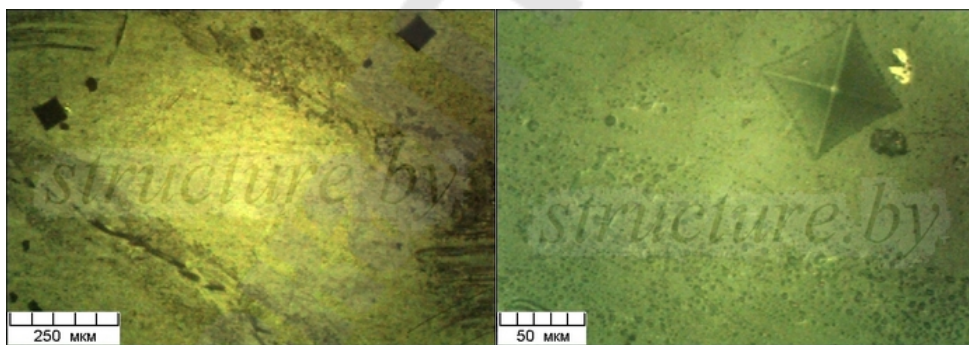


Рис. 7. Отпечаток внедрения индентора

Размер отпечатка измеряют оптическим способом, для чего образец разгружают и индентор убирают. В пластмассовом образце за время этих действий происходит восстановление упругой деформации, в следствие чего размер отпечатка отличается от истинного, достигнутого при внедрении индентора. Как правило, в этих случаях истинное значение твердости меньше вычисленных по результатам измерений. В связи с изложенным ГОСТ 4670-70 предписывает для определения твердости пластмасс использовать метод Бринелля с

замером глубины или ее вычислением вдавливания шарика из закаленной стали диаметром 5 мм. И твердость определять не как обычно по диаметру отпечатка, оставляемому металлическим шариком, вдавливаемым в поверхность, а как отношение усилия, приложенного к шарiku, к площади отпечатка, (причём площадь отпечатка берётся как площадь части сферы, а не как площадь круга.

Образец устанавливают на поворотный столик прибора и вращением маховика поднимают столик до соприкосновения образца с индентором. При этом создают предварительное усилие прижатия величиной до 10 Н. Устанавливают стрелку индикатора на ноль. Далее задают необходимое усилие сменными грузами на нагружающем рычаге. Продолжительность приложения нагрузки – 2 мин. Глубину вдавливания индентора определяют по показаниям индикатора часового типа по истечении заданного времени. Разгружают индентор без изменения положения образца и измеряют глубину h_1 по показаниям индикатора через 1 мин после снятия нагрузки. Эксперимент проводят не менее пяти раз на одном образце, выбирая различные точки для приложения индентора.

По результатам эксперимента определяют значение твердости, упругость и пластичность материала, значение коэффициента Пуассона, оценочные значения разрушающего напряжения и предела текучести по эмпирическим зависимостям.

Значение твердости по Бринеллю (НВ) рассчитывают по формуле:

$$\text{НВ} = \frac{F}{p \cdot d \cdot h},$$

где F – усилие, приложенное к индентору, Н;

d – диаметр шарика, мм;

h – глубина вдавливания шарика, мм.

Необходимо отметить, что таким методом можно определить и другие показатели полимеров:

Число упругости $У$ в процентах рассчитывают по уравнению

$$У = \frac{h - h_1}{h} \cdot 100\%.$$

Число пластичности $П$ оценивают из соотношения

$$П = 100 - У.$$

По известным значениям h и h_1 можно оценить приближенно величину модуля упругости при сжатии E :

$$E = \frac{F}{3 \cdot h_1 \cdot \sqrt{h \cdot d}}.$$

Величину коэффициента Пуассона ν оценивают по уравнению

$$\nu = \sqrt{1 - \frac{4 \cdot K_h \cdot d \cdot E}{6 \cdot F}},$$

где $K_h = 1 - \frac{h_1}{h}$.

Разрушающее напряжение σ_p или предел текучести σ_T определяют через значение НВ

$$y_p \approx 0,87 \cdot \text{НВ}^{0,93}, \quad y_T \approx 0,35 \cdot \text{НВ}^{0,93}.$$

Испытание по Роквеллу определяет твердость пластиков после упругого восстановления деформации образца при испытании. В этом заключается отличие этого метода от испытаний на твердость по Бринеллю: при этих испытаниях твердость определяют по глубине проникновения под нагрузкой и, следовательно, исключают любое упругое восстановление деформации материала. По этому значению по Роквеллу не могут быть непосредственно соотнесены со значениями твердости по Бринеллю.

Несмотря на преимущество метода Виккерса, дающего возможность измерять как мягкие, так и твердые материалы различной толщины, измерение твердости занимает много времени и требует тщательной подготовки поверхности. Существуют и другие методы определения твердости.

Замечание о переводе чисел твердости. Во всех нормативных документах указано, что общего точного перевода чисел твердости, измеренных различными методами (или определения прочности по твердости), не существует. Однако результаты проведенных многочисленных экспериментов указывают на то, что имеются, хотя и приближенные, но достаточно устойчивые зависимости, которые приведены в таблице 3.

Таблица 3

Сопоставление чисел твердости, измеренных различными методами:
Бринелля, Виккерса или Роквелла

НВ, НV («единицы твердости» соответст- венно по Бринел- лю и Вик- керсу)	HRB («едини- цы твер- дости» по Рок- веллу)	σ_B (МПа)	НВ, НV («единицы твердости» соответственно по Бринеллю и Виккерсу)	HRC («едини- цы твер- дости» по Рок- веллу)	σ_B (МПа)
100	52,4	333	245	21,2	815
105	57,5	350	250	22,1	835
110	60,9	362	255	23,0	855
115	64,1	382	260	23,9	865
120	67,0	402	265	24,8	880
125	69,8	410	270	25,6	900
130	72,4	430	275	26,4	910
135	74,7	450	280	27,2	930
140	76,6	470	285	28,0	950
145	78,3	480	290	28,8	970
150	79,9	500	295	29,5	980
155	81,4	520	300	30,2	1000
160	82,8	530	310	31,6	1030
165	84,2	550	320	33,0	1060
170	85,6	565	330	34,2	1090
175	87,0	580	340	35,3	1120
180	88,3	600	350	36,3	1150
185	89,5	620	360	37,2	1180
190	90,6	640	370	38,1	1200
195	91,7	650	380	38,9	1230
200	92,8	665	390	39,7	1260
205	93,8	685	400	40,5	1290
210	94,8	695	410	41,3	1305
215	95,7	715	420	42,1	1335
220	96,6	735	430	42,9	1365
225	97,5	745	440	43,7	1385
230	98,4	765	450	44,5	1410
235	99,2	785	460	45,3	1440
240	100	795	470	46,1	1480

Контрольные вопросы

1. Что такое твердость?
2. Классификация методов измерения твердости.

3. Сущность измерения твердости по Бринеллю.
4. До какого значения твердости при испытании по Бринеллю используются стальные шарики?
5. Какого диаметра шарики используются при испытании на твердость по Бринеллю?
6. Из каких условий выбирается диаметр шарика при испытании на твердость по Бринеллю?
7. Пример записи твердости по Бринеллю?
8. Сущность измерения твердости по Роквеллу?
9. При замере какой твердости снимается отсчет показаний по шкалам А, С, В?
10. Пример формы записи твердости по Роквеллу?
11. Особенности показателя твердости для полимеров.
12. Чем отличается методика измерения микротвердости от методик по Бринеллю, Роквеллу, Виккерсу?

Лабораторная работа № 23

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДАРНОЙ ВЯЗКОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ И КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Теоретическая часть:

При обработке, а также при эксплуатации полимерных и композиционных материалов и изделий могут иметь место процессы пластической деформации, протекающие с различной скоростью. Одни детали машин могут деформироваться в течение ряда лет, другие – за малые доли секунды. При различных условиях эксплуатации изделий скорость деформации может меняться в широчайшем диапазоне. Соответственно, механические свойства материалов могут очень сильно меняться: материал может быть прочным при статических нагрузках, но раскалываться при ударных. Этот факт определяет необходимость проведения динамических испытаний, являющихся ценным, а иногда необходимым дополнением к статическим испытаниям гладких образцов.

Ударные испытания выявляют такие различия между материалами, которые не отражаются при обычных (статических) испытаниях гладких образцов. Например, значения предела прочности для мелкозернистого железа ($36,5 \text{ кгс/мм}^2$) и крупнозернистого железа ($34,5 \text{ кгс/мм}^2$) мало отличаются, тогда как в значениях ударной вязкости имеется существенное различие: $13,1 \text{ кгс м/см}^2$ и $2,6 \text{ кгс м/см}^2$ соответственно. Для полимерных материалов это различие имеет еще больший разброс.

Пластичность неоднозначно зависит от скорости деформации. В большинстве случаев при ударных испытаниях образцов характеристики пластичности оказываются ниже, чем при аналогичных статических испытаниях.

Характер изменения пластичности и вязкости (работы деформации) с увеличением скорости деформации зависит от типа разрушения – срез или отрыв. Если при заданной схеме нагружения и температуре материал разрушается путем отрыва, то сопротивление разрушению мало меняется при переходе от статической к динамической деформации. В этом случае пластичность с увеличением скорости уменьшается. Если же разрушение происходит путем среза, то сопротивление разрушению существенно возрастает с ускорением деформации, а пластичность может не меняться или тоже повышаться.

Динамические испытания на ударную вязкость проводят как при комнатной температуре, так и при повышенных и пониженных температурах. Для обеспечения соответствующего температурного режима используют термостаты, в которые помещают образцы и доводят их до нужной температуры с непрерывным контролем. Для обеспечения требуемой температуры испытания образцы перед установкой на копёр должны быть переохлаждены или перегреты исходя из того, что они могут быть испытаны не позднее чем через 5–7 с после извлечения из термостата.

Свойство материала терять вязкость, хрупко разрушаться при понижении температуры называется хладноломкостью. Хладноломкость материалов оценивается порогом хладноломкости. Порог хладноломкости – это температура, при которой происходит переход от вязкого разрушения к хрупкому разрушению, сопровождающийся резким снижением ударной вязкости.

Нижний (t_H) и верхний (t_B) пределы порога хладноломкости определяют в серии ударных испытаний при разных температурах (рис. 1).

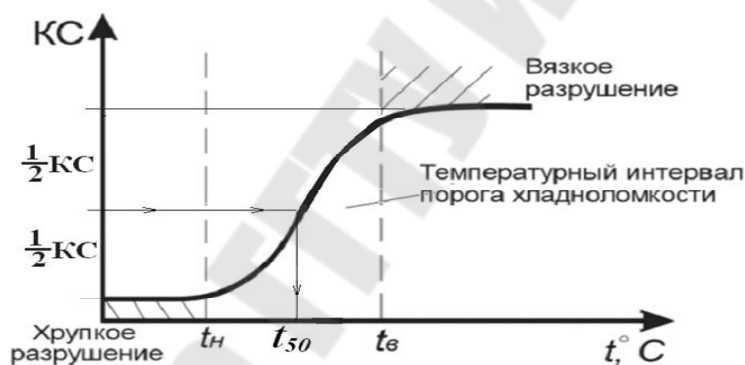


Рис. 1. Зависимость ударной вязкости от температуры и определение порога хладноломкости

Порог хладноломкости характеризуется одним числом (значением температуры полухрупкости), указывающим середину порога t_{50} (т. е. температуру, при которой ударная вязкость $КС$ снижается на 50 %).

Тип разрушения определяет вид излома металла: хрупкому разрушению соответствует хрупкий излом с блестящим, кристаллическим строением (рис. 2, а), вязкому разрушению – вязкий излом, имеющий матовое волокнистое строение (рис. 2, б).

При переходе из вязкого состояния в хрупкое меняется вид излома металла: доля волокнистой составляющей в изломе уменьшается, а кристаллической – увеличивается. При температуре t_{50} приблизительно половина излома имеет волокнистое строение.

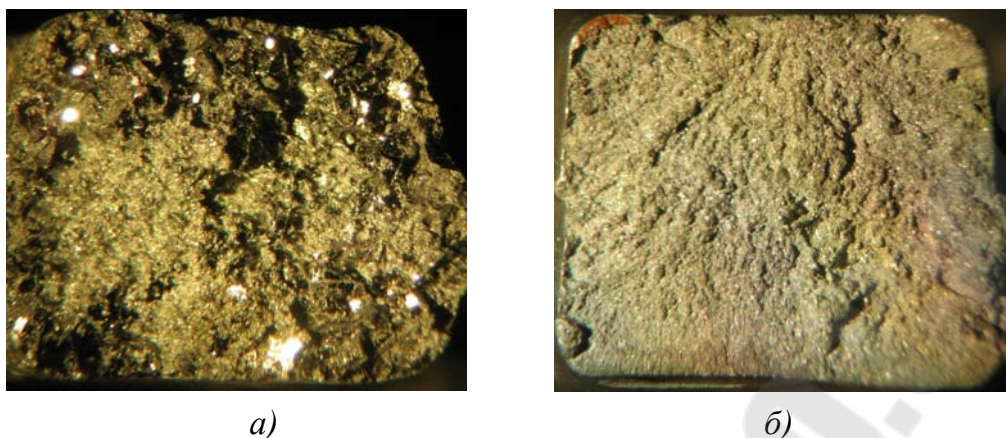


Рис. 2. Виды изломов стали: а – хрупкий; б – вязкий

Очевидно, чем выше пластические свойства материала и чем ниже температура перехода в хрупкое состояние, тем более надёжен этот материал.

Ударная вязкость в значительной мере отражает состояние поверхности образца, так как распределение деформации в образце неравномерно и часто бывает сосредоточено в основном в поверхностных слоях. Наличие твёрдых поверхностных слоёв понижает ударную вязкость, а мягкие поверхностные слои повышают её. Например, если надрезы на стальном образце, предназначенном для испытания на ударную вязкость, сделаны до термической обработки, то даже небольшое обезуглероживание поверхности, приводящее к образованию мягкого и пластичного феррита, может повысить ударную вязкость вдвое. Поэтому при ударных испытаниях предписывается изготовлять надрез на образцах. При определении ударной вязкости имеет значение и структура излома испытываемых образцов. В изломе не допускаются газовые поры, расслоения и другие дефекты.

Применять ударные испытания для чугунов, литых алюминиевых и магниевых сплавов нецелесообразно, так как сопротивление отрыву этих материалов минимально даже при статических нагрузках.

Таким образом, испытания на ударную вязкость являются одним из наиболее чувствительных методов контроля, чутко реагирующих на небольшие изменения состояния материала.

Цель работы: изучить метод определения ударной вязкости, измерить ударную вязкость образцов из различных полимеров и композиционных материалов.

Экспериментальная часть

Объекты и оборудование: Образцы из различных полимеров и композиционных материалов.

Образцы. Основная форма образца – стержень квадратного сечения 10×10 мм и длиной 55 - 100 мм. Надрез наносится по середине длины образца, преимущественно протяжкой. ГОСТ 9454-78 предусматривает образцы с концентраторами напряжений трёх видов: *U*-образным ($r = 1$ мм), *V*-образным ($r = 0,25$ мм) и *T*-образным (усталостная трещина). Трещину у вершины надреза получают при плоском циклическом изгибе образца. Число циклов, необходимое для получения трещины заданной глубины, должно быть не менее 3000. Форма и размеры образцов для испытания соответствуют рис. 3.

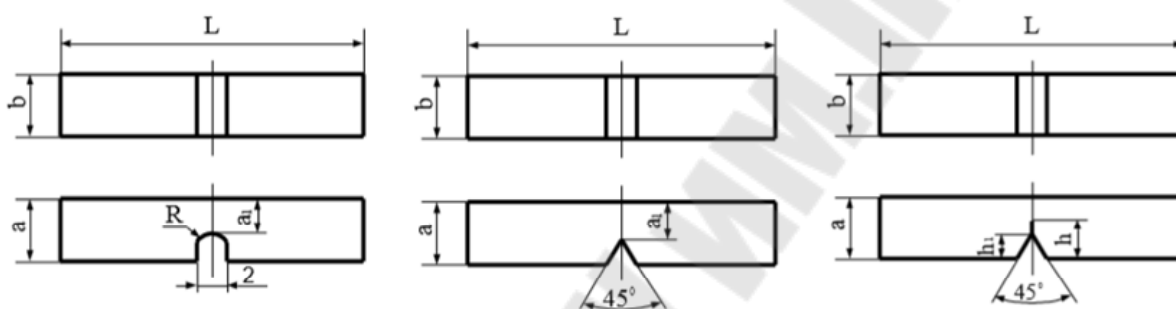


Рис. 3. Форма и размеры образцов для испытания

В настоящее время испытания на ударную вязкость проводят при температуре $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ на маятниковых копрах (рис. 4), на образцах с концентраторами различной формы. Характеристики копра МК-30А представлены в табл. 1. Число «30» в маркировке копра показывает максимальную работу удара в кг·м, которую может совершать маятник при проведении испытаний.

Оборудование. Штангенциркуль, измерительная линейка, маятниковый копёр.

Таблица 1

Основные технические данные маятникового копра МК-30А

Характеристика	Значение
Тип копра	маятниковый
Вид испытаний	двухопорный ударный изгиб
Подъём маятника	вручную
Расстояние между опорами	от 40 до 100 мм
Радиус закругления ножа в поперечном сечении	$3 \pm 0,5$ мм

Радиус окружности передней кромки ножа	67 мм
Угол заострения ножа молота	$40 \pm 1^\circ$
Число ступеней запаса энергии	16
Наибольший запас потенциальной энергии маятника	30 кг·м (~300 Дж)
Цена деления шкалы маятника	0,2 кг·м
Предел допустимой абсолютной погрешности измерения	$\pm 0,1$ кг·м
Скорость движения маятника в момент удара	$5 \pm 0,5$ м/с

Копёр состоит из чугунной станины в виде массивной плиты с двумя вертикальными колоннами. При испытании образец 4 устанавливается горизонтально на опоры 5 копра так, чтобы концентратор располагался симметрично относительно опор (рис. 5). Образец разрушается ударом ножа 1, закреплённого на маятнике 2, который вращается вокруг оси O и соединён с ней штангой 3. Маятник свободно падает с высоты H , определяемой углом подъёма маятника α . Направление удара – поперёк образца, со стороны, противоположной надрезу. Удар падающего маятника должен приходиться по ослабленному месту (сечению), то есть в зоне надреза. Надрез является концентратором напряжения. Чем он острее, тем сильнее действует концентратор напряжения.

Маятник, поднятый на определённый угол, обладает запасом энергии. Запас энергии определяется как произведение веса маятника на высоту подъёма его центра тяжести. В конце свободного падения маятник, встретившись с образцом и затратив на его разрушение часть энергии, поднимается на угол $\beta < \alpha$. Работу, затраченную на разрушение образца, определяют как разность запасов энергии маятника до и после удара по формуле:

$$K = G \cdot (H - H_1), \text{ кгс} \cdot \text{м},$$

где G – вес маятника, кг;

H и H_1 – высота подъёма центра тяжести маятника относительно точки встречи с образцом соответственно до и после удара.

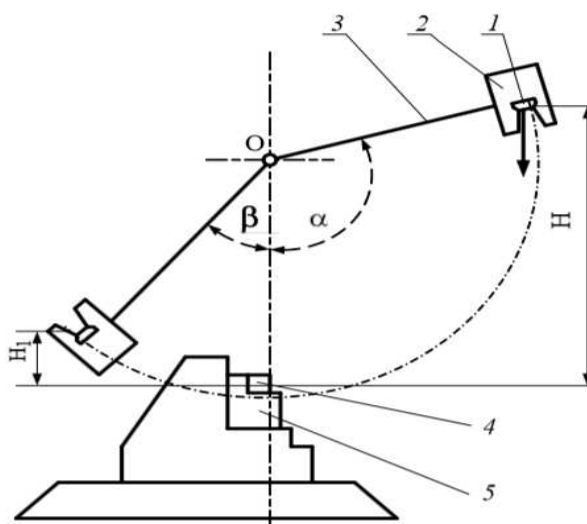


Рис. 4. Кинематическая схема маятнкового копра:

1 – нож; 2 – маятник; 3 – штанга;
4 – образец; 5 – опоры

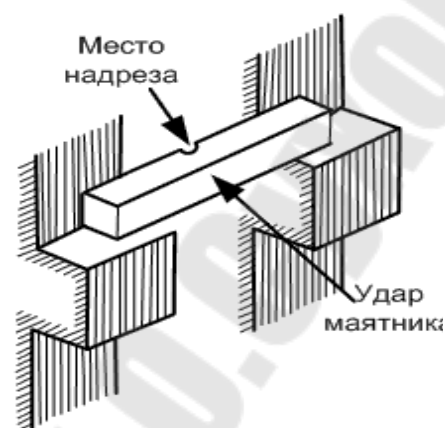


Рис. 5. Расположение образца на опорах копра

Измерительное устройство копра градуируют в единицах затраченной работы, что позволяет не вычислять работу разрушения по формуле, а отсчитывать её непосредственно по шкале измерительного устройства. Данные о затраченной работе позволяют определить ударную вязкость, под которой понимается работа удара, отнесённая к начальной площади поперечного сечения образца в месте концентратора.

Чем острее надрез, тем больше величина концентрации напряжений. Разные виды искусственных концентраторов позволяют комплексно оценить способность металлических сплавов сопротивляться разрушению, т. е. зарождению и развитию трещины.

Работу удара обозначают двумя буквами (KU , KV , KT) и цифрами. Первая буква (K) – символ работы удара, вторая буква (U , V , T) – вид концентратора. Последующие цифры обозначают максимальную энергию удара маятника, глубину концентратора и ширину образца.

Цифры не указывают при определении работы удара на копре с максимальной энергией маятника 294 Дж (300 кгс·м), при глубине концентратора 2 мм – для концентраторов U и V и 3 мм – для концентраторов вида T и ширине образца 10 мм. Ударную вязкость обозначают сочетанием букв и цифр: первые две буквы (KC) обозначают символ ударной вязкости, третья буква (U , V , T) – вид концентратора, первая цифра – максимальную энергию удара маят-

ника, вторая – глубину концентратора, третья – ширину образца. Ударную вязкость KC вычисляют по формуле

$$KC = \frac{K}{S_0}, \text{ Дж/см}^2 \text{ (кгс}\cdot\text{м/см}^2\text{)},$$

где K – работа удара, затраченная на разрушение образца, Дж (кгс·м); S_0 – начальная площадь поперечного сечения образца в месте концентратора, м^2 (см^2).

Пример обозначения ударной вязкости для стандартного образца с U -образным видом концентратора:

KCU – ударная вязкость, определённая на образце с концентратором вида U при комнатной температуре. Максимальная энергия удара маятника – 300 Дж, глубина концентратора 2 мм, ширина образца 10 мм.

Для обозначения работы удара и ударной вязкости при пониженной и повышенной температуре вводится дополнительный индекс, указывающий температуру испытания. Цифровой индекс ставят вверху, после буквенных составляющих. Примеры расшифровки обозначений:

$KV^{40} 50/2/2$ – работа удара, определённая на образце с концентратором типа V при температуре -40 °С. Максимальная энергия удара маятника 50 Дж, глубина концентратора 2 мм, ширина образца 2 мм;

$KCT^{+100} 150/3/7,5$ – ударная вязкость, определённая на образце с концентратором вида T при температуре $+100$ °С. Максимальная энергия удара маятника – 150 Дж, глубина концентратора 3 мм, ширина образца 7,5 мм.

Перед началом эксперимента определяют угол взлета маятника на холостом ходу. Для этого стрелку шкалы устанавливают в начальное положение и дают маятнику свободно падать из его верхнего положения. При правильной работе копра стрелка указателя остановится напротив нулевого положения шкалы.

Испытания проводят на трех стандартных образцах. Перед испытанием штангенциркулем измеряют толщину и ширину каждого образца в его середине с точностью до 0,01 мм и вычисляют площадь их поперечного сечения. Образец кладут на две опоры, расположенные в нижней части маятникового копра так, чтобы удар приходился по ребру образца. Маятник поднимают до верхнего положения и закрепляют с помощью специальной защелки. Стрелку на шкале устанавливают в исходное положение на ноль, затем освобождают защелку и дают маятнику падать. В нижней точке падения маятник ударяет

образец, разбивает его и отклоняется в другую сторону на определенную высоту, пропорциональную работе, затраченной на разрушение образца, и равную произведению веса маятника на разность высот его центра тяжести до и после испытаний. Одновременно при движении вверх маятник поднимает планку с указателем на высоту, фиксируемую по шкале. Удельную ударную вязкость материала рассчитывают по формуле:

$$P = A - A_0S,$$

где A -работа, совершенная маятником при разрушении образца, Н·м;

A_0 -работа, совершенная маятником при холостом ходе, Н·м;

S -площадь поперечного сечения образца, м².

Результаты испытаний и расчетов сводят в таблицу 2.

Таблица 2

Результаты испытаний и расчетов

Материал образца	Ширина образца, B	Высота образца, H	Глубина центра-тора, h	Высота рабочего сечения, H_1	Площадь поперечного сечения S_0 , см ²	Работа удара K , Дж (кгс·м)	Ударная вязкость KC , Дж/см ²
	см						

Контрольные вопросы

1. В каких случаях проводятся испытания на ударную вязкость?
2. Что такое ударная вязкость? Что такое работа удара?
3. В каких единицах измеряется ударная вязкость?
4. Какие факторы влияют на величину ударной вязкости?
5. О каких свойствах материала судят по величине ударной вязкости?
6. Как определить энергию, запасённую маятником в самом верхнем положении?
7. Как влияет расстояние между опорами установки образца на величину удельной ударной вязкости?
8. Чем принципиально отличаются образцы из металла от образцов из других материалов?
9. Как изменится ударная вязкость с изменением температуры?
10. Что понимают под температурным интервалом хрупкости?
11. В чём состоит принцип работы маятникового копра?

12. Какие материалы подвергаются испытаниям на ударную вязкость?
13. В чём сходство и различие статических и динамических испытаний?

Литература

1. Лахтин Ю.М. Материаловедение / Ю.М.Лахтин, В.П.Леонтьева, Москва, Машиностроение, 1990.-528с.
2. Материаловедение: учебник для вузов / Б.Н. Арзамасов [и др.]; Под общ. ред. Б.Н. Арзамасова. – 2-е изд. – Москва: Машиностроение, 1986.-383с.
3. Материаловедение / Б.Н. Арзамасов [и др.]. – 7-е изд. – Москва: Изд-во МГТУ им.Н.Э. Баумана, 2005.-648с.
4. Геллер Ю.А. Материаловедение / Ю.А.Геллер, А.Г. Рахштадт.- Москва: Металлургия, 1989. – 456с.
5. Худокормова Р.Н., Пантелеенко Ф.И. Материаловедение: Лабораторный практикум, Мн., Вышэйшая школа, 1988
6. Кенько В.М. Материаловедение: курс лекций. – Гомель: ГГТУ им. П.О.Сухого, 2009, 246с.
7. Зуев В.В. Физика и химия полимеров: учеб. пособие/ В.В.Зуев, М.В.Успенская, А.О. Олехнович. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2010. – 45 с.
8. Кордикова, Е. И. Композиционные материалы. Лабораторный практикум : учеб. пособие / Е. И. Кордикова. – Минск: БГТУ, 2007. – 177 с.
9. Кузнецов А.К., Захарова И.М. Лабораторный практикум, учеб. пособие ГОУВПО/ А.К.Кузнецов, И.М Захарова. Иван. гос. хим.-технол .ун-т. 2007. - 97с.
10. Лабораторные работы по дисциплине «Высокомолекулярные соединения»: Метод. указания: В 2 ч. Ч. 1 / Сост. Н.А. Козлов; Владимир. гос. ун-т. Владимир, 2004. - 48 с.
11. Материаловедение: учебное пособие / Ю.П. Егоров, Ю.М. Лозинский, Е.И. Марр и др.; Под ред. А.Г. Багинского; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2015. – 104 с.
12. Физика полимеров и композиционных материалов: сост. Романова Н.В., Шафигуллин Л.Н., Гумеров И.Ф., Гумеров А.Ф. – Набережные Челны: НЧИ (ф) КФУ, 2017. – 22с.

ОСНОВЫ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ И СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ

**Практикум
по выполнению лабораторных работ
для студентов специальности 1-36 07 02 «Производство
изделий на основе трехмерных технологий»
дневной формы обучения**

**Составители: Бобрышева Светлана Николаевна
Грудина Наталия Владимировна**

Подписано к размещению в электронную библиотеку
ГГТУ им. П. О. Сухого в качестве электронного
учебно-методического документа 30.03.21.

Рег. № 72Е.
<http://www.gstu.by>