

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Учреждение образования
«Витебский государственный технологический университет»

Конструкционные материалы

Методические указания
по выполнению лабораторных работ для студентов специальности
7-07-0712-02 «Теплоэнергетика и теплотехника»

Витебск
2024

УДК 620.22

Составитель:
В. В. Пятов

Одобрено кафедрой «Теплоэнергетика» УО «ВГТУ»,
протокол № 10 от 30.04.2024.

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским
советом УО «ВГТУ», протокол № 9 от 31.05.2024.

Конструкционные материалы : методические указания по выполнению лабораторных работ / В. В. Пятов. – Витебск: УО «ВГТУ», 2024. – 40 с.

Методические указания по выполнению лабораторных работ разработаны в соответствии с учебной программой дисциплины «Конструкционные материалы» специальности 7-07-0712-02 «Теплоэнергетика и теплотехника» дневной и заочной форм обучения.

УДК 620.22

© УО «ВГТУ», 2024

Содержание

Введение	4
1 Основные методы измерения твердости	5
2 Исследование ударной вязкости металлов	11
3 Металлографические методы исследования	16
4 Основы количественной металлографии.....	21
5 Микроанализ углеродистых сталей.....	25
6 Микроструктуры чугунов	28
7 Отжиг и нормализация стали.....	32
8 Закалка и отпуск стали	35
Литература	39

Введение

Методические указания по выполнению лабораторных работ предназначены для студентов высших учебных заведений специальности 7-07-0712-02 «Теплоэнергетика и теплотехника». Содержание методических указаний соответствует учебной программе дисциплины «Конструкционные материалы», оно также будет полезным для всех студентов инженерных специальностей.

Основная цель дисциплины «Конструкционные материалы» – дать будущим инженерам знания по современным конструкционным материалам, используемым в машиностроении и энергетике, а также закономерностям формирования их структуры и свойств в соответствии с формулировкой специальной компетенции СК-2 «Владеть методами конструкторских расчетов деталей машин, узлов и элементов энергетического оборудования и систем энергосбережения, уметь анализировать кинематические и динамические схемы механизмов, знать характеристики и особенности использования и применения конструкционных и электротехнических материалов». Однако кроме образовательных целей выполнение лабораторных работ способствует формированию у будущих инженеров материалистического научного мировоззрения, воспитывает трудовую дисциплину и навыки безопасной работы с оборудованием.

Важной задачей при изучении дисциплины является приобретение практических навыков работы с оборудованием, освоение методик экспериментального исследования материалов. Обучающиеся научатся измерять твердость и ударную вязкость металлов, освоят металлографические методы исследования структуры и основы термической обработки металлов.

На первом занятии необходимо пройти общий инструктаж по охране труда и получить допуск к работе в лаборатории. Перед началом каждой работы надо тщательно изучить теоретический материал, пройти инструктаж по безопасной работе на оборудовании, ответить на контрольные вопросы и лишь затем приступать к самостоятельным действиям.

Структура лабораторных работ следующая: теоретическая часть, инструктаж преподавателя, практическая часть, составление отчета о проделанной работе и его защита. Защита может проходить в форме беседы с преподавателем или в форме компьютерного теста. Студенты, не сумевшие защитить отчет на занятии, получают домашнее задание: они должны пройти углубленное тестирование по изучаемой теме в системе дистанционного обучения УО «ВГТУ» по адресу <https://sdo.vstu.by/course/view.php?id=2311> (курс «Конструкционные материалы»).

В заключительной части пособия содержится краткий перечень литературных источников и государственных стандартов, позволяющих глубже изучить учебный материал и лучше подготовиться к аттестационным мероприятиям.

1 Основные методы измерения твердости

Цель работы – изучить основные методы измерения твердости материалов, используемые в современной науке и технике.

1.1 Теоретическая часть

Твердостью называют способность материала сопротивляться внедрению (вдавливанию, царапинам). Это важная характеристика, от которой зависит стойкость трущихся деталей и инструментов (сверла, резцы, фрезы). Сравнить твердость материалов можно по минералогической шкале Мооса.

Метод Мюоса заключается в последовательных попытках поцарапать исследуемый материал набором из десяти специально подобранных эталонных минералов, начиная от самого мягкого (тальк) и заканчивая самым твердым (алмаз). Если, например, восьмой камень (топаз) образец не царапает, а девятый (корунд) – царапает, то твердость материала по шкале Мооса будет 9 баллов.

Таблица 1.1 содержит твердость эталонных минералов и некоторых других материалов.

Таблица 1.1 – Твердость материалов по шкале Мооса

Твердость, баллы	Эталонный минерал	Материал
1	Тальк	Графит, мел
2	Гипс	Слюда
3	Кальцит	Золото, серебро
4	Флюорит	Доломит, эмаль зуба, гвоздь
5	Апатит	Гематит
6	Ортоклаз	Закаленная сталь, Gorilla Glass
7	Кварц	Гранат, кремний, осмий
8	Топаз	Изумруд, оксид циркония
9	Корунд	Сапфир, рубин, WC, SiC
10	Алмаз	Эльбор

К достоинствам метода Мооса относят широкий диапазон охватываемых материалов, а к недостаткам – низкую точность; десяти баллов недостаточно.

Методы измерения твердости принято делить на статические и динамические. Статические методы основаны на вдавливании в образец какого-либо индентора и измерении размера полученного отпечатка; чем он меньше, тем тверже исследуемый материал. Динамические методы основаны на регистрации высоты отскока падающего бойка или скорости затухания ультразвука в материале; они не оставляют отпечатков, что важно для дорогих и уникальных изделий.

Метод Бринелля (ГОСТ 9012-59) заключается во внедрении в образец стального закаленного шарика и измерении диаметра полученного отпечатка (Рисунок 1.1). Метод Бринелля применяют для сравнительно мягких материалов: незакаленных сталей и цветных металлов.

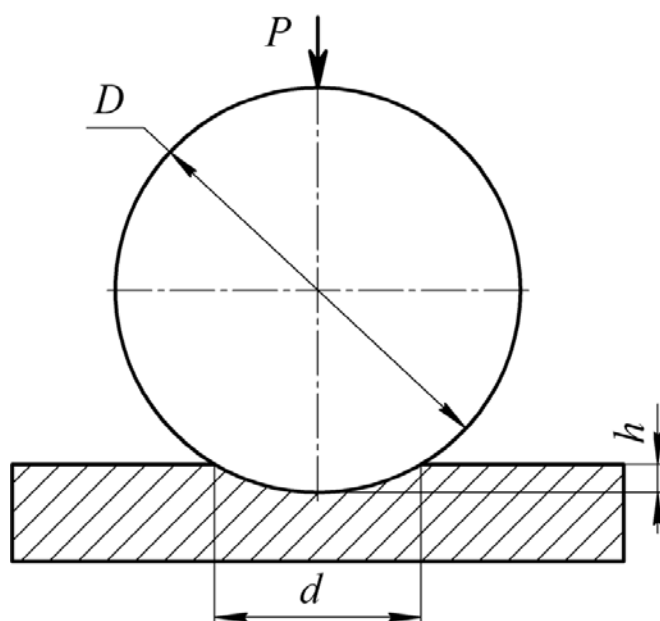


Рисунок 1.1 – Схема испытания твердости методом Бринелля

Твердость вычисляют по формуле

$$HB = \frac{0,102 \cdot 2 \cdot P}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})}, \quad (1.1)$$

где D – диаметр шарика в мм; P – нагрузка на шарик в ньютонах; d – диаметр отпечатка в мм.

Перед проведением испытания следует выбрать величину нагрузки и соответствующий индентор (Таблица 1.2).

При испытании шариками разных диаметров применяют разные нагрузки; при испытании более мягких материалов нагрузка меньше. Образец или изделие, подвергаемое испытанию, должно иметь чистую и плоскую поверхность, обработанную на станке или напильником. Если диаметр применяемого шарика равен 2,5 мм, то поверхность должна быть тщательно отшлифована.

При испытаниях должны соблюдаться следующие условия:

1. Расстояние от центра отпечатка до края образца не менее $2,5d$.
2. Толщина образца должна быть больше десятикратной глубины отпечатка.
3. Расстояние между центрами отпечатков должно быть не менее $2d$.
4. Диаметр отпечатка d должен находиться в пределах $0,2D \dots 0,6D$.

Полученный отпечаток измеряют лупой в двух взаимно перпендикулярных направлениях, диаметр отпечатка определяется как среднее арифметическое. Чтобы не прибегать к вычислениям, на практике пользуются специальной таблицей, которая дает перевод диаметра отпечатка в число твердости HB.

Таблица 1.2 – Ориентировочные параметры испытаний

Материал	Твердость,	Минимальная	Соотношение	Диаметр	Нагрузка, кН	Выдержка
----------	------------	-------------	-------------	---------	--------------	----------

	НВ	толщина испытуемого образца, мм	между нагрузкой P и диаметром D	шарика, мм	(кгс)	под нагрузкой, с
Черные металлы	140–450	6–3	$P = 30D^2$	10	29,40 (3000)	10
	До 140	4–2 менее 2 более 6	$P = 10D^2$	5 2,5 10	7,35 (750) 1,84 (187,5) 9,81 (1000)	10
Цветные металлы	130	6–3 менее 3	$P = 30D^2$	5 2,5 10	2,45 (250) 0,61 (62,5) 29,4 (3000)	10
		4–2 менее 2 9–3		$P = 10D^2$	5 2,5 10	
	8–35	6–3 менее 3 более 6	$P = 2,5D^2$		5 2,5 10	2,45 (250) 0,61 (62,5) 2,45 (250)
		6–3 менее 3		5 2,5	0,61 (62,5) 0,15 (15,6)	60

Метод Роквелла (ГОСТ 9013-59) заключается во внедрении в образец алмазного конуса с углом при вершине 120° (шкалы A и C) или стального сферического наконечника радиусом $0,2$ мм (шкала B).

Общая нагрузка складывается из предварительной нагрузки $P_0 = 98,07$ Н и основной нагрузки P_1 :

$$P = P_0 + P_1 \quad (1.2)$$

Глубину внедрения индентора измеряют после снятия основной нагрузки. Твердость определяют по разнице между глубиной его проникновения и остаточной глубиной после снятия основной нагрузки (Рисунок 1.2).

Наиболее распространенными являются следующие комбинации наконечников и нагрузок.

Шкала А. Наконечник в виде алмазного конуса, общая нагрузка $588,4$ Н. Шкала A применяется для испытания твердых сплавов и тонкого листового металла. Диапазон измерений по данной шкале составляет $70 \dots 93$ HRA.

Шкала В. Наконечник стальной шариковый диаметром $1,588$ мм, общая нагрузка $980,7$ Н. У этой шкалы рабочий участок составляет $25 \dots 100$ HRB. Ее применяют для мягкой отожженной стали или цветных сплавов. При твердости ниже 25 HRB отсчеты становятся неправильными из-за слишком большой площади соприкосновения шарика с образцом. При твердости свыше 100 HRB шарик деформируется и точность измерения резко падает.

Шкала С. Наконечник в виде алмазного конуса, общая нагрузка 1471 Н. Эта шкала применяется при испытании твердости закаленной стали и чугунов.

Диапазон измерений 20...67 HRC. При твердости образца более 67HRC создается слишком большое давление на вершину конуса, и она может отколоться.

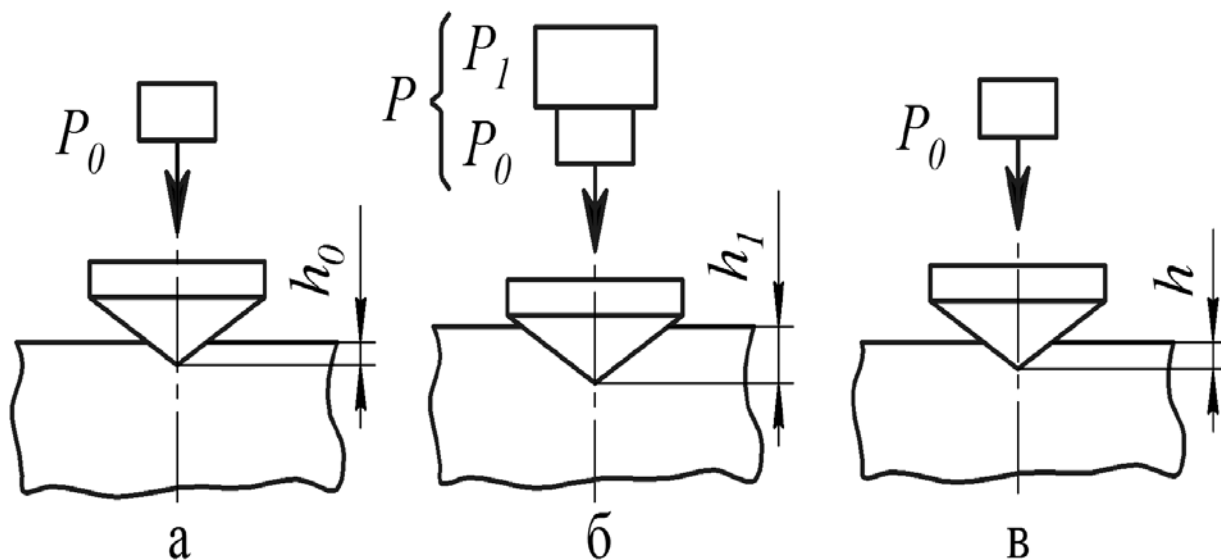


Рисунок 1.2 – схема испытания твердости методом Роквелла

Наконечник и нагрузку выбирают по твердости образца (Таблица 1.3).

Таблица 1.3 – Выбор нагрузки и наконечника для испытаний

Примерная твердость по Виккерсу HV	Обозначение шкалы	Вид наконечника	Нагрузка, Н	Обозначение твердости	Допускаемые пределы шкалы
60–240	B	Стальной шарик	980,7	HRB	25–100
240–900	C	Алмазный конус	1471	HRC	20–67
390–900	A	Алмазный конус	588,4	HRA	70–85

Метод Виккерса (ГОСТ 2999-75) заключается во внедрении алмазного наконечника в форме правильной четырехгранной пирамиды с углом при вершине 136° под действием нагрузки P , приложенной в течение определенного времени, и измерении двух диагоналей отпечатка d_1 и d_2 (Рисунок 1.3).

Твердость вычисляют по формуле

$$HV = \frac{0,102 \cdot 2 \cdot P \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2} = 0,189 \frac{P}{d^2}, \quad (1.3)$$

где P – нагрузка в Н; d – среднеарифметическое значение длин диагоналей d_1 и d_2 в мм; α – угол между гранями пирамиды при вершине (136°).

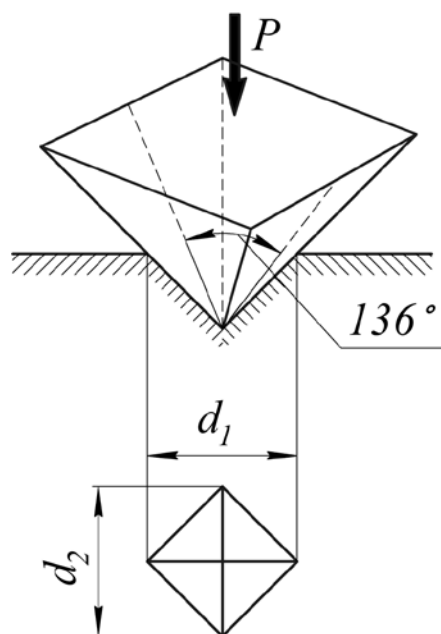


Рисунок 1.3 – схема испытания твердости методом Виккерса

Метод Виккерса применяют главным образом для материалов, имеющих высокую твердость, а также для мелких деталей и тонких слоев. Числа твердости по Бринеллю и Виккерсу хорошо совпадают до значений 360–400.

Если твердость выражена в $кгс/мм^2$, то ее записывают без размерности (пример: HV250), если же она выражена в МПа, то указывают единицу измерения (пример: HV2500 МПа).

Нагрузку выбирают в зависимости от толщины испытываемого слоя металла, которая должна быть по крайней мере в 1,5 раза больше диагонали отпечатка. Стандартом предусмотрены следующие значения нагрузок: 49,03 (5), 98,07 (10), 196,1 (20), 294,2 (30), 490,3 (50) или 980,7 (100) H ($кгс$).

На обратной стороне образца после испытания не должно обнаруживаться место, где прилагалась нагрузка. Отношение глубины отпечатка к величине его диагонали равно приблизительно 1:7.

При испытании тонких слоев металла нагрузка на индентор должна быть тем меньше, чем тоньше исследуемый слой. Если толщина слоя заранее неизвестна, рекомендуется произвести несколько испытаний при различных нагрузках (например, при 98,07, 196,1 и 490,3 H). Если сердцевина образца не влияет на результаты измерений, то числа твердости будут близки друг к другу (нагрузка подобрана удачно). Если полученные значения твердости при возрастании нагрузки уменьшаются, это означает, что поверхностный слой продавливается и нагрузку необходимо снизить.

1.2 Порядок выполнения работы

1. Изучить теоретическую часть и ответить на контрольные вопросы.

2. Пройти инструктаж по использованию лабораторного оборудования и получить допуск к самостоятельной работе на нем.
3. Оценить твердость выданного образца методом Мооса и по результатам выбрать оптимальный метод измерения твердости.
4. Измерить твердость образца выбранным методом.
5. Составить отчет о проделанной работе и полученных результатах.

1.3 Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Методика предварительной оценки твердости образца методом Мооса и полученные результаты исследования.
3. Обоснование выбора оптимального метода измерения твердости образца, основанные на результатах ее предварительной оценки.
4. Методика измерения твердости выбранным методом, используемое оборудование и результаты исследования.

1.4 Контрольные вопросы

1. Что такое твердость?
2. Каким методом можно измерить твердость отожженной стали?
3. Каким методом можно измерить твердость закаленной стали?
4. Что такое индентор и какие они бывают?
5. В каком методе измерения используют алмазный индентор?
6. В каком методе измерения используют стальной индентор?
7. В каком методе измерения используют сферический индентор?
8. В каком методе измерения используют алмазный конус?
9. В каком методе измерения используют алмазную пирамидку?
10. Каким методом можно измерить твердость образца, если его твердость по шкале Мооса составляет 7 баллов?
11. Каким методом лучше измерить твердость образца, если его твердость по шкале Мооса составляет 3 балла?
12. Какие методы измерения твердости не оставляют отпечатков?
13. Можно ли измерить твердость закаленной стали методом Бринелля?
14. Можно ли измерить твердость закаленной стали методом Роквелла?
15. Можно ли измерить твердость закаленной стали методом Виккерса?
16. Можно ли оценить твердость закаленной стали методом Мооса?
17. Можно ли оценить твердость отожженной стали методом Мооса?
18. Какой минерал самый твердый и какой у него химический состав?
19. Чем можно поцарапать алмаз?
20. Чем можно поцарапать Gorilla Glass?

2 Исследование ударной вязкости металлов

Цель работы – ознакомиться с методами определения ударной вязкости металлов и провести испытание образцов на двухопорный ударный изгиб.

2.1 Теоретическая часть

В технике принято различать статическую и динамическую прочность материала. Статическая прочность характеризует сопротивление медленно изменяющимся нагрузкам, а динамическая прочность – сопротивление удару.

Основной критерий статической прочности – временное сопротивление материала; его определяют при испытаниях на растяжение (ГОСТ 1497-84). Критерием динамической прочности является ударная вязкость материала, ее измеряют при испытаниях на ударный изгиб (ГОСТ 9454-78).

Основным видом динамических испытаний, получивших широкое распространение благодаря своей простоте, является ударное испытание надрезанных образцов на маятниковых копрах при начальной скорости удара 3–6 м/с. Ударные испытания широко применяются при массовом контроле качества материалов. Ударные испытания различают:

- по виду деформации: на изгиб, растяжение, сжатие, кручение, срез;
- по скорости нагружения: обычные (4...7 м/с), скоростные (100...300 м/с) и сверхскоростные (свыше 3000 м/с);
- по числу ударов: одним ударом или повторными ударами;
- по температуре испытания.

Широкое применение получил способ испытания при двухопорном ударном изгибе образцов прямоугольного сечения с надрезом (

Рисунок 2.1). Этот универсальный метод применяют для испытания металлов, пластмасс, неорганических стекол, дерева и других материалов.

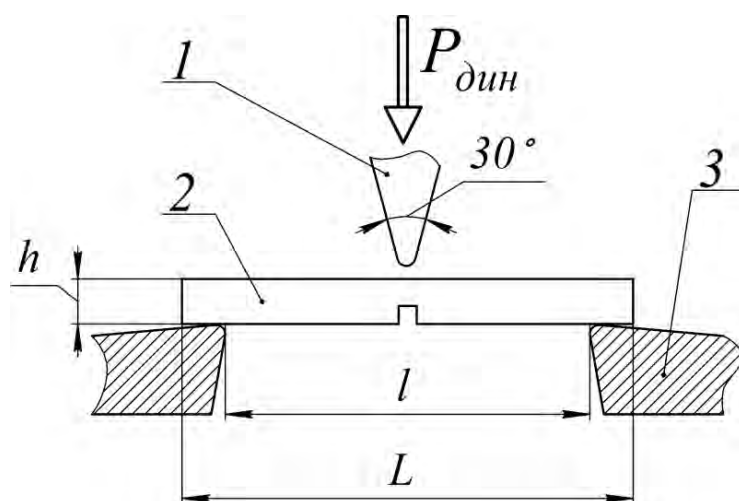


Рисунок 2.1 – Схема испытания на двухопорный ударный изгиб

Ударной вязкостью называют удельную работу разрушения образца ударом маятникового копра – работу удара, отнесенную к начальной площади поперечного сечения образца в месте концентратора:

$$КС = \frac{U}{H_1 B}, \quad (2.1)$$

где КС – ударная вязкость в Дж/см² (кгс·м/см²); U – работа удара, затраченная на разрушение образца, Дж (кгс·м); H₁ – высота образца с надрезом по его середине, см; B – ширина образца, см.

Рисунок 2.2 представляет общий вид маятникового копра, используемого для испытаний на ударную вязкость, а Рисунок 2.3 – его кинематическую схему.

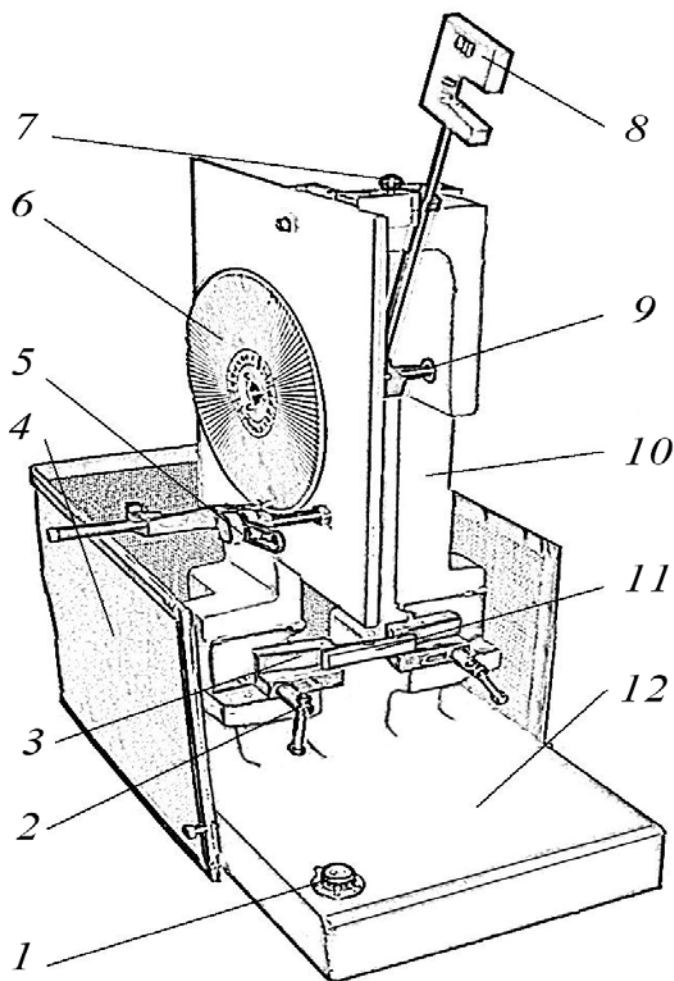


Рисунок 2.2 – Общий вид маятникового копра:

- 1 – уровень; 2 – стопор; 3 – упор; 4 – защитный экран; 5 – пишущий узел;
 6 – градуированный диск; 7 – фиксатор; 8 – нож маятника; 9 – ось маятника;
 10 – стойка; 11 – испытуемый образец

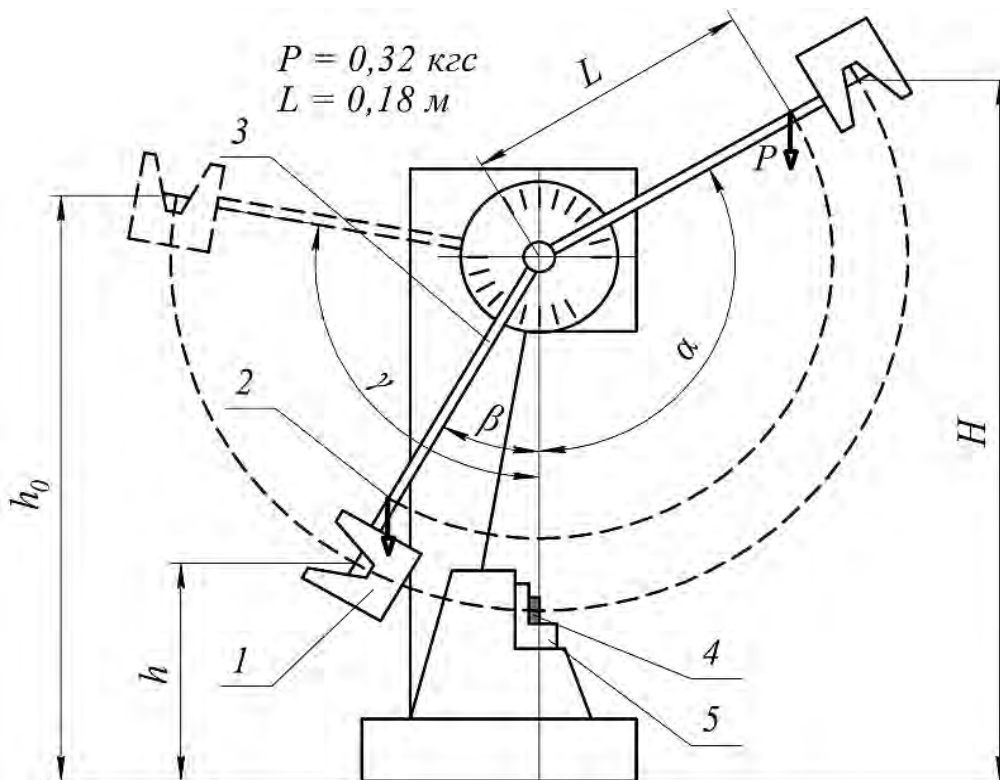


Рисунок 2.3 – Кинематическая схема маятникового копра

Образец 4 (Рисунок 2.3) устанавливают горизонтально на опоры 5 копра так, чтобы концентратор располагался симметрично относительно опор. Маятник 2, закрепленный на штанге 3, поднимают в начальное положение на высоту H с углом подъема α . Из этого положения он освобождается и при отсутствии образца (холостой ход) в своём движении, преодолевая сопротивление сил трения в опорном узле и воздуха, поднимается на высоту h_0 (угол γ). Работа, затраченная на преодоление сил сопротивления на пути $\alpha + \gamma$, определяется разностью потенциальных энергий маятника в крайних положениях:

$$U_0 = P \cdot H - P \cdot h_0 = P \cdot L(\cos\gamma - \cos\alpha) - U_0 \frac{\alpha + \beta}{\alpha + \gamma}, \quad (2.2)$$

С установленным образцом энергия маятника расходуется на его разрушение ножом 1 и преодоление сил сопротивления на пути $\alpha + \beta$. Считая, что работа на преодоление сил сопротивления пропорциональна пройденному пути маятника, работа, затраченная на разрушение образца, находится из выражения

$$U = P \cdot L(\cos\beta - \cos\alpha) - U_0 \frac{\alpha + \beta}{\alpha + \gamma}, \quad (2.3)$$

где P – вес маятника, кгс; L – длина маятника (расстояние от оси подвеса до центра тяжести), м; α – угол зарядки маятника, град; β – угол взлета маятника после разрушения образца, град; γ – угол взлета маятника при холостом ходе, град.

При испытании металлов стандартом предусмотрены следующие виды надрезов (концентраторов напряжения):

- U – применяется при выборе, приемо-сдаточных испытаниях;
- V – для конструкций повышенной надежности (летательные аппараты, транспортные средства, трубопроводы и т. п.);
- T (трещина) – для ответственных конструкций и научных исследований.

Образцов с концентратором вида U существует 10 типов (тип 1...10), с концентратором вида V – 4 типа (тип 11...14) и с концентратором вида T – 5 типов (тип 15...19).

Рисунок 2.4 представляет общий вид образца с U -концентратором, а Таблица 2.1 – его возможные размеры.

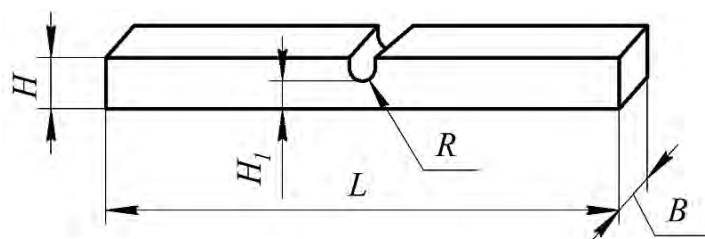


Рисунок 2.4 – Образец с концентратором вида U

Таблица 2.1 – Размеры образцов с концентратором вида U

Тип образца	Радиус концентратора R , мм	Длина L , мм	Ширина B , мм	Высота рабочего сечения H_1 , мм
1	1	55	10	8
2			7,5	
3			5	
4			2	6
5			10	7
6			7,5	
7			5	
8			10	5
9			7,5	
10			5	

2.2 Порядок выполнения работы

1. Изучить схемы основных методов испытаний на удар;
2. Изучить конструкцию и правила работы оборудования;
3. Получить образцы материалов, провести измерения их габаритов, установить необходимое расстояние между опорами приспособления, определяемое в соответствии с габаритами образцов;

4. Не устанавливая образцы, определить угол зарядки маятника и угол взлета маятника при холостом ходе. Рассчитать работу, затраченную на преодоление сил сопротивления;
5. Установить образец на опорах, определить угол взлета маятника после разрушения образца;
6. Провести соответствующие измерения при разрушении образцов из различных материалов с надрезом и без надреза;
7. Определить ударную вязкость образцов без надреза и с надрезом, а также относительную ударную вязкость;
8. Все результаты занести в протокол испытаний (Таблица 2.2).

Таблица 2.2 – Протокол испытаний

№	Материал	Площадь $A, \text{см}^2$	$\alpha,$ <i>град</i>	$\beta,$ <i>град</i>	$\gamma,$ <i>град</i>	$U_0, \text{Дж}$ (кгс·м)	$U, \text{Дж}$ (кгс·м)	$KC, \text{Дж/см}^2$ (кгс·м/см ²)
1	Холостой ход	–		–			–	–
2								
3								

2.3 Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.
2. Схема испытания на ударную вязкость.
3. Таблица с полученными результатами, необходимые расчеты.
5. Вывод.

2.4 Контрольные вопросы

1. Сущность проведения ударных испытаний.
2. Основные виды ударных испытаний.
3. Испытание на удар по методу Изода.
4. Испытание на удар по методу Шарпи.
5. Основные элементы маятникового копра.
6. Кинематическая схема маятникового копра.
7. Формула расчета работы, затраченной на разрушение образца.
8. Определение ударной вязкости, относительной ударной вязкости.
9. Основные виды образцов для испытаний.

3 Металлографические методы исследования

Цель работы – изучить методику и оборудование для проведения микроскопического анализа металлических структур.

3.1 Теоретическая часть

Металлографические методы исследования, в зависимости от увеличения структуры, разделяют на макроскопический и микроскопический анализ.

При макроанализе невооруженным глазом или с помощью лупы оценивают качество литья и выявляют относительно крупные дефекты металла, такие как текстура, ликвация, пористость. Макроанализ проводят на поверхности отливки, на изломе или на специально подготовленном образце – макрошлифе.

При микроанализе структуру металла исследуют с помощью оптического или электронного микроскопа на специально подготовленном образце – микрошлифе. Микроанализ позволяет определить размер и форму металлических зерен, характер взаимного расположения фаз в сплаве, наличие неметаллических включений и многое другое.

Микрошлиф последовательно шлифуют, полируют до зеркального блеска и подвергают травлению химическими реактивами; только после этого можно увидеть микроструктуру металла. Этот трудоемкий процесс может быть значительно упрощен использованием специализированного оборудования.

Для травления шлифов применяют различные реактивы, состав которых зависит от исследуемого материала. Наиболее распространенным для углеродистых сталей и чугунов является раствор азотной кислоты в спирте. Реактив разъедает границы между зернами, делая их видимыми. Кроме того, правильно подобранный состав по-разному реагирует с разными фазами сплава, проявляя их и делая картинку более информативной. Так, упомянутый травитель окрашивает перлит в темный цвет, выявляет границы зерен феррита и мартенсита.

Основная характеристика металлографических приборов – разрешающая способность: минимальное расстояние между точками, которые еще кажутся раздельными. Разрешение невооруженного глаза человека со стопроцентным зрением $\sim 0,2$ мм; сильная лупа повышает его до 5 мкм (увеличение до 40 раз). Разрешающая способность оптического микроскопа принципиально ограничена длиной световой волны и не превышает 200 нм (полезное увеличение до 1500 раз). Разрешение растрового электронного микроскопа достигает 1 нм (увеличение 300 000 раз).

Общее увеличение оптической системы микроскопа равно произведению увеличений объектива и окуляра. Объектив увеличивает рассматриваемый предмет, а окуляр увеличивает изображение, получаемое от объектива, и не добавляет к нему никаких новых деталей, если они не выявлены объективом. Максимальное полезное увеличение микроскопа $N = d_1/d$, где $d_1 = 0,2$ мм – мак-

симальная разрешающая способность человеческого глаза; d – максимальная разрешающая способность оптической системы микроскопа.

Металлографические микроскопы бывают вертикальные (МИМ-7) и горизонтальные (МИМ-8). Они работают в отраженном свете и позволяют изучать детали микроструктуры с размером до 0,2 мкм.

Оптическая система микроскопа МИМ-7 (Рисунок 3.1) включает объектив, окуляр и ряд вспомогательных оптических элементов: зеркала, призмы и т. п.

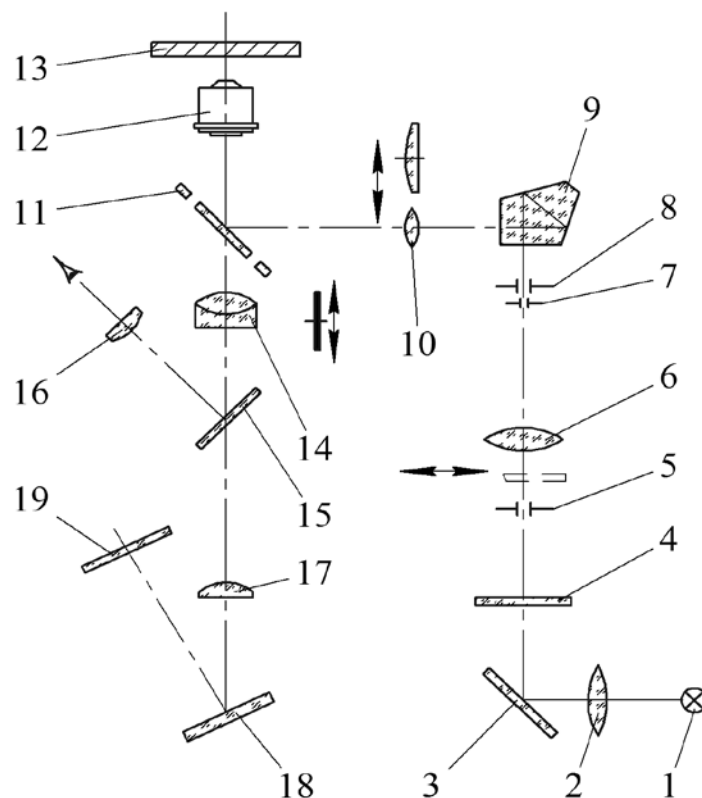


Рисунок 3.1 – Оптическая система микроскопа МИМ-7

Световые лучи от источника света *1* проходят через коллектор *2*, отражаются от зеркала *3* и попадают в светофильтр *4* и апертурную диафрагму *5*, линзу *6*, фотозатвор *7*, полевою диафрагму *8* (ограничивающую размер освещенного поля), пентапризму *9*, линзу *10* и попадают на полупрозрачную отражательную пластинку *11*. От нее световые лучи через объектив *12* попадают на микрошлиф *13*. Отражаясь от него, световые лучи опять попадают в объектив *12*, проходят через пластинку *11*, ахроматическую линзу *14* и зеркалом *15* направляются в окуляр *16*. Для фотографирования зеркало *15* выключают, световые лучи проходят через окуляр *17*, отражаясь зеркалом *18*, и попадают на фотопластинку *19*.

Объектив дает обратное, действительное, увеличенное изображение микроструктуры и представляет сложное сочетание линз, располагающихся в одной общей оправе. Объектив имеет фронтальную плосковыпуклую линзу, определяющую возможное увеличение и ряд коррекционных линз, предназна-

ченных для устранения нежелательных эффектов – хроматической и сферической аберраций. В зависимости от степени коррекции хроматической аберрации различают объективы ахроматические и апохроматические. В ахроматах сохранена аберрация для трех монохроматических лучей, в апохроматах – для двух. Апохроматы применяют для больших увеличений, а ахроматы – для малых и средних. Увеличение стандартных объективов обычно лежит в пределах от 10 до 100 раз.

Окуляры увеличивают изображение и исправляют оптические дефекты. В металлографических микроскопах применяют окуляры трех типов: обычные (Гюйгенса, для небольших увеличений), компенсационные и проекционные. Последние используют при фотографировании микроструктур. Компенсационные окуляры устроены сложнее; их применяют для больших увеличений и используют вместе с апохроматическими объективами. Обычные окуляры увеличивают изображение от 2 до 15 раз, а компенсационные – до 25 раз.

Микроскоп МИМ-7 (Рисунок 3.2) состоит из трех основных узлов: осветителя, корпуса и верхней части.

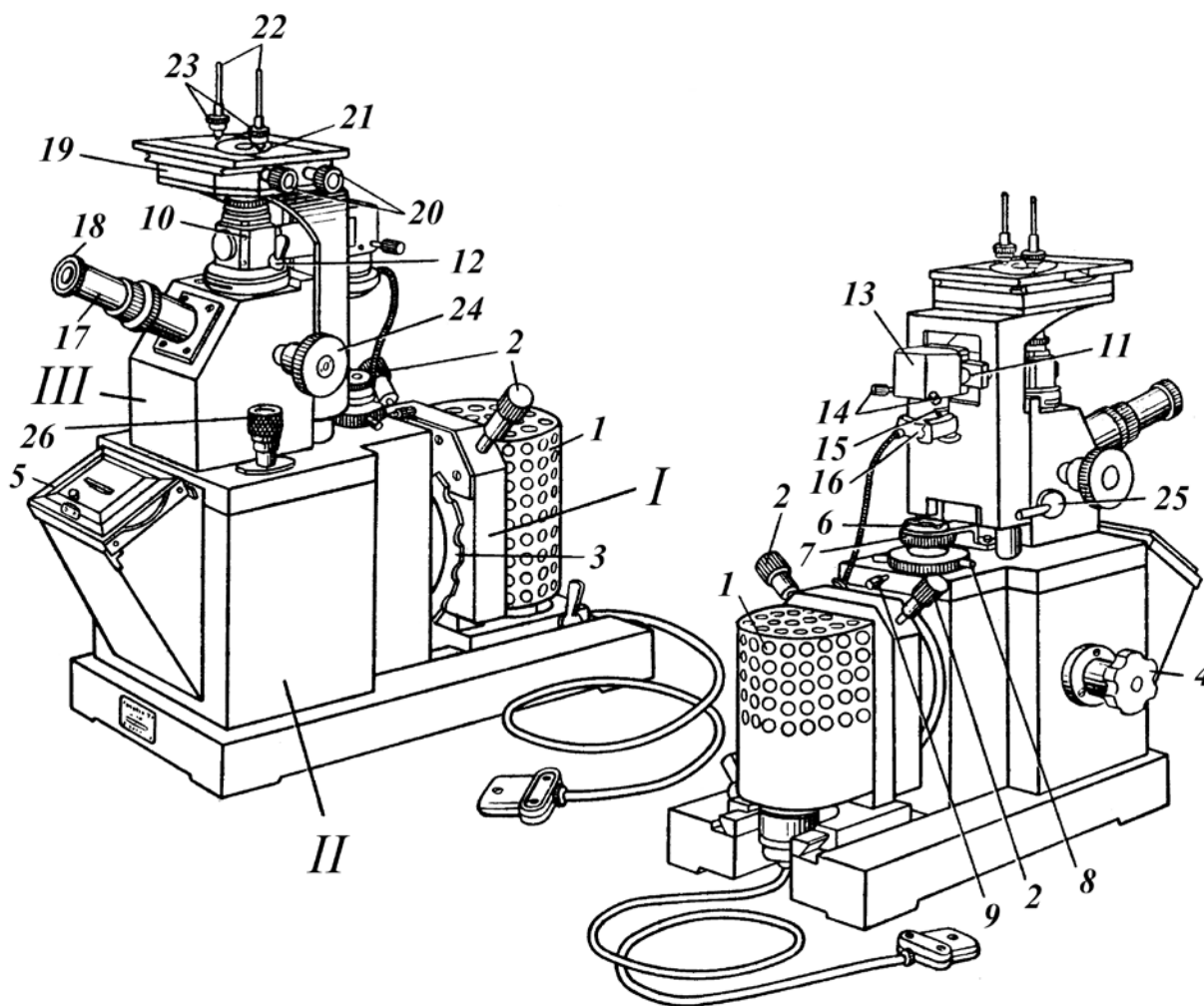


Рисунок 3.2 – Общий вид микроскопа МИМ-7

Осветитель I имеет фонарь 1, внутри кожуха которого находится лампа накаливания К-30 (17 В). Питание лампы осуществляется через понижающий трансформатор (на рисунке не показан). Центровочные винты 2 служат для совмещения центра нити накаливания лампы с оптической осью коллектора для получения максимальной яркости изображения.

В корпусе II находятся:

- диск 3 с набором светофильтров;
- рукоятка 4 переключения окуляров;
- посадочное устройство для рамки 5 с матовым стеклом;
- узел апертурной диафрагмы, укрепленный под оправой линзы 6;
- кольцо с накаткой 7, служащее для изменения диаметра диафрагмы;
- винт 5, вращением которого смещается диафрагма для создания косого освещения;
- винт 9 для фиксации поворота апертурной диафрагмы.

Верхняя часть III микроскопа имеет иллюминаторный тубус 10, в котором есть посадочное отверстие под объектив. На патрубке тубуса расположена рамка с линзами 11 для работы в светлом и темном поле и рукоятка 12 для включения диафрагмы при работе в темном поле; под кожухом 13 – пентапризма. В нижней части кожуха 13 расположены центровочные винты 14 полевой диафрагмы, диаметр которой изменяют при помощи поводка 15. Под конусом полевой диафрагмы находится фотозатвор 16. В зрительном тубусе 17 есть отверстие, в которое вставляется окуляр 18. При наблюдении тубус задвигают до упора, а при фотографировании выдвигают.

Увеличение микроскопа (Таблица 3.1) определяется выбором объектива и окуляра. В том случае, если размер рассматриваемого объекта заранее неизвестен, то начинать надо с меньших увеличений, постепенно переходя к большим.

Таблица 3.1 – Увеличения микроскопа МИМ-7

ОБЪЕКТИВЫ			ОКУЛЯРЫ			
Увеличение	Фокусное расстояние	Числовая апертура	7 [×]	10 [×]	15 [×]	20 [×]
<i>Для светлого и темного поля</i>						
8,6 [×]	F = 23,2	A = 0,17	(60)	90	130	170
14,4 [×]	F = 13,9	A = 0,30	(100)	140	200	300
24,5 [×]	F = 8,2	A = 0,37	170	240	360	500
32,5 [×]	F = 6,2	A = 0,65	(250)	320	500	(650)
<i>Иммерсионные</i>						
72,2 [×]	F = 2,8	A = 1,00	500	720	1080	(1440)
71,7 [×]	F = 2,8	A = 1,25	500	720	1080	(1440)

3.2 *Порядок выполнения работы*

1. Изучить устройство и принцип работы микроскопа МИМ-7.
2. Подготовить микроскоп к работе.
3. Подобрать окуляр и объектив для изучения объекта, размеры которого заданы преподавателем.
4. Провести исследование микрошлифов при различных увеличениях.
5. Составить отчет о проделанной работе.

3.3 *Содержание отчета*

1. Название и цель работы.
2. Основные сведения о металлографических микроскопах.
3. Зарисовать оптическую схему микроскопа МИМ-7.
4. Методика подбора объектива и окуляра.
5. Вывод

3.4 *Контрольные вопросы*

1. Что такое металлография?
2. Где проходит граница, разделяющая макро- и микроанализ?
3. Что такое микрошлиф и как его готовят?
4. Что такое травление и зачем оно нужно?
5. Чем травят углеродистые стали и чугуны?
6. Какие бывают металлографические микроскопы?
7. Из чего состоит оптическая схема микроскопа?
8. Что такое разрешающая способность?
9. Какова разрешающая способность невооруженного глаза?
10. Какова разрешающая способность микроскопа?
11. Чем различаются микроскопы МИМ-7 и МИМ-8?
12. Назовите элементы оптической системы микроскопа МИМ-7.
13. Что такое объектив и зачем он нужен?
14. Что такое окуляр и зачем он нужен?
15. Как определить полезное увеличение микроскопа?
16. Назовите элементы осветительной системы микроскопа МИМ-7.
17. Назовите элементы оптической системы микроскопа МИМ-7.
18. Что такое диафрагма?
19. Какие существуют типы окуляров?
20. В каком диапазоне лежит увеличение объективов?

4 Основы количественной металлографии

Цель работы – ознакомиться с основными способами определения количественных характеристик микроструктуры материалов.

4.1 Теоретическая часть

Для получения количественных характеристик микроструктуры используют точечный, линейный и плоскостной анализы.

Точечный анализ служит для определения объемных долей структурных составляющих или фаз. Измерение можно проводить под микроскопом с помощью окуляров с сеткой точек, на матовом стекле или фотографии. Применение точечного анализа предпочтительнее в тех случаях, когда объемная доля определяемой фазы не превышает 15 %. На исследуемую структуру накладывают сетку, состоящую из точек и подсчитывают число точек, лежащих в сечении частиц исследуемой фазы (Рисунок 4.1).

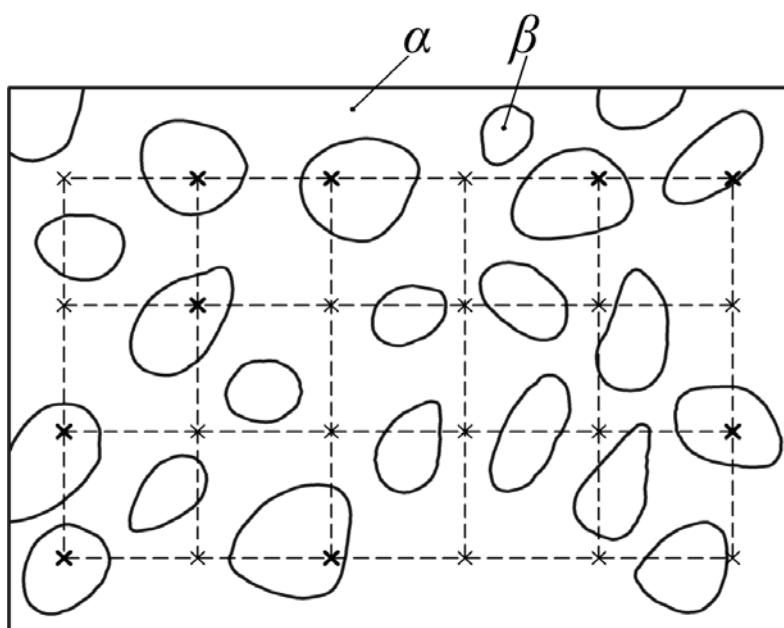


Рисунок 4.1 – Точечный анализ

Объемная доля β -фазы определяется по формуле:

$$V_{\beta} = \frac{P_{\beta}}{P} \cdot 100\% , \quad (4.1)$$

где P_{β} – число точек, лежащих в пределах β -фазы; P – общее число точек в сетке.

Подстановка численных значений в (4.1) дает:

$$V_{\beta} = \frac{9}{24} \cdot 100\% \approx 38\% . \quad (4.2)$$

При линейном анализе на изображение исследуемой структуры накладывается семейство измерительных прямых линий l_j (Рисунок 4.2), после чего хорды, отсекаемые сечением зерен на линиях $l_{\beta i}$, измеряются и группируются в соответствии с заданной системой размерных порядков; подсчитывается число точек в пересечениях измерительных линий и границ зерен; определяется общая длина измерительных линий, а также измеряется длина отрезков внутри фаз.

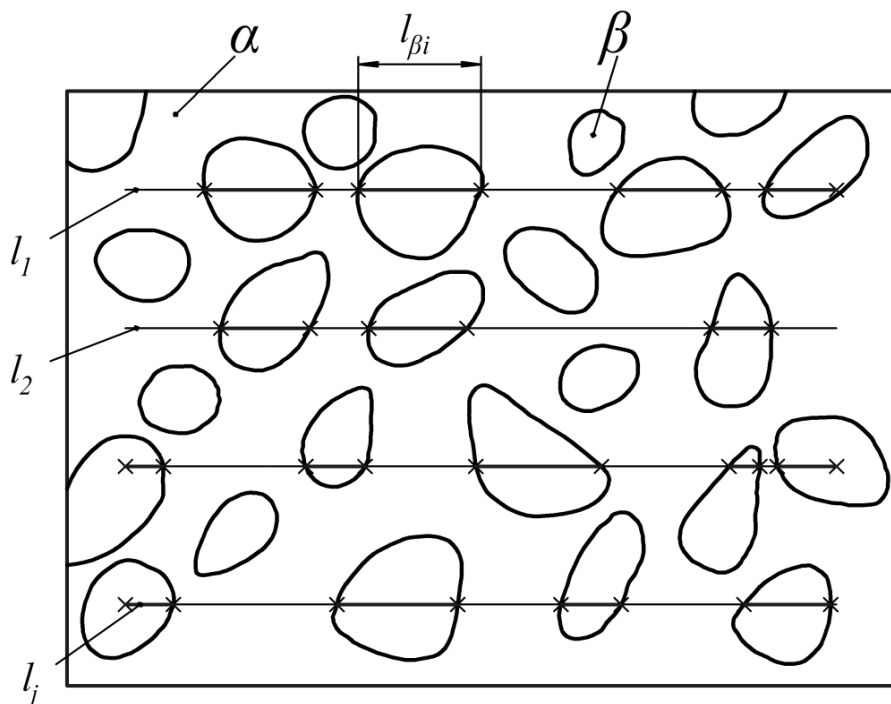


Рисунок 4.2 – Линейный анализ

Общая длина измерительных линий:

$$L = \sum_{j=1}^n l_j, \quad (4.3)$$

где l_j – длина одной измерительной линии.

Удельная поверхность границ зерен:

$$F = \frac{4 \cdot N \cdot M}{L}, \quad (4.4)$$

Объёмная доля β -фазы:

$$V_{\beta} = \frac{L_{\beta}}{L} \cdot 100\%, \quad (4.5)$$

где L_{β} – сумма всех длин хорд в β -фазе:

$$L_{\beta} = \sum_{i=1}^m l_{\beta i}, \quad (4.6)$$

где $l_{\beta i}$ – длина одной хорды в пределах измеряемой фазы.

Плоскостной анализ (метод круга). Использование этого метода позволяет наряду с распределением отдельных фаз по объему получить данные о средней площади поперечного сечения зерен (Рисунок 4.3).

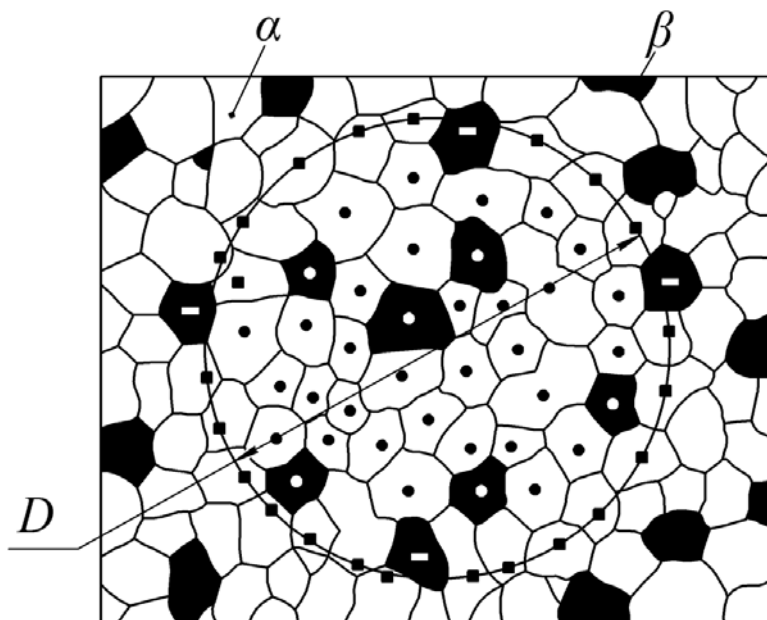


Рисунок 4.3 – Метод круга

На фотоснимке рисуют окружность заданного диаметра D и подсчитывают количество зерен z всех фаз полностью находящихся внутри круга. На рисунке эти зерна отмечены белым (β -фаза) и черным (α -фаза) цветами. Затем подсчитывают число зерен n , пересеченных линией окружности (отмечены белым прямоугольником и черным квадратом) и умножают на 0,67. Этот коэффициент показывает, что 67 % площади пересеченных зерен лежит внутри круга.

Принимая во внимание масштаб изображения N (увеличение микроскопа), получают среднюю площадь поперечного сечения зерен:

$$\bar{S} = \frac{\pi \cdot D^2}{4(0,67 \cdot n + z) \cdot N^2}. \quad (4.7)$$

Объемная доля β -фазы:

$$V_{\beta} = \frac{4 \cdot \bar{S} \cdot N^2 \cdot (0,67 \cdot n_{\beta} + z_{\beta})}{\pi \cdot D^2} \cdot 100\%, \quad (4.8)$$

где n_{β} – число зерен β -фазы, пересеченных линией окружности (обозначены символами белого прямоугольника); z_{β} – число зерен β -фазы полностью находящихся внутри окружности (обозначены символами белого круга).

4.2 Порядок выполнения работы

1. Получить у преподавателя фотографию микроструктуры образца;
2. Провести исследования количественных характеристик методом точечного анализа;
3. Провести исследования количественных характеристик методом линейного анализа;
4. Провести исследования количественных характеристик методом анализа площадей;
5. Свести полученные данные в таблицу 4.1;
6. Составить отчет о проделанной работе.

Таблица 4.1 – Полученные результаты

Метод	Объемная доля определяемой фазы, %	Средний линейный размер зёрен, мм	Средняя площадь поперечного сечения зерна, мм ²	Удельная поверхность границ зёрен, мм ⁻¹
Точечный анализ		–	–	–
Линейный анализ			–	
Метод круга		–		–

4.3 Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Основные сведения о методах количественной металлографии.
3. Расчет количественных характеристик методами количественной металлографии по фотоснимку структуры металла.
4. Вывод по проделанной работе.

4.4 Контрольные вопросы

1. Назначение и виды металлографического анализа.
2. Сущность точечного анализа.
3. Возможности линейного анализа.
4. Сущность метода анализа площадей.

5 Микроанализ углеродистых сталей

Цель работы – изучить равновесные микроструктуры доэвтектоидных, эвтектоидных и заэвтектоидных углеродистых сталей.

5.1 Теоретическая часть

По содержанию углерода сталь разделяют на доэвтектоидную ($C < 0,8\%$), эвтектоидную ($C = 0,8\%$) и заэвтектоидную ($C > 0,8\%$). Сплавы, содержащие менее $0,02\%$ углерода, называют техническим железом. У разных сталей разный фазовый состав и разная микроструктура.

Фазой называют обособленную однородную область в материале. Она может состоять из химического элемента, химического соединения, жидкого или твердого раствора. Фаза может быть кристаллической и аморфной, равновесной и метастабильной, парамагнитной и ферромагнитной, металлической и неметаллической. Кристаллическая фаза – колония одинаковых по составу кристалликов, отделенная от других колоний границей раздела. Обычно фазы очень дисперсны и видны лишь в микроскоп. Равновесные структуры углеродистых сталей состоят из двух фаз – феррита и цементита.

Феррит – твердый раствор углерода в альфа-железе; при комнатной температуре содержит до $0,02\%$ C, а при высокой – до $0,1\%$ C. В доэвтектоидной стали феррит присутствует в виде светлых зерен или полосок в смеси с перлитом.

Цементит – твердый метастабильный карбид железа Fe_3C , содержащий $6,67\%$ C. Цементит под микроскопом похож на блестящую белую сетку пластинок или зерен.

Перлит – эвтектоидная смесь феррита и цементита, содержащая $0,8\%$ C. Перлит имеет вид темных зерен различной формы и размеров или участков.

Микроструктура отожженной доэвтектоидной углеродистой стали состоит из зерен феррита и перлита, эвтектоидная сталь имеет чисто перлитную структуру, а заэвтектоидная сталь состоит из перлита и цементита (Рисунок 5.1). Микроструктуру стали изучают с помощью металлографического микроскопа при небольших увеличениях (до 200 раз).

С увеличением массовой доли углерода в стали увеличивается содержание перлита, следовательно, увеличивается площадь темных зерен или участков. С уменьшением массовой доли углерода увеличивается содержание феррита, т. е. увеличивается площадь светлых зерен или участков.

По площади включений феррита и перлита можно оценить массовую долю углерода в любой марке углеродистой стали. Например, для стали марки 40 площадь темных и светлых фаз примерно равна (50% феррита и 50% перлита). Так как в феррите углерода практически нет, а в перлите его около 80% , то нетрудно вычислить, что эта сталь содержит около $0,4\%$ углерода (проверяем: по ГОСТ 1050-88 она может содержать $0,37...0,45\%$ углерода).

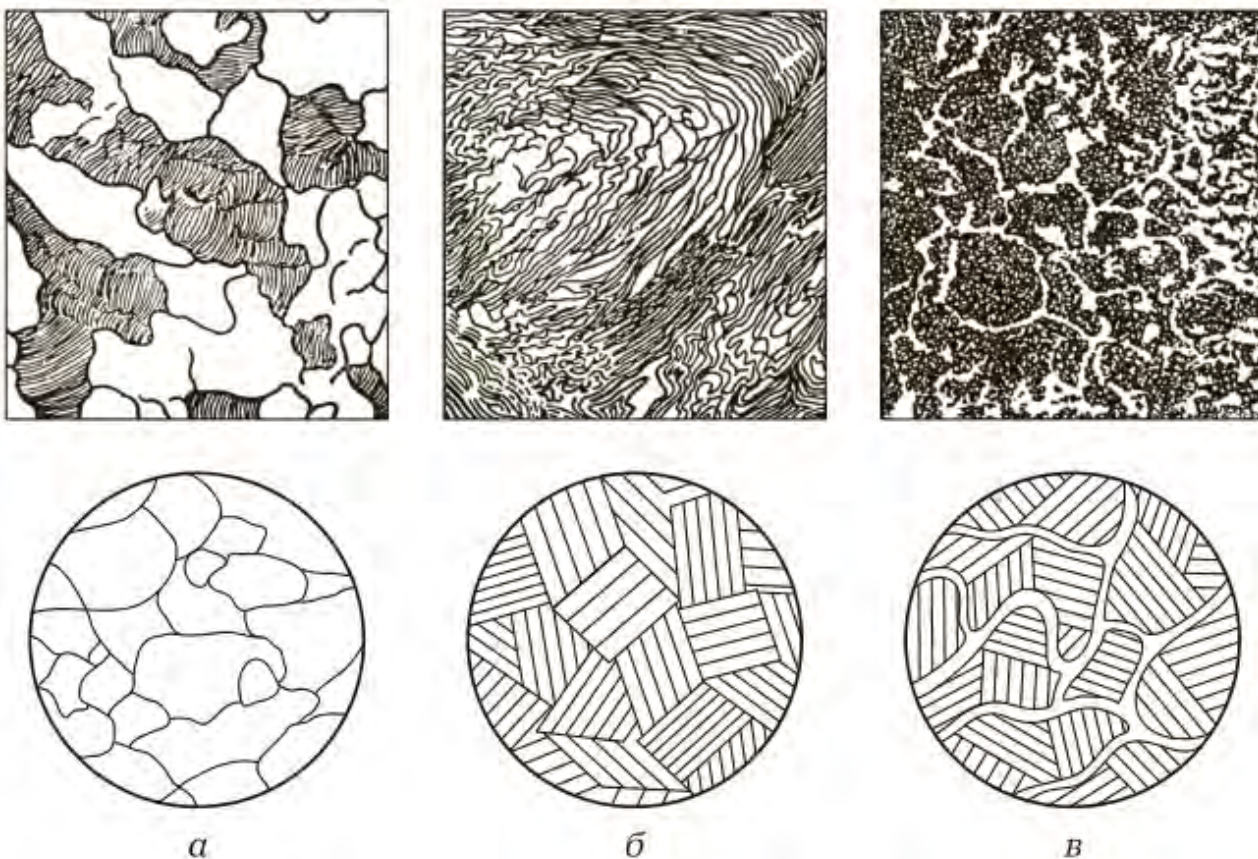


Рисунок 5.1 – Микроструктура доэвтектоидной, эвтектоидной и заэвтектоидной стали:
 а – феррит с перлитом, б – перлит, в – перлит с цементитом

5.2 Порядок выполнения работы

1. Подготовьте образцы для исследования (не менее пяти образцов).
2. Проведите исследование образцов в порядке возрастания массовой доли углерода.
3. Выполните эскизы микроструктур образцов и сравните их с прилагаемыми фотографиями.
4. Определите количество структурных составляющих в процентах, по ним массовую долю углерода в доэвтектоидной и заэвтектоидной стали.
5. По массовой доле углерода определите примерную марку и механические свойства исследуемой стали.

5.3 Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Эскизы микроструктур исследованных образцов.
3. Массовая доля углерода в образцах.
4. Примерная марка стали, из которой сделаны разные образцы.
5. Примерные механические свойства образцов сталей.

5.4 Контрольные вопросы

1. Что такое феррит?
2. Что такое цементит?
3. Что такое перлит?
4. Что такое фаза?
5. Каков фазовый состав доэвтектоидной стали?
6. Каков фазовый состав эвтектоидной стали?
7. Каков фазовый состав заэвтектоидной стали?
8. Сколько углерода содержит феррит?
9. Сколько углерода содержит цементит?
10. Сколько углерода содержит перлит?
11. При каких увеличениях исследуют стальные микроструктуры?
12. Что такое равновесная структура?
13. Сколько фаз в равновесной структуре эвтектоидной стали?
14. Как получить равновесную структуру?
15. Чем отличаются доэвтектоидные и заэвтектоидные стали?
16. Как называется карбид железа, каковы его свойства?
17. В каких сталях есть цементит?
18. В каких сталях есть феррит?
19. В каких сталях есть перлит?
20. Бывают ли однофазные стали?
21. Бывают ли двухфазные стали?
22. Феррит – аморфная фаза?
23. Перлит – это фаза?
24. Что такое карбид?
25. Какие стали называют углеродистыми?

6 Микроструктуры чугунов

Цель работы – изучить микроструктуры белых, серых, ковких и высокопрочных чугунов.

6.1 Теоретическая часть

Чугуны – железоуглеродистые сплавы, содержащие более 2,14 % углерода, постоянные примеси (Si, Mn, S, P) и, возможно, легирующие элементы (Cr, Ni, V, Al). Выплавляют чугуны в доменных печах при температуре около 1200 °С.

Чугуны по металлической структуре делят на ферритные, перлитные и ферритно-перлитные. По назначению они бывают пердедельные, износостойкие, литейные, антифрикционные и для художественного литья. По содержанию углерода чугуны делят на доэвтектические ($C < 4,3 \%$), эвтектические и заэвтектические ($C > 4,3 \%$). По форме углеродных включений чугуны делят на белые, серые, ковкие и высокопрочные.

В белом чугуне графита нет, весь углерод находится в цементите; такой чугун тверд и хрупок, применяется редко. Структура белого чугуна состоит из перлита, первичного цементита и ледебурита (Рисунок 6.1).

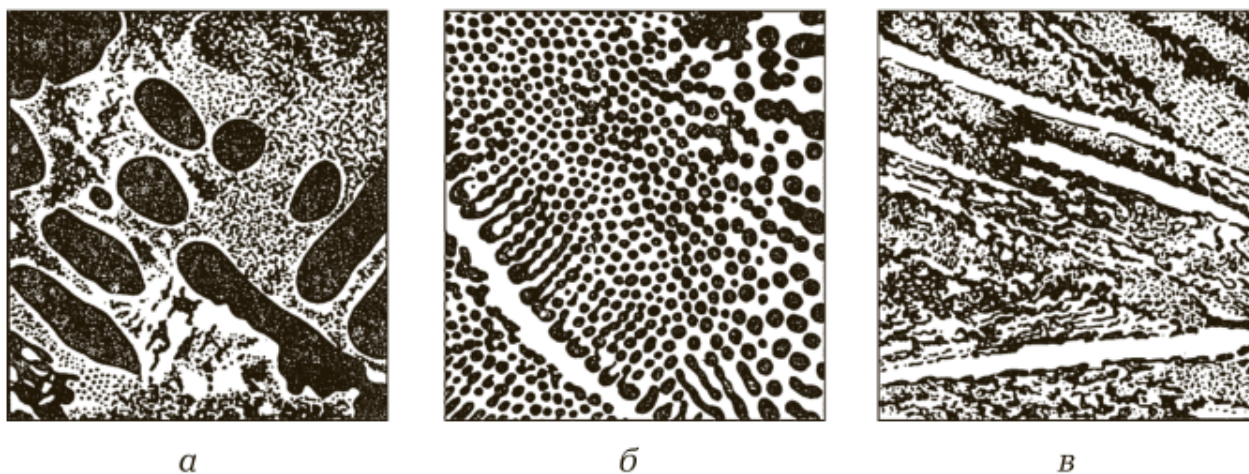


Рисунок 6.1 – Микроструктура белого чугуна:
а – доэвтектический, б – эвтектический, в – заэвтектический

Перлит – эвтектоидная смесь феррита и цементита, содержащая 0,8 % углерода; различают перлит пластинчатый и зернистый.

Цементит – твердый метастабильный карбид железа Fe_3C , содержащий 6,67 % С; в сплавах встречается в виде первичных, вторичных и третичных кристаллов. Крупные зерна первичного цементита выпадают из жидкой фазы в чугунах, вторичный цементит образуется при охлаждении аустенита, а очень

мелкие зерна третичного цементита выпадают в сталях при охлаждении феррита. Цементит на микрошлифе выглядит в виде светлых игл (сечение пластинок).

Ледебурит – легкоплавкая (1147 °С) хрупкая эвтектика, содержащая 4,3 % углерода. Различают ледебурит высокотемпературный (выше 727 °С, структура аустенит с цементитом) и низкотемпературный (ниже 727 °С, структура перлит с цементитом). Ледебурит по форме, строению и цвету похож на перлит, но зерна его более крупные и грубые (темная фаза на рисунках).

Аустенит – твердый раствор углерода в гамма-железе, равновесный выше 727 °С; содержание углерода в нем максимально (2,14 %) при температуре 1147 °С. При комнатной температуре аустенита в чугунах нет.

В сером чугуне графит пластинчатый (Рисунок 6.2). Из таких чугунов льют станины станков, поршни, цилиндры и другие работающие на сжатие детали.



Рисунок 6.2 – Микроструктура серого чугуна:
а – ферритный, б – ферритно-перлитный, в – перлитный

В ковком чугуне графит хлопьевидный (Рисунок 6.3), а в высокопрочном – сферический (Рисунок 6.4). Сферические включения не так сильно ослабляют металлическую основу чугуна, из высокопрочных чугунов делают трубы и другие изделия, конкурирующие со стальными.

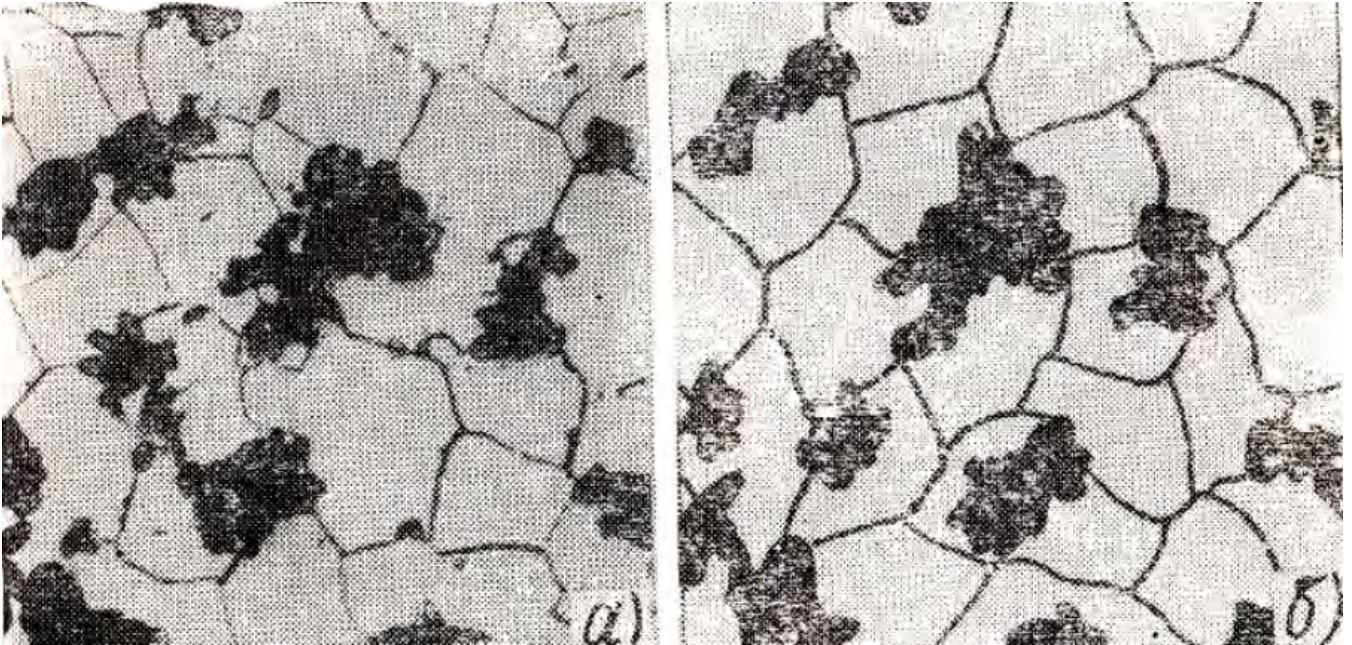


Рисунок 6.3 – Микроструктура ферритного ковкого чугуна

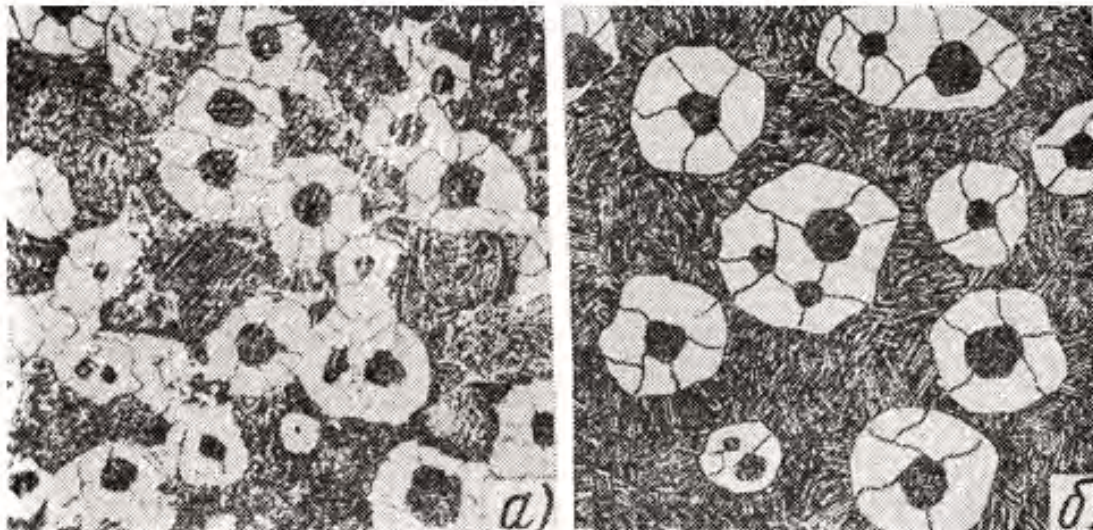


Рисунок 6.4 – Ферритный высокопрочный чугун

6.2 Порядок выполнения работы

1. Изучить теоретическую часть и ответить на контрольные вопросы.
2. Рассмотреть под микроскопом образцы и найти в атласе микроструктур похожие структуры.
3. Определить вид чугунов, из которых изготовлены разные образцы.
4. Составить отчет о проделанной работе.

6.3 Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Эскизы микроструктур и номера соответствующих образцов.
3. Виды чугунов и номера соответствующих образцов.
4. Выводы по работе.

6.4 Контрольные вопросы

1. Классификация чугунов по форме углеродных включений.
2. Классификация чугунов по металлической структуре.
3. Классификация чугунов по содержанию углерода.
4. Классификация чугунов по назначению.
5. Что такое ледебурит?
6. Микроструктура ферритного ковкого чугуна.
7. Микроструктура ферритного серого чугуна.
8. Микроструктура ферритного высокопрочного чугуна.
9. Микроструктура белого эвтектического чугуна.
10. Какая фаза содержит углерод в белом чугуне?

7 Отжиг и нормализация стали

Цель работы – изучить технологию проведения отжига и нормализации углеродистых и легированных сталей.

7.1 Теоретическая часть

Термической обработке подвергают отливки, сварные швы, детали машин, инструмент. Основные виды термообработки: отжиг, закалка, отпуск и старение.

Отжиг – медленное охлаждение горячего металла; уменьшает твердость, повышает пластичность и вязкость, снимает внутренние напряжения. Отжиг бывает первого и второго рода. Отжиг первого рода не связан с фазовыми превращениями; это диффузионный, рекристаллизационный и низкий отжиг. Диффузионный отжиг – продолжительная выдержка металла при высокой температуре; так уменьшают ликвацию в дорогих легированных сталях. Рекристаллизационный отжиг устраняет последствия холодной пластической деформации металла: снимает наклеп, уменьшает текстуру и анизотропию свойств. Низкий отжиг – легкий нагрев металла для снятия внутренних напряжений. Отжиг второго рода основан на фазовых превращениях; он бывает полный и неполный. При полном отжиге сплав нагревают до гомогенного (однофазного) состояния и затем медленно охлаждают вместе с печью. При неполном отжиге металл нагревают слабее, гомогенизация структуры частичная.

Термообработка стали основана на превращениях охлаждаемого аустенита. В зависимости от режима охлаждения в стали протекает диффузионное перлитное, бездиффузионное мартенситное или промежуточное бейнитное превращение. Перлитное превращение идет при медленном охлаждении (отжиге) стали. Аустенит распадается на ферритно-цементитные смеси различной дисперсности: перлит (грубая смесь), сорбит или троостит (тонкая смесь). Мартенситное превращение идет при закалке стали; аустенит превращается в прочный и твердый мартенсит (сильно пересыщенный углеродом метастабильный феррит). Бейнитное превращение наиболее полно протекает в изотермических условиях. Аустенит в горячей (~320 °С) соляной ванне превращается в прочный и твердый бейнит. Термообработка стали: отжиг, нормализация, закалка и отпуск.

Отжиг стали первого рода: диффузионный (~1100 °С, уменьшает ликвацию), рекристаллизационный (~700 °С, устраняет наклеп) и низкий (~200 °С, снимает внутренние напряжения). Отжиг стали второго рода: полный, неполный и изотермический (с остановкой: для высоколегированных сталей).

При нормализации сталь охлаждают на воздухе, а не в печи. Так измельчают зерно и устраняют цементитную сетку в заэвтектоидных сталях. Нормализация дешевле и производительнее отжига, но равновесной структуры не дает.

Микроструктура отожженных углеродистых сталей состоит из феррита, перлита и цементита (Рисунок 5.1).

Основными факторами при термообработке являются температура (T) и время (τ), любой термический процесс удобно изображать в этих координатах (Рисунок 7.1).

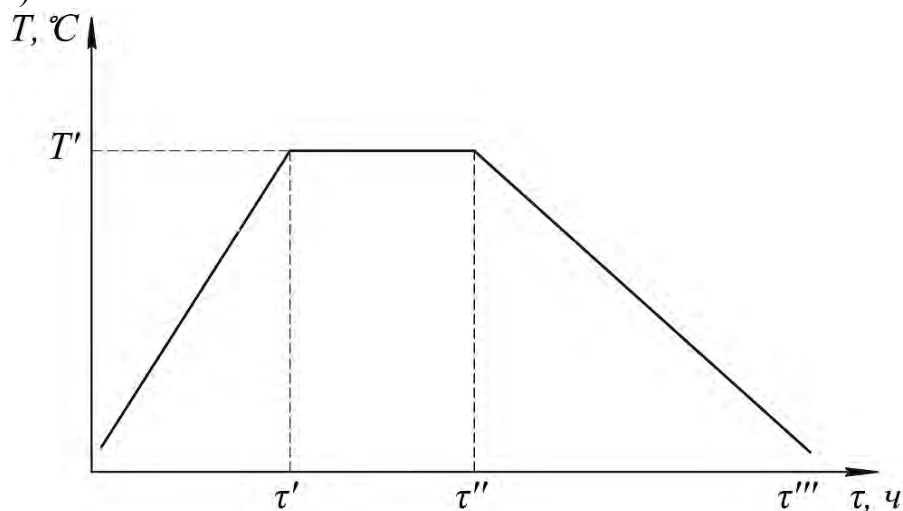


Рисунок 7.1 – Схематическое изображение процесса термообработки

Основными параметрами процесса термообработки являются температура нагрева T' , время выдержки – $\tau''-\tau'$, скорость нагрева T'/τ' и скорость охлаждения $T'/(\tau'''-\tau'')$.

7.2 Порядок выполнения работы

1. Изучить теоретическую часть и ответить на контрольные вопросы.
2. Получить три образца из одной и той же стали и измерить их твердость.
3. Один образец подвергнуть полному отжигу, второй – неполному, а третий нормализовать.
4. Изобразить графически все три режима термообработки (Рисунок 7.1).
5. Измерить твердость образцов после термической обработки.
6. Сравнить твердость образцов до и после термообработки и сделать заключение о том, в каком состоянии они находились вначале работы.
7. Составить отчет о проделанной работе.

7.3 Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Номера образцов и их исходная твердость.
3. Схематическое изображение термических процессов.
4. Твердость образцов после термообработки.
5. По изменению твердости образцов сделать заключение, в каком состоянии (отожженном, нормализованном, закаленном) они находились изначально.

7.4 Контрольные вопросы

1. Что такое отжиг первого рода?
2. Что такое отжиг второго рода?
3. Чем отжиг отличается от нормализации?
4. Чем полный отжиг отличается от неполного?
5. Какая сталь прочнее: отожженная или нормализованная?
6. Какая сталь пластичнее: отожженная или нормализованная?
7. Для чего нужен рекристаллизационный отжиг?
8. Для чего нужен диффузионный отжиг?
9. Для чего нужен низкий отжиг?
10. Что такое перлит?
11. Что такое сорбит?
12. Что такое троостит?
13. Что такое изотермический отжиг и зачем он нужен?
14. До какой температуры нагревают сталь при диффузионном отжиге?
15. До какой температуры греют сталь при рекристаллизационном отжиге?
16. До какой температуры нагревают сталь при низком отжиге?
17. Зачем нужна нормализация?
18. Из чего состоит микроструктура отожженных углеродистых сталей?
19. Какие бывают ферритно-цементитные смеси и чем они различаются?
20. Какая сталь тверже: отожженная или нормализованная?

8 Закалка и отпуск стали

Цель работы – изучить технологию термического упрочнения конструкционных и инструментальных сталей.

8.1 Теоретическая часть

Закалкой называют быстрое охлаждение горячего металла. Она дает прочную и твердую метастабильную структуру, но снижает пластичность и вязкость сплава. Критическая скорость закалки – минимальная скорость охлаждения, при которой пересыщенный твердый раствор еще не распадается на фазы. Медленнее охлаждать нельзя, закалки не будет.

Закалка бывает полная и неполная, с мартенситным превращением и без него, объемная и поверхностная. При полной закалке сплав нагревают до гомогенного состояния, а при неполной греют слабее, гомогенизация структуры частичная. Закалка с мартенситным превращением дает прочную и твердую метастабильную структуру – мартенсит. Закалка без мартенситного превращения дает пересыщенный твердый раствор; упрочнение сплава происходит при последующем старении этого метастабильного раствора.

Объемная закалка увеличивает прочность и твердость металла; деталь нагревают в печи и затем быстро охлаждают. Поверхностная закалка повышает твердость и износостойкость поверхности, а прочность почти не изменяет, так как охватывает лишь тонкий слой. Поверхность детали нагревают индукцией или лазером.

Отпуском называют нагрев сплава, закаленного с мартенситным превращением. Он стабилизирует структуру, снижает хрупкость, повышает надежность металла. Закаленную сталь без отпуска не используют, она слишком хрупкая и ненадежная.

Старением называют нагрев сплава, закаленного без мартенситного превращения. В процессе этой термической операции из пересыщенного твердого раствора, полученного при закалке, выпадают мелкодисперсные вторичные фазы, упрочняющие сплав. Старение бывает естественное (без нагрева) и искусственное (с легким нагревом).

Способ охлаждения при закалке зависит от состава стали. Простое непрерывное охлаждение ведет к большим внутренним напряжениям и сильно коробит сталь. Закалка в двух средах (через воду в масло) и ступенчатая закалка (с остановками) позволяют уменьшить закалочные напряжения. Изотермическая закалка в расплавленных солях дает прочный и твердый бейнит, но для такой обработки необходимо специальное оборудование. Закалка в заневоленном состоянии предотвращает изгиб длинных плоских изделий: ножовочные полотна закаляют зажатыми между массивными медными пластинами. Такой прием годится лишь для сталей с малой критической скоростью закалки.

Глубокое охлаждение стали жидким азотом устраняет нестабильный остаточный аустенит. После обычной закалки ~3 % аустенита в структуре стали сохраняется. В процессе эксплуатации изделия он распадается, что влияет на точность размеров. Холодом обрабатывают мерительный инструмент и прецизионные подшипники; это надо делать сразу же после закалки, иначе остаточный аустенит стабилизируется и избавиться от него не выйдет.

Закалочные среды: электролиты, вода, минеральное масло и воздух. Обычно углеродистые стали закаляют в воде, а легированные – в масле. На воздухе закаляют самокалящиеся стали мартенситного класса с очень низкой критической скоростью закалки.

Отпуск стали бывает низкий, средний и высокий. Низкий (150...250 °С, HRC 58-63) применяют для инструмента и подшипников. Средний отпуск (350...500 °С, HRC 40-50) необходим для рессорно-пружинных сталей. Высокий отпуск (500...700 °С, HRC 25-30) дает прочную надежную сталь; закалку с высоким отпуском называют улучшением.

Время нагрева деталей под закалку зависит от вида печи и размера детали (Таблица 8.1).

Таблица 8.1 – Время нагрева деталей в разных печах

Тип печи, жидкой ванны	Температура печи, °С	Время нагрева изделия, с, из расчета на 1 мм диаметра или толщины		
		круглого сечения	квадратного сечения	прямоугольного сечения
Электропечь	800	45...50	55...60	70...75
Электропечь	900	40...45	50...55	65...70
Соляная ванна	800	12... 15	15... 18	18...22
Свинцовая ванна	800	6...8	8... 10	10...12
Соляная ванна	1 300	6...8	8... 10	10...12

Микроструктура закаленной углеродистой стали (Рисунок 8.1) состоит из сорбита (а, высокий отпуск), троостита (б, средний отпуск) или мартенсита (в, низкий отпуск).

Таблица 8.2 содержит ориентировочные режимы термической обработки и получаемые в результате механические свойства углеродистых конструкционных качественных сталей разного состава. По ней также можно определить температуру нагрева под закалку и отпуск для разных сталей.



Рисунок 8.1 – Микроструктура закаленной стали:
а – сорбит, б – троостит, в – мартенсита

Таблица 8.2 – Режимы термообработки и свойства сталей

Марка стали	Температура нагрева для закалки, °С	Охлаждающая среда	Температура отпуска, °С	Твердость HRC после закалки и отпуска
35	840... 880	Вода	300...400	50...41
			400...500	41...31
			500...600	31...23
40	820... 860	Вода	200...300	52...48
			300...400	48...41
			400...500	41...33
			500...600	33...22
45	810...840	Вода	200...300	54...50
			300...400	50...41
			400...500	41...33
			600...700	33...22
50	800... 840	Вода	180...200	55...50
			380...400	48...40
			500...550	33...24
			560...620	24...20
60	785...820	Вода – масло	400	40...35
			550...620	24...18
70	770...815	Вода – масло	400	46...39
			610...670	27...22

8.2 *Порядок выполнения работы*

1. Изучить теоретическую часть и ответить на контрольные вопросы.
2. Измерить исходную твердость полученных стальных образцов.
3. Определить необходимую температуру нагрева печи под закалку и отпуск в зависимости от марки стали (Таблица 8.2).
4. Провести закалку и отпуск стальных образцов.
5. Измерить твердость закаленных сталей до и после отпуска и сравнить результаты с ожидаемыми (Таблица 8.2).
6. Составить отчет о проделанной работе.

8.3 *Содержание отчета*

1. Название и цель работы; применяемое оборудование и материалы.
2. Твердость полученного образца.
3. Режим закалки стали и твердость образца после нее.
4. Режим отпуска и окончательная твердость образца.
5. Выводы по работе.

8.4 *Контрольные вопросы*

1. Что такое закалка и зачем она нужна?
2. Какие существуют разновидности закалки?
3. Чем полная закалка отличается от неполной?
4. Что такое изотермическая закалка?
5. В каких случаях применяют закалку в заэвлектом состоянии?
6. Какие охлаждающие среды применяют при закалке сталей?
7. Как закаляют стали мартенситного класса?
8. Что такое мартенсит и каковы его механические свойства?
9. Из чего состоят микроструктуры углеродистых закаленных сталей?
10. Что такое отпуск и зачем он нужен?
11. Какие виды отпуска применяют к сталям?
12. От чего зависит время нагрева стальных деталей в печах?
13. Какую термическую операцию называют улучшением?
14. С какой целью сталь после закалки обрабатывают холодом?

Литература

1. Пятов, В. В. Конструкционные материалы : конспект лекций / В. В. Пятов, А. Н. Голубев. – Витебск, 2020. – 60 с.
2. Пятов, В. В. Материаловедение : конспект лекций / Пятов В. В., Голубев А. Н. – Витебск, 2017. – 58 с.
3. Пятов, В. В. Материаловедение : лабораторный практикум / В. В. Пятов, С. В. Бровка. – Витебск, 2012. – 73 с.
4. Материаловедение: Учебник для вузов / Б. Н. Арзамасов и др.; под общ. ред. Б. Н. Арзамасова, Г. Г. Мухина. – 7-е изд. – М., 2005. – 648 с.
5. Металлы. Метод измерения твердости по Бринеллю : ГОСТ 9012-59. – М., 1993. – 44 с.
6. Металлы. Метод измерения твердости по Виккерсу : ГОСТ 2999-79. – М., 1987. – 32 с.
7. Металлы. Метод измерения твердости по Роквеллу : ГОСТ 9013-59. – М., 2001. – 12 с.
8. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах : ГОСТ 9454-78. – М., 2003. – 12 с.

Учебное издание

Конструкционные материалы

Методические указания по выполнению лабораторных работ

Составитель:
Пятов Владислав Владимирович

Редактор *Р. А. Никифорова*
Корректор *А. С. Прокопюк*
Компьютерная верстка *В. В. Пятов*

Подписано к печати 14.06.2024. Усл. печ. листов 2,5.
Уч.-изд. листов 2,5. Заказ № 152.

Учреждение образования «Витебский государственный технологический университет»
210038, г. Витебск, Московский пр., 72.

Отпечатано на ризографе учреждения образования
«Витебский государственный технологический университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 1/172 от 12 февраля 2014 г.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 3/1497 от 30 мая 2017 г.