

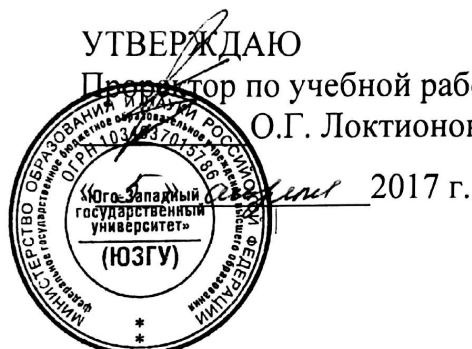
МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Юго-Западный государственный университет»
(ЮЗГУ)

Кафедра электроснабжения

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе

О.Г. Локтионова



ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЕ И КОНСТРУКЦИОННОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Электротехническое и конструкционное материаловедение» для студентов направления подготовки «Электроэнергетика и электротехника» всех форм обучения

КУРСК 2017

УДК 620.1:621.315

Составитель: Н.М. Гайдаш

Рецензент

Кандидат технических наук *Ю.А. Артеменко*

Электротехническое и конструкционное материаловедение: методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Электротехническое и конструкционное материаловедение» для студентов направления подготовки «Электроэнергетика и электротехника» всех форм обучения /Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: Н.М. Гайдаш. - Курск, 2017. 59 с.: табл. 12., ил. 23. - Библиогр. с. 59.

Излагаются методические рекомендации к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Электротехническое и конструкционное материаловедение». Указываются порядок проведения работ, обработки результатов и составления отчета.

Методические указания соответствуют требованиям ФГОС ВО по направлению подготовки «Электроэнергетика и электротехника».

Предназначены для студентов направления подготовки «Электроэнергетика и электротехника» очной и заочной форм обучения.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать *5.04.17*. Формат 60x84 1/16.
Усл. печ. л. *34*. Уч.-изд. л. *31*. Тираж 30 экз. Заказ *554* Бесплатно
Юго-Западный государственный университет.
305040 Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

1. ПОДГОТОВКА К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ

Лабораторные работы в группах проводятся в соответствии с расписанием учебных занятий в университете. Поэтому для выполнения лабораторных работ студент должен руководствоваться следующими положениями:

1. Предварительно ознакомиться с графиком выполнения лабораторных работ (он доводится на первом, вводном занятии).

2. Внимательно ознакомиться с описанием соответствующей лабораторной работы и установить, в чём состоит основная цель и задача этой работы.

3. По лекционному курсу и соответствующим литературным источникам изучить теоретическую часть, относящуюся к данной лабораторной работе.

4. До проведения лабораторной работы подготовить вступительную часть (титульный лист, название и цель лабораторной работы, приборы и оборудование); соответствующие схемы, таблицы наблюдений (они должны быть вычерчены с помощью чертёжных инструментов или с помощью компьютера); расчётные формулы; желательно миллиметровку для построения графиков.

5. Неподготовленные к работе студенты к выполнению лабораторной работы не допускаются.

Успешное выполнение лабораторных работ может быть достигнуто в том случае, если экспериментатор отчётливо представляет себе цель эксперимента и ожидаемые результаты, поэтому важным условием обстоятельности проводимых исследований является тщательная подготовка к лабораторной работе.

2. ВЫПОЛНЕНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

При выполнении лабораторных работ по курсу «Электротехническое и конструкционное материаловедение» применяется фронтальный метод. Он предусматривает выполнение всеми студентами одной и той же лабораторной работы. Этот метод считается наиболее перспективным, так как обеспечивает наибольший эффект от лабораторных работ.

Выполнять лабораторную работу нужно, соблюдая последовательность, которая указана в описании каждой работы. Перед выполнением каждого пункта работы рекомендуется выполнить все указанные действия, но без записи результатов. Это необходимо

для того, чтобы убедиться, что приборы и оборудование подобраны верно.

После окончания экспериментов нужно проанализировать полученные результаты, сопоставив их с теорией и свойствами исследуемого материала. При слишком большом расхождении результатов эксперимент следует повторить. Полезно построить черновой график. Если разброс точек на графике окажется слишком великим, то нужно повторить замер.

После выполнения лабораторной работы нужно показать результаты преподавателю, а затем отключать оборудование, приборы и привести в порядок рабочее место.

3. ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЁТА ПО ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ

Каждый студент должен самостоятельно обработать результаты выполненных им опытов и составить отчёт по проделанной текущей лабораторной работе. Он должен быть составлен настолько ясно, чтобы каждый знакомящийся с ним чётко представлял себе цель поставленной работы, тип экспериментальной установки, методику измерения и расчёт отдельных величин, порядок проведения работы, окончательные результаты испытаний в виде таблиц и графиков, а также познакомился с заключением на основе экспериментальных данных.

Отчёт составляют на одной стороне листа формата А4 или в тетради.

В начале отчёта приводится титульный лист, на котором указываются название учебного заведения, кафедры, номер и наименование проделанной лабораторной работы, название дисциплины, номер учебной группы, фамилия и инициалы выполнившего работу студента, фамилия и инициалы преподавателя.

Далее в отчёте по каждой лабораторной работе должно приведено следующее: наименование работы; цель работы; перечень электроизмерительных приборов и другого оборудования и их технические данные; результаты измерений, сведённые в таблице с краткими пояснениями; графики; анализ полученных результатов и выводы по выполненной работе.

Особое внимание необходимо уделять выполнению графиков исследуемых зависимостей. Они должны быть выполнены на миллиметровой или другой бумаге, имеющей масштабную сетку. При выборе масштаба необходимо исходить из того, чтобы графики по-

лучились нормальных размеров (не менее 100×100 мм и не более 200×200 мм).

В большинстве случаев масштабы для осей x и y необходимо брать различными, однако следует предпочитать такие, чтобы в масштабной линейной единице (в 1 см, 1 мм или одной клеточке сетки) находилось целое число откладываемых на осях единиц измеряемой величины.

У каждой координатной оси должны быть указаны условное обозначение откладываемой величины и единица её измерения.

После того как масштаб для координатных осей выбран, необходимо внимательно нанести имеющиеся в таблице экспериментальные или вычисленные точки. Построение необходимо начинать с нулевого или некоторого исходного значения для оси x и продолжать в порядке его возрастания.

Если в одних координатных осях строится несколько графиков, представляющих собой функциональную зависимость ряда величин от одной независимой переменной, то параллельно основной оси ординат, пересечение которой с осью абсцисс принято за начало координатных осей, проводят дополнительные оси ординат, каждую со своим масштабом и своими единицами измерения. За начало координат всех величин в этом случае принимают точку пересечения основных осей.

При построении точек по результатам опытов на таком совмещённом графике эти точки, во избежание ошибок, следует отмечать различными условными значками – крестиками, кружочками и т.п. После нанесения точек какого-либо графика их соединяют плавной кривой с помощью лекала. При этом возможен «разброс» точек, т.е. некоторые из этих точек не будут лежать на кривой. Это объясняется возможными погрешностями экспериментов: неточным снятием показания измерительного прибора, случайным колебанием напряжения в сети, приближённой вычислений и т.п. Если «разброс» точек оказался значительным, то опыт следует повторить. Для построения криволинейного графика необходимо иметь не менее пяти точек.

Следует обратить внимание на то, что когда экспериментальная зависимость не выражает определённого закона изменения исследуемых величин, экспериментально найденные точки соединяют между собой отрезками прямой. Кроме того, на осях графика

должны быть нанесены только основные единицы выбранного масштаба.

В отчёте следует приводить только окончательные результаты вычислений с указанием расчётных формул.

В выводах по выполненной работе надо указывать характер изменения исследуемых параметров или сравнивать полученные результаты с техническими данными исследуемого материала, которые приведены в справочной литературе.

По каждой лабораторной работе студент должен получить зачёт. Для этого он должен знать теоретический материал по данной теме, строение, свойства и область применения исследуемого материала, пояснить, как определяется тот или иной параметр, уметь делать анализ полученных результатов.

Зачёт может проходить в форме личной беседы преподавателя со студентом и может содержать программированный (тестовый) опрос. Оценка (баллы по БРС) за каждую работу может быть учтена при промежуточной аттестации (контрольные точки БРС). Такая система не только стимулирует работу студента, но и даёт преподавателю более полное представление о знаниях студента, его работоспособности, аккуратности и помогает вывести объективную оценку по дисциплине за семестр.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

ИЗМЕРЕНИЕ ТВЕРДОСТИ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Цель работы:

- изучить методы определения твердости металлов;
- измерить твердость металлов по методам Бринелля и Роквелла.

1. Общие положения

1.1 Методы измерения твердости металлов

Одним из широко распространенных видов испытания металлов является определение твердости. Твердость металла можно определять прямыми и косвенными методами. Прямые методы испытания на твердость состоят в том, что в образец вдавливают специальный твердый наконечник (из закаленной стали, алмаза или твердого сплава) различной формы (шарик, конус, пирамида). После снятия нагрузки остается отпечаток, величина которого характеризует твердость образца. При косвенных методах оцениваются свойства металла, пропорциональные его твердости. Испытания на твердость могут быть статическими и динамическими. К первому виду относятся испытания методом вдавливания, ко второму – методом ударного вдавливания. В зависимости от характера и способа приложения нагрузки твердость косвенно характеризует различные механические свойства металлов. Если наконечник вдавливается в образец, то твердость характеризует сопротивление пластической деформации. Если наконечник царапает образец, то твердость характеризует сопротивление разрушению. Твердость, определенная по отскоку наконечника, характеризует упругие свойства металла образца. По значению твердости металла можно составить представление о его свойствах. Например, чем выше твердость, определенная вдавливанием наконечника, тем меньше пластичность металла, и наоборот.

Метод измерения твердости имеет ряд преимуществ перед другими методами механических испытаний металла: простота техники и быстрота испытаний, простота формы и небольшие размеры образцов, возможность проводить испытание непосредственно на изделии без его разрушения.

Твердость определяют на специальных приборах – твердомерах. Твердомеры бывают стационарные и переносные. Принципи-

альное устройство твердомеров для всех методов испытаний на твердость одинаково.

Основными узлами твердомеров являются станина, рабочий столик, наконечник (узел, состоящий из оправки и индентора), нагружающее устройство, прибор для измерения величины деформации.

Общая схема испытания такова: деталь или образец помещают на рабочем столике, с помощью нагружающего устройства в образец вдавливают индентор и после снятия нагрузки определяют твердость.

В зависимости от цели испытания, свойств испытуемого металла, размеров образца выбирают форму, размер и материал индентора, величину и длительность приложения нагрузки.

Наиболее часто проводят определение твердости следующими методами: измерение твердости по Бринеллю – по ГОСТ 9012-59; измерение твердости по Роквеллу – по ГОСТ 9013-59; измерение твердости по Виккерсу – по ГОСТ 2999-75; измерение твердости методом ударного отпечатка – по ГОСТ 18661-73; измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников – по ГОСТ 9450-76.

Существуют общие требования к подготовке образцов и проведению испытаний:

1. Изготовление образцов и подготовка поверхности должны осуществляться способами, исключающими изменения свойств металла из-за нагрева или наклепа.

2. Поверхность образца должна быть чистой, без окисных пленок, следов ржавчины или окалины, трещин и прочих дефектов.

3. Образцы должны быть определенной толщины. После нанесения отпечатка на обратной стороне образца не должно быть следов деформации.

4. Образец должен лежать на столике жестко и устойчиво. В процессе испытания образец не должен смещаться или прогибаться.

5. Прилагаемая нагрузка должна действовать перпендикулярно к поверхности образца.

6. Нагрузка должна прилагаться и возрастать плавно до заданного значения, а далее поддерживаться постоянной в течение определенного времени.

1.1.1 Измерение твердости по Бринеллю

При определении твердости методом Бринелля в испытуемый образец или изделие вдавливается в течение определенного времени металлический шарик (рисунок 1).

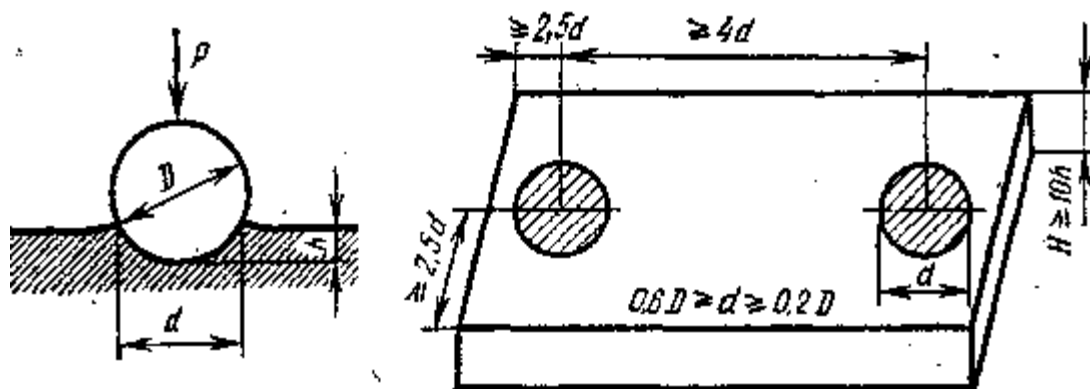


Рисунок 1. Схема расположения отпечатка при определении твердости методом Бринелля

После снятия нагрузки, на поверхности образца остается сферический отпечаток. Величина отпечатка зависит от твердости металла: чем тверже металл, тем меньше будет величина отпечатка. Число твердости по Бринеллю обозначается HB .

Чтобы определить число твердости HB (Н/м^2 или кг/мм^2), надо величину приложенной нагрузки P разделить на площадь отпечатка F :

$$HB = \frac{P}{F} = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

где D – диаметр шарика, м (или мм);

d – диаметр отпечатка, м (или мм);

P – нагрузка на шарик, Н (или кг).

Чтобы не производить каждый раз вычисления, при определении числа твердости пользуются специально составленной таблицей (приложение к ГОСТ 9012-59). Зная нагрузку, диаметры шарика и отпечатка, по этой таблице можно определить число твердости HB .

Для испытания применяют шарики из закаленной стали или твердого сплава диаметром 2,5; 5,0 и 10 мм. Диаметр шарика выбирают в зависимости от толщины испытуемого образца и его твердости: чем тоньше и тверже образец, тем меньше должен быть диаметр шарика.

Обычно испытание проводят на специально подготовленной горизонтальной площадке образца. Если поверхность детали криволинейная, то на ней должна быть подготовлена плоскость размером 20x20 мм² при диаметре шарика $D = 10,0$ мм, 10x10 мм² при диаметре шарика $D = 5,0$ мм и 5x5 мм² при диаметре шарика $D = 2,5$ мм.

Толщина испытуемого образца должна быть не меньше десятикратной глубины отпечатка. Глубину отпечатка определяют пробным испытанием или, если известен уровень твердости, по формуле:

$$H = P/\pi D^2 \cdot HB,$$

где H – глубина отпечатка, D – диаметр шарика, P – нагрузка на шарик, HB – число твердости.

Расстояние от центра отпечатка до края образца должно быть не менее $2,5d$, а между центрами двух соседних отпечатков – не менее $4d$. Для получения правильных результатов диаметр отпечатка d должен находиться в пределах 0,2...0,6 диаметра шарика D . Диаметр отпечатка d измеряют при помощи лупы или отсчетного микроскопа (рисунок 2) в двух взаимно перпендикулярных направлениях и определяют среднее арифметическое из двух определений. Разность измерений диаметров одного отпечатка не должна превышать 2% от меньшего из них. Размер отпечатка определяют с точностью до 0,05 мм при диаметре шарика 5 и 10 мм и с точностью до 0,01 мм при диаметре шарика 2,5 мм.

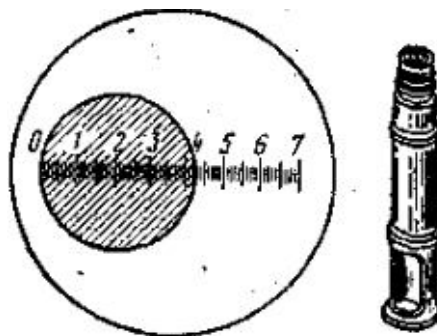


Рисунок 2. Измерение диаметра отпечатка по шкале лупы

В зависимости от твердости металла нагрузка на шарик может

изменяться от 15,6 до 3000 кг. Чтобы результаты испытаний были сопоставимы при любом диаметре взятого шарика, между нагрузкой и диаметром шарика должно выдерживаться соотношение: $P = 2,5D^2$, $P = 10D^2$, $P = 30D^2$.

Длительность приложения нагрузки должна быть достаточной для прохождения деформации и возрастать с уменьшением твердости испытуемого металла от 10 до 30 и 60 с.

При выборе диаметра шарика D , нагрузки P , продолжительности выдержки под нагрузкой t и минимальной толщины образца руководствуются таблицей 1.

Таблица 1 - Выбор параметров испытания при определении твердости методом Бринелля

Материал	Интервал твердости в числах Бринелля	Минимальная толщина испытуемого образца, мм	Соотношение между нагрузкой P и диаметром шарика	Диаметр шарика D , мм	Нагрузка P , кг	Выдержка под нагрузкой, сек
Черные металлы	140-450	от 6 до 3 от 4 до 2 < 2	$P=30D^2$	10,0 5,0 2,5	3000 750 187,5	10
	< 140	> 6 от 6 до 3 < 3	$P=10D^2$	10,0 5,0 2,5	1000 250 62,5	10
Цветные металлы	>130	от 6 до 3 от 4 до 2 < 2	$P=30D^2$	10,0 5,0 2,5	3000 750 187,5	30
	35-130	от 9 до 3 от 6 до 3 < 3	$P=10D^2$	10,0 5,0 2,5	1000 250 62,5	30
	8-35	> 6 от 6 до 3 < 3	$P=2,5D^2$	10,0 5,0 2,5	250 62,5 15,6	60

Запись результатов испытания проводится следующим образом. Если испытание проводится шариком диаметром $D = 10$ мм под нагрузкой $P = 3000$ кг с выдержкой 10 с, то записывается число твердости с символом *НВ*. Например, твердость стали *НВ 350*. Если условия испытания иные, то это показывается соответствующими индексами. Например, число твердости 230 и испытание проводилось шариком диаметром 5,0 мм при нагрузке 750 кг с выдержкой

под нагрузкой 10 с. В этом случае результаты записываются так: *НВ 5/750/10/230*.

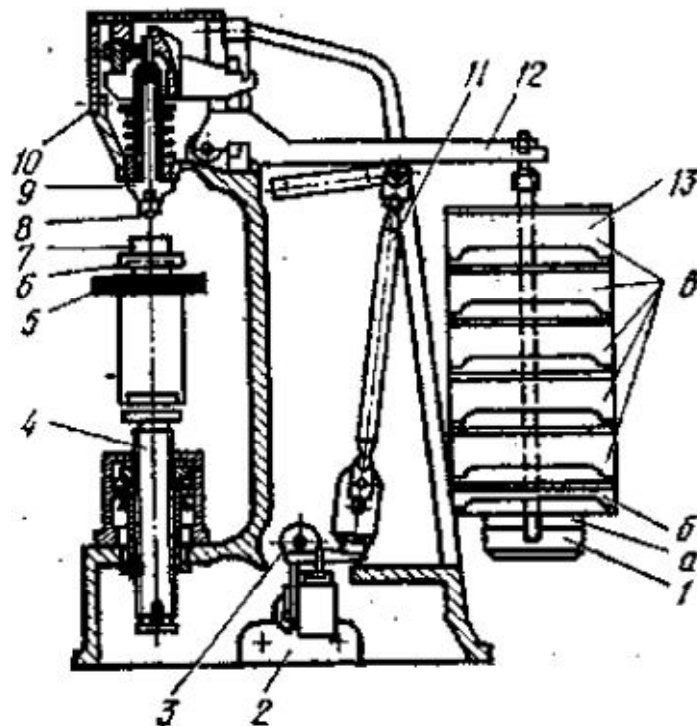


Рисунок 3. Схема прибора ТШ-2

Схема прибора для определения твердости по методу Бринелля приведена на рисунке 3.

На подвеску 1 устанавливают набор грузов 13. Сама подвеска создает нагрузку 1875 Н (187,5 кг). В наборе имеются грузы а, б и в, создающие нагрузки 625 Н (62,5 кг), 2500 Н (250 кг), 5000 Н (500 кг) соответственно. В шпинделе 9 закрепляют наконечник с шариком 8. Образец 7 устанавливают на столик 6. Вращением штурвала 5 приводят в движение винт 4 и прижимают образец к шарикам до совпадения указателя 10 с риской, при этом создается предварительная нагрузка 1000 Н (100 кг). После этого нажатием кнопки включают электродвигатель 2, через эксцентрик 3 и шатун 11 опускается рычаг 12 с нагруженной подвеской 1. При этом нагрузка передается на шарик и последний вдавливается в образец в течение установленного времени, после которого рычаг с грузами поднимается, снимая нагрузку с шарика. Вращением штурвала 5 против часовой стрелки опускается столик 6. Образец снимают и измеряют оставшийся отпечаток.

1.1.2 Измерение твердости по Роквеллу

При измерении твердости этим методом алмазный конус или

стальной шарик вдавливаются в испытуемый образец под действием общей нагрузки P . Причем сначала прилагается предварительная нагрузка P_0 , а затем основная – P_1 , т.е. $P = P_0 + P_1$. Твердость определяют по глубине отпечатка (рисунок 4).

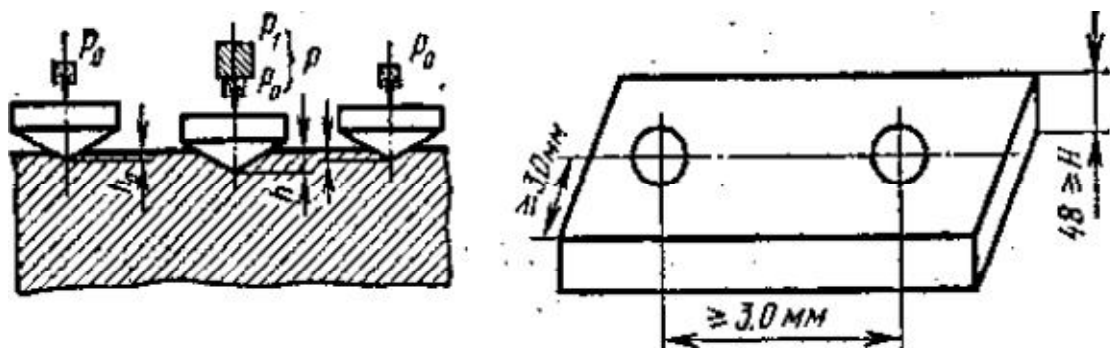


Рисунок 4. Схема испытания на твердость по методу Роквелла

За единицу твердости по Роквеллу принята условная величина, соответствующая осевому перемещению наконечника на 0,002 мм. В зависимости от твердости испытуемого образца испытание проводят вдавливанием алмазного конуса или шарика при различной величине основной и общей нагрузки. При испытании твердость можно измерять по трем шкалам: A , B и C (табл. 2).

Таблица 2 - Выбор параметров при определении твердости методом Роквелла

Шкала	Число твердости	Инденитор	Нагрузка, кг			Пределы измерения в ед. тверд. по Роквеллу, HR
			P_0	P_1	P	
A	HRA	Стальной конус	10	50	60	70...85
B	HRB	Стальной шарик	10	90	100	25...100
C	HRC	Алмазный конус	10	140	150	20...67

Поверхность для испытания может быть плоской и криволинейной. Радиус кривизны поверхности должен быть не менее 15 мм. Минимальная толщина образца должна быть не меньше восьмикратной глубины внедрения индентора после снятия основной нагрузки P_1 . При измерении твердости расстояние между центрами

двух соседних отпечатков или расстояние от центра отпечатка до края образца должно быть не менее 3,0 мм. На каждом образце проводят не менее трех измерений.

Схема прибора для измерения твердости по методу Роквелла показана на рисунке 5.

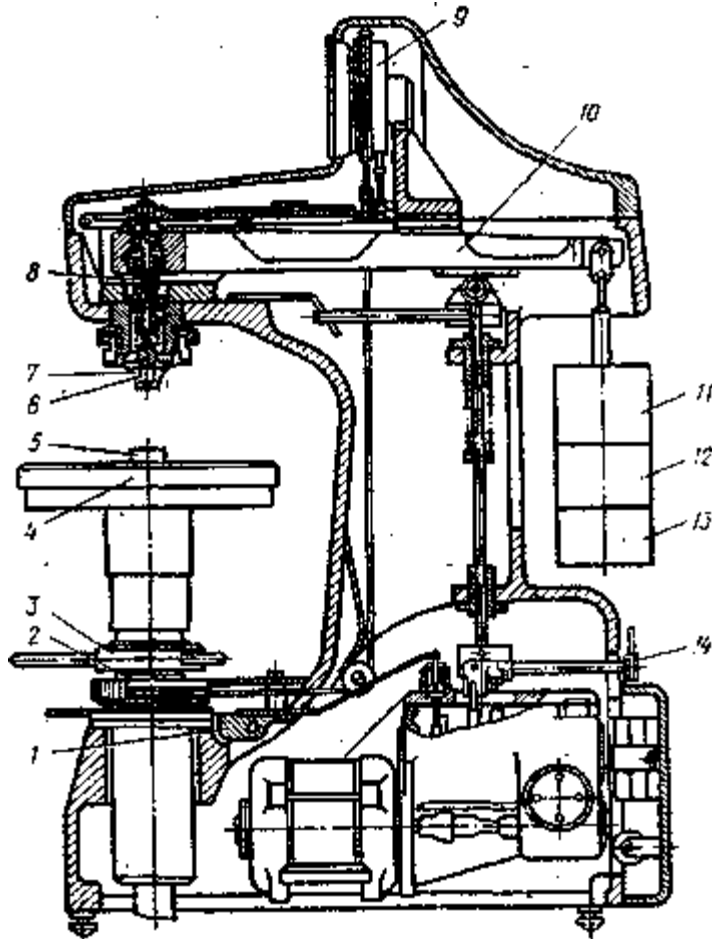


Рисунок 5. Схема прибора ТК-2

В зависимости от твердости испытываемого образца выбирают нагрузку и индентор (см. табл. 2). Нагрузку обеспечивает набор грузов, состоящий из одного постоянного 13 и двух переменных 12 и 11, каждый из которых дает соответственно нагрузку 500 Н (50 кг), 400 Н (40 кг) и 500 Н (50 кг). Твердость образца определяют по шкале индикатора 9. При испытании алмазным конусом под нагрузкой 1500 Н (150 кг) отсчет производят по черной шкале *C*, а под нагрузкой 600 Н (60 кг) – по черной шкале *A*; при испытании стальным шариком отсчет производят по красной шкале – *B*. В шпиндель 8 закрепляют оправку с индентором 6. Образец 5 устанавливают на столик 4, и, вращая по часовой стрелке маховик 3,

поднимают столик до упора образца в ограничительный чехол 7 индентора, что создает предварительную нагрузку 100 Н (10 кг). В момент упора образца в ограничительный чехол маленькая стрелка индикатора (рис. 6,а) должна дойти до точки, а большая стрелка установится около нуля черной шкалы С. Совмещают большую стрелку индикатора с нулем шкалы С, вращая барабан 2. Такое совмещение производится при испытании всеми инденторами с любыми нагрузками. При нажатии на клавишу 1 электродвигатель опускает рычаг 10 с подвеской и грузами – создается общая нагрузка: предварительная + основная. При этом индентор углубляется в образец, а большая стрелка индикатора поворачивается против движения часовой стрелки (рис. 6,б).

Длительность цикла испытания устанавливают рукояткой 14. Нормальный цикл испытания занимает 4 с, а ускоренный – 2 с. После окончания вдавливания основная нагрузка автоматически снимается. При этом большая стрелка индикатора поворачивается по часовой стрелке и указывает на соответствующей шкале число твердости по Роквеллу (рис. 6,в). Вращая маховик 8 против часовой стрелки, опускают стол 4 и освобождают образец 5.

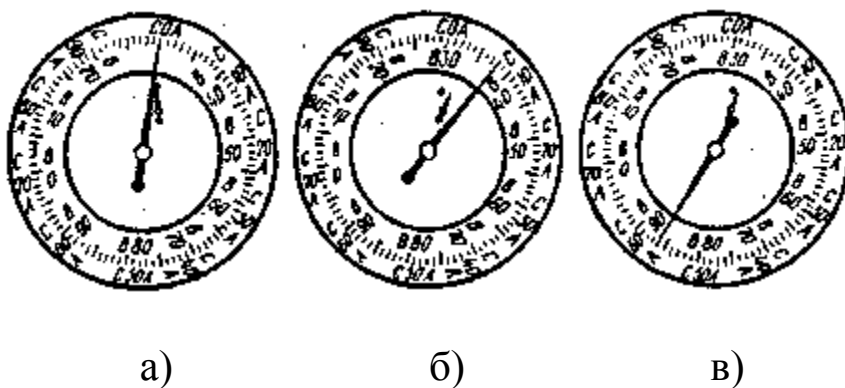


Рисунок 6. Шкала индикатора прибора ТК-2

2. Оборудование и материалы, применяемые в работе

1. Твердомер Бринелля.
2. Твердомер Роквелла.
3. Лупа Бринелля.
4. Набор образцов для испытаний.

3. Порядок определения твердости по Бринеллю

1. Пользуясь таблицей 1, определяют нагрузку и диаметр шарика в зависимости от толщины образца.
2. Устанавливают испытуемый образец на столик шлифованной поверхностью кверху. Центр отпечатка должен находиться от края образца на расстоянии не менее диаметра шарика. Каждое последующее испытание надо проводить на расстоянии не менее двух диаметров отпечатка.
3. Доводят образец до соприкосновения с шариком (см. рис.3) вращением маховика по часовой стрелке до полного упора.
4. Включают электродвигатель нажатием кнопки пускателя мотора и следят за ходом испытания. Нагрузка на образец, выключение мотора и освобождение образца от нагрузки происходят автоматически.
5. Опускают столик с испытуемым образцом вращением маховика против часовой стрелки.
6. Получают на том же образце еще один отпечаток.
7. Диаметры отпечатков измеряют при помощи лупы Бринелля в двух взаимно перпендикулярных направлениях и берут среднее арифметическое из двух измерений.
8. Результаты замеров заносят в таблицу 3.

Таблица 3- Результаты измерения твердости по Бринеллю

№ образца	Диаметр, мм	Нагрузка, Н	Диаметры отпечатков, мм			НВ
			d ₁	d ₂	d _{cp}	

Твердость по Бринеллю для ряда металлов связана эмпирической зависимостью с пределом прочности при растяжении σ . Для ковanej и катаной углеродистой стали – $\sigma = 0,36 \cdot HB$; для легированных сталей – $\sigma = (0,33 \dots 0,35) \cdot HB$; для стального литья $\sigma = (0,30 \dots 0,40) \cdot HB$.

4. Порядок измерения твердости по Роквеллу

1. По предполагаемой величине твердости образца определить шкалу (A, B или C), по которой следует измерять твердость.
2. Установить необходимую нагрузку и индентор.

3. Довести образец до соприкосновения с наконечником при помощи маховика (см. рис. 5).

4. Создать предварительную нагрузку в 10 кг, для чего вращением маховика продолжать подъем столика до тех пор, пока малая стрелка индикатора не окажется против красной точки на шкале, а большая не станет примерно в вертикальное положение.

5. Вращать барабан вместе с циферблатом до тех пор, пока для наконечника (шарика или алмазного конуса) нуль черной шкалы не совпадет с большой стрелкой (вращение барабана передается циферблату индикатора тросиком).

6. Включить основную нагрузку, для чего включить электрический привод, время приложения основной нагрузки 5...7 с (основная нагрузка снимается автоматически).

7. Записать число твердости по Роквеллу (цифру, которую указывает на шкале циферблата большая стрелка). При этом, если ее наконечником является алмазный конус, отсчет делают по черной шкале циферблата, если шарик – по красной.

8. Разгрузить образец полностью, для чего необходимо вращать маховик против часовой стрелки, столик прибора с образцом при этом опускается.

9. Испытание повторить на одном образце не менее трех раз. За число твердости принять среднее из трех последних. Результат первого испытания не учитывать. Полученные значения занести в таблицу 4.

Таблица 4 - Результаты измерения твердости по Роквеллу

№ образца	Материал	Шкала (А,В,С)	Нагрузка, Н	Тип ин- дентора	Твердость, НR	
					Числа твердости	Среднее

5. Содержание отчета

Отчет должен содержать ответы на следующие вопросы:

а) характеристика твердости как свойства металла и способы измерения твердости;

б) схемы приборов Бринелля, Роквелла и методика измерения твердости на них;

в) протокол испытаний в виде таблиц и анализ результатов измерений.

Контрольные вопросы к защите лабораторной работы

1. Какова связь между твердостью и пределом прочности у сталей?
2. Какие методы применяют для измерения твердости металлов и сплавов?
3. Чем вызывается деформация металлов?
4. В чем отличие упругой деформации от пластической?
5. Что называют концентратором напряжений?
6. Что такое разрушение металлов и сплавов?
7. Дайте определение порогу хладноломкости.
8. Почему хрупкое разрушение называют «катастрофическим»?
9. Опишите явление наклепа металлов и сплавов.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2 ПОСТРОЕНИЕ ДИАГРАММЫ СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ «ОЛОВО-ЦИНК» МЕТОДОМ ТЕРМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Цель работы: Освоить методику определения критических точек сплавов методом термического анализа и построения диаграммы состояния.

1. Общие положения

Диаграмма состояния сплавов есть графическое изображение фазового и структурного состояния сплавов в зависимости от их состава и температуры.

Наиболее часто для экспериментального построения используют термический метод анализа, заключающийся в построении кривых охлаждения или нагрева в координатах "время - температура" и нахождение на них критических точек, т.е. температур, при которых протекают фазовые превращения.

Любое фазовое превращение, происходящее в металле или сплаве (плавление, кристаллизация, изменение кристаллической решетки в твердом состоянии) сопровождается тепловым эффектом

– выделением или поглощением тепла, вследствие чего на кривых охлаждения или нагрева наблюдаются перегибы или горизонтальные площадки. Это и есть критические точки.

Кривые охлаждения (нагрева) строят с помощью термоэлектрического пирометра, состоящего из термопары и высокочувствительного гальванометра (рис. 7). Построение диаграммы состояния для двухкомпонентных сплавов заключается в перенесении значений критических точек с кривых охлаждения на плоскость в координатах "состав - температура" и соединении линиями перенесенных на диаграмму точек, относящихся к одному и тому же превращению.

Для построения диаграммы состояния используют чистые металлы олово и цинк и ряд их сплавов, например, 95% Sn + 5% Zn; 91% Sn + 9% Zn; 85% Sn + 15% Zn. Чем больше взято сплавов, тем точнее получается диаграмма.

Затем для каждого сплава строят кривые охлаждения и определяют на них положение критических точек. На рис. 8, а приведены кривые охлаждения вышеуказанных сплавов. На них точка 1 – критическая точка начала кристаллизации. Она называется точкой ликвидус. Выше точки ликвидус сплав находится в жидком состоянии. Точки 2' и 1' соответствуют окончанию кристаллизации и называются точками солидус. Ниже точки солидус сплав находится в твердом состоянии. Между ликвидусом и солидусом в сплаве имеются и жидкая и твердая (кристаллы Sn или кристаллы Zn) фазы.

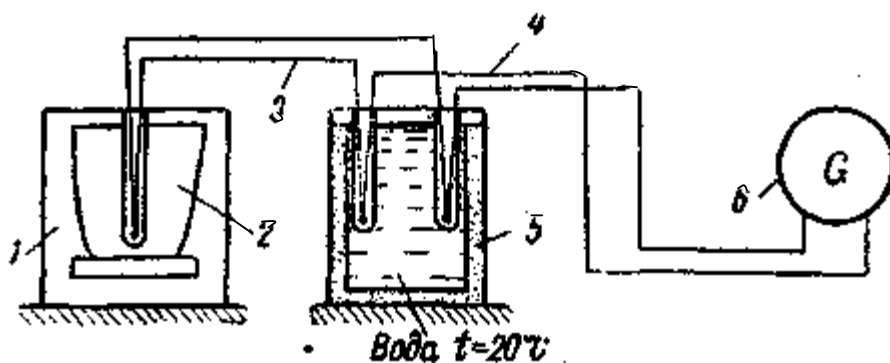


Рисунок 7. Схема установки для определения критических точек металлов и сплавов: 1 - электропечь; 2 - тигель; 3 - термопара; 4 - соединительные провода; 5 - термостат; 6 – гальванометр

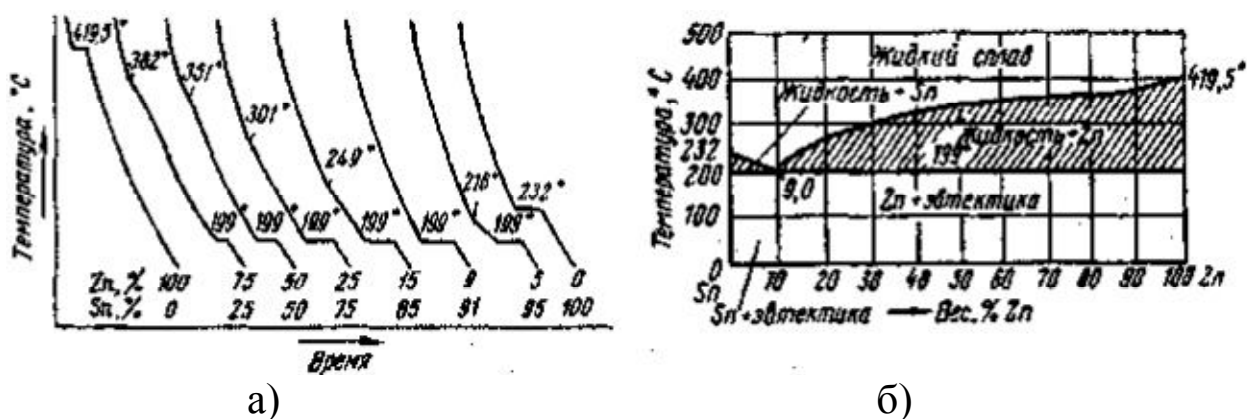


Рисунок 8. Построение диаграммы состояния «олово-цинк»:
 а) кривые охлаждения чистого цинка, нескольких сплавов системы «олово-цинк» и чистого олова; б) диаграмма состояния сплавов «олово-цинк»

Найденные значения критических точек всех исследованных сплавов наносят на диаграмму в координатах "концентрация цинка – температура". Точки ликвидус соединяют линией, которая называется линией ликвидус. Точки солидус соединяют другой линией, ее называют линией солидус.

Полученная диаграмма (рис. 8,б) и есть диаграмма состояния сплавов олова с цинком. На ней линия АСВ – линия ликвидус, ДСЕ – линия солидус.

Проанализируем кристаллизацию сплавов с различным содержанием цинка, пользуясь кривыми охлаждения на рис. 8.

Сплав 1 (сплав, содержащий менее 9% Zn). Выше точки 1 сплав находится в жидком состоянии. В интервале температур между точками 1 и 2 из жидкости выделяются и растут кристаллы олова. Вследствие выделения скрытой теплоты кристаллизации охлаждение сплава замедляется и на кривой охлаждения (в точке 1) появляется перегиб. Концентрация цинка в жидкой части сплава из-за выделения из нее олова с понижением температуры увеличивается (меняется по линии АС).

В точке 2 ($\approx 199^\circ\text{C}$) в жидкой части сплава концентрация цинка соответствует точке С диаграммы состояния, т.е. равна 9%. При этой температуре вся жидкость состава точки С кристаллизуется с одновременным образованием очень мелких кристаллов олова и цинка. При этом выделяется значительное количество тепла, вследствие чего температура сохраняется постоянной (горизонтальная

площадка 2-2' на кривой охлаждения) пока не закончится кристаллизация.

Структурная составляющая сплава, в которую закристаллизовалась при постоянной температуре (199°C) жидкость состава точки С, представляет собой механическую смесь кристаллов олова и цинка. Такая структура называется *эвтектикой*. Структура сплава 1 в твердом состоянии будет состоять из эвтектики и избыточных крупных кристаллов олова.

Сплав 2 (9% Zn). Этот сплав имеет эвтектический состав, поэтому вся жидкость кристаллизуется при постоянной, эвтектической температуре, равной 199°C. Структура сплавов в твердом состоянии полностью состоит из эвтектики.

Сплав 3 (более 9% Zn). Кристаллизация этого сплава протекает подобно сплаву 1, только избыточными кристаллами будут кристаллы цинка, а состав жидкости в интервале температур между ликвидусом и солидусом меняется по линии ВС и в точке 2 также становится эвтектическим. Структура сплава 3 после затвердевания будет состоять из эвтектики и избыточных кристаллов цинка.

Чистые металлы кристаллизуются при постоянных температурах (олово при 232°C, цинк – 419°C). Сплавы, содержащие менее 9% Zn (на диаграмме состояния – левее точки С), называются *доэвтектическими*, содержащие более 9% Zn (правее точки С) – *заэвтектическими*.

Диаграмма состояния показывает не только критические температуры сплавов, но и фазовый состав, отвечающий их равновесному состоянию (равновесное состояние характеризуется полным завершением превращений в сплавах в условиях очень медленного охлаждения).

При анализе диаграмм состояния пользуются правилом фаз Гиббса, которое выражается формулой: $C = K - \Phi + I$,

где C – число степеней свободы системы;

K – число компонентов (число элементов, образующих сплав);

Φ – число фаз;

I – внешний переменный фактор (температура).

Фазой называется химически однородная часть сплава, отделенная от других его частей поверхностью раздела, при переходе через которую состав и свойства меняются скачкообразно.

Выше линии ликвидус все сплавы находятся в однофазном состоянии (жидком), тогда $C = 2 - 1 + 1 = 2$. При двух степенях сво-

боды в этой области может изменяться и температура и концентрация, при этом сплав остается однофазным. Между ликвидусом и солидусом существуют две фазы – жидкая и кристаллы Sn или Zn, в этом случае $C = 2 - 2 + 1 = 1$. При одной степени свободы, т.е. пока система состоит из двух фаз, независимой является только температура, каждому значению температуры соответствует строго определенный состав фаз. Когда в сплаве имеются три фазы (во время эвтектического превращения), число степеней свободы равно нулю ($C = 2 - 3 + 1 = 0$). В этом состоянии сплав может существовать только в совершенно определенных условиях: при постоянной температуре и определенном составе всех находящихся в равновесии фаз. Это означает, что эвтектическое превращение начинается и заканчивается при одной и той же постоянной температуре.

2. Необходимое оборудование и материалы

1. Муфельная печь.
2. Термопара и гальванометр.
3. Керамический тигель.
4. Олово, цинк.
5. Миллиметровая бумага, линейка.

3. Порядок выполнения работы

1. Нагреть тигель с доэвтектическим сплавом олова с цинком (5% Zn) на 20-30°C выше температуры плавления сплава, температуру нагрева замерить с помощью термопары и гальванометра.

2. Выключить ток и охлаждать тигель с расплавом, фиксируя показания гальванометра через 10-15 с. После затвердевания сплава и получения температурной площадки на кривой охлаждения снимается еще 3-5 показаний гальванометра.

3. По результатам измерений построить на миллиметровой бумаге кривую охлаждения и указать процентный состав сплава.

4. Указанные в п.п. 1-3 операции повторить для сплавов: эвтектического (9% Zn), заэвтектического (30% Zn), чистого олова и чистого цинка.

5. По кривым охлаждения построить диаграмму состояния сплавов «олово-цинк». В случае рассеяния критических точек, перенесенных с кривых охлаждения на диаграмму состояния, допустимо проведение средних линий.

6. Провести анализ кривых охлаждения и диаграммы состояния с применением правила фаз.

4. Содержание отчета

В отчет включить описание методики построения диаграмм состояния, схему установки для термического анализа, таблицу опытных данных, кривые охлаждения и диаграмму состояния сплавов «олово-цинк», анализ превращений с применением правила фаз.

Контрольные вопросы к защите лабораторной работы

1. Основные виды взаимодействия компонентов при образовании сплавов: твердые растворы (замещения и внедрения), химические соединения и механические смеси, их строение и условия образования.
2. Основные типы диаграмм равновесного состояния и условия их образования. Понятия компонента, фазы, системы, структуры, равновесного (стабильного) состояния, неравновесного (метастабильного) состояния.
3. Основные методы построения диаграмм состояния.
4. Процессы, протекающие в сплавах в критических точках и в интервале температур между ними.
4. Эвтектическая кристаллизация.
5. Физический смысл правила фаз.
6. Особенности кристаллизации доэвтектических и заэвтектических сплавов.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3 КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Цель работы: Изучить процесс кристаллизации металлов и сплавов.

1. Краткие теоретические сведения

Переход металла из жидкого состояния в твердое (кристаллическое) называется *кристаллизацией*. Кристаллизация протекает в условиях, когда система переходит к термодинамически более устойчивому состоянию с меньшей энергией Гиббса (свободной энергией) G , т.е. когда энергия Гиббса кристалла меньше, чем энергия

Гиббса жидкой фазы. Если превращение происходит с небольшим изменением объема, то $G = E - TS$,

где E – полная энергия (внутренняя энергия фазы); T – абсолютная температура; S – энтропия.

Изменение энергии Гиббса металла в жидком и твердом состоянии в зависимости от температуры показано на рисунке 9. При температуре выше температуры превращения ($T_{\text{п}}$) более устойчив жидкий металл, имеющий меньший запас свободной энергии, а ниже $T_{\text{п}}$ – устойчив твердый металл. При температуре $T_{\text{п}}$ значения энергий Гиббса металла в жидком и твердом состояниях равны. Температура $T_{\text{п}}$ соответствует равновесной температуре кристаллизации (или плавления) данного вещества, при которой обе фазы (жидкая и твердая) могут сосуществовать одновременно.

Процесс кристаллизации при этой температуре еще не начинается, а начинается, тогда, когда возникает разность энергий Гиббса (ΔG), образуемая вследствие меньшей энергии Гиббса твердого металла по сравнению с жидким.

Следовательно, процесс кристаллизации может протекать только при переохлаждении металла ниже равновесной температуры $T_{\text{п}}$. Разность между температурами $T_{\text{п}}$ и $T_{\text{к}}$, при которых может протекать процесс кристаллизации, носит название степени переохлаждения: $\Delta T = T_{\text{п}} - T_{\text{к}}$.

Переход сплава из жидкого состояния в твердое, как и при кристаллизации чистых металлов, протекает только при наличии некоторого переохлаждения, когда энергия Гиббса жидкой фазы оказывается выше энергии Гиббса твердой фазы.

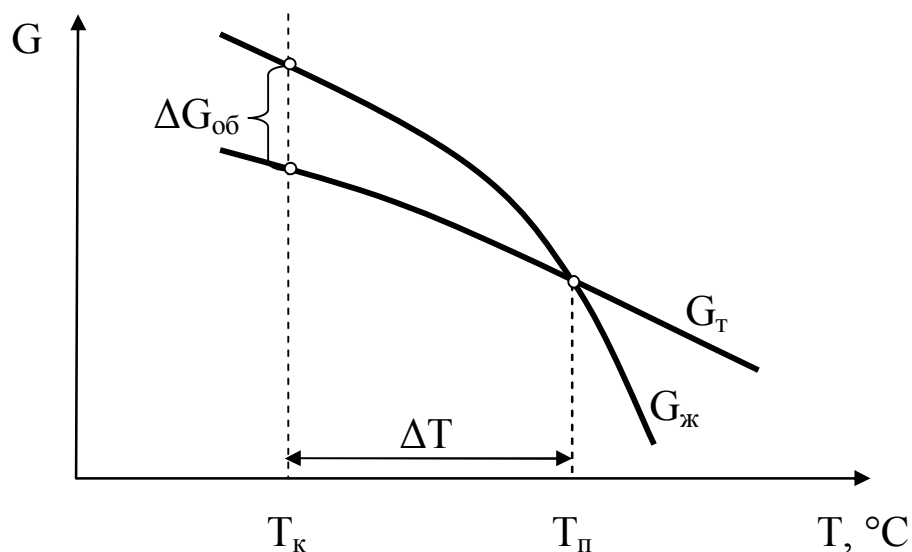


Рисунок 9. Изменение энергии Гиббса металла в жидком ($G_{\text{ж}}$)

и твердом (G_T) состояниях в зависимости от температуры (T_K – температура, при которой происходит кристаллизация)

Процесс затвердевания протекает в результате образования центров кристаллизации (зародышей) и последующего их роста в виде дендритных или полногранных кристаллитов.

Любые твердые фазы, образующиеся в жидком сплаве, отличаются по составу от исходного жидкого раствора, поэтому для образования устойчивого зародыша необходимы не только гетерогенные флуктуации, но и флуктуации концентрации. *Флуктуациями концентрации называют временно возникшие отклонения химического состава сплава в отдельных малых объемах жидкого раствора от среднего его состава.*

Такие флуктуации возникают вследствие диффузионного превращения атомов вещества в результате тепловых движений в жидком растворе.

Русский ученый Д.К. Чернов, изучая структуру литой стали, указал, что процесс кристаллизации состоит из двух элементарных процессов. Первый процесс заключается в зарождении мельчайших частиц кристаллов, которые Чернов назвал *зачатками*, а теперь их называют зародышами, или центрами кристаллизации. Вторым процессом состоит в росте кристаллов из этих центров.

Рассмотрение схем кристаллизации позволяет объяснить два момента:

1) по мере развития процесса кристаллизации в нем участвует все большее и большее число кристаллов. Поэтому процесс вначале ускоряется, пока в какой-то момент взаимное столкновение растущих кристаллов не начинает заметно препятствовать их росту;

2) в процессе кристаллизации, пока кристалл окружен жидкостью, он часто имеет правильную форму, но при столкновении и срастании кристаллов их правильная форма нарушается, внешняя форма кристалла оказывается зависимой от условий соприкосновения растущих кристаллов.

Зародыш новой фазы может возникнуть только в тех микрообъемах исходной фазы, состав которых в результате флуктуации концентрации и расположения атомов соответствует составу и строению новой кристаллизующей фазы. Если при этом концентрационные флуктуации соответствуют микрообъемам, имеющим

размер меньше критического, возникает устойчивый зародыш, способный к росту.

Самопроизвольное образование зародышей на основе фазовых и энергетических флуктуаций может проходить только в высокочистом жидком металле при больших степенях переохлаждения.

Чаще источником образования зародышей являются всевозможные твердые частицы, которые всегда присутствуют в расплаве. Если частицы примеси имеют одинаковую кристаллическую решетку с решеткой затвердевающего металла, и параметры сопрягающихся решеток примесей и кристаллизующегося вещества примерно одинаковы, то они играют роль готовых центров кристаллизации.

Структурное сходство между поверхностями сопряжения зародыша и частицы посторонней примеси приводит к уменьшению размера критического зародыша, работы его образования, и затвердевание жидкости начинается при меньшем переохлаждении, чем при самопроизвольном зарождении.

Чем больше примесей, тем больше центров кристаллизации, тем мельче получается зерно. Такое образование зародышей называют *гетерогенным*.

Модифицирование – использование специально вводимых в жидкий металл примесей для получения мелкого зерна по описанному выше механизму. Эти примеси, практически не изменяя химического состава сплава, вызывают при кристаллизации измельчение зерна и в итоге улучшение механических свойств.

Процесс перехода металла из жидкого состояния в кристаллическое можно изобразить кривыми в координатах "время – температура" (рисунок 10).

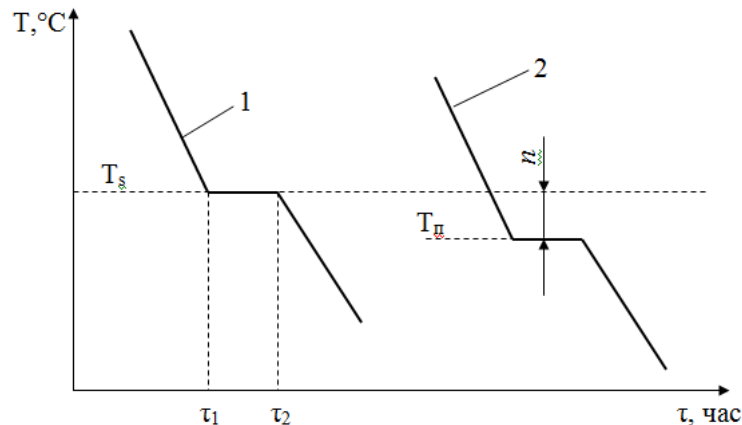


Рисунок 10. Схема кристаллизации металла (кривые охлаждения при кристаллизации)

Охлаждение металла в жидком состоянии сопровождается плавным понижением температуры и может быть названо простым охлаждением, так как при этом нет качественного изменения состояния.

При достижении теоретической температуры кристаллизации (T_S) на кривой появляется горизонтальная площадка, так как отвод тепла компенсируется выделяющейся при кристаллизации *скрытой теплотой кристаллизации*. Теоретически процесс кристаллизации изображается кривой 1. При T_S начинается процесс кристаллизации, который продолжается определенное время от τ_1 до τ_2 . Кривая 2 показывает реальный процесс кристаллизации. Жидкость непрерывно охлаждается до температуры переохлаждения $T_{\text{п}}$, лежащей ниже теоретической температуры кристаллизации. При охлаждении ниже T_S создаются энергетические условия, необходимые для протекания процесса кристаллизации.

В реальных условиях при кристаллизации слитка могут получиться кристаллы самых разнообразных форм и размеров. Это зависит от условий охлаждения слитка, а также от того, с какой температурой металл попадает в изложницу и какова была температура перегрева сплава, от скорости отвода тепла и т.д. Чаще всего при кристаллизации металлов и солей образуется дендритная структура. (*Дендрит* – древовидный кристалл). В реальных металлических слитках дендриты имеют правильную форму. Кристаллы неправильной формы называются *зернами* или *кристаллитами*.

Обычно слиток состоит из трех зон, каждая из которых характеризуется особым расположением зерен (рисунок 11), образовавшихся при различных условиях охлаждения.

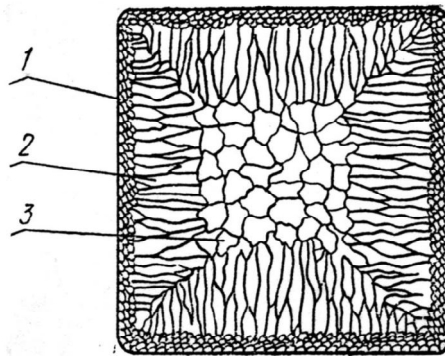


Рисунок 11. Схема строения стального слитка

Первая зона (1) – наружная мелкозернистая корка, состоящая из дезориентированных мелких кристаллов – дендритов.

Вторая зона (2) – зона столбчатых кристаллов. Их форма определяется направлением отвода тепла.

Третья зона (3) – зона равноосных кристаллов. Центрами кристаллизации являются мельчайшие включения, не растворившиеся в жидком металле.

2. Методика выполнения работы

Процесс образования кристаллов в настоящей работе изучается на примере кристаллизации солей из водных растворов (NaCl , NH_4Cl , $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ с помощью биологического микроскопа.

После нанесения капли раствора на предметное стекло начинается процесс испарения воды, приводящий к выпадению кристаллов. На примере кристаллизации NaCl можно проследить процесс образования и роста кристаллов правильной формы, а также влияние примесей на форму и число центров кристаллизации.

Кристаллизация раствора NH_4Cl позволяет наблюдать процесс роста дендритных кристаллов. (Обратить внимание на динамику их роста). Раствор $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ служит моделью, позволяющей проследить рост столбчатых кристаллов.

3. Порядок выполнения работы

1. Нанести с помощью пипетки каплю раствора на предметное стекло.

2. Поместив стекло с каплей под объектив микроскопа, получить резкое изображение края капли (капли растворов $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ необходимо предварительно подогреть до выпаривания воды).

3. Наблюдать за ростом кристаллов. Зарисовать в отчете кристаллы на нескольких последовательных стадиях роста.

4. Выполнить вышеуказанные задания для каждого раствора.

Контрольные вопросы к защите лабораторной работы

1. При каких условиях протекает кристаллизация?
2. Что называют степенью переохлаждения?
3. Что такое флуктуации концентрации?
4. Что такое центры кристаллизации?
5. Как строят кривые охлаждения? В каких координатах?
6. Что такое модифицирование?

7. Из каких зон состоит кристаллизующийся слиток?
8. Что называют дендритом?
9. Что происходит с энергией Гиббса при кристаллизации?
10. В чем отличие кристаллизации металлов от кристаллизации металлических сплавов?
11. С какой целью применяют на практике модифицирование?
12. По какому механизму работают модификаторы второго рода?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4 МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СТАЛИ

Цель работы: изучить с помощью микроскопа микроструктуры углеродистых сталей, научиться определять тип сплава по наблюдаемой микроструктуре и содержание углерода в нем.

1. Теоретическая часть

Структурные превращения в сталях происходят в соответствии с диаграммой состояния $Fe-Fe_3C$ (рис. 12), которая показывает превращения, протекающие в железоуглеродистых сплавах при различных температурах в условиях медленного охлаждения. Структурные превращения в железоуглеродистых сплавах при быстром охлаждении не соответствуют диаграмме состояния $Fe-Fe_3C$. При быстром охлаждении получают закалочные структуры: мартенсит, бейнит, троостит, сорбит.

Под равновесным состоянием сплава понимается состояние, при котором все фазовые превращения в сплаве практически закончились. Равновесное состояние в сталях обычно достигается путем полного отжига, заключающегося в нагреве доэвтектоидных и эвтектоидных сталей (содержание углерода до 0,8% включительно) выше линии GS диаграммы $Fe-Fe_3C$ на 30-50°, длительной выдержки при этой температуре и последующем охлаждении. Заэвтектоидная сталь имеет содержание углерода свыше 0,8% (до 2,14%). В соответствии с диаграммой $Fe-Fe_3C$, структура стали в равновесном состоянии, а следовательно, физико-механические свойства, определяются содержанием углерода.

Углеродистые стали в отожженном состоянии, в зависимости от содержания углерода, в общем случае имеют три структурные составляющие: феррит, цементит и перлит.

Структурной составляющей называют однородную часть структуры, наблюдаемую под микроскопом (оптическим или электронным).

Структурные составляющие железоуглеродистых сплавов могут быть однофазными (в этом случае фаза и структурная составляющая по названию совпадают) или представлять собой механическую смесь двух фаз (эвтектоид, эвтектика; каждая из этих структурных составляющих состоит из двух фаз).

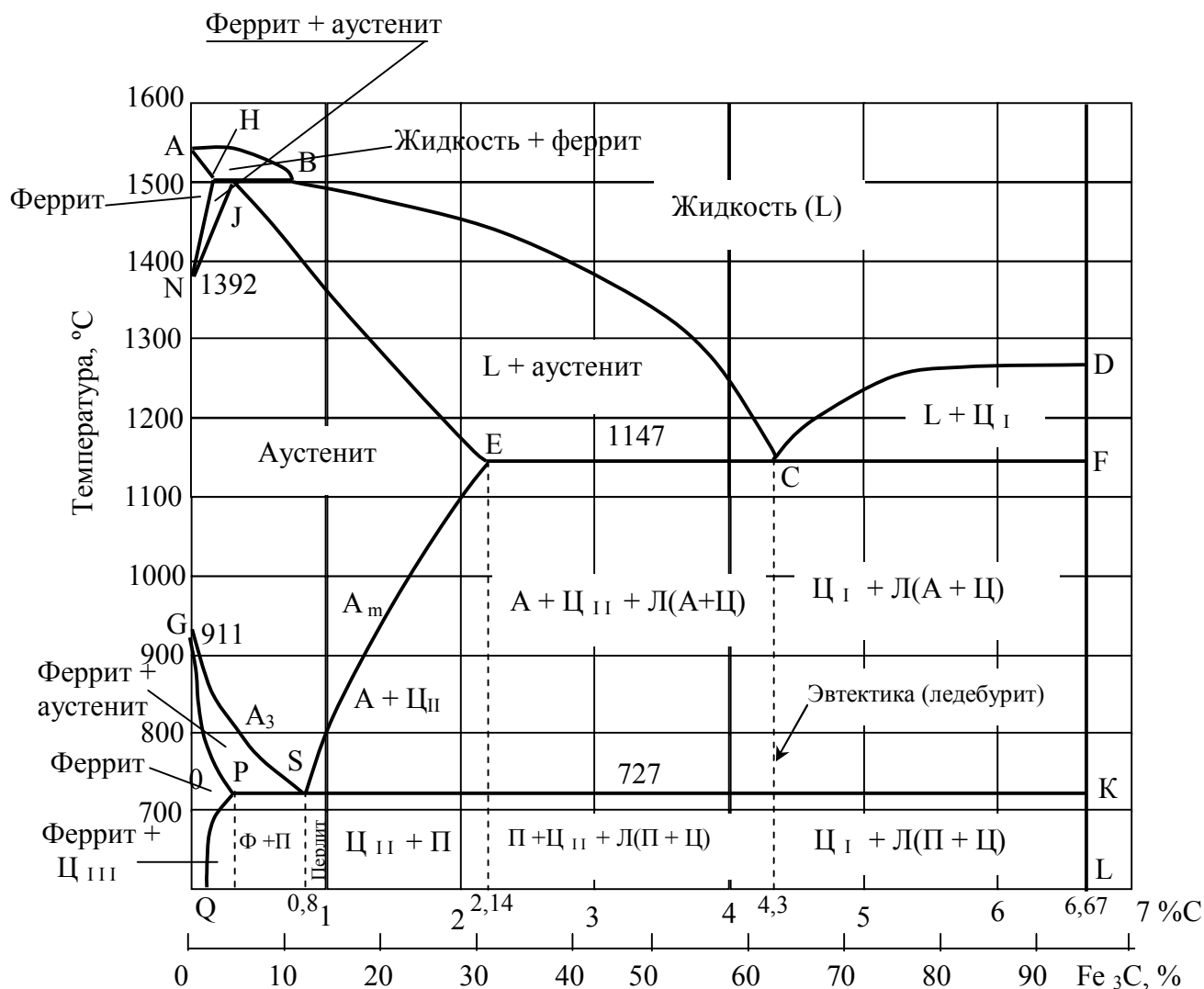


Рисунок 12. Диаграмма состояния сплавов $Fe-Fe_3C$

Фазой называют однородную часть системы (сплава), отделенную от других частей сплава поверхностью раздела, при переходе через которую химический состав или кристаллическая решетка сплава изменяется скачком. Фазы в сплавах определяют (идентифицируют) рентгенографическим анализом. Согласно диа-

грамме $Fe-Fe_3C$, в равновесных железоуглеродистых сплавах могут содержаться следующие фазы: феррит, аустенит и цементит при температурах выше линии GPSK или феррит и цементит – при температурах ниже линии GPSK, в том числе при комнатной.

Феррит (Ф) – твердый раствор углерода в α -железе (в железе с объемно-центрированной кубической решеткой). В феррите растворяется очень мало углерода: при 727°C до 0,02%, а при комнатной температуре – только до 0,006% С (растворимость углерода в феррите показывает линия PQ на рисунке 12).

Аустенит (А) – твердый раствор углерода в γ -железе (в железе с гранецентрированной кубической решеткой). Растворимость углерода в аустените высокая: 2,14% С при 1147°C и 0,8% С при 727°C (линия ES на рис. 12).

Цементит (Ц) – химическое соединение железа с углеродом, карбид железа Fe_3C . Содержание углерода в цементите составляет 6,67% по массе, или 7,5% ат.

Решетка цементита состоит из октаэдров. В центре каждого октаэдра расположен атом углерода, который окружают шесть атомов железа. Каждый атом железа принадлежит двум октаэдрам, что соответствует атомному соотношению $Fe:C = 3:1$, или формуле Fe_3C .

Согласно диаграмме $Fe-Fe_3C$ (где железо представлено левой ординатой, цементит – правой), при температурах ниже линии PSK и, следовательно, при комнатной температуре в железоуглеродистых сплавах могут присутствовать следующие структурные составляющие: перлит, ледебурит, цементит первичный, цементит вторичный, цементит третичный, феррит.

Перлит (П) представляет собой эвтектоид (продукт распада аустенита на механическую смесь двух фаз – феррита и цементита). Линия PSK диаграммы (727°C) показывает температуру эвтектоидного превращения, т.е. превращения аустенита, содержащего 0,8% углерода, в перлит.

Ледебурит (Л) – название эвтектики железоуглеродистых сплавов. Он образуется из жидкого раствора, содержащего 4,3% углерода при температуре эвтектического превращения, которая для чистых железоуглеродистых сплавов равна 1147°C (линия EF диаграммы). При температурах между 1147 и 727°C ледебурит состоит из цементита и аустенита. Поскольку при 727°C аустенит превращается в перлит, то ледебурит при температурах ниже 727°C со-

стоит из цементита и перлита. По фазовому составу ледебурит и перлит не отличаются друг от друга – оба состоят из феррита и цементита, при этом цементит, входящий в ледебурит, называют эвтектическим, а входящий в перлит – эвтектоидным. Если цементит представляет собой самостоятельную структурную составляющую, то его называют первичным, вторичным или третичным.

Цементит первичный (Ц_I) – это кристаллы цементита, выделившиеся из жидкого раствора (при температурах в области CDF, т.е. между линиями ликвидус и солидус).

Цементит вторичный (Ц_{II}) – это цементит, выделившийся из аустенита при охлаждении между температурами 1147 и 727°C (изменение растворимости цементита в аустените в этом же температурном интервале показано линией ES диаграммы).

Цементит третичный (Ц_{III}) – это цементит, выделившийся из феррита при охлаждении ниже 727°C (растворимость цементита в феррите при этих температурах показана линией PQ). Основа разделения по структуре железуглеродистых сплавов на техническое железо, стали и чугуны заключается в том, что техническое железо не имеет в структуре ни перлита, ни ледебурита; в структуре сталей имеется перлит; чугуны имеют в своей структуре и перлит и ледебурит.

Железуглеродистые сплавы с содержанием углерода менее 2,14%, т.е. стали, в зависимости от содержания углерода и наблюдаемых структур разделяются на следующие типы:

а) *технически чистое железо* ($C \leq 0,025\%$). Структура состоит из феррита и цементита третичного (рис. 13). Этот сплав характеризуется низкой твердостью и высокой пластичностью.

б) *доэвтектоидные стали* ($C = 0,025...0,8\%$). Структурными составляющими являются феррит и перлит (рис. 14). С увеличением содержания углерода количество зерен перлита увеличивается, твердость и предел прочности возрастают, а пластичность уменьшается.

в) *эвтектоидные стали* ($C = 0,8\%$), имеющие чисто перлитную структуру (рис. 15). Их твердость и предел прочности выше, чем у доэвтектоидной стали, а пластичность ниже.

г) *заэвтектоидные стали* ($C = 0,8...2,14\%$), имеющие структуры перлита и вторичного цементита (рис. 16).

Зная количество углерода, находящегося в различных структурных составляющих, и соотношение площадей, занимаемых в ис-

следуемой структуре структурными составляющими, можно с достаточной для практики точностью определить содержание углерода в стали.

Доэвтектоидная сталь

Доэвтектоидная сталь, как известно, включает две структурные составляющие: феррит и перлит, отличающиеся большой разницей по содержанию углерода. Если в феррите углерода находится ничтожное количество (0,006% при комнатной температуре), то в перлите содержится его больше (0,8%), т.е. в 133 раза выше, чем в феррите. Поэтому при расчетах содержанием углерода в феррите можно пренебречь, а вычисления вести только по одной структурной составляющей – по перлиту.

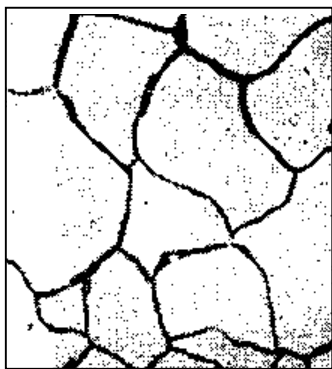
Допустим, что при наблюдении микрошлифа под микроскопом оказалось 20% площади, занимаемой перлитом, при этом феррита будет 80%, т.е. соотношение площадей перлита и феррита равно 20:80.

Для определения количества углерода составляем уравнение: 100% перлита содержит 0,8% углерода, а 20% перлита содержит X% углерода. Откуда находим:

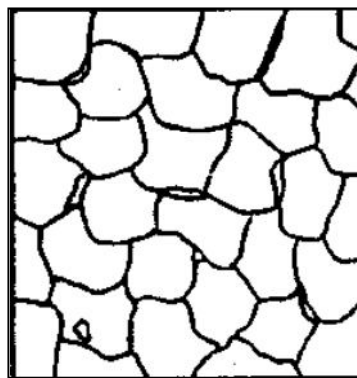
$$X = \frac{20 \cdot 0,8\%C}{100\%} = 0,16\%C$$

Следовательно, исследуемая сталь содержит примерно 0,16%С. Зная содержание углерода, по табл. 5 можно определить марку углеродистой качественной конструкционной стали. В данном случае будет сталь 15.

Пример обозначения этой стали: Сталь 15 ГОСТ 1050-80. «15» означает среднее количество углерода в сотых долях процента, т.е. 0,15%.



а)

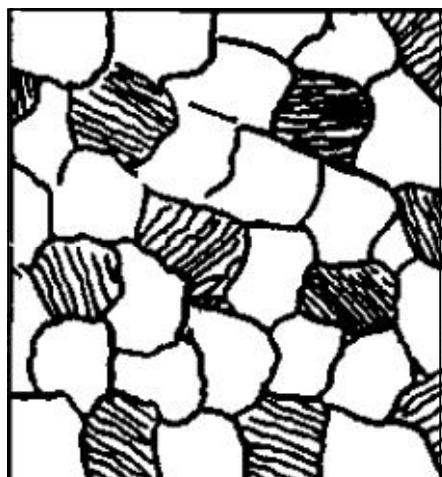


б)

Рисунок 13. Структура технического железа: а) микроструктура (феррит и третичный цементит); б) схема зарисовки микроструктуры



а)



б)

Рисунок 14. Структура доэвтектоидной стали:
а) микроструктура (феррит и перлит);
б) схема зарисовки микроструктуры

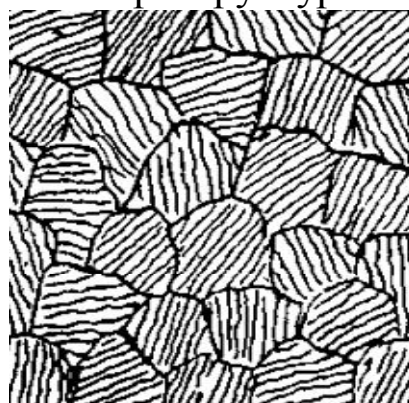


Рисунок 15. Структура эвтектоидной стали: а) микроструктура (перлит); б) схема зарисовки микроструктуры



а)



б)

Рисунок 16. Структура заэвтектоидной стали: та) микроструктура (перлит и вторичный цементит); б) схема зарисовки микроструктуры

Эвтектоидная сталь

Эвтектоидная сталь содержит только одну структурную составляющую - перлит. Содержание углерода в этой стали постоянно 0,8%. Эвтектоидная сталь относится к углеродистым – инструментальным сталям, предназначенным в основном для изготовления слесарных инструментов. Пример обозначения этой стали: Сталь У8 ГОСТ 1435-80. Буква «У» означает углеродистую инструментальную сталь, а «8» – среднее содержание углерода в десятых долях процента, т.е. 0,8%.

Заэвтектоидная сталь

Заэвтектоидная сталь включает две основные структурные составляющие: перлит и цементит вторичный, каждая из которых содержит большое количество углерода (в перлите 0,8%, а в цементите еще больше – 6,67%). Поэтому расчет содержания углерода в заэвтектоидных сталях ведут по двум структурным составляющим.

Допустим, что структура заэвтектоидной стали содержит 95% перлита и 5% цементита вторичного, тогда содержание углерода в перлите находится из соотношения: 100% перлита содержит 0,8%С, 95% перлита содержит X% С, откуда:

$$X = \frac{95\% \cdot 0,8\%C}{100\%} = 0,76\%C$$

Содержание углерода в цементите находится из соотношения: 100% цементита содержит 6,67% С, 5% цементита содержит X% С, тогда:

$$X = \frac{5\% \cdot 6,67\%C}{100\%} = 0,33\%C$$

В данном случае содержание углерода в стали будет равно сумме: $C = 0,76\%C + 0,33\%C = 1,09\%C$.

По табл. 5 определяем марку стали. В данном случае будет углеродистая инструментальная сталь У11 ГОСТ 1435-80.

Обычно площадь, занимаемая цементитом в структуре заэвтектоидных статей невелика, поэтому определить ее на глаз затруднительно, ввиду чего приведенный расчет определения содержания углерода дает большие погрешности и на практике исполь-

зуется редко.

2. Необходимое оборудование и материалы

1. Металлографический микроскоп.
2. Оснастка и материалы для изготовления микрошлифов.
3. Набор микрошлифов углеродистых сталей после травления (доэвтектоидной, эвтектоидной и заэвтектоидной).
4. Атлас микроструктур металлов и сплавов.

Таблица 5 - Углеродистые качественные конструкционные (ГОСТ 1050-80) и углеродистые инструментальные (ГОСТ 1435-80) стали

Марки сталей	Содержание углерода, %	Предел прочности σ_B , 10^5 Н/м ²	Твердость по Бринеллю, НВ	Примерное назначение
1	2	3	4	5
10	0,07...0,13	34	143	Детали, штампуемые в холодном состоянии: прокладки, шайбы и т.д.
15	0,12...0,18	38	149	Детали, изготавливаемые ковкой и штамповкой в горячем состоянии, штамповкой (с вытяжкой) в холодном состоянии: болты, гайки, шайбы, гаечные ключи, рычаги, фланцы
20	0,17...0,24	42	163	Кованные и штампованные тяги, рычаги, серьги, втулки, вкладыши
25	0,22...0,29	46	170	Оси, валы, соединительные муфты, болты, шпильки, гайки, шайбы, не испытывающие высоких нагрузок
30	0,27...0,34	50	179	Детали, изготавливаемые ковкой и штамповкой в горячем состоянии с повышенной вязкостью: оси, валы, тяги, цилиндры
35	0,32...0,39	54	207	Кованные тяги, оси, валы, болты, винты, гайки, балансиры, диафрагмы
40	0,37...0,44	58	217	Оси, штоки, коленчатые валы, зубчатые колеса, фланцы, диски
45	0,42...0,49	61	220	Плунжеры, зубчатые колеса и рейки, муфты, валы, фрикцион-

				ные диски
50	0,47...0,55	64	241	Втулки, болты, шпильки, гайки
55	0,52...0,60	66	255	Штоки, оси, зубчатые колеса, неответственные пружины
60	0,57...0,65	69	255	Эксцентрики, пружинные кольца, шайбы дисков сцепления, регулировочные прокладки
65	0,62...0,70	71	255	Рессоры, пружины
Сталь углеродистая инструментальная				
У7	0,65...0,74	67,5	187	Резцы по дереву и пластмассе, долота, стамески, зубила, кернеры, молотки, ключи гаечные
У8	0,75...0,84	67,5	187	Клещи, плоскогубцы, чеканы, штангенциркули и др. мерительный инструмент
У9	0,85...0,94	69	192	Метчики, плашки для нарезания резьбы
У10	0,95...1,04	70	197	Высадочные и чеканочные штампы, формы для литья под давлением
У11	1,05...1,14	72	202	Ножовки по металлу, сверла, зенкеры, развертки фрезы, напильники, чертилки, шаберы
У13	1,25...1,35	76	212	Лезвия бритв, граверный инструмент

3. Порядок выполнения работы

1. Изучить основные сведения о микроструктуре стали в равновесном состоянии.

2. Рассмотреть под микроскопом и изучить структуры микршлифов углеродистых сталей после травления (вначале доэвтектоидной, а затем эвтектоидной и заэвтектоидной).

3. После анализа микроструктур определить расчетным путем примерное содержание углерода в сталях с учетом площадей, занимаемых отдельными структурными составляющими.

4. По табл. 5 определить марки исследуемых сталей и их основные механические характеристики (по процентному содержанию углерода).

5. Результаты исследований занести в табл. 6.

6. В табл. 6 нарисовать структуры сталей, рассматриваемых под микроскопом и указать следующие данные: а) увеличение микроскопа; б) соотношение площадей, занимаемых отдельными

структурными составляющими (по типу 20:80); в) наименование структурных составляющих.

При выполнении рисунков микроструктур сравнить изображения микрошлифов, рассмотренных под микроскопом, с фотографиями микроструктур из атласа с целью проверки правильности определения микроструктур и структурных составляющих.

7. Занести в табл. 6 назначение исследуемых марок сталей (см. табл. 5).

Таблица 6 - Результаты исследований микроструктур углеродистых сталей

№	Тип стали по диаграмме Fe-Fe ₃ C	Структурные составляющие			С, %	Марка	ГОСТ	Механические свойства, $\times 10^5$, Н/м ²	
		Феррит, %	Перлит, %	Цементит, %				σ_b	НВ
1	Доэвтектоидная								
2	Эвтектоидная								
3	Заэвтектоидная								
Рисунок микроструктуры и область применения доэвтектоидной стали			Рисунок микроструктуры и область применения эвтектоидной стали			Рисунок микроструктуры и область применения заэвтектоидной стали			

4. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Понятие о равновесной структуре стали.
3. Типы сталей по диаграмме Fe-Fe₃C и краткая их характеристика.
4. Расчеты по определению содержания углерода в исследуемых под микроскопом сталей, путем анализа микроструктур.
5. Результаты исследования микроструктур углеродистых сталей в соответствии с табл. 6.

Контрольные вопросы к защите лабораторной работы

1. Диаграмма состояния системы "железо-цементит". Строение сплавов в различных областях диаграммы состояния. Фазы и структурные составляющие железоуглеродистых сплавов. Определение состава и количества фаз при любой температуре в любой области диаграммы.

2. Превращения в железоуглеродистых сплавах, происходящие при охлаждении из расплавленного состояния при первичной и вторичной кристаллизации. Эвтектоидное и эвтектическое превращения. Построение кривых охлаждения с применением правила фаз. Критические точки A_2 , A_3 , A_4 . Влияние углерода на критические точки A_3 и A_4 .

3. Определение содержания углерода в стали по микроструктуре. Классификация сталей по структуре в отожжённом состоянии. Влияние углерода на структуру и свойства стали. Классификация углеродистых сталей по назначению и способу производства.

4. В чем отличие цементита первичного от цементита вторичного и цементита третичного?

5. Какова особенность образования цементита первичного?

6. Как образуется цементит вторичный?

7. Что такое цементит и каковы его основные механические свойства?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЧУГУНОВ

Цель работы: изучить с помощью микроскопа микроструктуру чугунов, научиться определять тип сплава по наблюдаемой микроструктуре и содержание углерода в нем.

1. Теоретическая часть

К чугунам относятся железоуглеродистые сплавы с содержанием углерода от 2,14% до 6,67% (см. рис. 12). Причем, чугун, как и сталь, кроме железа и углерода содержит постоянные примеси: кремний, марганец, серу, фосфор и др.

Углерод в чугунах может находиться в свободном состоянии в виде графита, а также в связанном состоянии в виде цементита Fe_3C . В отличие от стали химический состав чугуна еще не характеризует достаточно надежно его свойства: структура чугунов, а следовательно и их свойства зависят как от химического состава, так и от технологического процесса производства и режима термической обработки, особенно от скорости охлаждения: изменяя скорость охлаждения, можно при одном и том же химическом составе

получить различную структуру чугуна. Высокая скорость охлаждения способствует образованию в чугуне цементита; замедленное охлаждение, наоборот, вызывает выделение углерода в виде графита. Влияние химического состава: примеси в чугуне – *Mn, Cr, Mo* (карбидообразующие) – способствуют образованию цементита; другие – *Si, Ni, Al* (графитообразующие) – вызывают выделение углерода в виде графита.

В зависимости от условий кристаллизации графит в чугунах образуется различной формы (пластинчатый, хлопьевидный, шаровидный), отсюда и могут быть следующие виды чугунов: белый, серый, ковкий, высокопрочный и легированный (антифрикционный, жаропрочный, жаростойкий, износостойкий). Для характеристики структуры чугунов следует отметить, что в чугунах помимо структурных составляющих, наблюдаемых в сталях (феррит, перлит, цементит), может быть, кроме графита, еще одна характерная структура – ледебурит, обладающая высокой твердостью, хрупкостью и низкой прочностью.

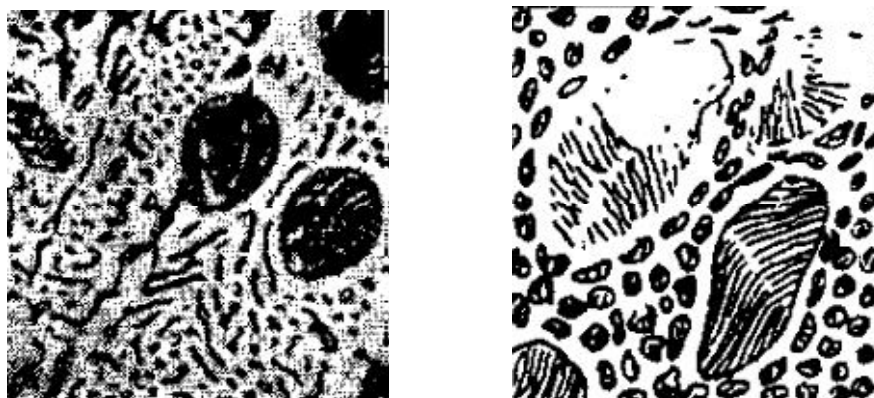
Белый чугун. Такое название он получил по матово-белому цвету в местах излома. Характерной особенностью белого чугуна является то, что в нем практически весь углерод находится в виде химического соединения – цементита Fe_3C . Структурным признаком белого чугуна является наличие ледебурита, а поэтому он очень тверд и хрупок (для изготовления деталей машин применяется в редких случаях).

Получают белые чугуны ускоренным охлаждением или добавкой карбидообразующих элементов (например, марганца).

В зависимости от содержания углерода и структуры, различают следующие типы белых чугунов:

а) *доэвтектические* с содержанием углерода от 2,14% до 4,3% имеют структуру, состоящую из трех составляющих – перлита, образовавшегося из дендритов (кристаллов) аустенита; ледебурита, образовавшегося по линии EF диаграммы $Fe-Fe_3C$, и цементита вторичного, выделившегося из твердого раствора – аустенита в интервале температур 1147...727°C в связи с уменьшением растворимости углерода в Fe с понижением температуры (рис. 17). При микроисследованиях вторичный цементит виден плохо, за исключением чугунов с содержанием углерода чуть более 2,14%, т.к. он сливается с цементитом ледебурита, и поэтому определить содер-

жание углерода по площадям, занимаемым отдельными структурами, в доэвтектическом чугуна практически нельзя.

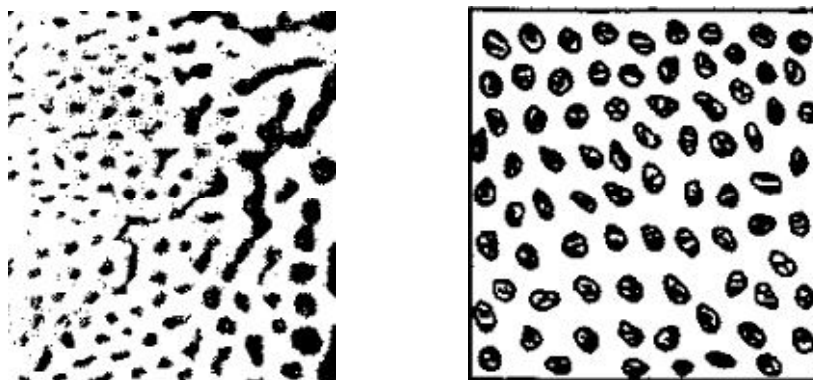


а)

б)

Рисунок 17. Структура доэвтектического белого чугуна:
а) микроструктура (перлит, вторичный цементит и ледебурит);
б) схема зарисовки микроструктуры

б) *эвтектический* с содержанием углерода 4,3% имеет одну ледебуритную составляющую – это механическая смесь перлита и цементита (рис. 18).



а)

б)

Рисунок 18. Структура эвтектического белого чугуна:
а) микроструктура (ледебурит);
б) схема зарисовки микроструктуры

в) *заэвтектические* с содержанием углерода от 4,3% до 6,67%. Они имеют структуру, состоящую из ледебурита (распавшегося) и цементита первичного в виде светлых игл (рис. 19). В заэвтектическом белом чугуна по количеству соотношений площадей струк-

турных составляющих, как и в стали, можно приблизительно определить содержание углерода, составляя подобные соотношения (аналогично стали) для других структурных составляющих – ледебурита и цементита, суммируя содержание углерода. Например:

$$C\% = \frac{4,3\%L \cdot 6,67\%Ц_I}{100\%}$$

где $C\%$ – содержание углерода в процентах;

L – площадь, занимаемая ледебуритом в поле зрения микроскопа;

$Ц_I$ – площадь, занимаемая цементитом первичным в поле зрения микроскопа.



а)



б)

Рисунок 19. Структура заэвтектического белого чугуна:

а) микроструктура (первичный цементит и ледебурит);

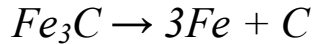
б) схема зарисовки микроструктуры

Серый чугун. Принципиальное отличие серого чугуна от белого состоит в том, что у него весь или большая часть углерода находится в свободном состоянии – в виде графита, имеющего форму нитевидных включений или пластинок различной формы. Остальная же часть углерода находится в химически связанном состоянии (Fe_3C). Из-за включений графита эти чугуны имеют серый цвет, в особенности при изломе.

Структура серого чугуна более сложна и состоит из металлической основы и включений графита, вкрапленных в эту основу. Серый чугун сравнительно мягкий, хорошо обрабатывается резанием, обладает отличными литейными свойствами. Из него получают чугунное литье для нужд промышленности (станины станков, бло-

ки цилиндров двигателей внутреннего сгорания и многие др. детали).

Серый чугун получают более медленным охлаждением, чем в случае получения белого чугуна, в результате часть или весь цементит распадается с выделением свободного графита:



Кроме скорости охлаждения на процесс графитизации оказывают влияние различные элементы, способствующие (*Si, Al, Cu, Ni*) или затрудняющие (*Mn, S, Cr*) выделение свободного графита. В зависимости от скорости охлаждения и количества элементов, влияющих на графитизацию, могут быть получены 4 группы серых чугунов с различной металлической (сталистой) основой: ферритные, ферритно-перлитные, перлитные и перлитно-цементитные.

Марки, механические свойства и область применения серых чугунов даны в табл. 9.

Пример условного обозначения серого чугуна: Чугун СЧ 21-40 ГОСТ 1412-84. "СЧ" – серый чугун, число "21" указывает предел прочности при растяжении в кг/мм² ($21 \cdot 10^5$ Н/м²), число "40" – предел прочности при изгибе в кг/мм² ($40 \cdot 10^5$ Н/м²).

Ковкий чугун. Получают длительным отжигом готовых отливок из белого доэвтектического чугуна, в результате чего цементит белого чугуна частично или полностью распадается с образованием графита отжига, который распределяется в металлической основе в виде хлопьевидных включений, не связанных между собой. В силу разобщенности включений графита ковкие чугуны обладают большей твердостью, пластичностью и износостойкостью, чем серые чугуны, а поэтому их применяют для изготовления ответственных деталей.

Название "ковкий" чугун получил условно из-за большей пластичности в сравнении с серым чугуном. В действительности ковать его нельзя. При рассмотрении под микроскопом различных марок ковкого чугуна на металлической основе нетравленных шлифов хорошо просматриваются хлопьевидные включения свободного графита. В табл. 7 даны марки и механические характеристики ковкого чугуна.

Пример обозначения ковкого чугуна: Чугун КЧ 35-10 ГОСТ 1215-84. "КЧ" – ковкий чугун, число "35" – предел прочности при растяжении в кг/мм² ($35 \cdot 10^5$ Н/м²), число "10" – относительное удлинение в процентах.

Таблица 7- Серые, ковкие и высокопрочные чугуны

Марки чугуна	ГОСТ	Предел прочности на растяжение σ_b , 10^5 Н/м ²	Относительное удлинение, %	Твердость по Бриггеллю, НВ	Примерное назначение
1	2	3	4	5	6
Серые чугуны					
СЧ 12	1412-84	12	-	143...229	Крышки, люки, кожухи, плиты, стойки, втулки, грузы, подвески
СЧ 15	1412-84	15	-	163...229	Станины, ступицы, корпуса, тонкостенные отливки с большими габаритами
СЧ 18	1412-84	18	-	170...229	Корпусные детали, стойки, опоры, патрубки, детали текстильных машин
СЧ 21	1412-84	21	-	170...241	Станины долбежных станков, вертикальные стойки фрезерных, расточных и строгальных станков, рамы, зубчатые колеса, маховики, тормозные барабаны, гильзы
СЧ 24	1412-84	24	-	170...241	Металлические литейные формы, выхлопные трубы, фитинги, рычаги, серьги, корпуса компрессоров
СЧ 32	1412-84	32	-	187...255	Станины механически ножниц, прессов, многошпиндельных станков, патроны токарных станков, зубчатые колеса, муфты, кулики, клапаны, поршневые кольца
Ковкие чугуны					
КЧ 30-6	1215-84	30	6	163	Тормозные колодки, кронштейны, рычаги, тяги, опоры, патрубки гайки специальные
КЧ 33-8	1215-84	33	8	149	Крышки, муфты, шкивы, фасонные соединительные части водопроводной арматуры: угольники, тройники, крестовины, муфты переходные
КЧ 35-10	1215-	35	10	149	Упоры, укосины, колен-

	84				чатые валы, звенья цепей, детали тракторов, сельскохозяйственных и текстильных машин
КЧ 63-3	1215-84	63	3	269	Фитинги и др. детали водопроводной арматуры (работающие при высоком давлении воды и пара), коленчатые валы, звенья цепей, детали компрессоров и др. поршневых машин
Высокопрочные чугуны					
ВЧ 40-10	7293-80	40	10	156...197	Детали, работающие с ударами, на износ, с переменными нагрузками, например, коленчатые валы, кулачковые валики, толкатели, зубчатые колеса, поршневые кольца, детали штампов и турбин
ВЧ 45-5	7293-80	45	5	170...207	Детали прокатных станов, детали станков и кузнечно-прессового оборудования
ВЧ 60-2	7293-80	60	2	197...269	Ответственные детали прокатных станов, детали станков
ВЧ 80-3	7293-80	80	3	229...300	Детали прокатных станов, детали станков

Высокопрочный чугун. Представляет собой разновидность серого чугуна, в котором свободный графит входит в металлическую основу в форме отдельных шаровидных включений, не связанных между собой. Это улучшает механические свойства, а поэтому высокопрочные чугуны применяют для особо ответственных деталей, которые ранее изготавливались из стали (коленчатые валы, кулачковые валики и др.).

Высокопрочный чугун получают модифицированием серого чугуна, путем введения в жидкий серый чугун перед разливкой в формы специальных порошков – модификаторов: магния, цезия или ферросилиция. Порошки металлов являются дополнительными центрами кристаллизации свободного графита, который концентрируется в виде округлых, шаровидных включений. Металлическая основа у высокопрочных чугунов может быть такой же, как и у серых.

В табл. 7 приведены марки, механические свойства и область применения высокопрочных чугунов. Пример обозначения высокопрочного чугуна: Чугун ВЧ 60-2 ГОСТ 7293-80. "ВЧ" – высокопрочный чугун, число "60" – предел прочности при растяжении в кг/мм^2 ($60 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$), цифра "2" – относительное удлинение в процентах.

Легированный чугун. Легированный чугун помимо обычных примесей (*Si, Mn, P, S* и др.) содержит ряд элементов (*Al, Cr, Cu, Mo, Ni, Ti* и др.), обеспечивающих особые свойства, например, жаростойкость, износостойкость и др. Пример обозначения легированного жаростойкого чугуна: Чугун ЖЧЮ2ХШ ГОСТ 7769-81. "ЖЧ" – жаростойкий чугун, "Ю2" – алюминия 2%, "Х" – хрома до 1%, "Ш" – указывает, что графит в чугуне имеет шаровидную форму.

2. Необходимое оборудование и материалы

1. Металлографический микроскоп.
2. Оснастка и материалы для изготовления микрошлифов.
3. Набор микрошлифов серого, ковкого и высокопрочного чугунов после травления.
4. Атлас микроструктур металлов и сплавов.

3. Порядок выполнения работы

1. Изучить основные сведения о микроструктурах чугунов.
2. Изучить табл. 7, где даны некоторые марки серого, ковкого и высокопрочного чугунов, а также указаны их основные механические свойства и области применения.
3. Записать в табл. 8 типичную марку серого, ковкого и высокопрочного чугунов с их механическими характеристиками.
4. Рассмотреть и проанализировать под микроскопом нетравленные микрошлифы серого, ковкого и высокопрочного чугунов с целью выявления формы и характера распределения графитовых включений.
5. В табл. 8 нарисовать структуры чугунов, рассматриваемых под микроскопом, и указать: а) увеличение микроскопа; б) скопление графита с указанием стрелками.
6. Занести в табл. 8 области применения типичных марок чугунов, рассматриваемых под микроскопом, имея в виду марки, которые будут вписаны в верхнюю часть данной таблицы.

Таблица 8 - Результаты исследований микроструктур чугунов

№	Вид чугуна	Марка	ГОСТ	Предел прочности σ_b , $\times 10^5$ Н/м ²	Относительное удлинение δ , %	Твердость по Бриггеллю, НВ
1	Серый				-	
2	Ковкий					
3	Высокопрочный					
Рисунок микроструктуры и область применения серого чугуна		Рисунок микроструктуры и область применения ковкого чугуна		Рисунок микроструктуры и область применения высокопрочного чугуна		

4. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Виды чугунов и краткая их характеристика.
3. Результаты исследований микроструктур чугунов в соответствии с табл. 8.

Контрольные вопросы к защите лабораторной работы

1. Диаграмма состояния системы "железо-цементит". Строение сплавов в различных областях диаграммы состояния. Фазы и структурные составляющие железоуглеродистых сплавов. Определение состава и количества фаз при любой температуре в любой области.

2. Превращения в железоуглеродистых сплавах, происходящие при охлаждении из расплавленного состояния при первичной и вторичной кристаллизации. Эвтектоидное и эвтектическое превращения. Построение кривых охлаждения с применением правила фаз. Критические точки A_1 , A_2 , A_3 . Влияние углерода на критические точки A_3 .

3. Белые чугуны. Классификация белых чугунов по структуре. Способы получения, свойства и применение белых чугунов. Отличие белых чугунов от стали и серых чугунов.

4. Классификация серых чугунов по форме выделения графита и металлической основе. Маркировка и получение серых, высокопрочных и ковких чугунов. Отличие серых чугунов от стали.

5. Какая структура металлической основы серого чугуна обеспечивает наибольшую прочность и износостойкость?

6. Какая структура металлической основы серого чугуна обеспечивает наименьшую прочность и износостойкость?
7. Какие преимущества имеет высокопрочный чугун в сравнении с литой углеродистой сталью?
8. Опишите процесс получения ковкого чугуна.
9. Какую форму имеет графит ковкого чугуна?
10. Опишите области применения ковкого чугуна.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6 ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

Цель работы: Изучить оптимальные температурные режимы термической обработки углеродистых сталей.

1. Общие положения

Любая операция термической обработки заключается в нагреве стали до определенной температуры, выдержке при этой температуре и охлаждении. Основные виды термической обработки стали – отжиг, нормализация, закалка и отпуск.

Отжиг – нагрев стали выше критической точки A_{c3} или A_{c1} , на 30-50°C, выдержка и медленное (вместе с печью) охлаждение. Основное назначение отжига – приближение стали к равновесному состоянию, снижение твердости, улучшение обрабатываемости резанием. Доэвтектоидные стали подвергают полному отжигу (выше A_{c3}), заэвтектоидные – неполному (выше A_{c1}).

Нормализация – нагрев стали выше A_{c3} , выдержка и охлаждение на спокойном воздухе. Для низкоуглеродистых сталей нормализация заменяет отжиг, а для среднеуглеродистых сталей, если обеспечиваются удовлетворительные служебные свойства, нормализация может заменить закалку с отпуском. Однако обычно отжиг и нормализация являются первоначальными операциями термической обработки.

Закалка заключается в нагреве стали до температуры выше A_{c3} или A_{c1} выдержке при этой температуре и быстром охлаждении. На практике температура нагрева под закалку доэвтектоидных сталей принимается на 30-50°C выше точки A_{c3} для того, чтобы обеспечить переход исходной структуры в аустенит, который при достаточно быстром охлаждении превращается в мартенсит (полная закалка). Если доэвтектоидную сталь нагреть перед закалкой до

температуры, лежащей выше точки A_{c1} , но ниже A_{c3} , то в нагретом состоянии сталь кроме аустенита будет содержать избыточный феррит (рис. 20), который сохраняется в структуре и после закалки. Такая закалка называется неполной. Твердость доэвтектоидной стали после неполной закалки будет пониженной, или «пятнистой», из-за наличия в структуре зерен избыточного феррита.



Рисунок 20. Оптимальные температуры нагрева для закалки доэвтектоидных и заэвтектоидных углеродистых сталей

Заэвтектоидная сталь, наоборот, после неполной закалки будет иметь твердость более высокую, чем после полной закалки, так как структура заэвтектоидной стали после неполной закалки состоит из мартенсита и цементита (цементит имеет твердость более высокую, чем мартенсит). Поэтому заэвтектоидная сталь подвергается неполной закалке, т.е. с нагревом до температуры на 20-50°C выше точки A_{c1} . Нагрев до более высоких температур заэвтектоидных сталей (перегрев) нежелателен, так как он будет приводить к получению более грубой мартенситной структуры (повышению хрупкости) и увеличению в закаленной стали количества остаточного аустенита, снижающего твердость.

Температура нагрева под закалку изделий из стали различных групп в зависимости от содержания углерода приведены в табл. 9. Время нагрева под закалку образцов из углеродистой стали в лабораторных муфельных электропечах назначают 1...1,5 мин на 1 мм сечения в зависимости от температуры нагрева и формы образца. В частности, для нагрева до 800°C образец диаметром 10 мм достаточно держать в печи 12 мин, до 900°C – 15 мин (с момента загрузки в печь, разогретую до указанных температур). Время выдержки

при температуре нагрева составляет $1/5 \dots 1/4$ времени нагрева. Увеличение времени выдержки сверх необходимой вредно по тем же причинам, что и перегрев.

Необходимая скорость охлаждения при закалке может быть определена по диаграмме изотермического превращения аустенита для каждой марки стали (рис. 21). На диаграмме скорость охлаждения аустенита изображается вектором, проведенным из точки K (точка K соответствует температуре нагрева стали) под углом α оси времени. На рис. 21 скорости охлаждения v_1, v_2, v_3 обеспечивают переохлаждение, приводящее к распаду аустенита на ферритоцементитную смесь (отжиг, нормализация). Вектор $v_{кр}$ соответствует критической скорости охлаждения, при которой аустенит превращается в мартенсит (в пересыщенный твердый раствор углерода в α -железе). Указанная минимальная скорость охлаждения называется критической скоростью закалки. Между ферритоцементитным распадом аустенита и мартенситным превращением имеется следующее основное различие. Разложение аустенита на ферритоцементитную смесь (перлит, сорбит, троостит, бейнит) является диффузионным процессом и может протекать до полного завершения как при непрерывном охлаждении (термокинетический распад аустенита), так и во время изотермической выдержки переохлажденного аустенита (изотермическое разложение).

Таблица 9 - Температура закалки различных групп стали

№	Группа стали	Содержание углерода, %	Температура закалки, °С
1	Углеродистая, марганцовистая, хромистая, молибденовая, хромомолибденовая, хромоникелевая (при содержании хрома до 1,25% и никеля до 2%) и никелемолибденовая	< 0,25 0,26...0,36 0,37...0,55 0,57...0,90	900 870 840 820
2	Кремнистая, кремнемарганцевая, хромокремнемарганцевая, хромованадиевая, хромомарганцевованадиевая и хромомолибденовананадиевая	0,15...0,24 0,25...0,44 0,45...0,65	900 880 870
3	Хромомарганцевотитановая и хромомарганцевомолибденовая	< 0,25	900
4	Никелевая, хромоникелевая (при содержании хрома более 1,25% и никеля более 2%) и хромоникелемолибденовая	< 0,25	840

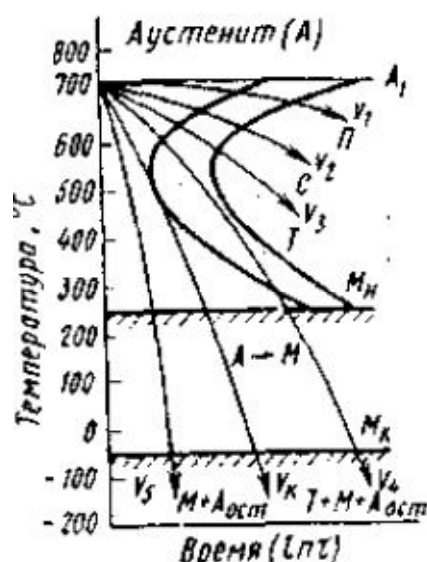


Рисунок 21. Различные скорости охлаждения, нанесенные на диаграмму изотермического превращения аустенита

Мартенситное же превращение является бездиффузионным процессом и может протекать лишь при непрерывном охлаждении. Существует интервал между температурой начала мартенситного превращения (точкой M_n и температурой конца мартенситного превращения (точкой M_k). Мартенситное превращение при остановке охлаждения между M_n и M_k быстро затухает, не доходя до конца. Для того, чтобы произошло мартенситное превращение, охлаждение нужно довести до температур, лежащих ниже точки M_k . Даже в этом случае сохраняется некоторое количество (до 2%) остаточного аустенита.

Температурный интервал мартенситного превращения зависит от химического состава стали. Наибольшее влияние на положение точек M_n и M_k оказывает содержание углерода. С увеличением содержания углерода M_n и M_k снижаются (рис. 22). Для сталей, содержащих более 0,6% углерода точка M_k лежит ниже нуля. Поэтому заэвтектоидные стали после закалки на мартенсит всегда имеют в структуре некоторое количество остаточного аустенита. Для его перевода в мартенсит применяется обработка холодом, т.е. охлаждение закаленной стали до температур ниже нуля.

Положение точек M_n и M_k практически не зависит от скорости охлаждения стали (если обеспечивается переохлаждение аустенита до температуры M_n , т.е. если скорость охлаждения до M_n выше $v_{кр}$). Поэтому охлаждение в интервале температур мартенситного превращения можно проводить с небольшой скоростью. При этом будут уменьшаться закалочные напряжения. В практике термообработки наиболее часто используются три способа закалки, в резуль-

тате которых в изделии образуется структура мартенсита с незначительным количеством остаточного аустенита.

Закалка в одном охладителе. Выбирают охлаждающую среду, обеспечивающую охлаждение со скоростью $v_{кр}$ или несколько большей и охлаждают в ней изделие до комнатной температуры (рис. 19).

Охлаждение сопровождается возникновением в изделии больших закалочных напряжений, могущих вызвать трещины или коробление. Поэтому данный способ применяют при закалке лишь изделий простой формы.

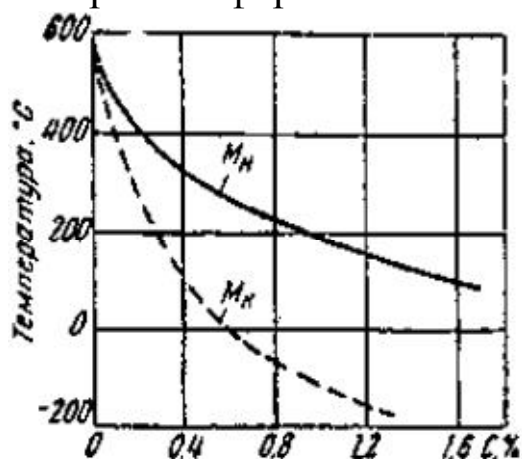


Рисунок 22. Температура начала и конца мартенситного превращения в зависимости от содержания углерода в стали

Прерывистая закалка. Это закалка в двух жидких средах, из которых первая обладает большей охлаждающей способностью, чем вторая. Такими средами обычно являются вода и масло. Мартенситный интервал температур проходят при сравнительно медленном охлаждении (в масле), что способствует уменьшению внутренних напряжений. Этот способ применяется при закалке деталей и инструментов из высокоуглеродистых сталей (рис. 23).

Недостаток прерывистой закалки заключается в том, что трудно установить момент переноса изделий из воды в масло, так как время пребывания в воде мало и измеряется обычно секундами. Этот способ требует высокой квалификации калильщика.

Ступенчатая закалка. Изделие охлаждается сначала в закалочной среде (ванне), имеющей температуру выше точки M_n для данной марки стали. После охлаждения в этой среде до выравнивания температуры по всему сечению, следует окончательное медленное охлаждение (на воздухе), во время которого и происходит закалка (рис. 23), т.е. мартенситное превращение; поэтому внут-

ренные напряжения незначительны. Этот способ закалки можно применять для мелких деталей (диаметром не более 10-12 мм), так как горячие закалочные среды не позволяют достигнуть критической скорости для больших сечений.

Кроме перечисленных способов закалки на мартенсит иногда применяется *изотермическая* закалка на троостит или бейнит. Этот способ закалки отличается от ступенчатой тем, что закаливаемые детали выдерживаются в охлаждающей среде, имеющей температуру выше M_n (обычно 250-350°C) столько времени, чтобы успело закончиться изотермическое превращение аустенита в троостит и бейнит (рис. 23). После изотермической закалки сталь обладает меньшей твердостью, чем после закалки на мартенсит, но более высокой вязкостью.

Окончательная операция термической обработки, в результате которой закаленная сталь получает требуемые механические свойства – *отпуск*. Мартенсит закалки является неустойчивой структурой, имеющей, наряду с высокой твердостью, низкую вязкость и пластичность. В нем даже при комнатной температуре самопроизвольно протекают внутренние превращения, обусловленные стремлением структурных составляющих стали к переходу в более устойчивое состояние. В результате этих превращений закаленные стальные изделия постепенно изменяют свои размеры. Перераспределение остаточных напряжений и изменение размеров при длительном вылеживании изделий без отпуска может привести к образованию трещин.

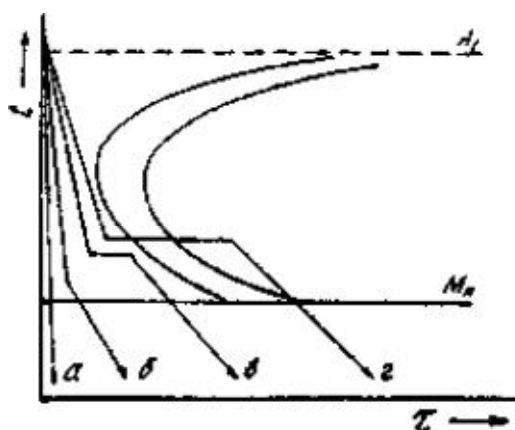


Рисунок 23. Кривые охлаждения (а, б, в, г) для различных способов закалки, нанесённые на диаграмму изотермического превращения аустенита

Отпуск заключается в нагреве закаленной стали до температуры, лежащей ниже точки A_{c1} , выдержке при этой температуре и охлаждении. В зависимости от температуры нагрева различают три вида отпуска: низкий, средний и высокий.

Низкий отпуск. Закаленные изделия нагревают до $150...250^{\circ}\text{C}$ и выдерживают при температуре нагрева в течение $2...4$ ч. При этих температурах тетрагональный мартенсит закалки превращается в отпущенный (почти кубический). Атомы углерода диффундируют из решетки тетрагонального мартенсита и образуют чрезвычайно тонкие, еще не обособившиеся пластинки карбида (толщиной в несколько атомных слоев), имеющего формулу, близкую к Fe_2C . При низком отпуске понижаются внутренние напряжения, несколько увеличивается ударная вязкость, прочность и пластичность. Твердость почти не изменяется. Структура низкоотпущенной стали при рассмотрении под обычным микроскопом аналогична исходной структуре до отпуска. Низкому отпуску подвергают изделия, у которых необходимо сохранить высокую твердость при одновременном уменьшении величины внутренних напряжений (режущий и измерительный инструмент, а также детали машин после цементации).

Средний отпуск. Изделия после закалки нагревают до $350...500^{\circ}\text{C}$ и выдерживают $1,5...2$ ч. В этом температурном интервале протекают следующие процессы: а) завершается ($250...300^{\circ}\text{C}$) превращение остаточного аустенита в отпущенный мартенсит, сопровождающееся увеличением объема и снижением ударной вязкости;

б) при $300...400^{\circ}\text{C}$ кристаллическая решетка карбидов полностью обособляется от решетки мартенсита, при этом карбид Fe_2C превращается в цементит (Fe_3C), одновременно происходит укрупнение частиц цементита – коагуляция (особенно интенсивно этот процесс протекает при температурах – выше 400°C), указанное превращение сопровождается понижением твердости; в) при $\sim 400^{\circ}\text{C}$ завершается диффузия углерода из решетки мартенсита, вследствие чего происходит дальнейшее уменьшение напряжений.

В итоге двух последних превращений образуется высокодисперсная феррито-цементитная смесь, называемая трооститом отпуска. В результате среднего отпуска ($\sim 350^{\circ}\text{C}$) сталь приобретает максимальную упругость. Среднему отпуску подвергают те закаленные изделия, от которых требуется максимально достижимые

упругие свойства при относительно высокой твердости (пружины, рессоры, ударный инструмент – зубила, штампы и т.д.).

Высокий отпуск (500...680°C; 0,5...1 ч). В процессе высокого отпуска происходит дальнейшее укрупнение и округление цементитных частиц, расположенных в ферритной основе. В результате образуется сравнительно легко различимая под микроскопом феррито-цементитная смесь, называемая сорбитом отпуска (500...600°C) или перлитом отпуска (600...680°C). В структурах отпуска (троостите, сорбите, перлите) цементит имеет зернистую (округлую) форму, тогда как в одноименных структурах изотермической закалки или нормализации он наблюдается в виде пластин. Поэтому пластичность и ударная вязкость структур отпуска мартенсита выше, чем у одноименных структур нормализации или изотермической закалки.

Термическая обработка, состоящая из закалки на мартенсит и последующего высокого отпуска, называется *улучшением*. Сталь после улучшения имеет наиболее высокую ударную вязкость и пластичность.

Улучшению подвергают детали машин, испытывающие большие ударные нагрузки. Охлаждение после отпуска углеродистых и некоторых легированных сталей не влияет на их структуру и свойства. Однако ускоренное охлаждение после высокого отпуска приведет к появлению новых тепловых напряжений. Поэтому охлаждение после отпуска обычно проводят на воздухе. Установление температур нагрева для отжига, нормализации, закалки и высокого отпуска требует знания критических точек A_{c1} и A_{c3} промышленных сталей. По диаграмме железо-углерод можно определить положение критических точек лишь для чистых углеродистых сплавов. Промышленные же стали содержат, кроме этих основных компонентов, примеси – марганец, кремний, фосфор и серу, а также в небольших количествах хром, никель и др. Диаграммы состояния многокомпонентных систем, к которым относятся и промышленные углеродистые стали, отсутствуют. Поэтому задача настоящей работы заключается в экспериментальном определении критических точек A_{c1} и A_{c3} конкретных промышленных сталей. Эта задача может быть решена методом пробных закалок, который заключается в экспериментальном построении кривых зависимости твердости стали от температуры нагрева для закалки.

2. Оборудование и материалы

1. Образцы из исследуемой стали \varnothing 0...20 мм, высотой 10...15мм.
2. Муфельная нагревательная печь.
3. Термопара с гальванометром.
4. Щипцы, ванна с охлаждающей жидкостью (водой).
5. Прибор ТК-2.
6. Атлас микроструктур сталей.

3. Порядок выполнения работы

1. Измерить толщину или диаметр образцов из исследуемой стали (см. табл. 10). Определить твердость исходной стали на приборе ТК-2.

2. Включить муфельную электропечь и отрегулировать ее на требуемый температурный режим (первый образец нагревают ниже A_{c1} на 30...50°C; каждый следующий образец нагревают на 10...30°C выше; последний образец нагревают на 30...50°C выше линии GSK).

Таблица 10 - Индивидуальные задания к лабораторной работе

№ инд. задания	Марка стали	№ инд. задания	Марка стали
1	25	11	75
2	30	12	80
3	35	13	85
4	40	14	У7
5	45	15	У8
6	50	16	У9
7	55	17	У10
8	60	18	У11
9	65	19	У12
10	70	20	У13

3. Загрузить образец в печь.

4. После соответствующей выдержки в печи образец клещами перенести в ванну с водой. Во время охлаждения образец необходимо в течении 2...3 минут энергично перемещать в воде чтобы сбить образующуюся на его поверхности паровую рубашку, замедляющую скорость охлаждения.

5. После полного охлаждения образец вынуть из воды, просушить и испытать на твердость по способу Роквелла на приборе ТК-2.

6. Результаты закалки стали оформить в виде таблицы 11 (в индивидуальное задание может также входить определение твердо-

сти стали по Бринеллю и изготовление микрошлифов исследуемых образцов до и после закалки).

7. В нагретую до температуры низкого отпуска (200°C) электропечь загрузить образец после закалки и выдержать 30 мин. По окончании выдержки образец вынуть из печи, охладить в воде или на воздухе. Определить твердость *HRC*.

Таблица 11- Результаты закалки стали

Марка стали	Содержание углерода, %	Толщина, мм	Твердость стали в исходном состоянии, HRC	Температура нагрева, $^{\circ}\text{C}$	Время выдержки, с	Охлаждающая среда	Твердость стали после закалки, HRC

8. В нагретую до температуры среднего отпуска (400°C) электропечь загрузить образец после закалки и выдержать 30 мин. Далее соблюдать последовательность действий, выполненных с первым образцом после выдержки в печи.

9. В нагретую до температуры высокого отпуска (600°C) электропечь загрузить образец после закалки и выдержать 30 мин. Далее соблюдать последовательность действий, выполненных с первым образцом.

10. Результаты отпуска стали оформить в виде таблицы 12 (в индивидуальное задание входит изучение под микроскопом полученных в результате низкого, среднего и высокого отпуска микроструктур: мартенсит отпуска, троостит отпуска и сорбит отпуска).

Таблица 12 - Результаты отпуска стали

Марка стали	Содержание углерода, %	Толщина, мм	Твердость стали до отпуска, HRC	Температура нагрева, $^{\circ}\text{C}$	Время выдержки, с	Охлаждающая среда	Твердость стали после отпуска, HRC

4. Содержание отчета

Отчет должен содержать ответы на следующие вопросы:

1. Сущность и назначение отжига, нормализации, закалки и отпуска.
2. Результаты исследования термической обработки стали.
3. Графики зависимости твердости от температуры закалки и температуры отпуска.
4. Оптимальные температурные режимы закалки и отпуска доэвтектоидных и заэвтектоидных сталей.

Контрольные вопросы к защите лабораторной работы

1. Практическое применение диаграммы состояния железо-цементит для проведения термической обработки стали.
2. Основные виды термической обработки стали и их назначение.
3. Теория закалки и отпуска стали.
4. Цель закалки, выбор температуры закалки.
5. Требования к закалочным средам и методы закалки.
6. Виды и назначение отпуска стали.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Колесов С.Н. Материаловедение и технология конструкционных материалов: Учебник для вузов [Текст] / С.Н. Колесов, И.С. Колесов // М.: Высшая школа, 2004. - 519 с.
2. Лахтин, Ю.М. Материаловедение. [Текст] / Ю.М. Лахтин, В.П. Леонтьева // М.: Машиностроение. 1990. - 493 с.
3. Травин, О.В. Материаловедение. [Текст] / О.В. Травин, Н.Т. Травина // М.: Металлургия, 1989. - 384 с.
3. Модберг, Р.К. Материаловедение. [Текст] / Р.К. Модберг // М.: Высшая школа. 1991. - 345 с.
4. Новиков, И.И. Материаловедение, термообработка и рентгенография. [Текст] / И.И. Новиков, Г.Б. Строганов, А.И. Новиков // М.: МИСиС. 1994.
5. Болховитинов, Н.Ф. Атлас макро- и микроструктур металлов и сплавов. [Текст] / Н.Ф. Болховитинов, Е.Н. Болховитинова // М.: Машиностроение, 1964. - 104 с.