

**МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

ФГБОУ ВО Пензенский ГАУ

**МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ.
ТЕХНОЛОГИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ
МАТЕРИАЛОВ**

Раздел «Материаловедение»

Пенза 2018

**МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

ФГБОУ ВО Пензенский ГАУ

Кафедра «Основы конструирования механизмов и машин»

И.А. Спицын

**МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ.
ТЕХНОЛОГИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ
МАТЕРИАЛОВ**

Раздел «Материаловедение»

Лабораторный практикум

Пенза 2018

УДК 621.91 (075)

ББК 34.5 (я7)

C 72

Рецензент – А.А. Орехов, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Технический сервис машин»

Печатается по решению методической комиссии инженерного факультета от 28.05.2018 г., протокол № 9.

Спицын, Иван Алексеевич

C 72 Материаловедение. Технология конструкционных материалов. Раздел «Материаловедение»: лабораторный практикум / И.А. Спицын. – Пенза: РИО ПГАУ, 2018. – 102 с.

Лабораторный практикум предназначен для студентов инженерного факультета Пензенского ГАУ, обучающихся по направлениям 35.03.06 Агроинженерия и 23.03.03 Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов.

В соответствии с рабочей программой дисциплины «Материаловедение. Технология конструкционных материалов» по разделу «Материаловедение» предусмотрено выполнение восьми лабораторных работ. В каждой работе приведены краткие теоретические сведения и методические пояснения для выполнения лабораторных заданий, что обеспечит лучшее усвоение основных вопросов раздела и приобретение необходимых компетенций.

© ФГБОУ ВО

Пензенский ГАУ, 2018

© И.А. Спицын, 2018

ВВЕДЕНИЕ

Материаловедение – раздел дисциплины «Материаловедение. Технология конструкционных материалов». Оно связано с изучением строения материалов, способов их обработки с целью придания им определённых физико-механических и других свойств, что является основой современного машиностроительного и ремонтного производства. От физических и механических свойств зависят технологические и эксплуатационные свойства материалов, определяющие ресурс деталей, сборочных единиц и машин в целом. В этой связи, для поддержания сельскохозяйственных машин и оборудования, транспортно-технологических машин и комплексов в работоспособном состоянии, бакалавры должны уметь обосновано выбирать материал, назначать его обработку с целью обеспечения свойств, обеспечивающих высокую надёжность деталей при проведении технического обслуживания и ремонта машин.

В практикуме приводятся теоретические сведения и методика выполнения лабораторных работ по определению механических свойств металлов и сплавов; технологии приготовления микрошлифа для микроскопического исследования металлов и сплавов; изучению фазового состава и структурных составляющих диаграммы состояния системы железо-углерод, процессов, протекающих в сплавах при охлаждении и нагревании; изучению микроструктур углеродистых, легированных сталей и чугунов, цветных металлов и сплавов в равновесном состоянии; влиянию термической обработки на механические свойства сталей.

При выполнении работ обучающиеся изучают оборудование и приборное обеспечение, приобретают практические навыки и закрепляют теоретические знания по дисциплине.

Перед проведением каждой лабораторной работы проводится входной контроль знаний обучающихся, которые в ходе выполнения работы получают данные, заносят их в рабочие тетради, обрабатывают и анализируют результаты и оформляют отчёт, который в последующем защищают.

Лабораторная работа № 1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТВЕРДОСТИ МЕТАЛЛОВ

Цель работы: изучение методики и приобретение практических навыков определения твёрдости металлических сплавов и других материалов.

Краткие теоретические сведения. Твёрдость – механическое свойство материала сопротивляться местной деформации при внедрении в него другого, более твёрдого тела (индентора). Это тело может иметь форму шарика, конуса, пирамиды и изготовлено из закалённой стали, твёрдого сплава или алмаза.

Определение твёрдости является наиболее распространённым методом испытаний материалов в лабораторных и заводских условиях. Твёрдость отражает многие рабочие свойства материала, например, сопротивляемость истиранию, режущие свойства, способность обрабатываться шлифованием или резанием, выдерживать местные давления и др. По твердости можно определить и некоторые другие механические свойства. Например, для определения предела прочности при растяжении имеется эмпирическая зависимость вида

$$\sigma_b = k \cdot HB \cdot 10, \text{ МПа}, \quad (1.1)$$

где k – коэффициент пропорциональности; HB – твёрдость по Бринеллю. Для кованой и катаной углеродистой стали $k = 0,36$; легированной стали – $0,33\dots 0,35$; отожжённой меди – $0,48$; латуни, бронзы – $0,53$; алюминия – $0,4$.

При испытании материалов на твердость не требуется изготовления специальных образцов. Методика испытаний позволяет определять твёрдость готовой детали без её разрушения.

По характеру воздействия индентора на испытуемый материал различают следующие методы: вдавливания, отскока, царапания. Наибольшее применение получили методы вдавливания: стального закалённого шарика (метод Бринелля); алмазного или твердосплавного конуса, а также закалённого шарика (метод Роквелла); четырёхгранной алмазной пирамиды (метод Виккерса).

По Бринеллю определяют твердость относительно мягких материалов: цветных металлов и их сплавов, отожжённой стали, чугунов (кроме белого), полимерных материалов.

По Роквеллу чаще всего определяют твердость твердых материалов: закаленных сталей, твердых сплавов, керамики, твердых по-

крытий, в том числе наплавленных слоев достаточной глубины на сталях и чугунах, но можно определять и твердость сравнительно мягких материалов.

Метод Виккерса используется для испытания твердости деталей малой толщины или тонких поверхностных слоев, имеющих высокую твердость. Реже этот метод применяется для измерения твердости твердых и мягких материалов.

По методу вдавливания измеряется микротвёрдость в пределах отдельных зерен или очень тонких слоев. В качестве индентора применяется четырёхгранная алмазная пирамида.

Твердость по методу Бринелля

Определение твёрдости по методу Бринелля применяется для материалов с твёрдостью не более 650 единиц. При этом на специальном приборе в испытуемый материал под определённой нагрузкой P вдавливается стальной закалённый шарик диаметром D , в результате чего на поверхности металла образуется отпечаток (рис. 1.1).

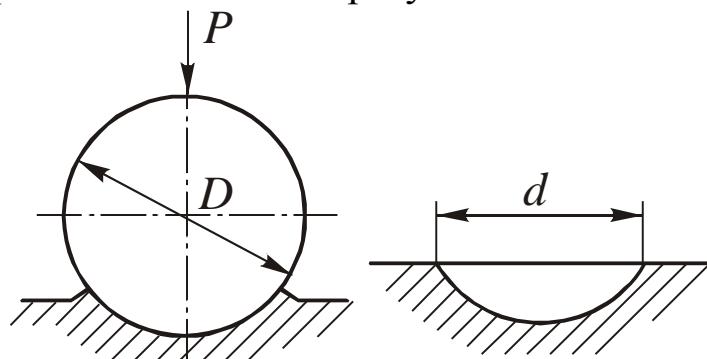


Рисунок 1.1 – Схема к определению твёрдости материала по методу Бринелля: P – нагрузка; D – диаметр шарика; d – диаметр отпечатка

Твёрдость по Бринеллю (HB) определяется отношением нагрузки, действующей на шарик, к площади поверхности полученного отпечатка, т.е.

$$HB = \frac{P}{F}, \quad (1.2)$$

где P – нагрузка, кгс; F – площадь поверхности шарового отпечатка, мм^2 .

Площадь отпечатка через его диаметр и диаметр шарика определяется по формуле

$$F = \frac{\pi D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})}{2}. \quad (1.3)$$

Подставив выражение (1.3) в формулу (1.2) получим

$$HB = \frac{2P}{\pi D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})}, \quad (1.4)$$

где P – нагрузка, кгс.

Значения твёрдости материалов в зависимости от нагрузки, диаметра шарика и диаметра полученного отпечатка сведены в таблицу 1.1.

Чтобы показать, при каких условиях проведены определения твёрдости, применяют условный метод записи, например 250 HB 5/750/25, что означает твёрдость по Бринеллю 250, полученная при диаметре шарика 5 мм, нагрузке 750 кгс, времени выдержки под нагрузкой 25 с.

Для определения твёрдости по методу Бринелля применяют приборы различных типов. Рассмотрим конструкцию прибора рычажно-механического типа ТШ-2 (рис. 1.2).

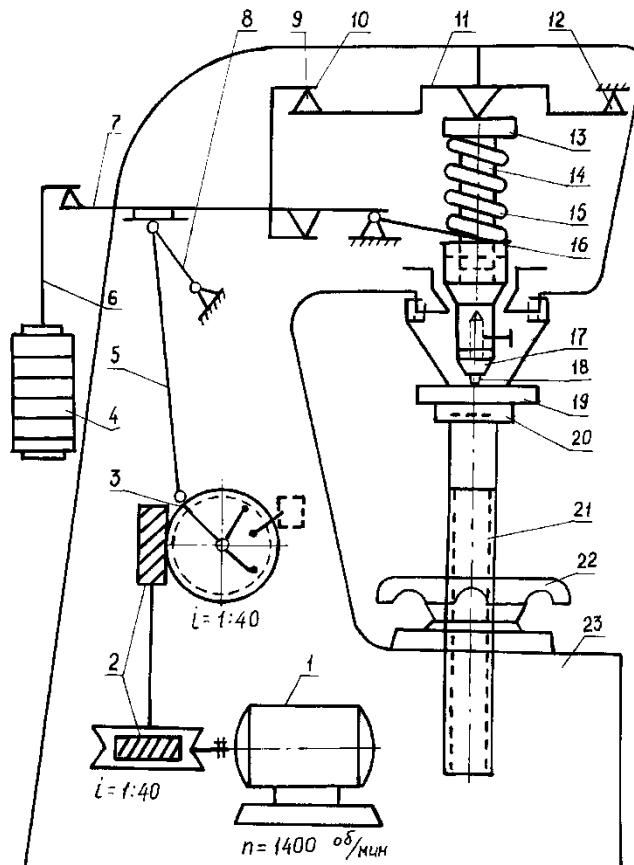


Рисунок 1.2 – Кинематическая схема твердомера Бринелля типа ТШ-2

Прибор состоит из станины 23, в нижней части которой поме-
6

щён винт 21 со сменными столиками 20 для установки на них испытуемых образцов 19. Перемещение винта осуществляется вручную маховиком 22. В верхней части станины находится шпиндель 14, в который устанавливаются сменные наконечники 17 с шариками 18 диаметром: 2,5; 5 и 10 мм.

Основная нагрузка прикладывается к образцу посредством рычажной системы. На свободном конце основного рычага 7, устанавливается подвеска с грузами 4. Комбинациями грузов можно сформировать нагрузки 1840 (187,5), 2450 (250), 7355 (750), 9800 (1000) и 29430 (3000) Н (кгс).

Рычаг 7 правым концом шарнирно закреплён на оси 16 и связан серьгой 10 с малым рычагом 11, на котором закреплены две призмы 9 и 12. На призму 10 опирается серьга, а призма 12 упирается в жёстко закреплённую на корпусе прибора подушку. В средней части рычага имеется ещё призма, которая упирается в подушку 13, запрессованную в верхний конец шпинделя 14. На шпинделе имеется пружина 15.

При нажатии пусковой кнопки движение от вала электродвигателя 1 передаётся через червячный редуктор 2 кривошипу 3, при повороте которого против часовой стрелки опускается шатун 5 и нагрузка через левый конец рычага 7, серьгу 10 и рычаг 11 передаётся на шпиндель, шарик и испытуемый образец. Для установки продолжительности выдержки образца под нагрузкой служит подвижный упор переключателя, установленный на валу червячного колеса редуктора. Упор устанавливается до начала испытания в положение, соответствующее требуемой выдержке. При вращении вала червячного колеса редуктора упор доходит до рычага, который переключает фазы электродвигателя и вал электродвигателя начинает вращаться в другую сторону, вследствие чего шатун поднимается и нагрузка со шпинделя снимается.

Подготовка прибора и проведение испытания

1. В зависимости от материала и толщины образца по таблице 1.1 определяют диаметр шарика, нагрузку и время выдержки под нагрузкой.

2. Устанавливают на подвеску 6 набор грузов, учитывая, что рычажная система с подвеской создают нагрузку 1840 Н (187,5 кгс). Затем вставляют во втулку шпинделя и закрепляют винтом наконечник с выбранным шариком. Время выдержки под нагрузкой устанавлива-

ют поворотом лимба, расположенного на правой стороне прибора следующим образом: риску на шкале лимба, соответствующую заданной выдержке ставят против риски шкалы, закреплённой на станне, в соответствии с предполагаемой твёрдостью и диаметром шарика. Лимб закрепляют с помощью винта. При испытании чёрных сплавов пользуются чёрными, а цветных красными – шкалами и рисками.

3. Поверхность образца зачищают шлифовальной шкуркой и устанавливают на столике прибора. Вращением маховика 22 по часовой стрелке столик с образцом поднимают до упора, при этом пружина сжимается и создаёт предварительную нагрузку 980 Н (100 кгс). Центр шарика должен находиться на расстоянии от края образца: при испытании материалов с твёрдостью более 35 НВ не менее 2,5 диаметров, а от центра соседнего отпечатка не менее 4-х диаметров шарика; с твёрдостью менее 35 НВ соответственно 3 и 6 диаметров.

Таблица 1.1 – Выбор режима испытания при определении твёрдости по методу Бринелля

Материал	Интервал чисел твёрдости, НВ	Толщина испытуемого образца, мм	Соотношение между нагрузкой и диаметром шарика $K = P/D^2$	Диаметр стального шарика, мм	Нагрузка P , Н (кгс)	Время выдержки под нагрузкой, с
1	2	3	4	5	6	7
Чёрные металлы	140–450	6–3	30	10,0	29430 (3000)	10
		4–2	30	5,0	7355 (750)	10
		Менее 2	30	2,5	1840 (187,5)	10
Чёрные металлы	Менее 140	Более 6	10	10,0	9800 (1000)	10
		6–3	10	5,0	2450 (250)	10

Цветные металлы	130	6–3	30	10,0	29430 (3000)	30
		4–2	30	5,0	7355 (750)	30
		Менее 2	30	2,5	1840 (187,5)	30
	35–130	9–3	10	10,0	9800 (1000)	30
		6–3	10	5,0	2450 (250)	30
	35–80	Более 6	25	10,0	2450 (250)	60

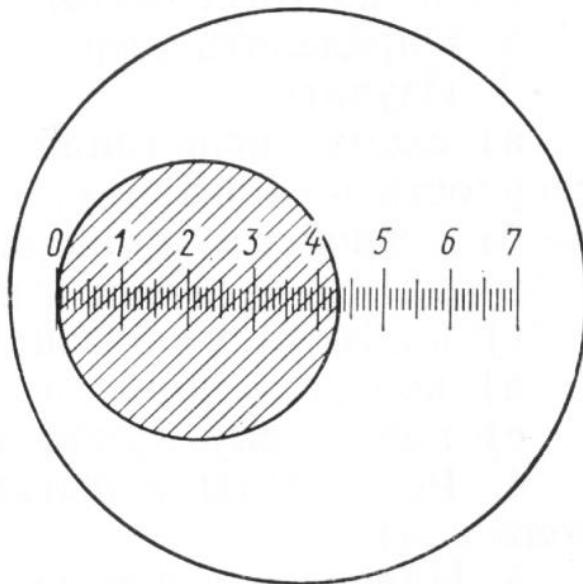
4. Нажатием кнопки включают электродвигатель. В момент приложения нагрузки загорается сигнальная лампочка, расположенная в верхней части прибора. После остановки электродвигателя вращением маховика против часовой стрелки опускают столик и снимают образец.

5. С помощью микроскопа МПБ-2 (рис. 1.3) замеряют диаметр отпечатка в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Точность измерений диаметров отпечатка при испытании шариками 10 и 5 мм должна быть не менее 0,05 мм, а 2,5 мм – 0,1 мм. Диаметр отпечатка должен находиться в пределах от 0,2 до 0,6 диаметра шарика. Для получения более достоверного числа твёрдости за результат принимают среднее арифметическое трёх испытаний.

6. По диаметру отпечатка по формуле (1.4) вычисляют твёрдость или определяют по таблице 1.2.



а)



б)

Рисунок 1.3 – Общий вид микроскопа (а) и схема измерения отпечатка (б)

6. По диаметру отпечатка по формуле (3) вычисляют твёрдость или определяют по таблице 1.2.

Метод измерения твёрдости вдавливанием стального закалённого шарика не является универсальным. Он не позволяет: а) определять твёрдость материалов с твёрдостью более НВ 450, так как будет деформироваться сам шарик (для материалов с твёрдостью до НВ 650 надо применять шарики из твёрдых сплавов); б) определять твёрдость тонкого поверхностного слоя, толщиной менее 1–2 мм, так как шарик продавливает этот слой и проникает на большую глубину.

Таблица 1.2 – Определение чисел твёрдости по Бринеллю

Диаметр отпечатка, мм (d_{10} , $2d_5$, $4d_{2,5}$)	Число твёрдости при нагрузке Р, Н		
	$\frac{30D^2}{0,102}$	$\frac{10D^2}{0,102}$	$\frac{2,5D^2}{0,102}$
	1	2	3
1	2	3	4
2,90	444	-	-
2,95	430	-	-
3,00	415	-	34,6
3,05	401	-	33,4
3,10	388	129,0	32,3
3,15	375	125,0	31,3
3,20	364	121,0	30,3

Продолжение таблицы 1.2

1	2	3	4
3,25	351	117,0	29,3
3,30	340	114,0	28,4
3,35	332	110,0	27,6
3,40	321	107,0	26,7
3,45	311	104,0	25,9
3,50	302	101,0	25,2
3,55	293	97,7	24,5
3,60	286	95,0	23,7
3,65	277	92,3	23,1
3,70	269	89,7	22,4
3,75	262	87,2	21,8
3,80	255	84,9	21,2
3,85	248	82,6	20,7
3,90	241	80,4	20,1
3,95	235	78,3	19,6
4,00	228	76,3	19,1
4,05	223	74,3	18,6
4,10	217	72,4	18,1
4,15	212	70,6	17,6
4,20	207	68,8	17,2
4,25	202	67,1	16,8
4,30	196	65,5	16,4
4,35	192	63,9	16,0
4,40	187	62,4	15,6
4,45	183	60,9	15,2
4,50	179	59,5	14,9
4,55	174	58,1	14,5
4,60	170	56,8	14,2
4,65	166	55,5	13,9
4,70	163	54,3	13,6
4,75	159	53,0	13,3
4,80	156	51,9	13,0
4,85	153	50,7	12,7
4,90	149	49,6	12,4
4,95	146	48,6	12,2

Окончание таблицы 1.2

1	2	3	4
5,00	143	47,5	11,9
5,05	140	46,5	11,6
5,10	137	45,5	11,4
5,15	134	44,6	11,2
5,20	131	43,7	10,9
5,25	128	42,8	10,7
5,30	126	41,9	10,5
5,35	124	41,0	10,3
5,40	121	40,2	10,1
5,45	118	39,4	9,9
5,50	116	38,6	9,7
5,55	114	37,9	9,5
5,60	112	37,1	9,3
5,65	109	36,4	9,1
5,70	107	35,7	9,0
5,75	105	35,0	8,9

Твёрдость по Роквеллу

Твёрдость по методу Роквелла определяют по глубине вдавливания в испытуемую поверхность *стального закалённого шарика* диаметром 1,588 мм при нагрузке 988 Н (100 кгс), *алмазного или твердосплавного конуса* с углом при вершине 120° при нагрузке 588 Н (60 кгс) или 1470 Н (150 кгс).

На приборе имеется индикатор часового типа с круговыми шкалами, цифрами (рис. 1.4), показывающими твёрдость испытуемого материала. При использовании в качестве наконечника (индентора) конуса отсчёт производят по шкалам А и С (чёрная шкала), шарика – шкале В (красная шкала). Шкалой А пользуются при измерении твёрдости образцов (изделий), подвергнутых поверхностному упрочнению, а также твёрдых сплавов с твёрдостью более 700 НВ; шкалой С – при измерении твёрдости закалённых сталей НВ от 230 до 700; шкалой В – при измерении твёрдости незакалённых сталей, цветных металлов и сплавов с твёрдостью менее 230 НВ. При этом «0» чёрной шкалы совпадает со значением «30» красной шкалы.

По методу Роквелла измеряется не диаметр, а глубина отпечат-

ка. Цифры на шкале нанесены в порядке, обратном движению стрелки в момент приложения нагрузки, причём внедрение индентора на 0,002 мм соответствует перемещению большой стрелки на одно деление. Если стрелка сделает один оборот от начального положения, то индентор внедряется на 0,02 мм. Схема определения твёрдости приведена на рисунке 1.5. Твёрдость по Роквеллу выражается в условных единицах и обозначается буквами HRC, HRA, HRB (H – твёрдость; R – по Роквеллу; C, A, B – соответственно шкалы C, A, B).

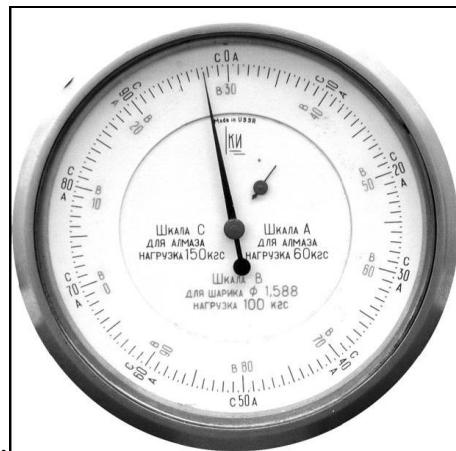


Рисунок 1.4 – Шкальное устройство (циферблат) индикатора часового типа прибора ТК-2

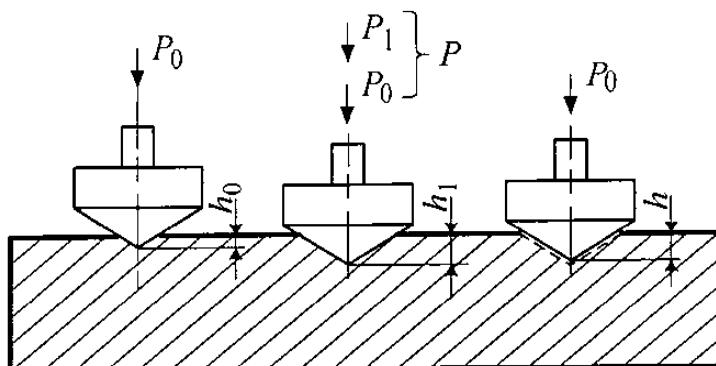


Рисунок 1.5 – Схема измерения твёрдости по методу Роквелла:

P_0 – предварительная нагрузка; P_1 – основная нагрузка;
 P – общая нагрузка; h_0 – глубина внедрения наконечника под действием предварительной нагрузки, мм;
 h_1 – глубина внедрения наконечника в испытуемый образец под действием общей нагрузки, равной сумме предварительной и основной нагрузки; h – глубина внедрения наконечника в испытуемый образец, измеренная после снятия основной нагрузки

Разность глубин внедрения наконечника в испытуемый образец, измеренная после снятия основной нагрузки и после приложения предварительной нагрузки характеризует твёрдость материала. Тогда твёрдость по Роквеллу при измерении по шкалам А, С и В можно определить по зависимостям

$$HRC(A) = 100 - \frac{h-h_0}{0,002}, \quad (1.5)$$

$$HRB = 130 - \frac{h-h_0}{0,002}, \quad (1.6)$$

где 100 – число делений шкалы С или А; 130 – шкалы В циферблата индикатора прибора.

На практике числа твёрдости не вычисляют по формулам 1.4 и 1.5, а отсчитывают по шкале индикатора в процессе испытания. Схема прибора Роквелла приведена на рисунке 1.6. Прибор состоит из винта 3 с предметным столиком 2 для установки на него испытуемых образцов. Перемещение винта осуществляется вручную маховиком 4. Шпинделья с наконечником 1, пружины 13 для создания предварительной нагрузки, циферблата 12, рычажной системы, состоящей из рычагов 9, 10 и 11 для передачи нагрузки на наконечник, подвески с грузами 5, 6 и 7 и амортизатора 8 для плавной передачи нагрузки на образец.

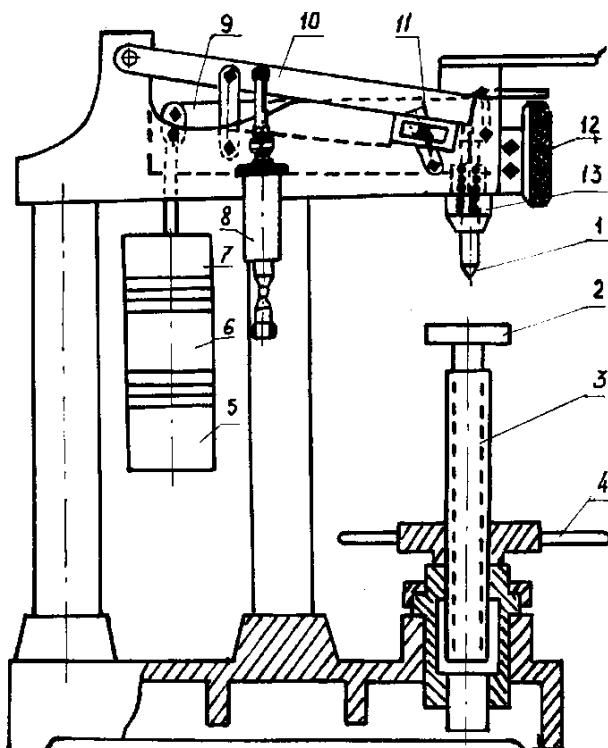


Рисунок 1.6 – Схема твердомера типа ТК

Подготовка прибора и порядок проведения испытания

В режим испытания, в зависимости от предполагаемой твёрдости, входят: выбор вида наконечника, нагрузки и шкалы.

1. По таблице 1.3, в зависимости от предполагаемой твёрдости, выбираются наконечник, нагрузка и шкала для испытания.

Таблица 1.3 – Выбор нагрузки, наконечника и шкалы для испытаний

Предполагаемая твёрдость, НВ	Обозначение шкалы (цвет)	Вид наконечника	Нагрузка, Н (кгс)	Обозначение твёрдости	Допускаемые пределы значений
60...230	В (красная)	Стальной шарик	980 (100)	HRB	25...100
230...700	С (чёрная)	Алмазный конус	1470 (150)	HRC	20...67
Более 700	А (чёрная)	Алмазный конус	588 (60)	HRA	Выше 70

2. Устанавливают наконечник в шпиндель и грузы на подвеску.

3. При помощи маховика 4 подводят образец к наконечнику до тех пор, пока маленькая стрелка на циферблате не станет против красной точки. При этом пружина 13 сжимается и создаётся предварительная нагрузка 98 Н (10 кгс), что обеспечивает плотное соприкосновение наконечника с испытуемым образцом.

4. Далее поворачивают ободок индикатора так, чтобы ноль чёрной шкалы (В30 красной шкалы) совпал с большой стрелкой.

5. После этого мягким нажимом откидывают в направлении от себя рукоятку 11, расположенную с правой стороны прибора, освобождая тем самым опирающийся на него рычаг 10. При опускании рычага 10 опускается и рычаг 9, на котором установлена подвеска с грузами (5, 6, 7), и нагрузка передаётся на наконечник. Благодаря амортизатору, нагрузка передаётся плавно, наконечник вдавливается в испытуемый образец, а большая стрелка поворачивается против часовой стрелки. После того как движение рукоятки 11 прекратится, её возвращают в первоначальное положение, при этом снимается основная нагрузка и большая стрелка поворачивается по часовой стрелке. После остановки большая стрелка указывает величину твёрдости по соответствующей шкале.

Быстрота испытаний на приборе Роквелла и возможность измерения твёрдости деталей небольших размеров (минимальная толщина 0,4 мм) обеспечивает преимущество данного метода перед методом Бринелля.

На основании экспериментальных данных составлена таблица 1.4, по которой числа твёрдости по Роквеллу можно приблизённо перевести в числа твёрдости по Бринеллю.

Таблица 1.4 – Соотношение чисел твёрдости по Бринеллю и Роквеллу

Твёрдость по Бринеллю ($D_{uu} = 10$ мм, $P = 3000$ кгс (29430 Н))	Твёрдость по Роквеллу		
	Шкала		
Диаметр отпечатка, мм	Число твёрдости	C – 150 кгс (1470 Н)	B – 100 кгс (920 Н)
1	2	3	4
2,20	782	72	-
2,25	744	69	-
2,30	713	67	-
2,35	683	65	-
2,40	652	63	-
2,45	627	61	-
2,50	600	59	-
2,55	578	58	-
2,60	555	56	-
2,65	532	54	-
2,70	512	52	-
2,75	495	51	-
2,80	477	49	-
2,85	460	48	-
2,90	444	47	-
2,95	430	45	-
3,00	418	44	-
3,05	402	43	-
3,10	387	41	-
3,15	375	40	-
3,20	364	39	-

Продолжение таблицы 1.4

1	2	3	4	5
3,25	351	38	-	69
3,30	340	37	-	69
3,35	332	36	-	68
3,40	321	35	-	68
3,45	311	34	-	67
3,50	302	33	-	67
3,55	293	31	-	66
3,60	286	30	-	66
3,65	277	29	-	65
3,70	269	28	-	65
3,75	262	27	-	64
3,80	255	26	-	64
3,85	248	25	-	63
3,90	241	24	100	63
3,95	235	23	99	62
4,00	228	22	98	62
4,05	223	21	97	61
4,10	217	20	97	61
4,15	212	19	96	60
4,20	207	18	95	60
4,25	202	-	94	59
4,30	196	-	93	58
4,35	192	-	92	58
4,40	187	-	91	57
4,45	183	-	89	56
4,50	179	-	88	56
4,55	174	-	87	55
4,60	170	-	86	55
4,65	166	-	85	54
4,70	163	-	84	53
4,75	159	-	83	53
4,80	156	-	82	52
4,85	153	-	81	52
4,90	149	-	80	51
4,95	146	-	78	50

Окончание таблицы 1.4

1	2	3	4	5
5,00	143	-	76	-
5,05	140	-	76	-
5,10	137	-	75	-
5,15	134	-	74	-
5,20	131	-	72	-
5,25	128	-	71	-
5,30	126	-	69	-
5,35	124	-	68	-
5,40	121	-	67	-
5,45	118	-	66	-
5,50	116	-	65	-
5,55	114	-	64	-
5,60	112	-	62	-
5,65	109	-	61	-
5,70	107	-	59	-
5,75	105	-	58	-

Порядок выполнения работы

1. Изучить устройство приборов для определения твердости металлов.
2. Изучить методику определения твердости металлов на имеющихся твердомерах.
3. Выбрать режимы определения твёрдости сплавов методом Бринелля, произвести испытания, измерить диаметры отпечатков и определить твёрдость образцов.
4. Выбрать режимы определения твёрдости сплавов методом Роквелла и определить твёрдость образцов.
5. Построить и объяснить зависимость твёрдости стали от содержания в ней углерода.
6. Сформулировать выводы по работе.

Содержание отчёта

Отчёт по лабораторной работе должен включать:

1. Понятие о твёрдости, как свойстве металла.
2. Сущность, схемы и формулы для определения твёрдости металлов и сплавов по методам Бринелля и Роквелла.
3. Методики определения твёрдости металлов и сплавов по ме-

тодам Бринелля и Роквелла.

4. Режимы определения твёрдости образцов из стали и цветных сплавов и результаты испытаний.

5. Графические зависимости твёрдости стали от содержания углерода.

Выводы (область применения твердомеров, преимущество и недостатки каждого, факторы, влияющие на твердость, объяснить полученную графическую зависимость).

Контрольные вопросы

1. Что понимается под твёрдостью металла?

2. С помощью какого прибора и как определяют диаметр отпечатка, полученного вдавливанием шарика?

3. Что входит в режим определения твёрдости материала по методу Бринелля?

4. От чего зависит выбор диаметра шарика при определении твёрдости по методу Бринелля?

5. Как установить время выдержки под нагрузкой при определении твёрдости по методу Бринелля?

6. Чем и как создаётся предварительная нагрузка при определении твёрдости по методу Бринелля?

7. От чего зависит выбор нагрузки при определении твёрдости по методу Бринелля?

8. Почему нельзя определить на приборе Бринелля твёрдость материала выше НВ 450?

9. Что означает запись HRC 50?

10. Для определения твёрдости каких материалов на приборе Роквелла используют нагрузки 150 кгс, 100 кгс и 60 кгс ?

11. По какой шкале (по цвету) на приборе Роквелла производят отсчёт при определении твёрдости закалённой стали?

12. По какой шкале (по цвету) на приборе Роквелла производят отсчёт, при определении твёрдости стали, подвергнутой химико-термической обработке?

13. Чему равна, чем создаётся и как контролируется предварительная нагрузка при определении твёрдости металла на приборе Роквелла?

14. При определении твёрдости каких материалов на приборе Роквелла используют в качестве индентора шарик?

Лабораторная работа № 2

МИКРОСКОПИЧЕСКИЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Цель работы: изучение технологии приготовления микрошлифа и приобретение практических навыков микроскопического исследования металлов и сплавов.

Краткие теоретические сведения. Микроскопический метод исследования или микроанализ – изучение микроструктуры металла и сплава при помощи оптического или электронного микроскопа. Оптический микроскоп позволяет исследовать строение металлов и сплавов с увеличением до 2000 раз. Исследование кристаллического строения при больших увеличениях (до 20000 раз) производится с помощью электронного микроскопа. Они позволяют установить форму и размеры кристаллических зёрен; изменение структуры, происходящее под влиянием термической и химико-термической обработки, а также под действием пластической деформации; микродефекты: микротрещины, раковины, поры; неметаллические включения: графит, сульфиды, оксиды и др.

Микроанализ состоит из следующих этапов: а) приготовление шлифа; б) исследование микродефектов и неметаллических включений; в) травление шлифа; г) исследование структуры.

Микрошлифом называется образец металла, специально приготовленный для исследования его структуры под микроскопом.

Рассматриваемая поверхность микрошлифа должна быть абсолютно плоской и зеркальной. Приготовление микрошлифа сводится к следующим операциям: 1. Вырезке образца. 2. Выравниванию поверхности среза. 3. Шлифованию. 4. Полированию. 5. Травлению (выявление структуры).

Вырезка образца. Образец вырезают из того места металла, которое определяется целью металлографического исследования, размерами, формой и особенностями структуры изучаемого объекта. Из мягких материалов образец вырезают пилой, фрезой или резцом. От очень хрупких сплавов кусочек для изготовления шлифа можно отбить молотком, твёрдых – шлифовальным кругом. Наиболее удобными формами микрошлифа является цилиндр, параллелепипед или куб высотой 15...20 мм, с площадью основания 2...3 см² (рис. 2.1, а, б). Если исследуемый образец представляет собой пластинку или лист, то его зажимают в струбцину или заливают в цилиндрической

обойме бакелитом, эпоксидной смолой, органическим стеклом или легкоплавким сплавом (рис. 2.1, в, г).

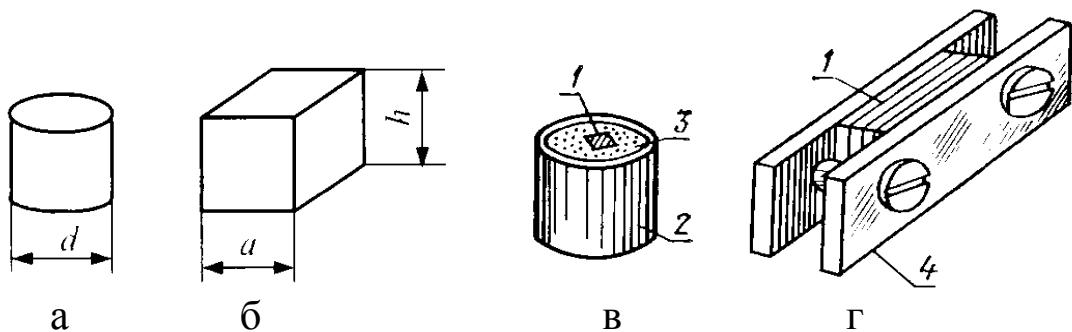


Рисунок 2.1 – Формы металлографических шлифов (а, б) и приспособления для изготовления шлифов (в, г): 1 – образец; 2 – оправка (труба); 3 – легкоплавкий материал; 4 – струбцина

Исследуемую поверхность образца заторцовывают на плоскость. Получение плоской поверхности достигается спиливанием напильником или заточкой на абразивном круге с периодическим охлаждением, чтобы не было перегрева и изменения структуры металла.

Шлифование. Плоскость образца шлифуют вручную или на шлифовальных станках с врачающимися кругами, на которые натягивают шлифовальную бумагу разных номеров зернистости абразивного материала.

Ручная шлифовка проводится на толстом стекле. Процесс осуществляют следующим образом: на толстое стекло укладывают шлифовальную шкурку с величиной абразивного зерна 150...125 мкм и затем образцом, прижатым к шлифовальной шкурке, производят прямолинейные движения (от себя и к себе, влево – вправо), не отрывая обрабатываемую поверхность от шлифовальной шкурки. Обработку ведут до исчезновения следов обработки от торцевания и появления рисок от абразивных зёрен шкурки. Затем берут шлифовальную бумагу с абразивным зерном меньшего размера и продолжают обработку. При каждой смене шлифовальной шкурки образец поворачивают на 90° и проводят обработку в направлении перпендикулярном к рискам, образовавшимся от предыдущего шлифования до полного их уничтожения и образования рисок от абразивных зёрен новой шкурки. Завершают шлифование на шлифовальной шкурке с мелким абразивным зерном (40...28 мкм). При переходе от одной шкурки к другой образец тщательно промывают проточной водой.

Полирование. Полирование проводят для удаления мелких ри-

сок, оставшихся после шлифования и получения гладкой зеркальной поверхности шлифа. Применяют механическое или электрохимическое полирование.

Механическое полирование обычно проводят на торцевой поверхности вращающегося круга, покрытой сукном, фетром, драпом, куда непрерывно или периодически подаётся суспензия из воды и мелкого абразива. В качестве абразивов применяют окись хрома (Cr_2O_3), окись алюминия (Al_2O_3), окись магния (MgO) и др. Хорошее качество полирования обеспечивает паста ГОИ. В состав пасты входят окись хрома, стеарин, олеиновая кислота, сода и керосин. В зависимости от размера частиц окиси хрома различают грубую, среднюю и тонкую пасты. В последние годы широкое использование находят полировальные алмазные пасты.

При электрохимическом полировании шлиф помещают в качестве анода в ванну с электролитом. Катодом служит пластина из нержавеющей стали. При пропускании постоянного электрического тока определённой силы (плотности тока) происходит анодное растворение рисок, оставшихся на поверхности шлифа после шлифования, и она становится гладкой и зеркальной.

Для предохранения шлифов от окисления их хранят в эксикаторе – стеклянном сосуде с хорошо притёртой и плотно прилегающей крышкой. Для поглощения проникающей в сосуд влаги в него засыпают хлористый кальций.

Наличие в металлической основе микроскопических трещин, неметаллических включений (оксидов, сульфидов, графита и др.) определяют просмотром полированной поверхности под микроскопом. При этом металлическая основа имеет светлый вид, а включения в виде тёмных или серых точек и линий (рис. 2.2).

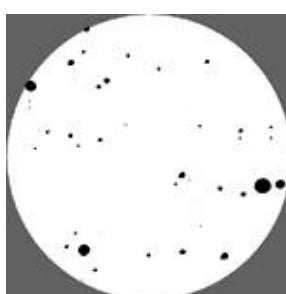


Рисунок 2.2 – Вид полированной поверхности стали с оксидными включениями

Травление. Травление проводят для выявления микроструктуры металлов и сплавов за счёт неравномерного растворения их струк-

турных составляющих в соответствующих реактивах, состав которых зависит от вида сплава и их химического состава. Так, например, применяют для травления:

а) углеродистых сталей и чугунов:

- 5%-й раствор азотной кислоты в этиловом спирте;

- 4%-й раствор пикриновой кислоты в этиловом спирте;

- пикрат натрия (едкий натрий 25 г, пикриновая кислота 2 г, вода 100 мл);

б) нержавеющих сталей: смесь соляной и азотной кислот в отношении 3:1 (реактивом пользуются через 24 часа после приготовления);

в) алюминиевых сплавов:

- 0,5%-й раствор фтористой кислоты в дистиллированной воде;

- смесь кислот и воды (1% фтористой, 2,5% азотной, 1,5% соляной и 95% воды);

г) медных сплавов:

- 8%-й раствор фтористой кислоты в дистиллированной воде;

- 3%-й раствор хлористого железа в 10% растворе HCl.

Приготовленный реактив соответствующего состава наливают в небольшую фарфоровую или стеклянную чашку. Микрошлиф, полированной поверхностью погружают в реактив и выдерживают в нём в течение нескольких секунд до появления на поверхности ровного матового оттенка без пятен. Для равномерного травления исследуемой поверхности микрошлифу придают небольшие колебательные движения. После этого его извлекают из чашки, промывают проточной водой, затем спиртом и удаляют влагу фильтровальной бумагой. Если после травления микроструктура сплава отчётливо не выявлена, то микрошлиф вновь погружают в реактив.

Выявление микроструктуры сплавов основано на неравномерном растворении в реактиве его зёрен (структурных составляющих) и их границ. Границы между зёrnами имеют повышенное содержание примесей и растворяются сильнее, вследствие чего образуются впадины (рис. 2.3, а). Лучи света, падающие на них, будут частично рассеиваться, и в результате эти участки под микроскопом будут выглядеть более тёмными, в виде тонких линий. Зёrna феррита будут просматриваться в виде светлых участков неодинаковой яркости, что объясняется анизотропией феррита, т.е. неодинаковостью свойств вдоль различных кристаллографических направлений. Зёrna перлита в стали, представляющие собой смесь пластинок феррита и цементи-

та, проравливаются сильнее, чем однородные зёरна феррита или цементита, и под микроскопом будут просматриваться в виде чередующихся тёмных и светлых полос (рис. 2.4).



Рисунок 2.3 – Схема, поясняющая падение и отражение лучей света от зёрен и их границ (а), видимость зёрен феррита (б)

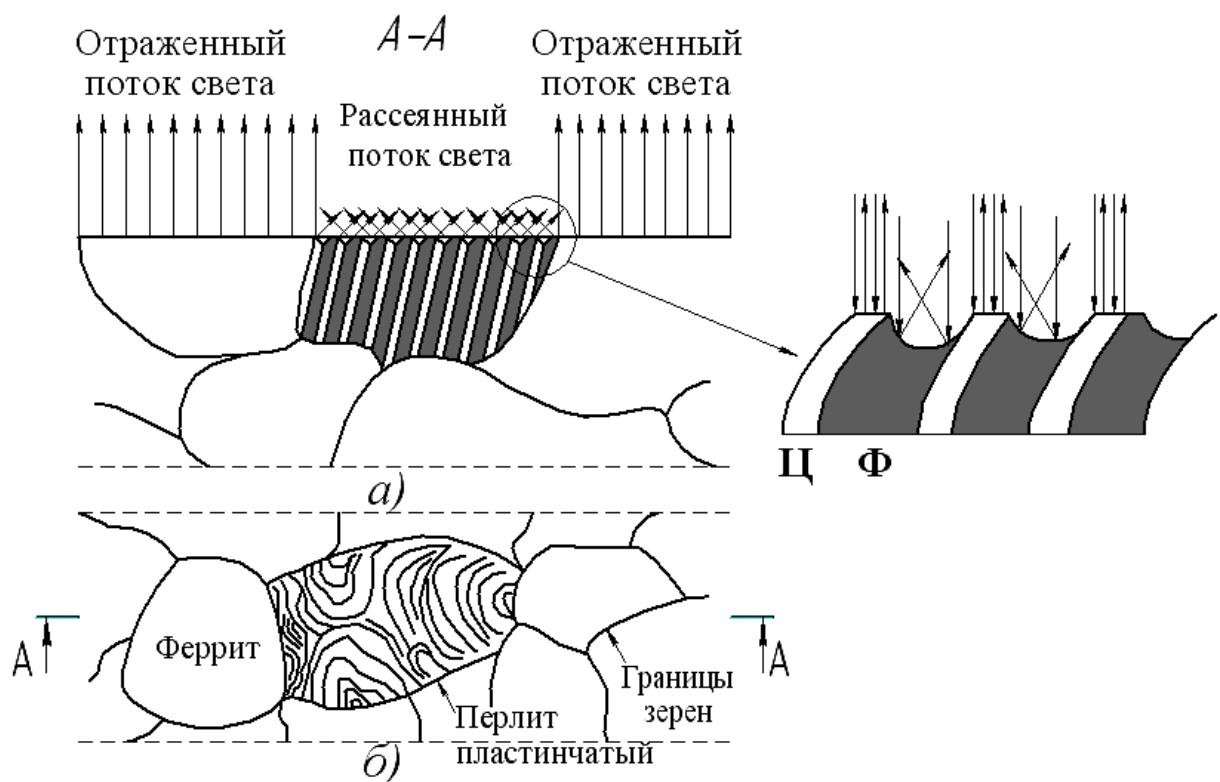


Рисунок 2.4 – Схема, поясняющая вид неоднородных зёрен

Устройство металлографического микроскопа МИМ-6

Вертикальный металлографический микроскоп МИМ-6 позволяет рассматривать микрошлиф в светлом и поляризованном свете, а также производить фотографирование микроструктуры. Набор объективов и окуляров позволяет получать увеличение при визуальном наблюдении от 63^x до 600^x . Он состоит из следующих основных узлов (рис. 2.5): центральной части 8, осветительного устройства 6, за-

креплённого на кронштейне 5 и фотокамеры 1.

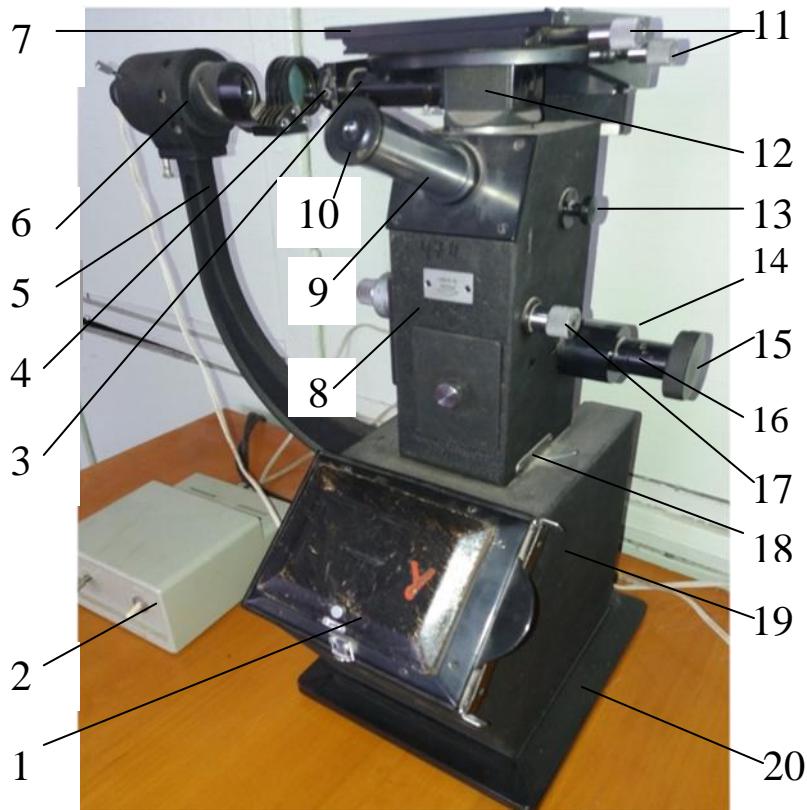


Рисунок 2.5 – Общий вид микроскопа МИМ-6

В центральную часть микроскопа входят:

- а) осветительный тубус 3, внутри которого имеется полевая диафрагма, а на конце апертурная диафрагма 4. Осветительный тубус прикреплён к корпусу 12, в верхней части которого имеется калиброеованное отверстие, в которое вставляют объективы;
- б) предметный столик 7, имеющий перемещение в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Эти перемещения производят винтами 11;

в) механизм грубой подачи 16, перемещающий столик в вертикальной направлении рукояткой 15. Для предотвращения самопроизвольного опускания предметного столика имеется зажимной винт 14;

г) микрометрический механизм, перемещающий объектив в вертикальном направлении для точной фокусировки. Винты 17 данного механизма расположены с обеих сторон корпуса центральной части микроскопа.

д) визуальный тубус 9, в отверстие которого вставляется окуляр 10.

е) в средней части корпуса имеется рукоятка 13 для управления положением отражательной призмы и рукоятка 18 управления фот-

затвором.

Источником света служит электрическая лампочка мощностью 20 ватт, питаемая от понижающего трансформатора 2 напряжением 8 В.

Световые лучи от лампы 1 (рис. 2.6) через коллектор 2, светофильтры 3, полуматовую пластину 4, апертурную диафрагму 5, линзу 6, полевую диафрагму 7, линзы 8 и 9 попадает на прозрачную стеклянную пластину 10, от которой часть лучей отражается и через объектив освещает микрошлиф 12. Лучи, отражённые от микрошлифа, снова поступают через объектив на пластину 10, при этом часть лучей проходят через неё и попадают на отражательную призму 13, где преломляются и поступают в окуляр 14. В фокальной плоскости окуляра образуется изображение объекта.

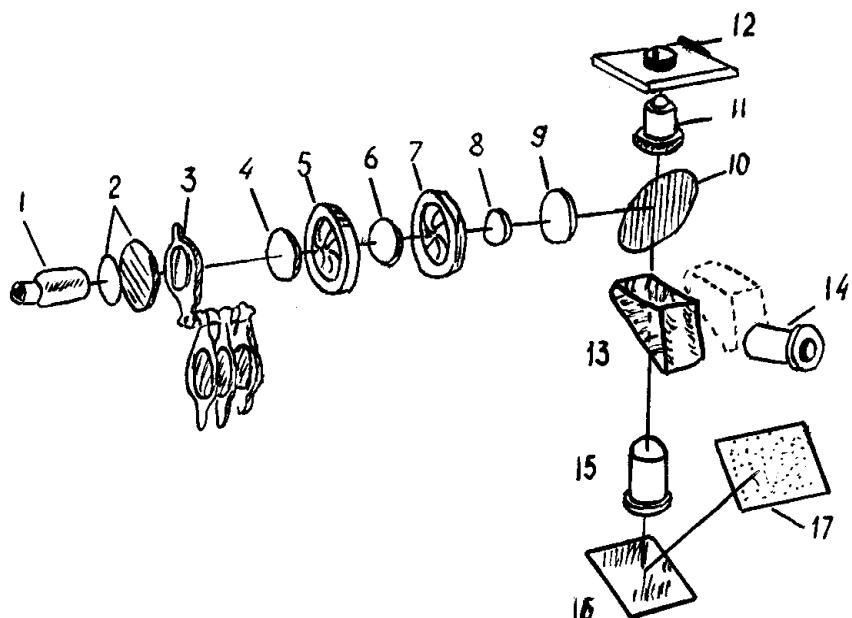


Рисунок 2.6 – Оптическая схема микроскопа МИМ-6

При фотографировании микроструктуры отражательную призму с помощью рукоятки 13 (рис. 2.5) выводят из хода лучей, тогда они проходят через фотоокуляр 15 и отражаются зеркалом 16 на фотопластину 17.

Настройка микроскопа МИМ-6 для визуального наблюдения

1. Перед началом работы выбирают увеличение микроскопа и по нему подбирают объектив и окуляр (табл. 2.1).

2. Отвернув зажимной винт 14 (рис. 2.5) вращением рукоятки 15 поднимают предметный столик и в кольцевую выточку корпуса осветителя вставляют объектив. Затем рукояткой 13 (рис. 2.5) вводят

призму 13 (рис. 2.6) в ход лучей и в визуальный тубус вставляют окуляр.

Таблица 2.1 – Подбор увеличения микроскопа

Объективы	Окуляр для визуального наблюдения		
	7^{\times}	10^{\times}	15^{\times}
$9 \times 0,20$	63	90	135
$21 \times 0,40$	147	210	315
$40 \times 0,65$	280	400	600

3. Включают трансформатор в сеть.
4. При помощи винтов 11 устанавливают предметный столик так, чтобы его отверстие совпадало с центром объектива.
5. На предметный столик устанавливают микрошлиф протравленной поверхностью вниз.
6. Наблюдая в окуляр, вращением рукоятки 15 грубого перемещения, производят наводку на фокус до момента появления в поле зрения окуляра очертания структуры и фиксируют кронштейн за jakiным винтом 14.
7. Вращением рукоятки 17 микрометрического механизма добиваются чёткого изображения исследуемого объекта.

Устройство металлографического микроскопа МИМ-7

Вертикальный металлографический микроскоп МИМ-7 (рис. 2.7) предназначен для наблюдения и фотографирования микроструктуры сплавов в обычном свете в светлом и тёмном поле и в поляризованном свете в светлом поле. Набор объективов и окуляров обеспечивает увеличение микроскопа от 60^{\times} до 1440^{\times} .

Микроскоп (рис. 2.7) состоит из трёх основных частей: осветителя I, корпуса II и верхней части III.

Осветитель состоит из фонаря 1 с лампой мощностью 170 ватт, закрытой кожухом, винтов 2, служащих для центрирования центра нити лампы с оптической осью коллектора, и рукоятки фиксации фонаря. Лампа питается от трансформатора с выходным напряжением 17 В.

В корпусе микроскопа находятся диск 3 с набором светофильтров, посадочное устройство для рамки 5 с матовым стеклом или кассеты с фотопластиной, рукоятка 4 переключения фотоокуляров, линза 6 и узел апертурной диафрагмы: кольцо с накаткой 7, служащее для изменения диаметра диафрагмы, приводящее к изменению освещения изображения.

щённости объекта, винт 8 для смещения диафрагмы при создании косого освещения и винт 9 для её фиксации в требуемом положении.

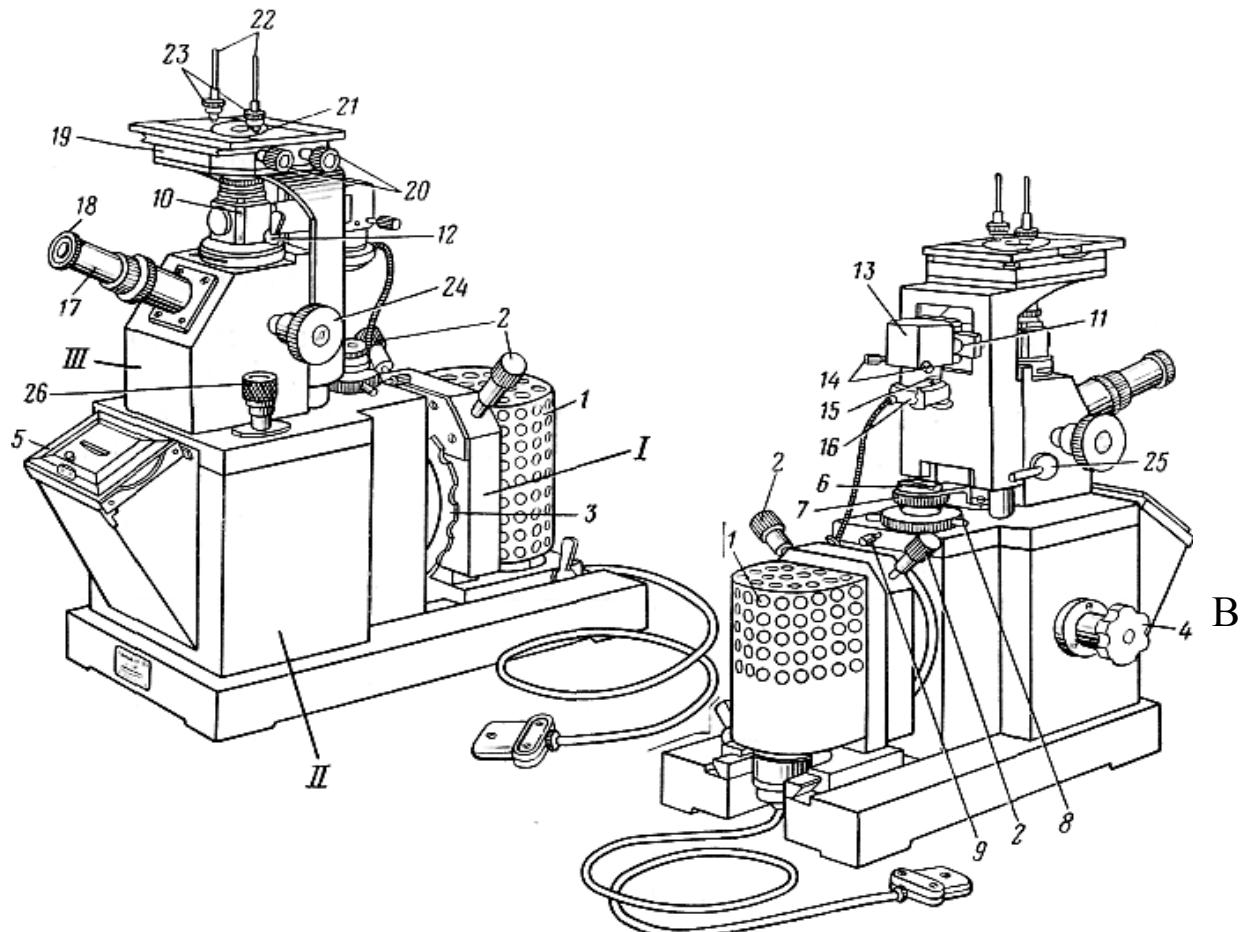


Рисунок 2.7 – Общий вид микроскопа МИМ-7

В верхней части микроскопа находятся:

а) иллюминаторный тубус 10, в верхней части которого имеется посадочное отверстие для установки объектива. На патрубке тубуса расположена рамка с линзами 11 для работы в светлом и тёмном полях и рукоятка 12; в нижней части кожуха 13 расположены центрирующие винты 14 полевой диафрагмы, а внутри его – пентапризма. Диаметр полевой диафрагмы изменяют поводком 15. Изменение диаметра приводит к ограничению освещённого поля рассматриваемого участка объекта. Под конусом полевой диафрагмы находится фотозатвор 16;

б) визуальный тубус 17, в отверстие которого вставляется окуляр 18;

в) предметный столик 19, который при помощи винтов 20 может перемещаться в двух взаимно перпендикулярных направлениях. В центре предметного столика имеется окно, в него вставляют одну

из сменных подкладок 21 с отверстиями различного диаметра. На столике расположены держатели, состоящие из стоек 22 и пружинных прижимов 23, прижимающих микрошлиф к подкладке предметного столика. Винт 24 служит для перемещения предметного столика в вертикальном направлении при грубой наводке на фокус. Фиксация столика в определённом положении производится винтом 25. Точная фокусировка производится винтом 26.

Лучи света от лампы 1 (рис. 2.8), собранные и направленные коллектором 2 на зеркало 3, отражаются от него вверх и, пройдя через светофильтр 4, апертурную диафрагму 5, предназначенную для регулирования контрастности изображения микрошлифа, линзу 6, фотозатвор 7 и полевую диафрагму 8, предназначенную для ограничения освещённого поля рассматриваемого участка на микрошлифе, попадают на пентапризму 9.

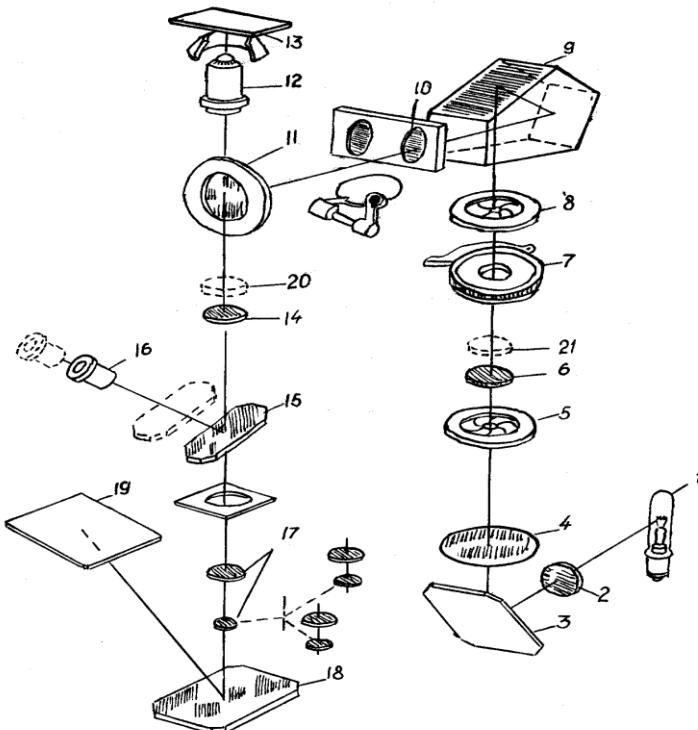


Рисунок 2.8 – Оптическая схема микроскопа МИМ-7

Здесь лучи преломляются, проходят линзу 10, попадают на отражательную пластинку 11 и направляются в объектив 12 и далее на микрошлиф 13, установленный на предметном столике. Отразившись от микрошлифа, лучи проходят вновь через объектив 12 и, выходя параллельным пучком, попадают на отражательную пластинку 11 и ахроматическую линзу 14. При визуальном наблюдении в ход лучей вводится зеркало 15, которое отклоняет лучи в сторону окуляра 16.

При фотографировании зеркало 15 выводится из хода лучей выдвижением визуального тубуса вместе с окуляром до отказа. Тогда лучи направляются к фотоокуляру 17, проходят через него на зеркало 18, от которого отражаются и попадают на матовое стекло 19 (фотопластинку), где и дают изображение. При визуальном наблюдении тубус вдвигается до упора.

Светофильтры, применяемые в микроскопе, служат для превращения белого света в монохроматический. Так как глаз человека обладает наибольшей чувствительностью к жёлто-зелёным лучам, то при рассмотрении микроструктуры рекомендуется пользоваться жёлто-зелёным светофильтром.

Анализатор 20 и поляризатор 21 применяют при исследовании неметаллических включений в полированном микрошлифе.

Настройка микроскопа МИМ-7 для визуального наблюдения

1. Перед началом работы выбирают увеличение микроскопа и по нему подбирают объектив и окуляр (табл. 2.2).

Таблица 2.2 – Подбор увеличения микроскопа

Объективы: фокусное расстояние «F», числовая апертура «A»	Окуляры			
	7 ^x	10 ^x	15 ^x	20 ^x
F = 23,2; A = 0,17	60	90	130	170
F = 13,9; A = 0,30	100	140	200	300
F = 8,16; A = 0,37	170	240	360	500
F = 6,16; A = 0,65	250	320	500	650
F = 2,77; A = 1,25	500	720	1080	1440
F = 2,79; A = 1,00	500	720	1080	1440

2. Поворотом винта 24 (рис. 2.7) поднимают предметный столик, вставляют объектив в отверстие иллюминаторного тубуса 10, а окуляр 18 в визуальный тубус 17 и тубус вдвигают до упора.

3. В окно предметного столика вставляют подкладку с нужным отверстием в зависимости от размера микрошлифа.

4. Включают трансформатор в сеть. Вращением рукоятки переключателя доводят, контролируя по вольтметру, напряжение до величины, обеспечивающей хорошую видимость рассматриваемого объекта, но не более 17 В.

5. Вращением винта 24 устанавливают предметный столик на

рабочую высоту, совмещая риску на кронштейне с точкой на корпусе микроскопа.

6. При помощи винтов 20 устанавливают предметный столик так, чтобы объектив был в центре отверстия подкладки.

7. На предметный столик устанавливают микрошлиф протравленной поверхностью вниз.

8. Наблюдая в окуляр, вращением винта 24 производят наводку на фокус до момента появления в поле зрения окуляра очертания структуры и фиксируют положение предметного столика стопорным винтом 25.

9. Вращением винта 26 микрометрического механизма добиваются чёткого изображения исследуемого объекта.

Основные характеристики микроскопа

Качество микроскопа характеризуется разрешающей способностью, совершенствованием геометрической оптики и возможным увеличением.

Под разрешающей способностью микроскопа d понимается минимальное расстояние между двумя точками, при котором они видны раздельно. Она может быть определена по следующей зависимости:

$$d = \frac{\lambda}{2A}, \text{ мкм}, \quad (2.1)$$

где λ – длина световой волны;

A – числовая апертура объектива, зависящая от показателя преломления среды n и конструкции линзы и определяется из выражения

$$A = n \cdot \sin \frac{\alpha}{2}, \quad (2.2)$$

где α – отверстный угол объектива, образованный двумя лучами, исходящими из фокуса линзы.

Числовая апертура тем больше, чем больше угол α , поскольку в этом случае больше лучей, отражённых предметом, попадают в него и, следовательно, тем лучше можно различать детали предмета. Кроме того, значение числовой апертуры зависит от показателя преломления среды. Если между объективом и предметом создать среду с большим показателем преломления, чем воздух, например, поместить каплю кедрового масла ($n = 1,51$), то значение апертуры повысится. В этом случае больше лучей попадает в объектив, освещённость изображения возрастает и увеличивается разрешающая способность.

В иммерсионном объективе капля кедрового масла наносится на его фронтальную линзу перед началом наблюдения. Частицы, которые не были видны с помощью сухого объектива, становятся разрешаемыми (видимыми) с помощью иммерсионного объектива.

Ограничения разрешающей способности в оптике возникают вследствие сферической и хроматической аберрации. Сущность сферической аберрации состоит в том, что лучи, преломляемые краем линзы и центральной её частью, не сходятся в одной точке, в результате чего изображение получается нерезкое. Для уменьшения сферической аберрации объектив изготавливают из двух линз – выпуклой и вогнутой, которые имеют одинаковую, но различно направленную сферическую аберрацию.

Сущность хроматической аберрации состоит в том, что различные цветные лучи (с раной длиной волны), из которых состоит луч белого цвета, неодинаково преломляются линзой и не собираются в одной точке. Сильнее всех преломляются фиолетовые лучи, затем зелёные и слабее всех красные. В результате чего контуры изображения не имеют чёткой границы, и вокруг изображения имеется нерезкая кайма, поскольку изображение, создаваемое зелёными лучами, не совпадает с изображениями, создаваемыми красными и фиолетовыми лучами. Хроматическую аберрацию можно полностью устранить только применением апохроматических линз, приводящих изображения в одну плоскость.

Увеличение микроскопа V_m определяется по таблице и по формулам

$$V_m = V_{\text{ок}} \cdot V_{\text{об}}, \text{ или } V_m = \frac{250}{f_{\text{ок}}} \cdot \frac{l}{f_{\text{об}}}, \quad (2.3)$$

где $V_{\text{ок}}$ – кратность увеличения окуляра;

$V_{\text{об}}$ – кратность увеличения объектива;

l – оптическая длина тубуса (расстояние между соседними фокусами объектива и окуляра), мм;

$f_{\text{ок}}$ – фокусное расстояние окуляра, мм;

$f_{\text{об}}$ – фокусное расстояние объектива, мм.

Объектив даёт обратное увеличение изображения предмета, а окуляр увеличивает изображение, полученное в объективе.

Вспомогательные устройства микроскопа

При проведении количественных исследований (определении

величины зерна, глубины упрочнённого, обезуглероженного слоя или другого объекта) применяют окулярные вкладыши: стеклянные круглые пластики, на которые нанесена шкала, сетка, перекрестье и т.п. Эти пластинки вставляются в окуляры между линзами. Окуляр с измерительным вкладышем (шкалой) называется окуляр-микрометром. Цена деления шкалы окуляр-микрометра будет зависеть от объектива, установленного на микроскопе. Цену деления окуляр-микрометра определяют с помощью объект-микрометра, представляющего собой металлическую пластину с отверстием в центре, где размещена стеклянная вставка (рис. 2.9, а). В центре вставки выгравирована линейка длиной 1 мм, разделенная на 100 частей (рис. 2.9, б) Показание одного деления соответствует 10 мкм (0,01 мм).

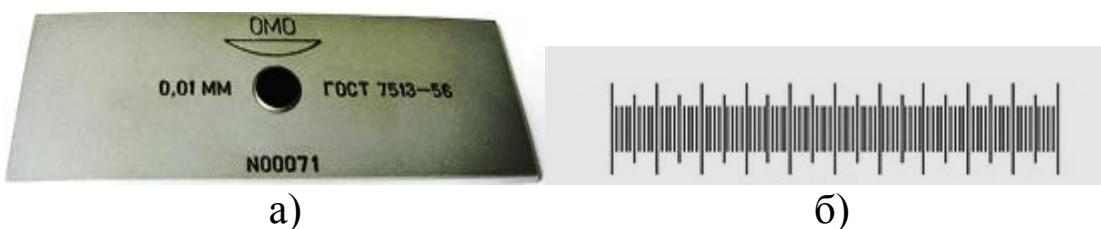


Рисунок 2.9 – Объект-микрометр: а – общий вид; б – шкала

Для определения цены деления окуляр-микрометра при заданном увеличении на предметный столик микроскопа помещают объект-микрометр шкалой вниз. В тубус микроскопа вставляют окуляр-микрометр 7^x и, перемещая его в тубусе, получают резкое изображение шкалы окуляра. С помощью грубой и микрометрической подач получают резкое изображение шкалы объект-микрометра. Тщательно сфокусировав, совмещают изображения шкал объект-микрометра и окуляр-микрометра. Поворачивая окуляр, штрихи обеих шкал устанавливают параллельно (рис. 2.10).

Цену деления шкалы окуляр-микрометра ($\Pi_{ок}$) определяют по формуле

$$\Pi_{ок} = \frac{M \cdot 0,01}{H}, \quad (2.4)$$

где M – число совпавших делений объект-микрометра;

H – число совпавших делений окуляр-микрометра;

0,01 – цена деления объект-микрометра.

$$\Pi_{ок} = \frac{28 \cdot 0,01}{40} = 0,007 \text{мм} = 7 \text{ мкм.}$$

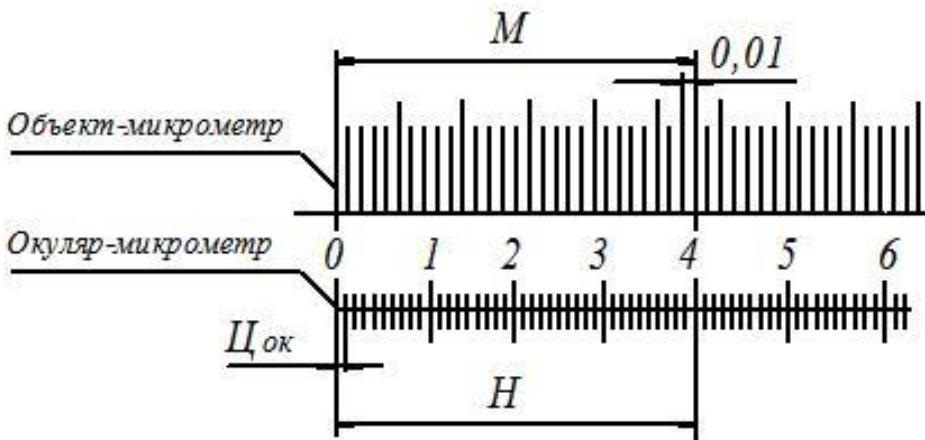


Рисунок 2.10 – Совмещение в поле зрения шкал объект-микрометра и окуляр-микрометра

Определение величины зерна

Для определения величины зерна при помощи окуляр-микрометра сначала подсчитывают линейный размер зерна (длину) в горизонтальном направлении по формуле

$$l_{\text{гор}} = \frac{n \cdot Ц_{\text{ок}}}{m_{\text{гор}}}, \text{ мкм}, \quad (2.5)$$

где n – количество делений окуляр-микрометра, шт;

$Ц_{\text{ок}}$ – цена деления шкалы окуляр-микрометра, мкм;

$m_{\text{гор}}$ – число зёрен, приходящихся на « n » делений окуляр-микрометра, шт.

Затем определяют линейный размер зерна в вертикальном направлении $l_{\text{верт}}$ и средний размер зерна по формуле

$$l_{\text{ср}} = \frac{l_{\text{гор}} + l_{\text{верт}}}{2}, \text{ мкм}. \quad (2.6)$$

Приняв (приближённо), что зерна равноосны и их форма приближается к шару, приравнивают линейный размер зерна равным среднему диаметру зерна и определяют площадь зерна по формуле

$$S_{\text{ср}} = \frac{\pi \cdot l_{\text{ср}}^2}{4}, \text{ мкм}^2. \quad (2.7)$$

Стандартный номер зерна определяют по таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Зависимость между номером зерна и истинной площадью

№ зерна	Истинная площадь зерна, мкм ²		
	наименьшая	средняя	наибольшая
1	2	3	4
1	40000	64000	80000
2	20000	32000	40000
3	10000	16000	20000

Окончание таблицы 2.3

1	2	3	4
4	5000	8000	10000
5	2500	4000	5000
6	1200	2000	2500
7	600	1000	1200
8	300	500	600

Стандартный номер зерна также приближённо можно определить путём сравнения микроструктуры при 100-кратном увеличении со стандартными микрофотографиями.

Порядок выполнения работы

1. Изучить технологический процесс приготовления микрошлифа.
2. Изучить устройство металлографических микроскопов, регулировки, порядок установки требуемого увеличения.
3. Произвести настройку микроскопа для визуального наблюдения.
4. Установить в микроскоп окуляр с семикратным увеличением (окуляр-микрометр), поместить на предметный столик объект-микрометр и определить цену деления окуляр-микрометра.
5. Определить величину зерна в стали или размер неметаллического включения.
6. Сформулировать выводы по работе.

Содержание отчёта

1. Технологический процесс приготовления микрошлифа (кратко).
2. Схемы металлографических микроскопов и их описание. Формулы для определения увеличения микроскопа.
3. Схемы, поясняющие видимость зерен металла с различной окраской.
4. Схема к определению цены деления окуляр-микрометра (сочетание в поле зрения шкал объект-микрометра и окуляр-микрометра).
5. Расчёт цены деления окуляр-микрометра.
6. Порядок и результаты определения величины зерна в стали.

Выводы (назначение и сущность микроанализа, возможности оптических металлографических микроскопов, назначение объект-микрометра и окуляр-микрометра).

Контрольные вопросы

1. Что называется микроанализом?
2. Назовите основные операции технологии приготовления микрошлифа.
3. Чем отличается полирование от шлифования образца?
4. Для чего проводят травление поверхности образца?
5. От чего зависит выбор реактива для травления поверхности образца?
6. Как просматривается образец под микроскопом после операции полирования?
7. Как просматриваются под микроскопом границы зёрен и почему?
8. От чего зависит увеличение оптического металлографического микроскопа?
9. Как можно определить размеры неметаллических включений в металле?
10. Для чего предназначены объект-микрометр и окуляр-микрометр?
11. Как определяют размеры зерна в стали?
12. Каково назначение основных деталей и сборочных единиц микроскопов МИМ-6 и МИМ-7.

Лабораторная работа № 3

АНАЛИЗ ДИАГРАММЫ СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗО – УГЛЕРОД (Fe – C)

Цель работы: изучение фазового состава и структурных составляющих диаграммы состояния, процессов, протекающих в сплавах при охлаждении и нагревании, положения критических точек; приобретение навыков построения и анализа кривых охлаждения сплавов с применением правила Гиббса (фаз) и правила отрезков.

Краткие теоретические сведения. Железоуглеродистые сплавы (стали и чугуны) – важнейшие металлические сплавы современной техники.

Диаграмма состояния железо – углерод даёт представление о строении железоуглеродистых сплавов и позволяет для любого сплава установить:

- наличие изменений в строении сплава, если он подвергается нагреванию или охлаждению;
- названия фаз, структурных составляющих, а также количество каждой из них при заданной температуре и концентрации компонентов, если их не более двух;
- положение критических точек.

Перечисленные сведения необходимы при назначении режима термической обработки, а также для раскрытия свойств сплава или компонента.

Диаграмма состояния представляет собой графическое изображение состояния системы (сплава) в зависимости от температуры (ось ординат) и концентрации (ось абсцисс). Вещества, образующие систему, называются компонентами. Основными компонентами железоуглеродистых сплавов являются железо и углерод. В начале координат углерода будет 0 %, а железа 100 %. На диаграмме по оси абсцисс показывают содержание углерода от 0 до 6,67 %, поскольку при такой концентрации образуется химическое соединение цементит (Fe_3C), которое можно рассматривать как компонент. Поэтому диаграмму железо – углерод называют также диаграммой железо – цементит и указывают вторую ось абсцисс, на которой приводят содержание Fe_3C в диапазоне 0...100 % (рис. 3.1).

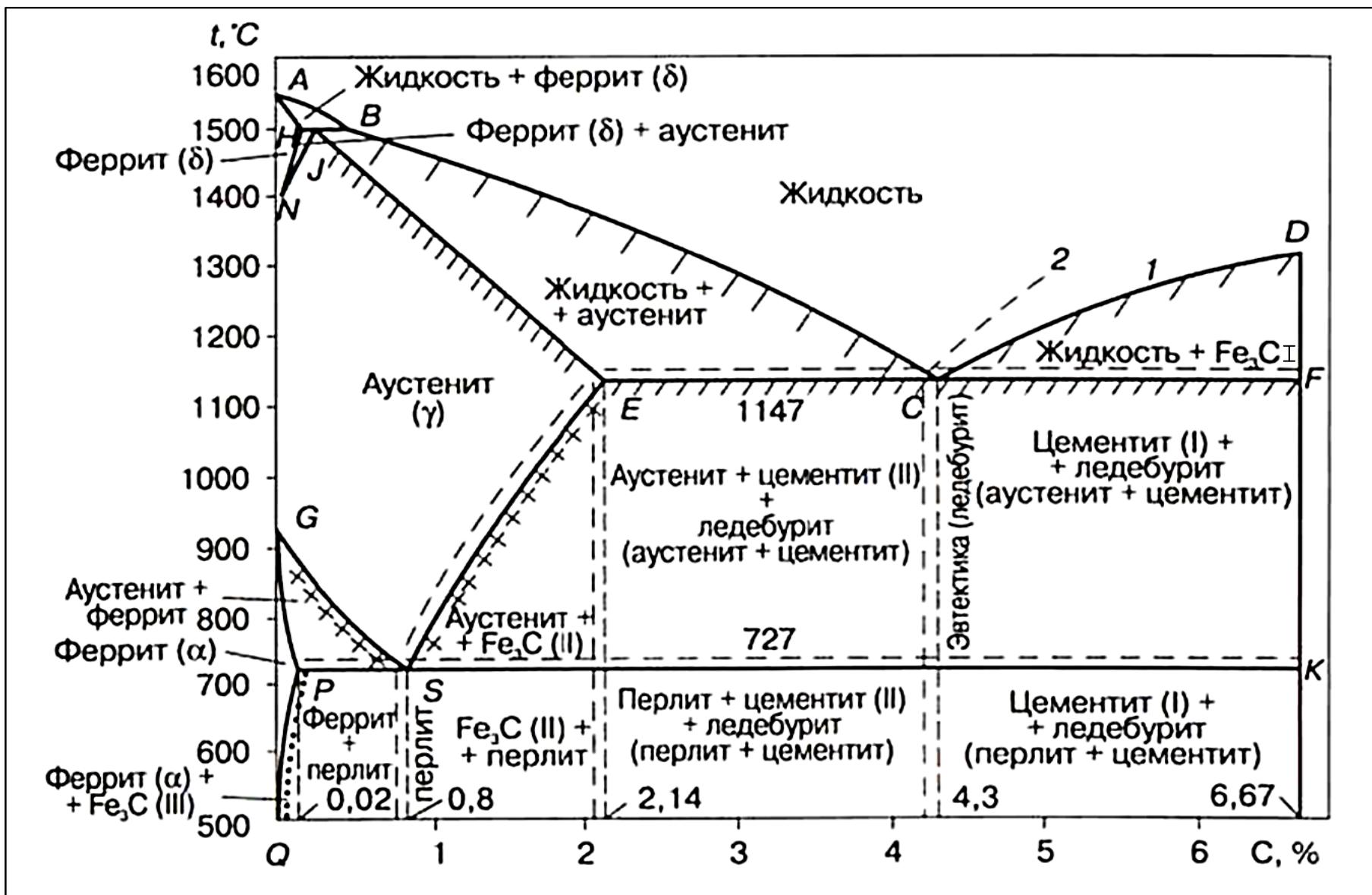


Рисунок 3.1 – Диаграмма состояния системы железо – углерод

Железо – пластичный металл серебристо-белого цвета с атомной массой 55,85 и температурой плавления и кристаллизации 1539° и удельным весом 7,8 г/см³. Оно обладает свойством аллотропии или полиморфизма, то есть имеет разные кристаллические решётки при разных температурах. Температурные интервалы существования модификаций железа показаны на кривой охлаждения чистого железа (рис. 3.2).

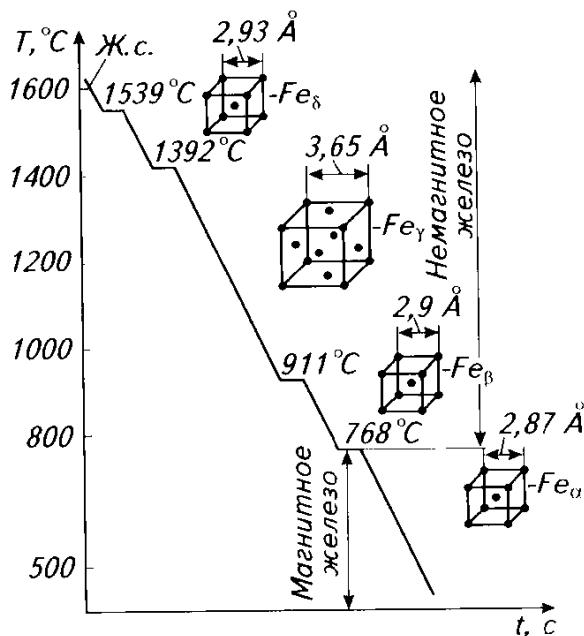


Рисунок 3.2 – Кривая охлаждения чистого железа

При охлаждении кристаллизация железа происходит при температуре 1539 °С с образованием объёмно-центрированной кубической кристаллической решётки (ОЦК). При дальнейшем охлаждении при температуре 1392 °С ОЦК переходит в гранецентрированную кристаллическую решётку (ГЦК), а при температуре 911 °С происходит обратное превращение ГЦК в ОЦК. При температуре 768 °С происходит изменение магнитных свойств железа. Железо с ОЦК называют α -железо (Fe_α), а с ГЦК γ -железо (Fe_j); высокотемпературную модификацию (1392...1539) °С обозначают δ -железо (Fe_δ), а немагнитное β -железо (Fe_β).

Железо со многими элементами образует растворы: с металлами – растворы замещения, с углеродом – растворы внедрения. С углеродом образует химическое соединение Fe_3C .

Углерод – неметаллический элемент с атомной массой 12, плотностью 2,5 т/м и температурой плавления 3500 °С. Размеры углерода сравнительно малы, поэтому он хорошо растворим в железе в жид-

ком и твёрдом состояниях, образует твёрдые растворы внедрения, а при определённых условиях химическое соединение – цементит.

В зависимости от скорости охлаждения сплавы системы железо-углерод могут находиться в стабильном или метастабильном состоянии. Первое из них наиболее устойчиво и получается в условиях медленного охлаждения сплава, когда все фазовые превращения успевают полностью завершиться, и характеризуется наличием фазы графита. Второе получается при несколько большей скорости охлаждения и характеризуется наличием фазы цементита.

Фаза – однородная часть системы, ограниченная от других частей системы поверхностью раздела, при переходе через которую химический состав и свойства меняются скачком. Фазами метастабильного состояния диаграммы железо-углерод являются жидкость, аустенит, феррит, цементит.

Жидкость – жидкий расплав атомов железа и углерода.

Феррит – твёрдый раствор внедрения углерода и других элементов в α -железе (Fe_α). У него ОЦК – решётка, и поэтому растворимость углерода в феррите очень мала. Максимальная растворимость составляет 0,1 % (при температуре 1499 °C, точка «Н» на диаграмме), 0,02 % (при температуре 727 °C, точка «Р» на диаграмме) и 0,006 % (при температуре 20 °C, точка «Q» на диаграмме). Техническое железо ($C \leq 0,02\%$) имеет структуру феррита. Поэтому свойства феррита близки к свойствам железа. Он мягок и пластичен (твёрдость 50...80 HB, относительное удлинение – $\delta = 50\%...30\%$), предел прочности $\sigma_b = 300$ МПа, магнитен до температуры 768 °C. Феррит, который кристаллизуется из жидкости, называется высокотемпературным ферритом и обозначается δ -феррит. На рассматриваемой диаграмме состояния феррит занимает области GPQ и AHN.

Аустенит – твёрдый раствор внедрения углерода и других элементов в γ -железе (Fe_γ). Углерод занимает место в центре гранецентрированной кубической ячейки. Растворимость углерода в аустените при температуре 1147 °C составляет 2,14 % (точка «Е» на диаграмме), а при температуре 727 °C – 0,8 % (точка «S» на диаграмме). Он пластичен, но более твёрд, чем феррит (твёрдость 160...200 HB, относительное удлинение – $\delta = 30\%$), парамагнитен. На рассматриваемой диаграмме состояния аустенит занимает область NJESG.

Цементит – химическое соединение Fe_3C , содержащее 6,67 % углерода. Он самая твёрдая (800 HB или 65 HRC, легко царапает

стекло) и хрупкая составляющая (пластичность практически равна нулю). Температура плавления цементита около 1600°C . До температуры 217°C магнитен. На рассматриваемой диаграмме состояния граница области цементита – линия DFK.

Структурными составляющими метастабильного состояния диаграммы железо-углерод являются аустенит, феррит, цементит, перлит и ледебурит.

Перлит – механическая смесь феррита и цементита, содержащая 0,8 % углерода. Он образуется во время перекристаллизации аустенита, содержащего 0,8 % углерода, при температуре 727°C . Это превращение называется эвтектоидным, а перлит – эвектоидом. Он имеет предел прочности $\sigma_{\text{в}} = 800 \text{ МПа}$, твёрдость 160...200 НВ, относительное удлинение $\delta = 5\ldots15\%$. В зависимости от формы частиц цементита перлит бывает пластинчатым и зернистым.

Ледебурит – механическая смесь аустенита и цементита. Образуется при кристаллизации жидкого раствора, содержащего 4,3 % углерода, при температуре 1147°C . Это превращение называется эвтектическим, а ледебурит – эвтектикой. При температурах ниже 727°C аустенит в ледебурите превращается в перлит, и поэтому ледебурит при этих температурах состоит из перлита и цементита. Ледебурит твёрд (700 НВ), имеет сотовое или пластинчатое строение и содержится во всех белых чугунах.

На рассматриваемой диаграмме состояния имеются однофазные области: AHN (δ -феррит), GPQ (феррит), NJESG (аустенит) и двухфазные области: AHJB (жидкость + δ -феррит), HJN (δ -феррит + аустенит), JBEC (жидкость + аустенит), CDF (жидкость + цементит), GSP (аустенит + феррит), SECFK (аустенит + цементит), QPSK (феррит + цементит). На диаграмме даны названия структурных составляющих, а следовательно, и структур, образуемых фазой или двумя фазами в указанных областях.

Сплошные линии на диаграмме представляют собой геометрическое место критических точек, каждая из которых соответствует определённой температуре и концентрации компонентов. При этом на каждой линии протекают различные превращения. Например, температура кристаллизации чистого железа составляет 1539°C , а при добавлении в расплав железа углерода до 0,5 % температура начала кристаллизации сплава будет уменьшаться до 1499°C (линия AB), и при дальнейшем повышении концентрации углерода в сплаве

она снизится до 1147 °С (линия ВС).

Линия ABCD – геометрическое место точек начала кристаллизации сплава называется линией *ликвидус*. На участке АВ происходит кристаллизация δ-феррита, ВС – аустенита, CD – цементита первичного (Ц_I).

Линия AHJECF – геометрическое место точек завершения кристаллизации сплава называется линией *солидус*. Между этими линиями сплав находится в жидким и твёрдом состояниях.

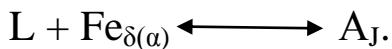
Линии HNi JN – соответственно начала и завершения аллотропического превращения $\text{Fe}_\alpha \leftrightarrow \text{Fe}_j$ (δ-феррита в аустенит) при охлаждении и обратного при нагревании.

Линии GS и GP – соответственно начала и завершения аллотропического превращения $\text{Fe}_j \leftrightarrow \text{Fe}_\alpha$ (аустенита в феррит) при охлаждении и обратного при нагревании.

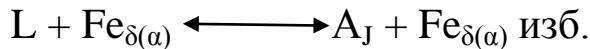
Линии ES и PQ отражают изменение растворимости углерода в аустените в интервале температур (1147... 727) °С от 2,14 % до 0,8 % и в феррите в интервале температур (727...20) °С от 0,02 % до 0,006 %, что приводит к образованию вторичного (Ц_{II}) и третичного цементита (Ц_{III}) соответственно.

В железоуглеродистых сплавах три превращения происходят при постоянных температурах: перитектическое, эвтектическое и эвтокоидное.

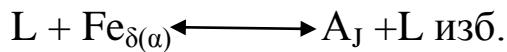
Перитектическое происходит при температуре, соответствующей линии НВ (1499 °С). Оно состоит во взаимодействии жидкости (L) с ранее выпавшими кристаллами δ-феррита ($\text{Fe}_{\delta(\alpha)}$). В результате взаимодействия образуются кристаллы нового вида – аустенита (A). Превращение совершается без остатка взаимодействующих фаз только в сплаве с концентрацией углерода, соответствующей т. J (0,16 %), и протекает по следующей реакции:



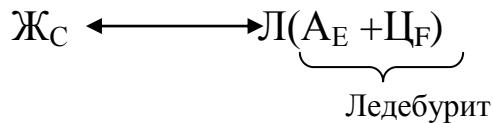
В сплавах с содержанием углерода $0,1 < C < 0,16$ в результате взаимодействия образуются кристаллы аустенита и в избытке остаются кристаллы δ-феррита:



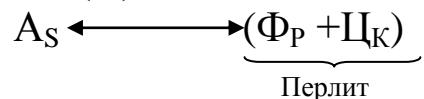
В сплавах с содержанием углерода $0,16 < C < 0,5$ в результате взаимодействия образуются кристаллы аустенита и в избытке остаётся жидкость:



Эвтектическое происходит при температуре, соответствующей линии ECF (1147°C) и заключается в одновременном выделении из жидкости, с концентрацией углерода, соответствующей т. С диаграммы (4,3%), кристаллов двух фаз: аустенита (A) и цементита (Ц), механическая смесь которых образует эвтектику – ледебурит.



Эвтектоидное происходит в твёрдом состоянии при температуре, соответствующей линии PSK (727°C) и заключается в распаде аустенита, с концентрацией углерода соответствующей точки S (0,8 %), на две фазы: феррит и цементит, механическая смесь которых (эвтектоид) называется перлитом (П).



Изучение диаграммы сопровождается построением кривых охлаждения различных сплавов в координатах температура – время. На кривой охлаждения отмечают положения критических точек и температур, и на каждом участке указывают название фаз или структурных составляющих. Её строят справа от диаграммы состояния.

Для правильного построения кривых охлаждения необходимо знать и применять правило фаз (закон Гиббса), которое устанавливает зависимость между степенью свободы системы, количеством компонентов и фаз.

Под степенью свободы системы понимают количество внешних и внутренних факторов (температура, давление и др.), которые можно изменять без изменения количества фаз. Закон Гиббса выражается формулой

$$C = K - \Phi + 1, \quad (3.1)$$

где C – степень свободы системы;

Φ – число фаз;

1 – число внешних факторов (один – температура, давление постоянное).

Если степень свободы системы $C > 0$, то кристаллизация или перекристаллизация идёт при переменной температуре, а если $C = 0$, то при постоянной температуре.

Рассмотрим последовательность превращений сплава концентрации $C = 3\%$ при охлаждении его из расплавленного состояния.

До т. 1 сплав находится в жидком состоянии. Степень свободы системы (C) равна 2 ($C = 2 - 1 + 1 + 2$). При двух степенях свободы равновесие в системе не нарушается даже при одновременном изменении температуры и концентрации сплава в определенных пределах. При понижении температуры в сплаве не будет происходить никаких превращений, и температура будет падать быстро, кривая охлаждения идет круто вниз до точки 1.

При температуре, соответствующей критической точке 1, из жидкого раствора начинают выделяться кристаллы аустенита. Степень свободы системы (C) на участке 1-2 равна 1 ($C = 2 - 2 + 1 = 1$). Участок на кривой охлаждения будет более пологим. Кристаллизация жидкости в аустенит идет при переменной температуре и продолжается до критической точки 2 (рис. 3.3).

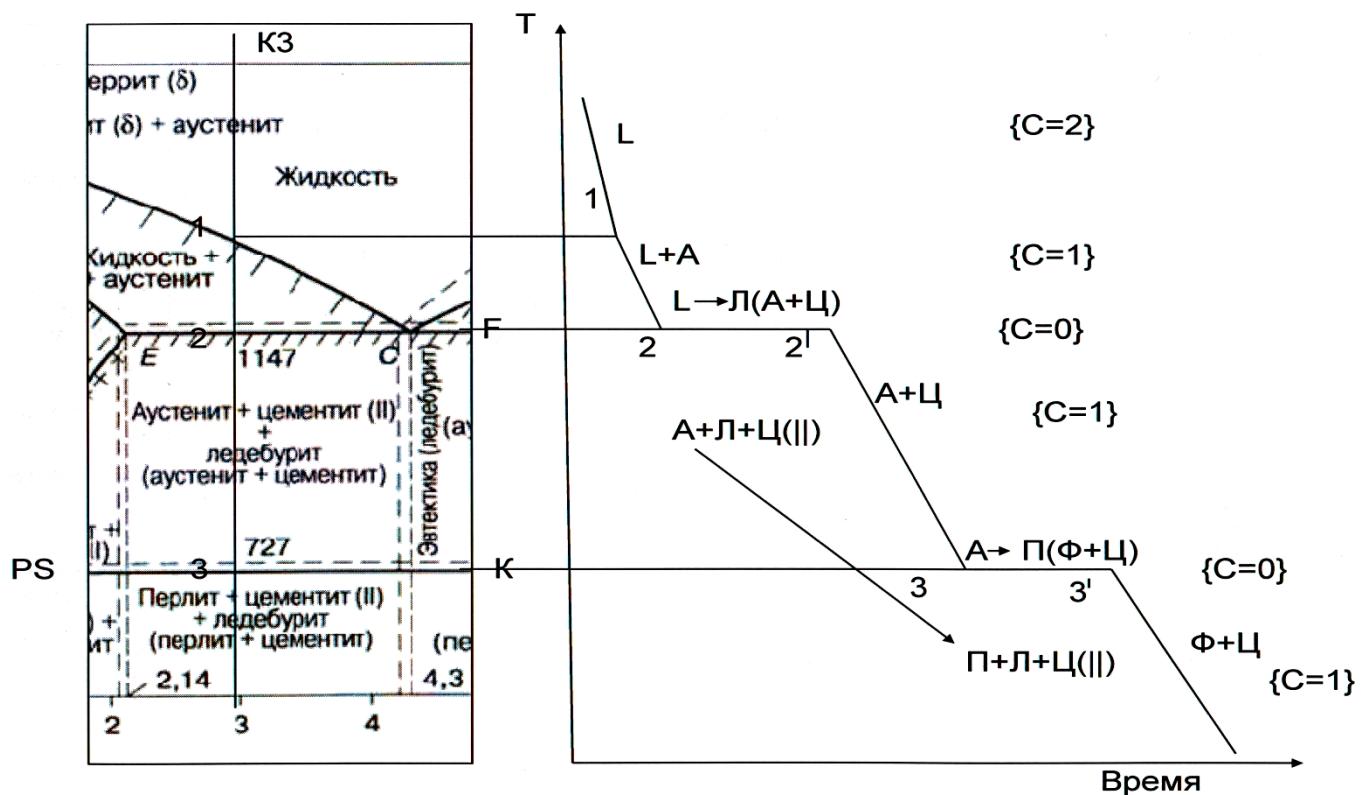


Рисунок 3.3 – Часть диаграммы состояния системы железо-углерод и кривая охлаждения сплава К3 ($C=3\%$). Справа от кривой приведены фазы, слева – структурные составляющие сплава

При температуре точки 2 (1147°C) жидкий раствор приобретает концентрацию углерода $4,3\%$ и кристаллизуется одновременно в два

вида кристаллов (две фазы): аустенит и цементит, механическая смесь которых называется ледебуритом. Степень свободы системы $C = 0$ ($C = 2 - 3 + 1 = 0$), поскольку в процессе кристаллизации имеется три фазы: жидкость (L), аустенит (A) и цементит (Ц). Данное превращение протекает при постоянной температуре, и на кривой охлаждения образуется площадка, параллельная оси времени ($2 - 2^1$), при этом т. 2 соответствует началу, а т. 2^1 – концу превращения.

При понижении температуры от т. 2 до т. 3 растворимость углерода в аустените изменяется по линии ES от 2,14 % при температуре 1147 °C (т. E) до 0,8 % при температуре 727 °C (т. S) (рис. 3.1). Углерод, который уже полностью не может раствориться в аустените, выделяется в виде вторичного цементита (Ц_{II}). Степень свободы на данном участке равна 1 ($C = 2 - 2 + 1 = 1$), то есть частичная перекристаллизация идёт при переменной температуре.

При температуре точки 3 (727 °C) аустенит приобретает концентрацию углерода 0,8 % и распадается одновременно на два вида кристаллов: феррит и цементит, механическая смесь которых называется перлитом. Поскольку в процессе распада имеется три фазы: аустенит (A), феррит (Ф) и цементит (Ц), то степень свободы системы $C = 0$

($C = 2 - 3 + 1 = 0$). Данное превращение протекает при постоянной температуре и на кривой охлаждения образуется площадка, параллельная оси времени ($3 - 3^1$), при этом т. 3 соответствует началу, а т. 3^1 – концу распада аустенита.

При дальнейшем понижении температуры идёт охлаждение сплава без изменения количества фаз и структуры сплава при степени свободы системы равной 1.

Если состояние сплава при заданной температуре характеризуется наличием двух фаз или двух структурных составляющих, то по диаграмме можно определить количественное соотношение фаз или структурных составляющих и концентрацию компонентов в них. Для этого пользуются правилом отрезков.

Первое правило. Для определения концентрации компонента в фазах через заданную точку, характеризующую состояние сплава, проводят горизонтальную линию до пересечения с линиями, ограничивающими данную область, и проекции точек пересечения на ось концентрации покажут концентрацию компонента в фазах.

Второе правило. Для определения соотношения фаз в сплаве

через заданную точку, характеризующее состояние сплава, проводят горизонтальную линию до пересечения с линиями, ограничивающими данную область и отношение отрезков от заданной точки до точек пересечения с границами определяемых фаз обратно пропорционально соотношению этих фаз.

Например, необходимо определить концентрацию компонентов в фазах и количественное соотношение фаз в сплаве с концентрацией углерода 3 % при температуре 1200 °С.

Точка «*a*», характеризующая состояние сплава, находится в двухфазной области (аустенит и жидкость). Проводим через заданную точку горизонтальную линию до пересечения с границами этих фаз. Проекция точки пересечения «*b*» на ось концентрации даст концентрацию компонентов в жидкости (3,7 % углерода и 96,3 % железа), а точки «*c*», соответственно концентрацию компонентов в аустените (1,7 % углерода и 98,3 % железа).

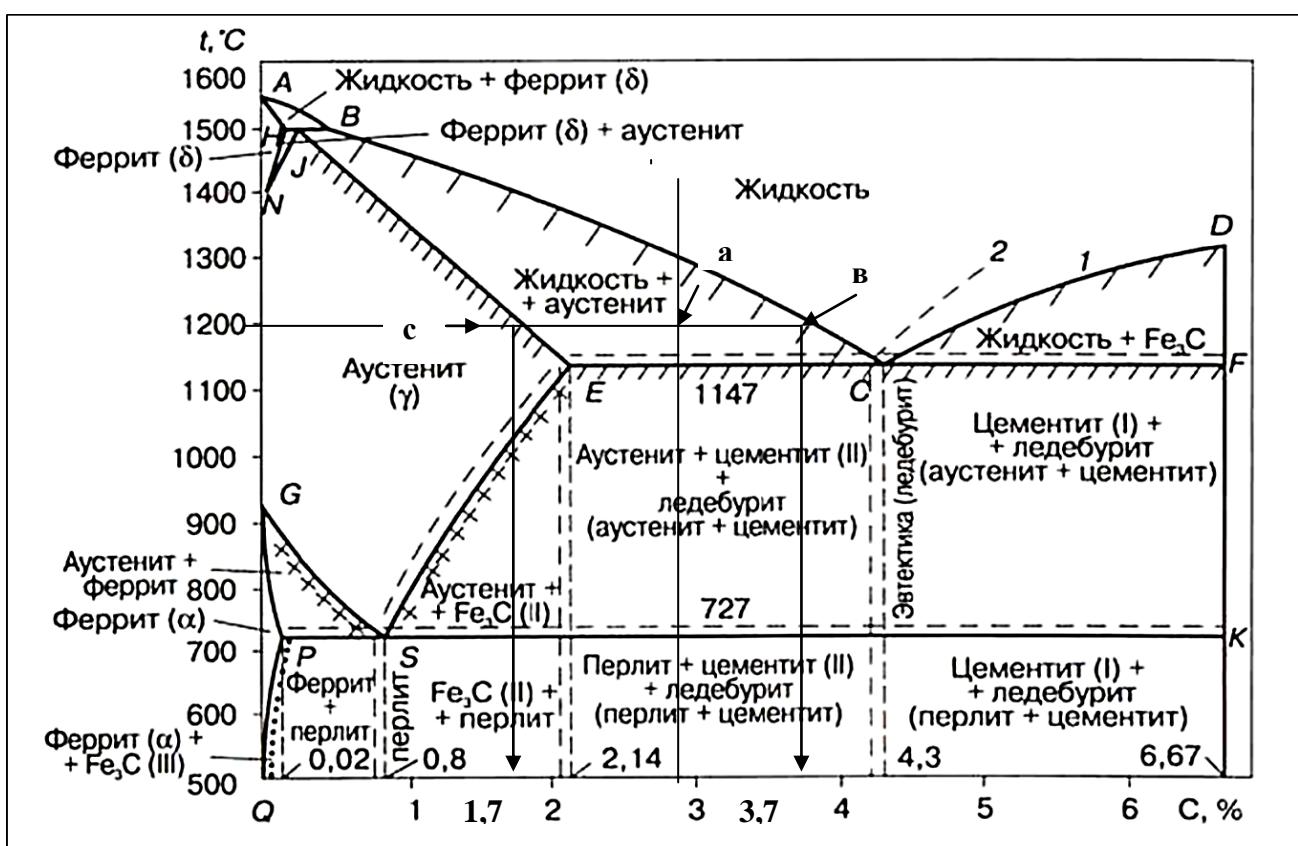


Рисунок 3.4 – Схема к определению концентрации углерода в фазах и количественного их соотношения

Второе правило отрезков можно выразить следующей формулой:

$$\frac{\text{кол. A}}{\text{кол. L}} = \frac{ab}{ac} . \quad (3.2)$$

Тогда, кол. A = $\frac{ab}{bc} \cdot 100\%$, а кол. L = $\frac{ac}{bc} \cdot 100\%$,

где вс – отрезок, характеризующий весь сплав.

$$\text{кол. A} = \frac{3,7 - 3,0}{3,7 - 1,7} \cdot 100\% = 35\%. \text{ кол. L} = \frac{3,0 - 1,7}{3,7 - 1,7} \cdot 100\% = 65\%.$$

Лабораторное задание

1. С правой стороны диаграммы построить кривые охлаждения для двух сплавов (по заданию преподавателя), определяя степень свободы на каждом участке.
2. На каждом участке кривой охлаждения первого сплава указать названия фаз, а на кривой охлаждения второго сплава с права названия фаз, слева названия структурных составляющих.
3. Для каждого сплава при заданной температуре определить концентрацию компонентов в фазах и их количественное соотношение.

Таблица – Варианты заданий для самостоятельной работы студентов

№ варианта	Концентрация углерода в сплаве	Температура сплава, °C	Примечание
1	2	3	4
1	1. C = 0,08 2. C = 5,5	1440 1200	
2	1. C = 0,13 2. C = 2,8	750 1200	
3	1. C = 0,8 2. C = 2,14	727 800	Конец превращения
4	1. C = 1,5 2. C = 2,7	750 727	Конец превращения
5	1. C = 0,16 2. C = 5,0	1499 1100	Начало превращения
6	1. C = 0,6 2. C = 2,5	727 900	Начало превращения
7	1. C = 4,3 2. C = 1,3	800 727	Конец превращения

Окончание таблицы

1	2	3	4
8	1. C = 3,5 2. C = 0,5	1000 720	
9	1. C = 2,14 2. C = 0,8	900 600	
10	1. C = 2,5 2. C = 0,4	1147 727	Начало превращения Конец превращения
11	1. C = 3,2 2. C = 0,25	727 750	Начало превращения
12	1. C = 6,0 2. C = 0,8	727 700	Конец превращения
13	1. C = 4,3 2. C = 1,5	900 700	
14	1. C = 0,8 2. C = 2,14	727 800	Конец превращения
15	1. C = 1,8 2. C = 5,5	750 1147	Начало превращения
16	1. C = 1,0 2. C = 4,5	700 1147	Конец превращения
17	1. C = 0,4 2. C = 3,5	750 1147	Начало превращения

Порядок выполнения работы

1. Вычертить кривую охлаждения чистого железа с приведением кристаллических решёток.
2. Изучить диаграмму состояния системы «железо – углерод».
3. Заполнить таблицу с характерными точками диаграммы состояния «железо – углерод» с указанием температуры и концентрации углерода в каждой точке, а также раскрыть сущность превращения, которое происходит в сплаве.
4. Рассмотреть процесс кристаллизации двух сплавов с построением кривых охлаждения, определением степени свободы на каждом участке и указанием фаз и структурных составляющих.
5. По заданию преподавателя в точке, характеризующей состояние сплава, определить концентрацию углерода в фазах и количественное соотношение фаз.
6. Сформулировать выводы по работе.

Содержание отчёта

Отчёт по лабораторной работе должен включать:

1. Кривую охлаждения чистого железа.
 2. Диаграмму состояния системы «железо – углерод».
 3. Понятия: диаграмма состояния системы, компонент, фаза.
 4. Понятия по фазам и структурным составляющим диаграммы состояния «железо – углерод».
 5. Правило фаз и правила отрезков.
 6. Сущность перитектического, эвтектического и эвтектоидного превращений. Причины образования вторичного и третичного цементита.
 7. Таблица с характерными точками и линиями диаграммы состояния «железо – углерод».
 8. Кривые охлаждения двух сплавов. Определение содержания углерода в фазах и количественное соотношение фаз при заданной концентрации углерода в сплаве и температуре.
- Выводы (практическое значение диаграммы, значения правил фаз и отрезков).

Контрольные вопросы

1. Что такое диаграмма состояния системы двойных сплавов?
2. Что понимают под фазой сплава?
3. Чем отличается твёрдый раствор внедрения от твёрдого раствора замещения?
4. При каких условиях образуются химические соединения?
5. Для чего пользуются правилом фаз?
6. Что нужно знать для определения степени свободы системы?
7. Если степень свободы системы равно нулю, что это значит?
8. Из чего могут состоять механические смеси?
9. Дайте определение аустениту и ферриту.
10. Дайте определение ледебуриту и перлиту.
11. Что такое цементит? При каких условиях он образуется?
12. Приведите интервал температур, при которых ледебурит состоит из перлита и цементита.
13. Поясните причину образования вторичного цементита.
14. Какие превращения протекают при постоянной температуре?

15. Что нужно выполнить для определения концентрации углерода в фазе?

16. Как определить количественное соотношение фаз в сплаве?

17. При каких условиях аустенит превращается в перлит?

18. При каких условиях жидкий раствор превращается в ледебурит?

19. При каких условиях протекает перитектическое превращение и в чём оно заключается?

20. Что такое аллотропия железа?

21. Назовите фазовый состав сплавов с концентрацией углерода от 0,006 % до 6,670%.

Лабораторная работа №4

ИЗУЧЕНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ В РАВНОВЕСНОМ СОСТОЯНИИ

Цель работы: приобретение практических навыков в проведении микроанализа структур углеродистых сталей.

Краткие теоретические сведения. Железоуглеродистые сплавы в зависимости от содержания углерода подразделяются на техническое железо ($C \leq 0,02\%$), стали ($0,02 < C \leq 2,14\%$) и чугуны ($2,14 < C \leq 6,67\%$).

Сталь является многокомпонентным сплавом, содержащим наряду с железом и углеродом полезные (марганец и кремний) и вредные примеси (сера, фосфор, кислород, азот, водород).

Стали классифицируют по назначению, химическому составу, степени раскисления, качеству и структуре.

По назначению стали разделяют на конструкционные, инструментальные и специальные (сталь с особыми физическими и химическими свойствами).

По химическому составу (содержанию углерода) стали делят на низкоуглеродистые ($0,02\dots0,25\%C$), среднеуглеродистые ($0,30\dots0,55\%C$) и высокоуглеродистые ($0,6\%C$ и более).

В зависимости от условий и степени раскисления стали делят на спокойные (раскислены марганцем, кремнием и алюминием), полуспокойные (раскислены марганцем и кремнием) и кипящие (раскислены марганцем). Марганец и кремний вводят в составе ферросплавов (ферромарганец и ферросилиций). В кипящих стальях повышенное содержание кислорода, который, взаимодействуя с углеродом, образует пузыри окиси углерода (CO), что и создаёт впечатление кипения. Кипящие стали имеют самое низкое качество, но высокую пластичность и низкую стоимость. Они применяются для производства листов, прутков, используемых для изготовления деталей холодной штамповкой. Степень раскисления указывается в конце марки стали двумя буквами: кипящая – кп, полуспокойная – пс, спокойная – сп.

В зависимости от качества углеродистые стали делят на стали обыкновенного качества, качественные и высококачественные. Качество стали определяется содержанием в них вредных примесей: серы и фосфора. Так, в стальях обыкновенного качества допустимое содер-

жение серы составляет $\leq 0,05\%$, а фосфора $\leq 0,04\%$; в качественных – серы и фосфора около $0,035\%$, а в высококачественных – $\leq 0,025\%$.

В соответствии с ГОСТ 380-2005, углеродистую конструкционную сталь обыкновенного качества изготавливают следующих марок: Ст0, Ст1кп, Ст1пс, Ст1сп, Ст2кп, Ст2пс, Ст2сп, Ст3кп, Ст3пс, Ст3сп, Ст3Гпс, Ст3Гсп, Ст4кп, Ст4пс, Ст4сп, Ст5пс, Ст5сп, Ст5Гпс, Ст6пс, Ст6сп. Буквы «Ст» обозначают «Сталь», цифры – условный номер марки в зависимости от химического состава, буква «Г» – марганец при его массовой доле в стали $0,80\%$ и более, буквы «кп», «пс», «сп» – степень раскисления стали. Сталь поставляется с гарантированным химическим составом (табл. 4.1).

Таблица 4.1 – Химический состав углеродистых сталей обыкновенного качества

Марка стали	Массовая доля элементов, %		
	углерод (С)	марганец (Mn)	кремний (Si)
Ст0	$\leq 0,23$	-	-
Ст1кп	$0,06\dots 0,12$	$0,25\dots 0,50$	$\leq 0,05$
Ст1пс	$0,06\dots 0,12$	$0,25\dots 0,50$	$0,05\dots 0,15$
Ст1сп	$0,06\dots 0,12$	$0,25\dots 0,50$	$0,15\dots 0,30$
Ст2кп	$0,09\dots 0,15$	$0,25\dots 0,50$	$\leq 0,05$
Ст2пс	$0,09\dots 0,15$	$0,25\dots 0,50$	$0,05\dots 0,15$
Ст2сп	$0,09\dots 0,15$	$0,25\dots 0,50$	$0,15\dots 0,15$
Ст3кп	$0,14\dots 0,22$	$0,30\dots 0,60$	$\leq 0,05$
Ст3пс	$0,14\dots 0,22$	$0,40\dots 0,65$	$0,05\dots 0,15$
Ст3сп	$0,14\dots 0,22$	$0,40\dots 0,65$	$0,15\dots 0,30$
Ст3Гсп	$0,14\dots 0,22$	$0,80\dots 1,10$	$0,15\dots 0,30$
Ст4кп	$0,18\dots 0,27$	$0,40\dots 0,70$	$\leq 0,05$
Ст4пс	$0,18\dots 0,27$	$0,40\dots 0,70$	$0,05\dots 0,15$
Ст4сп	$0,18\dots 0,27$	$0,40\dots 0,70$	$0,15\dots 0,30$
Ст5пс	$0,28\dots 0,37$	$0,50\dots 0,80$	$0,05\dots 0,15$
Ст5сп	$0,28\dots 0,37$	$0,50\dots 0,80$	$0,15\dots 0,30$
Ст5Гпс	$0,22\dots 0,30$	$0,80\dots 1,20$	$\leq 0,15$
Ст6пс	$0,38\dots 0,49$	$0,50\dots 0,80$	$0,05\dots 0,15$
Ст6сп	$0,38\dots 0,49$	$0,50\dots 0,80$	$0,15\dots 0,30$

Углеродистые стали обыкновенного качества в состоянии поставки (горячекатанный прокат: сортовой, листовой, профильной

штамповки, поковки и др.) широко применяют в строительстве для изготовления сварных, клёпаных и болтовых конструкций, в путевом хозяйстве железнодорожного транспорта и в сельскохозяйственном машиностроении при изготовлении малонагруженных деталей машин.

Качественные углеродистые конструкционные стали маркируют двузначным числом, указывающим среднее содержание углерода в сотых долях процента (05, 08,...60). Если стали полностью не раскислены, то в обозначение добавляют буквы кп, пс, а для спокойных сталей буквы не добавляют. Сталь поставляется с гарантированными химическим составом и нормированными механическими свойствами (табл. 4.2).

Таблица 4.2 – Марки, химический состав и механические свойства углеродистой качественной стали (ГОСТ 1050-88)

Марка стали	Содержание углерода по массе, %	Механические свойства нормализованной стали (не менее)			
		Предел текучести, σ_T , Н/мм ² (кгс/мм ²)	Временное сопротивление разрыву, σ_B , Н/мм ² (кгс/мм ²)	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %
08	0,05...0,12	196 (20)	320 (33)	33	60
10кп	0,07...0,14	186 (19)	314 (32)	33	55
10	0,07...0,14	205 (21)	330 (34)	31	55
15	0,12...0,19	225 (23)	370 (38)	27	55
20	0,17...0,24	245 (25)	410 (42)	25	55
25	0,22...0,30	275 (28)	450 (46)	23	50
30	0,27...0,35	295 (30)	490 (50)	21	50
35	0,32...0,40	315 (32)	530 (54)	20	45
40	0,37...0,45	335 (34)	570 (58)	19	45
45	0,42...0,50	355 (36)	600 (61)	16	40
50	0,47...0,55	375 (38)	630 (64)	14	40
55	0,52...0,60	380 (39)	650 (66)	13	35
60	0,57...0,65	400 (41)	680 (69)	12	35

Если сталь содержит марганца более 0,8%, то после двузначно-

го числа ставится буква «Г», например сталь 60Г.

Качественные углеродистые конструкционные стали применяют для изготовления различных деталей машин. Например, из сталей 08 и 10кп, изготавливают детали холодной штамповкой и холодной высадкой, трубы, прокладки, крепеж, колпачки; стали 15, 20 применяют для изготовления малоагруженных деталей (валики, пальцы, упоры, копиры, оси, шестерни и др.); стали 40, 45 применяют для изготовления деталей, от которых требуется повышенная прочность (коленчатые валы, шатуны, зубчатые венцы, распределительные валы, маховики, зубчатые колеса, шпильки, храповики, плунжеры, шпинтели и др.).

Инструментальные углеродистые стали маркируют буквой «У» и числом (однозначным или двузначным), показывающим среднее содержание углерода в десятых долях процента (7, 8, 9...1,3) (табл. 4.3). По качеству они бывают качественные (У7 – содержание углерода 0,7 %) и высококачественные (У13А – содержание углерода 1,3 %). Сталь поставляется по ГОСТ 1435-90.

Таблица 4.3 – Марки и химический состав инструментальной нелегированной стали (ГОСТ 1435-90)

Марка стали	Массовая доля элементов, %				
	углерода	кремния	марганца	серы	фосфора
У7	0,65...0,74	0,17...0,33	0,17...0,33	0,028	0,030
У8	0,75...0,84	0,17...0,33	0,17...0,33	0,028	0,030
У9	0,85...0,94	0,17...0,33	0,17...0,33	0,028	0,030
У10	0,95...1,04	0,17...0,33	0,17...0,33	0,028	0,030
У11	1,05...1,14	0,17...0,33	0,17...0,33	0,028	0,030
У12	1,15...1,24	0,17...0,33	0,17...0,33	0,028	0,030
У13	1,25...1,35	0,17...0,33	0,17...0,33	0,028	0,030
У7А	0,65...0,74	0,17...0,33	0,17...0,33	0,018	0,025
У8А	0,75...0,84	0,17...0,33	0,17...0,33	0,018	0,025
У9А	0,85...0,94	0,17...0,33	0,17...0,33	0,018	0,025
У10А	0,95...1,04	0,17...0,33	0,17...0,33	0,018	0,025
У11А	1,05...1,14	0,17...0,33	0,17...0,33	0,018	0,025
У12А	1,15...1,24	0,17...0,33	0,17...0,33	0,018	0,025
У13А	1,25...1,35	0,17...0,33	0,17...0,33	0,018	0,025
У8Г	0,8...0,9	0,17...0,33	0,33...0,58	0,028	0,030
У8ГА	0,8...0,9	0,17...0,33	0,33...0,58	0,018	0,025

Специальная конструкционная углеродистая сталь, предназначенная для изготовления болтов, гаек, винтов и других крепёжных деталей на металлорежущих станках-автоматах, называется автоматной сталью. Она содержит повышенное количество серы (до 0,3 %) и фосфора (до 0,15 %), маркируется буквой «А», после которой следует двузначное число, указывающее среднее содержание углерода в сотых долях процента. При повышенном содержании в стали марганца после двузначного числа ставится буква «Г», например А40Г.

Микроструктуру сталей изучают в равновесном состоянии, когда процессы фазовых превращений полностью закончились, что достигается только при очень медленном охлаждении. Структурные составляющие углеродистых сталей в равновесном состоянии определяют по диаграмме состояния железо–углерод и ими являются феррит, перлит и цементит (рис. 4.1).

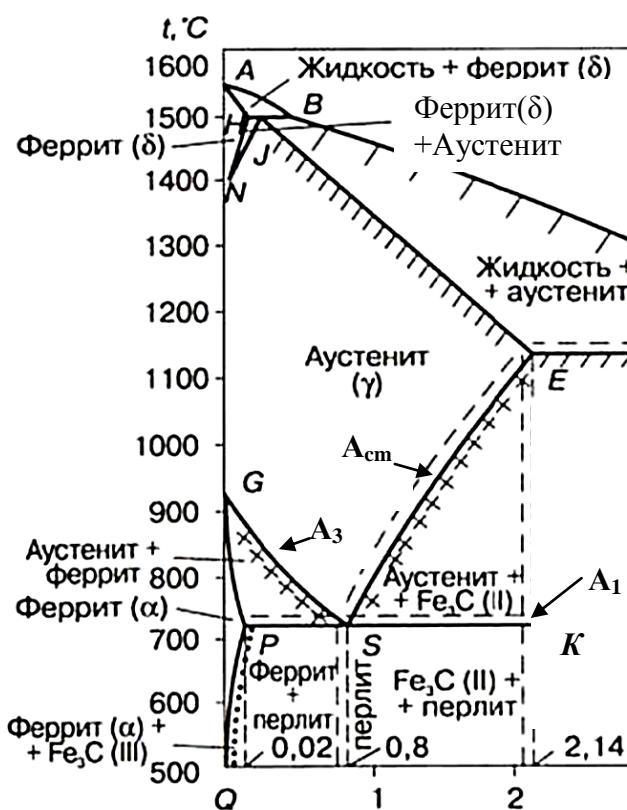


Рисунок 4.1 – Часть диаграммы состояния системы железо – углерод (стальной участок)

Феррит мягок и пластичен, имеет твёрдость 50...80 НВ, относительное удлинение – $\delta = 50\% \dots 30\%$, предел прочности $\sigma_b = 300$ МПа. Под микроскопом из-за анизотропии просматривается в виде

зёрен неодинаковой яркости.

Перлит имеет твёрдость 160...200 НВ, относительное удлинение – $\delta = 5...15\%$ и предел прочности $\sigma_b = 800$ МПа. В зависимости от формы частиц цементита перлит бывает пластинчатым и зернистым. Под микроскопом просматривается в виде чередующихся тёмных и светлых полос (при небольшом увеличении в виде тёмных зёрен).

Цементит – самая твёрдая (800 НВ или 65 HRC, легко царапает стекло) и хрупкая структурная составляющая (пластичность практически равна нулю). Под микроскопом просматривается в виде блестящих зёрен, пластин или светлой сетки, располагающейся по границам зёрен перлита.

По микроструктуре в равновесном состоянии стали делят на доэвтектоидные, эвтектоидные и заэвтектоидные (рис. 4.1).

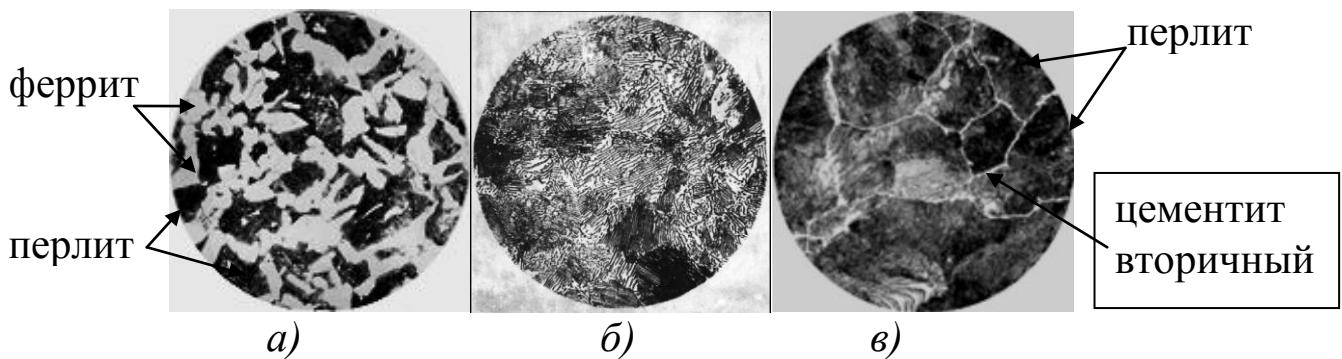


Рисунок 4.2 – Микроструктура сталей: а – доэвтектоидная (тёмные зерна – перлит, светлые – феррит); б – эвтектоидная (перлит пластиначатый: феррит + цементит); в – заэвтектоидная (темные зерна – перлит, сетка по границам зерен – цементит вторичный)

Доэвтектоидные стали содержат от 0,02 % до 0,80 % углерода и структура их состоит из феррита и перлита (рис. 4.1, 4.2, а). С увеличением содержания углерода уменьшается в структуре количество феррита и увеличивается количество перлита. При этом возрастает твёрдость и уменьшается пластичность стали. Стали имеют две критические точки (рис. 4.1): А₁ (линия PSK) и А₃ (линия GS).

Эвтектоидная сталь содержит 0,8 % углерода и структура её состоит из перлита (рис. 4.1, б). Сталь имеет одну критическую точку (рис. 4.1) – А₁ (линия PSK).

Заэвтектоидные стали содержат от 0,80% до 2,14% углерода и

структурой их состоит из перлита и вторичного цементита, который располагается по границам зёрен перлита в виде сетки или прожилок белого цвета (рис. 4.1, в). Причиной образования вторичного цементита является уменьшение растворимости углерода в аустените при его охлаждении в интервале температур (1147...727) °С. С увеличением содержания углерода уменьшается в структуре количество перлита и увеличивается количество вторичного цементита. При этом твёрдость стали возрастает, но и увеличивается её хрупкость. По этой причине стали с содержанием углерода более 1,3 % не находят применения в технике. Стали имеют две критические точки (рис. 4.1): A₁ (линия PSK) и A_{cm} (линия SE).

Таким образом, с увеличением содержания углерода в сталях изменяется их микроструктура, процентное соотношение структурных составляющих и фаз в данной структуре, что приводит к изменению механических свойств: увеличивается твёрдость, уменьшается ударная вязкость и пластичность (рис. 4.3). Предел прочности при растяжении возрастает и достигает максимального значения при содержании углерода около 1 %, а затем снижается, что объясняется образованием хрупкой сетки из вторичного цементита по границам зёрен перлита.

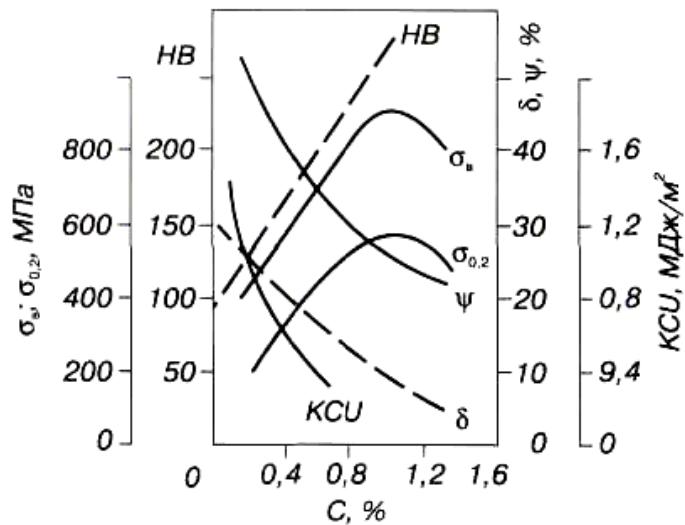


Рисунок 4.3 – Влияние углерода на механические свойства углеродистой стали: HB – твёрдость, KСU – ударная вязкость, δ – относительное удлинение, ψ – относительное сужение, σ_e – предел прочности при растяжении, $\sigma_{0,2}$ – условный предел текучести

По микроструктуре стали, находящейся в равновесном состоя-

нии, можно с достаточной степенью точности для практических целей определить содержание углерода. Так как в феррите содержится небольшое количество углерода (0,006 %), то можно считать, что весь углерод в доэвтектоидных сталях находится в перлите. Для этого в рассматриваемом под микроскопом микрошлифе ориентировано (на глаз) определяют площадь, занимаемую перлитом. Зная содержание углерода в перлите ($C_{\text{п}} = 0,8 \%$) и площадь, занимаемую им (F_n), содержание углерода в стали определяют по формуле

$$C = \frac{F_n \cdot C_{\text{п}}}{100}, \%$$

Порядок выполнения работы

1. Изучить микроструктуру углеродистых сталей в равновесном состоянии.
2. Схематически зарисовать наблюдаемые в микроскоп микроструктуры с указанием структурных составляющих.
3. Определить, к какому классу по структуре относятся рассмотренные стали.
4. По микроструктуре доэвтектоидной стали расчетным методом определить количество углерода в ней и установить её марку.
5. Сформулировать выводы по работе.

Содержание отчёта

Отчёт по лабораторной работе должен включать:

1. Часть диаграммы состояния «железо – углерод» (стальной участок).
2. Характеристику структурным составляющим углеродистых сталей.
3. Схемы микроструктур углеродистых сталей в равновесном состоянии, их описание, критические точки и наименование сталей по структуре (класс стали по структуре).
4. Расчёт концентрации углерода в стали по её микроструктуре и определение марки стали.

Выводы (влияние концентрации углерода в стали на изменение её микроструктуры, физико-механических свойств и положений критических точек).

Контрольные вопросы

1. Как классифицируют углеродистые стали по назначению?
2. Какого качества бывают углеродистые конструкционные и инструментальные стали?
3. Какие элементы, входящие в состав сталей, в основном определяют их качество?
4. На какие группы делятся углеродистые конструкционные стали обыкновенного качества и по каким признакам?
5. Как маркируются углеродистые конструкционные стали обыкновенного качества и качественные?
6. Как маркируются углеродистые инструментальные стали качественные и высококачественные?
7. Как изменяется структура углеродистой стали с увеличением содержания в ней углерода?
8. Какова методика определения содержания углерода в стали по её микроструктуре?
9. Расшифруйте марки сталей: БСт2, сталь 45, У8А, Сталь 65Г, Ст3кп, У12, ВСт6.
10. Как просматривается под микроскопом зё尔на феррита и цементита?
11. Как просматривается под микроскопом перлит?
12. Какими механическими свойствами характеризуются перлит и феррит?
13. Где на диаграмме «железо – углерод» располагаются критические точки A_1 и A_3 ?
14. Как определить температуру критической точки A_{cm} для стали У13?

Лабораторная работа № 5

ИЗУЧЕНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ЧУГУНОВ

Цель работы: приобретение практических навыков в проведении микроанализа микроструктуры чугунов.

Краткие теоретические сведения. Чугунами называют железоуглеродистые сплавы с содержанием углерода от 2,14 до 6,67 % (рис. 5.1). Практическое применение находят чугуны с содержанием углерода от 2,4 % до 3,8 %. При содержании углерода менее 2,4 % ухудшаются литейные свойства, а более 3,8 % – механические свойства чугуна. Углерод в чугунах может находиться в двух состояниях: 1 – в химически связанном, в виде карбида железа Fe_3C (цементит); 2 – в свободном состоянии, в виде графита. В первом случае чугуны называются белыми, во втором графитизированными (серыми).



*Рисунок 5.1 - Часть диаграммы состояния системы
Железо – углерод (чугунный участок)*

Белые чугуны получили название по виду излома, имеющего матово-белый цвет. Из-за присутствия в чугуне значительного количества цементита (32 % при содержании углерода 2,14 % и 100 % при содержании углерода 6,67 %), который образуется при быстром охлаждении сплава из расплавленного состояния, он имеет высокую твёрдость до НВ 800, хрупкость и практически не поддается обработке резанием. Поэтому, как конструкционный материал, он находит ограниченное применение. Кристаллизация чугуна проходит в

соответствии с диаграммой состояния Fe – С (рис. 5.1). Отливки из белого чугуна являются заготовками для получения ковкого чугуна.

Структурной составляющей, присутствующей во всех белых чугунах, является ледебурит, который образуется в процессе эвтектического превращения жидкости с концентрацией углерода 4,3 % при температуре 1147 °С и состоит из механической смеси аустенита и цементита. При температуре 727 °С аустенит превращается в перлит – механическую смесь феррита и цементита. Поэтому, ледебурит ниже температуры 727 °С состоит из перлита и цементита.

Все чугуны при кристаллизации претерпевают эвтектическое превращение и, в этой связи, в зависимости от содержания углерода они делятся на доэвтектические, эвтектические и заэвтектические.

Доэвтектические чугуны содержат углерода от 2,14 до 4,30 % и имеют микроструктуру, состоящую из перлита, цементита вторичного и ледебурита (рис. 5.2). Кривая охлаждения чугуна приведена на рисунке 3.3. Перлит под микроскопом просматривается в виде тёмных зёрен, ледебурит – в виде отдельных участков, колоний. Каждый участок – смесь довольно мелких округленных и вытянутых зёрен перлита, равномерно расположенных в цементитной основе. Цементит вторичный просматривается в виде светлых включений.

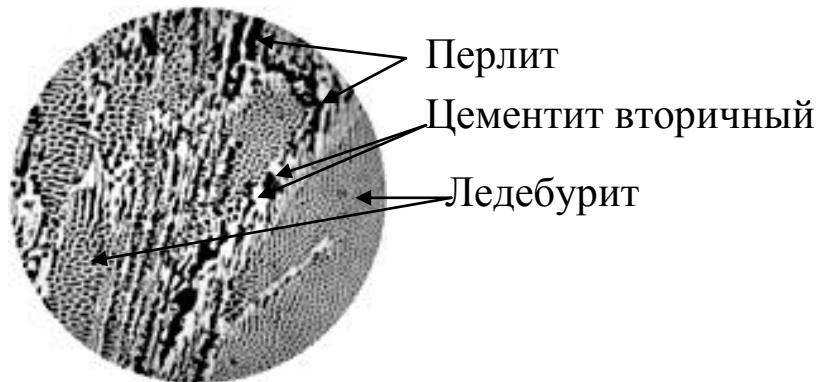


Рисунок 5.2 – Микроструктура белого доэвтектического чугуна

С увеличением содержания углерода количество ледебурита в структуре увеличивается, а цементита вторичного и перлита – уменьшается.

Эвтектический чугун представляет собой равномерную механическую смесь перлита с цементитом (рис. 5.3).

Заэвтектические чугуны содержат углерода от 4,30 % до 6,67 % и имеют микроструктуру, состоящую из цементита первичного и ледебурита (рис. 5.4). С увеличением содержания углерода количество цементита первичного увеличивается, а ледебурита уменьшается.

Чем больше в структуре белого чугуна цементита, тем выше его твёрдость и хрупкость, тем хуже обрабатываемость его резанием.

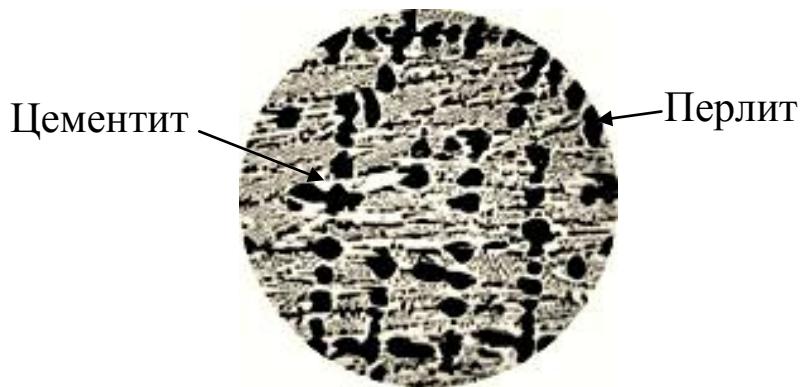


Рисунок 5.3 – Микроструктура белого эвтектического чугуна

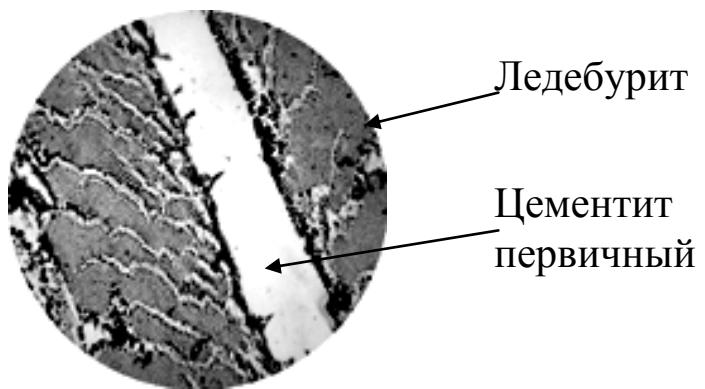


Рисунок 5.4 – Микроструктура белого заэвтектического чугуна

Фазовый состав белых чугунов такой же, как и в углеродистых сталях в равновесном состоянии, все они состоят из феррита и цементита.

В чугунах со структурно свободным углеродом весь углерод, или большая часть его, выделяется в виде графита различной формы. Графит придаёт излому чугуна серый цвет. В зависимости от формы графита и условий его образования чугун делится на серый, высокопрочный и ковкий. В сером чугуне графит имеет пластинчатую форму, высокопрочном – шаровидную, ковком – хлопьевидную. Процесс образования графита называется графитизацией. Степень и полноту графитизации оценивают по количеству свободно выделившегося углерода, то есть графита, что определяет и металлическую основу чугуна, которая может быть ферритной, феррито-перлитной и перлитной.

На графитизацию оказывают существенное влияние скорость охлаждения, количество присутствующих элементов и наличие центров кристаллизации. Чем меньше скорость охлаждения, тем больше степень графитизации.

Кремний особенно сильно влияет на структуру, усиливая графитизацию. Содержание кремния в чугунах колеблется от 0,3 до 2,8 %. Изменяя содержание кремния, можно получить чугуны различные по свойствам и структуре – от белого до серого с различной металлической основой.

Марганец препятствует графитизации, то есть способствует отбеливанию чугуна. Количество марганца не превышает 0,4 %.

Сера, как и марганец, способствует отбеливанию чугуна и ухудшает литейные свойства (снижает жидкотекучесть). Содержание серы в чугуне допускается для мелкого литья до 0,08 %, для крупного – 0,12 %.

Фосфор практически не влияет на графитизацию и улучшает жидкотекучесть, чему способствует образование фосфидной эвтектики. Содержание фосфора в чугуне от 0,3 до 0,8 %.

Рассмотрим кристаллизацию серого чугуна с содержанием углерода 3,5 % (сплав K) с построением кривой охлаждения (рис. 5.5).

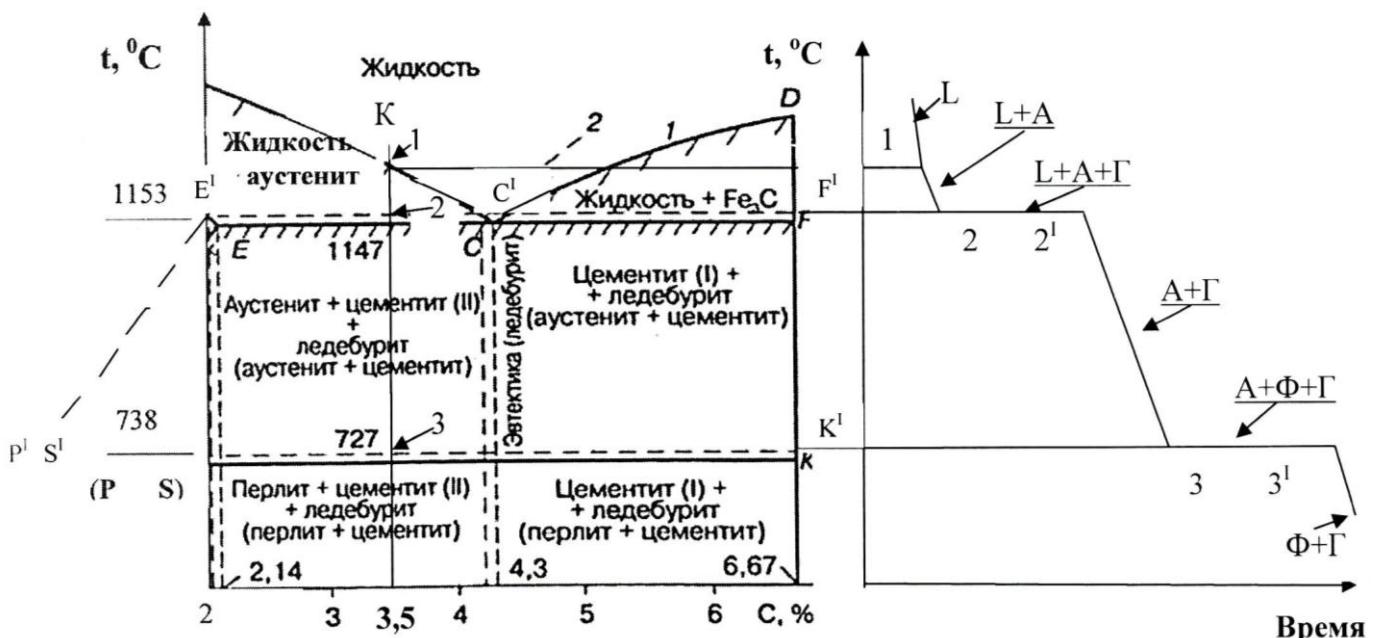


Рисунок 5.5 - Часть диаграммы состояния системы железо – углерод с кривой охлаждения серого чугуна с концентрацией углерода 3,5 %

До точки 1 сплав находится в жидком состоянии (степень свободы системы $C = 2$). В точке 1 начинается и до т. 2 продолжается кристаллизация аустенита ($C = 1$). При медленном охлаждении последующие превращения будут происходить по стабильной диаграмме железо-углерод (пунктирные линии). При температуре 1153 °С (линия $E^I C^I F$) протекает эвтектическое превращение: жидкий раствор (L) одновременно кристаллизуется в аустенит (A) и графит (Γ), ($C = 0$). При дальнейшем охлаждении по линии $E^I S^I$ из аустенита выделяется вторичный графит, и в интервале температур (1153...738) °С сплав состоит из двух фаз: аустенита и графита ($C = 1$). При температуре 738 °С (линия $P^I S^I K^I$) протекает эвтектоидное превращение: аустенит распадается на феррит (Φ) и графит ($C = 0$). При полном распаде аустенита образуется серый чугун со структурой феррит + графит (рис. 5.6), то есть серый чугун с ферритной металлической основой. Увеличение скорости охлаждения отливки в интервале температур (738...727) °С позволяет получать чугуны с феррито-перлитной и перлитной металлической основой ^{«ЧМК»}

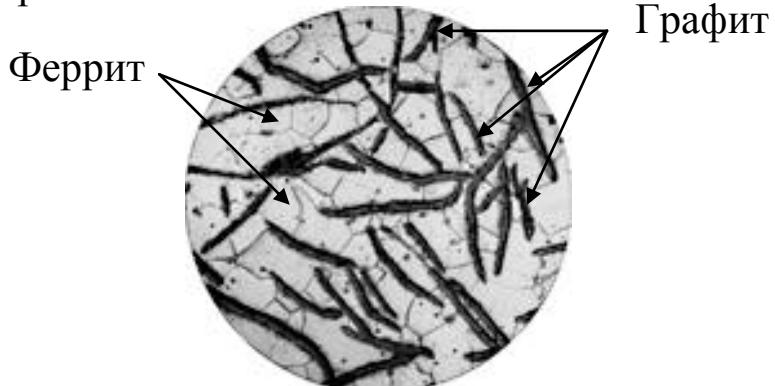


Рисунок 5.6 – Микроструктура серого чугуна с ферритной металлической основой

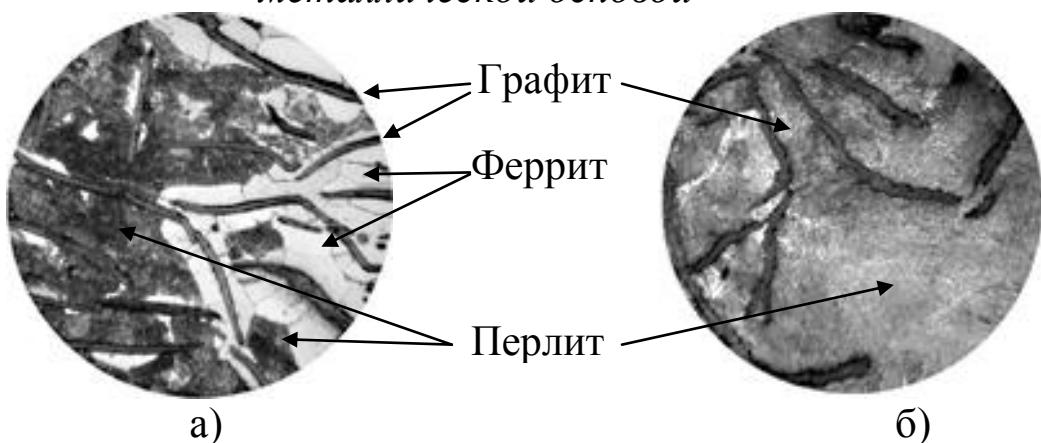


Рисунок 5.7 – Микроструктура серого чугуна с феррито-перлитной (а) и перлитной (б) металлической основой

Механические свойства чугуна обусловлены его структурой и зависят от формы, количества, размеров, распределения графитовых включений и металлической основы.

Чем меньше графитовых включений, чем они мельче и больше степень изолированности их друг от друга, тем выше прочность чугуна, так как графитовые включения нарушают сплошность металлической основы и являются концентраторами напряжений.

Серый чугун с перлитной металлической основой имеет более высокую твёрдость и больший предел прочности при растяжении, чем чугуны с феррито-перлитовой и ферритной металлической основой, поскольку механические свойства перлита выше, чем феррита.

Серый чугун по ГОСТ 1412-85 маркируется буквами: С – серый, Ч – чугун, после идёт цифровое обозначение, указывающее величину минимального временного сопротивления при растяжении (предел прочности при растяжении) σ_b , выраженного в МПа· 10^{-1} (табл. 5.1).

Таблица 5.1 – Механические свойства серых чугунов по ГОСТ 1412-85

Марка*	Твёрдость при толщине стенки отливки 15 мм	Временное сопротивление разрыву при растяжении σ_b , МПа ($\text{кгс}/\text{мм}^2$), не менее	Структура металлической основы (ферритная – Ф, перлитная – П)
СЧ10	190	100 (10)	Ф
СЧ15	210	150 (15)	Ф
СЧ20	230	200 (20)	Ф+П
СЧ25	245	250 (25)	Ф+П
СЧ30	260	300 (30)	П
СЧ35	275	350 (35)	П

*Примечание: по заказу потребителя для изготовления отливок допускаются марки чугунов СЧ18, СЧ21, СЧ24.

Серые ферритные чугуны с ферритной металлической основой применяются в машиностроении для изготовления слабо- и средненагруженных деталей: крышек, фланцев, корпусов редукторов, фундаментных плит, маховиков и др. Чугуны с феррито-перлитной металлической основой применяются для деталей, работающих при повышенных статических и динамических нагрузках: блоки цилиндров, станины станков, диски сцепления и др. Чугуны с перлитной метал-

лической основой применяют для отливки станин мощных станков, корпусов насосов, цилиндров, гильз и др.

Высокопрочные чугуны получают модифицированием расплава серого чугуна ферросилицием и магнием или церием с целью создания большого центров кристаллизации и формирования графита шаровидной формы, который в меньшей степени нарушает сплошность металлической основы, не создаёт концентраторы напряжений, что и обеспечивает повышенную прочность и пластичность чугуна.

Высокопрочный чугун, как и серый, может иметь ферритную, феррито-перлитную (рис. 5.8) и перлитную металлическую основу (рис. 5.9), которая и определяет механические свойства чугуна (табл. 5.2).

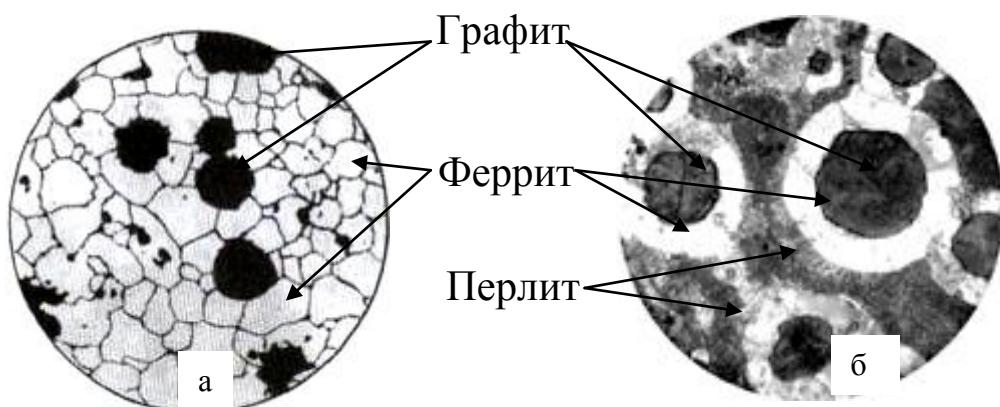


Рисунок 5.8 – Микроструктура ферритного (а) и феррито-перлитного (б) высокопрочного чугуна

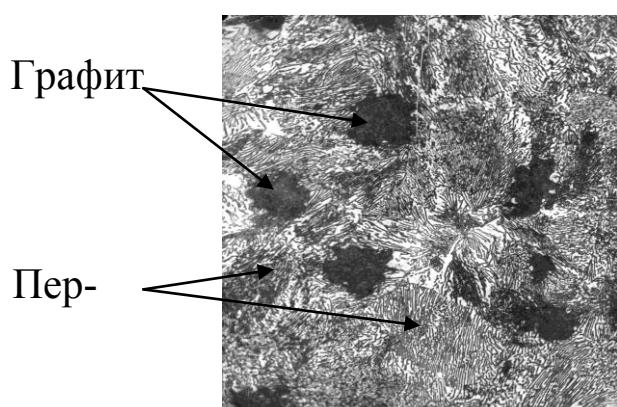


Рисунок 5.9 – Микроструктура перлитного высокопрочного чугуна

Высокопрочный чугун по ГОСТ 7293-85 маркируется буквами: В – высокопрочный, Ч – чугун, после идёт цифровое обозначение,

указывающее величину минимального временного сопротивления при растяжении (предел прочности при растяжении) σ_e , выраженного в МПа·10⁻¹ (табл. 5.2).

Таблица 5.2 – Механические свойства высокопрочных чугунов по ГОСТ 7293-85

Марка	Временное со- противление разрыва при растяжении σ_e , МПа (кгс/мм ²)	Условный предел тек- учести $\sigma_{0,2}$, МПа (кгс/мм ²)	Относи- тельное удлине- ние δ , %	Твёр- дость по Бринел- лю, НВ	Структура металличе- ской осно- вы (фер- ритная – Ф, перлитная – П)
	не менее				
ВЧ35	350 (35)	220 (22)	22	140...170	Ф
ВЧ40	400 (40)	250 (25)	15	140...202	Ф
ВЧ45	450 (45)	310 (31)	10	140...225	Ф+П
ВЧ50	500 (50)	320 (32)	7	153...245	Ф+П
ВЧ60	600 (60)	370 (37)	3	192...277	Ф+П
ВЧ70	700 (70)	420 (42)	2	228...302	П
ВЧ80	800 (80)	480 (48)	2	248...251	П
ВЧ100	1000 (100)	700 (70)	2	270...360	П

Высокопрочные чугуны применяют в машиностроении для изготовления деталей ответственного назначения: ступицы колёс, рычаги, распределительные и коленчатые валы двигателей внутреннего сгорания, крышки и стаканы подшипников коробок передач и др.

Ковкий чугун получают путём отжига при высоких температурах белого доэвтектического чугуна, который имеет структуру перлита, ледебурита и вторичного цементита. В свою очередь ледебурит представляет собой механическую смесь перлита и цементита. Таким образом, можно считать, что до отжига белый чугун состоит из перлита и цементита. В процессе отжига цементит распадается на аустенит (j-железо) и графит хлопьевидной формы (рис. 5.10), что способствует повышению пластических свойств чугуна – он лучше переносит ударные нагрузки.

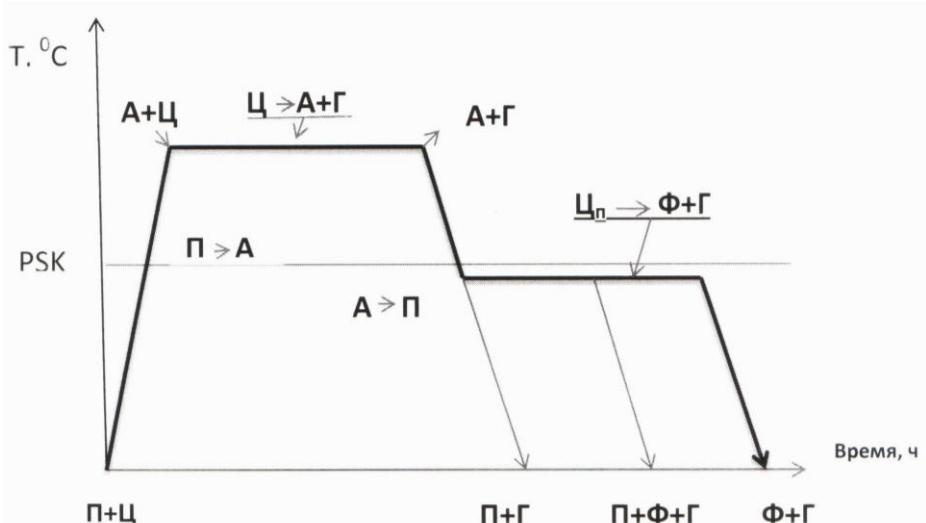


Рисунок 5.10 – Схема отжига и образования структур ковкого чугуна

При нагреве белого чугуна выше линии PSK перлит превращается в аустенит, и в начале отжига при температуре 950...970 °С структура чугуна состоит из аустенита и цементита. При выдержке протекает первая стадия графитизации, т.е. распад цементита на аустенит и графит ($\text{Ц} \rightarrow \text{A} + \text{Г}$). При завершении первой стадии графитизации структура чугуна будет состоять из аустенита и графита. При охлаждении до температуры, соответствующей линии PSK, аустенит превратится в перлит, и чугун будет иметь структуру «перлит + графит». В случае незавершенности первой стадии графитизации структура чугуна при высокой температуре будет состоять из аустенита, цементита и графита, а при низкой (комнатной) – перлита, цементита и графита.

Вторая стадия графитизации протекает или при весьма медленном охлаждении в эвтектоидном интервале температур (738...727) °С, или длительной выдержке при температурах несколько ниже линии PSK. В процессе выдержки цементит перлита распадается на феррит и графит ($\text{Ц}_\text{п} \rightarrow \text{Ф} + \text{Г}$) и структура чугуна будет состоять из феррита и графита (рис. 5.11).

В случае незавершенности второй стадии графитизации структура чугуна будет состоять из перлита, феррита и графита. Таким образом, ковкий чугун может иметь ферритную, феррито-перлитную и перлитную металлическую основу, которая и определяет механические свойства чугуна. Чугуны с ферритной и феррито-перлитной основой относятся к ферритному классу, а с перлитной металлической основой – перлитному классу.

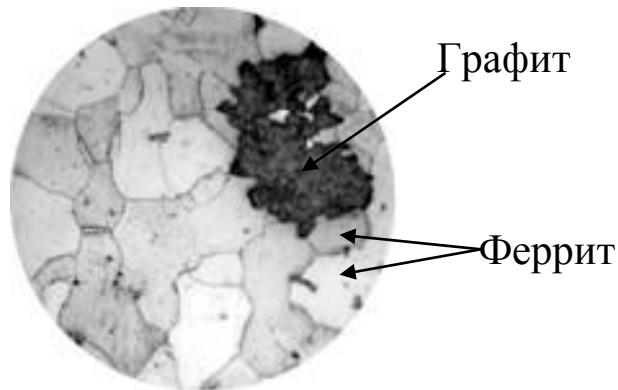


Рисунок 5.11 – Микроструктура ковкого чугуна с ферритной металлической основой

Ковкий чугун по ГОСТ 1215-79 маркируется буквами: К – ковкий, Ч – чугун, после идёт цифровое обозначение, указывающее величину минимального временного сопротивления при растяжении (предел прочности при растяжении) σ_b , выраженного в $\text{МПа} \cdot 10^{-1}$, и относительное удлинение $\delta, (\%)$ (табл. 5.3).

Таблица 5.3 – Механические свойства ковкого чугуна по ГОСТ 1215-79

Марка	Временное сопротивление разрыву при растяжении σ_b , МПа ($\text{кгс}/\text{мм}^2$), не менее	Относительное удлинение $\delta, \%$, не менее	Твёрдость по Бринеллю, НВ	Класс - перлитный (П), ферритный (Ф)
КЧ30-6	294 (30)	6	100...163	Ф
КЧ33-8	323 (33)	8	100...163	Ф
КЧ35-10	333 (35)	10	100...163	Ф
КЧ37-12	362 (37)	12	110...163	Ф
КЧ45-7	441 (45)	7	150...207	П
КЧ50-5	490 (50)	5	170...230	П
КЧ55-4	539 (55)	4	192...241	П
КЧ60-3	588 (60)	3	200...269	П
КЧ65-3	637 (65)	3	212...269	П
КЧ70-2	686 (70)	2	241...285	П
КЧ80-1,5	784 (80)	1,5	270...320	П

Ковкие чугуны применяют в машиностроении для изготовления картеров редукторов, ступиц, корпусов задних мостов, фланцев, вилок карданных валов, муфт, гаечных ключей и др.

Вермикулярные чугуны – чугуны с вермикулярным (червеобразным) графитом (ЧВГ). Они занимают промежуточное положение между чугунами с пластинчатым и шаровидным графитом и сочетают в себе хорошие литейные свойства с достаточно высокими прочностью, пластичностью и вязкостью. Пластиинки графита в чугуне завихрены, укорочены, притуплены на кромках. Образование вермикулярного графита происходит при присутствии в расплаве сфероидизирующих (магний, церий) и десфероидизирующих (титан, алюминий) присадок и кальция. По типу металлической основы различают чугуны ферритные, феррито-перлитные и перлитные.

Чугун с вермикулярным графитом по ГОСТ 28394-89 маркируется буквами: Ч – чугун, ВГ – вермикулярный графит, после идёт цифровое обозначение, указывающее величину минимального временного сопротивления разрыву при растяжении (предел прочности при растяжении) σ_e , выраженного в МПа· 10^{-1} (табл. 5.3).

Таблица 5.3 – Механические свойства чугуна с вермикулярным графитом по ГОСТ 28394-89

Марка	Временное сопротивление разрыву при растяжении σ_e , МПа ($\text{кгс}/\text{мм}^2$)	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа ($\text{кгс}/\text{мм}^2$)	Относительное удлинение δ , %	Твёрдость по Бринеллю НВ
ЧВГ 30	300 (30)	240 (24)	3,0	130...180
ЧВГ 35	350 (35)	260 (26)	2,0	140...190
ЧВГ 40	400 (40)	320 (32)	1,5	170...220
ЧВГ 45	450 (45)	380 (38)	0,8	190...250

Вермикулярные чугуны применяют в машиностроении для изготовления автомобилей, тракторов, работающих при переменных повышенных циклических температурах и механических нагрузках: головки цилиндров, тормозные рычаги тракторов, корпуса турбокомпрессоров, ступицы колёс, гильзы цилиндров и др.

Порядок выполнения работы

1. Получить коллекцию микрошлифов различных чугунов в равновесном состоянии до и после травления в 4%-м растворе азотной кислоты в этиловом спирте.
2. Определить увеличение микроскопа. Рассмотреть, изучить и зарисовать микроструктуру белых чугунов с указанием структурных составляющих, их видимостью под микроскопом, условий получения и наименования чугуна по структуре.
3. Определить увеличение микроскопа. Рассмотреть, изучить и зарисовать микроструктуру серого, ковкого и высокопрочного чугунов с указанием структурных составляющих, формы графита, их видимостью под микроскопом, условий получения и наименования чугуна с учётом металлической основы.
4. Изучить влияние структурных составляющих, в том числе формы графитовых включений, на механические свойства чугуна.
5. Сформулировать выводы по работе.

Содержание отчёта

Отчёт по лабораторной работе должен включать:

1. Участок диаграммы «железо – углерод» с содержанием углерода от 2,14 % до 6,6 7% и указать структурные составляющие в каждой области.
 2. Определение и классификацию белых чугунов по структуре и дать характеристику структурным составляющим: определение, строение, механические свойства, видимость под микроскопом.
 3. Понятия серого, ковкого и высокопрочного чугунов, условия их получения на различной металлической основе и маркировку.
 4. Зарисовки микроструктур чугунов, их описание, условия получения и наименование по структуре.
- Выводы (объяснить различие в структуре и свойствах чугуна; установить влияние каждой структурной составляющей на свойства чугуна, в том числе формы графитового включения; отразить практическое применение чугунов).

Контрольные вопросы

1. Каково содержание углерода в чугунах?
2. Как получают белый и серый чугуны, и в чём состоит их основное отличие?

3. Назовите основные химические элементы, входящие в состав чугунов.
4. В какой форме в чугунах может быть графит?
5. От чего зависит прочность чугуна?
6. Как получают серый чугун на ферритной металлической основе?
7. Как получают ковкий чугун на перлитной металлической основе?
8. Как получают высокопрочный чугун на феррито-перлитной металлической основе?
9. Для изготовления каких деталей применяют заготовки из серого, ковкого и высокопрочного чугуна?
10. Как маркируются серый, ковкий и высокопрочный чугуны?
11. Как влияют на графитизацию кремний и марганец?
12. От содержания каких элементов зависит жидкотекучесть чугуна?
13. Как классифицируют белые чугуны по структуре?
14. При какой температуре протекает эвтектическое превращение при получении серого чугуна и в чём оно заключается?
15. Расшифруйте марки чугунов: СЧ15, СЧ20, КЧ35-10, ВЧ50, КЧ 37-12, ВЧ100.
16. Почему прочность высокопрочного чугуна больше, чем серого?
17. Какова структура белого заэвтектического чугуна?

Лабораторная работа № 6

ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ

Цель работы: установление влияния термической обработки стали на её механические свойства.

Краткие теоретические сведения. Термической обработкой называется совокупность операций нагрева, выдержки и последующего охлаждения с целью получения заданных свойств за счёт изменения строения и структуры металлических сплавов (рис. 6.1). Термическая обработка используется в качестве предварительной или промежуточной операции для улучшения обрабатываемости заготовок давлением, резанием и т.д., либо как окончательная операция технологического процесса, обеспечивающая заданный уровень физико-механических свойств изделия.

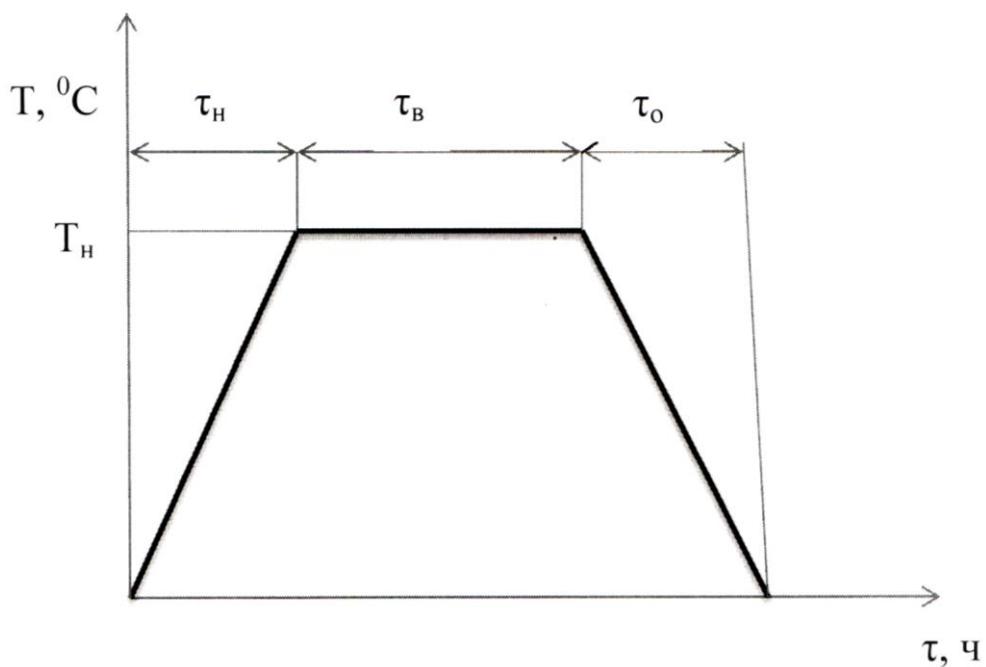


Рисунок 6.1 – Схема термической обработки: T_h – температура нагрева, τ_h – время нагрева, τ_v – время выдержки, τ_o – время охлаждения

Основными параметрами, характеризующими режим термической обработки, являются: скорость нагрева (T_h/τ_h) до заданной температуры, температура нагрева, время выдержки при этой температуре и скорость охлаждения (T_h/τ_o). Значения элементов режима термообработки зависят от химического состава сплава, размера изделия и целевого назначения выполняемого вида термообработки.

Основой для изучения термической обработки стали является диаграмма состояния системы «железо – углерод» (рис. 4.1). Так, температуру нагрева углеродистой стали в зависимости от вида термической обработки и содержания углерода выбирают в основном по диаграмме. Принято, что критические точки A_1 (линия PSK), A_3 (линия GS) при нагреве обозначают Ac_1 , Ac_3 , а при охлаждении – Ar_1 , Ar_3 (вследствие гистерезиса температуры превращений при нагреве всегда выше соответствующих температур при охлаждении). Основными видами термической обработки являются: отжиг, нормализация, закалка и отпуск.

Отжиг – операция термической обработки, заключающаяся в нагреве стали до определённой температуры, выдержке при этой температуре и медленном охлаждении (вместе с печью) с целью получения равновесной структуры, свободной от внутренних напряжений. В зависимости от температуры нагрева различают следующие основные виды отжига: полный, неполный, диффузионный, изотермический, отжиг на зернистый перлит, рекристаллизационный (рис. 6.2).

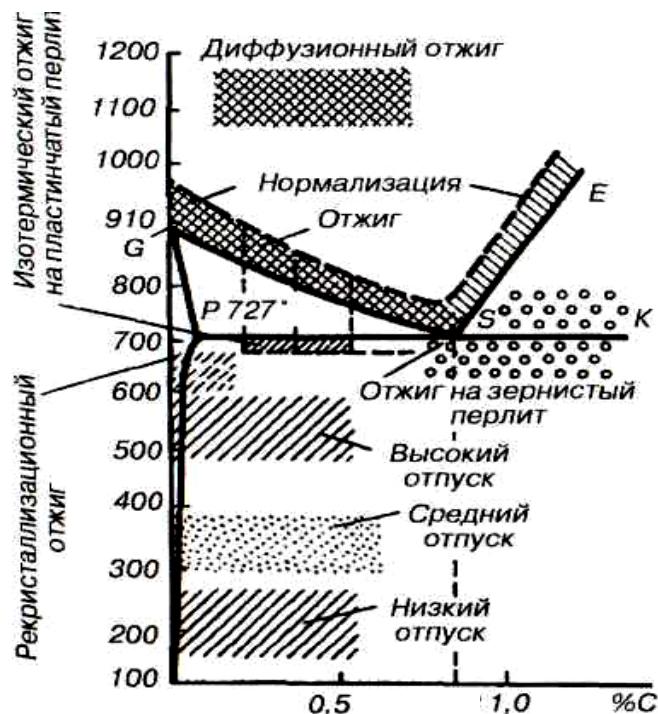


Рисунок 6.2 – Температурные интервалы нагрева стали при различных видах термической обработки стали

Полный отжиг проводится для доэвтектоидных сталей и заключается в нагреве стали на $30...50$ °С выше критической точки Ac_3 , выдержке при этой температуре и медленном охлаждении вместе с

печью (обычно до 500 °C, а затем на воздухе). Результатом отжига является образование мелкозернистой структуры (феррит + перлит) с высокой прочностью, вязкостью и пластичностью, улучшается обрабатываемость резанием.

Для заэвтектоидных сталей полный отжиг не проводят, так как при охлаждении от температур, соответствующих линии SE, происходит выделение цементита, который располагается по границам зёрен в виде сетки, и сталь становится хрупкой. Для них проводят неполный отжиг, который заключается в нагреве стали выше критической точки Ac_1 , но ниже критической точки A_{cm} , выдержке при этой температуре и медленном охлаждении. В этом случае происходит только частичная перекристаллизация структурных составляющих стали и в избытке остаётся цементит вторичный. После отжига сталь имеет структуру перлита и цементита вторичного.

Диффузионный отжиг проводят для выравнивания химического состава сплава.

Изотермический отжиг заключается в нагреве доэвтектоидной стали выше критической точки Ac_3 или эвтектоидной выше критической точки Ac_1 на 30...50 °C, выдержке при этих температурах, быстрым охлаждением до температуры несколько ниже критической точки Ar_1 , изотермической выдержке при этой температуре до полного распада аустенита на перлит и последующем охлаждении на воздухе. Применяют в основном для легированных сталей с целью получения пластинчатого перлита и улучшению обрабатываемости резанием.

Отжиг на зернистый перлит заключается в многократном нагреве и охлаждении стали в области температур немного выше и несколько ниже критической температуры A_1 . Невысокая температура нагрева позволяет сохранить большое число центров кристаллизации, способствующих образованию зернистого цементита. Такой отжиг приводит к снижению твёрдости, повышению вязкости и улучшению обрабатываемости резанием.

Рекристаллизационный отжиг применяют для доэвтектоидной малоуглеродистой стали, прошедшей обработку давлением в холодном состоянии, для устранения наклёпа, что приводит к уменьшению твёрдости, увеличению пластичности и вязкости.

Нормализация – это операция термической обработки, заключающаяся в нагреве доэвтектоидной стали выше критической точки Ac_3 , эвтектоидной выше критической точки Ac_1 и заэвтектоидной стали выше критической точки A_{cm} на 30...50 °C, непродолжительной

выдержке при этой температуре и последующем охлаждении на спокойном воздухе. Нормализацию применяют для снятия внутренних напряжений, получения мелкозернистой однородной структуры и уменьшения твёрдости. Для некоторых сталей нормализация является окончательной термической обработкой, т.е. стали получают хорошее сочетание пластичности и прочности.

Закалка стали – это операция термической обработки, заключающаяся в нагреве стали на $30\ldots50$ °С выше температур фазовых превращений Ac_3 или Ac_1 (рис. 6.3), выдержке при этой температуре и быстром охлаждении (со скоростью выше критической), в результате чего формируется неравновесная структура с высокой твёрдостью.

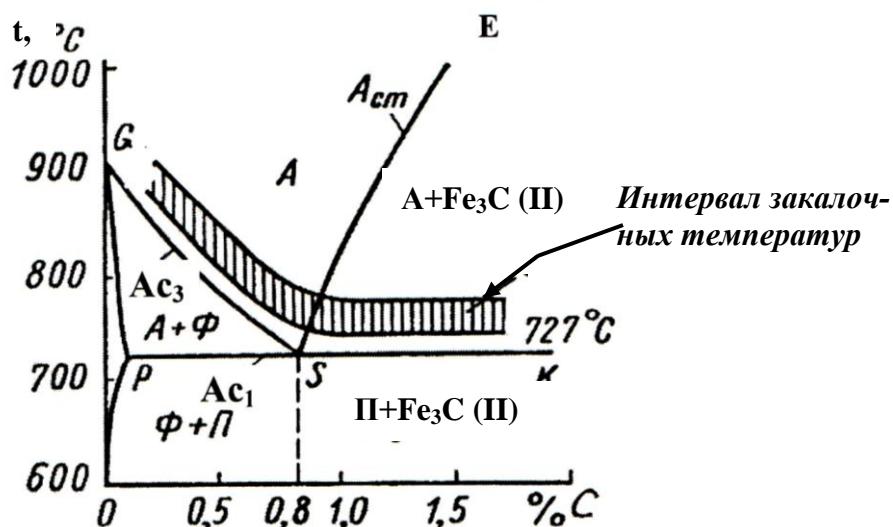


Рисунок 6.3 – Оптимальный интервал температур закалки углеродистых сталей

Критической скоростью закалки (V_{kp}) называют минимальную скорость охлаждения, обеспечивающую превращение переохлаждённого аустенита в мартенсит (рис. 6.4) – касательная к левой С-образной кривой (1) в точке минимальной устойчивости аустенита.

При охлаждении со скоростью меньше критической (V_1, V_2, V_3) имеет место превращение переохлаждённого аустенита в пластинчатые феррито-цементитные смеси: перлит, сорбит и троостит. Эти структуры отличаются друг от друга лишь степенью дисперсности. Чем выше скорость охлаждения, тем выше дисперсность феррито-цементитной смеси и выше твёрдость. Это превращение протекает в интервале температур Ar_1 и 550 °С и называется перлитным.

Перлит образуется при температуре 727...650 °С и представляет собой механическую смесь пластинок феррита и цементита со средней суммарной толщиной около 0,6 мкм и твёрдостью 15...18 HRC.

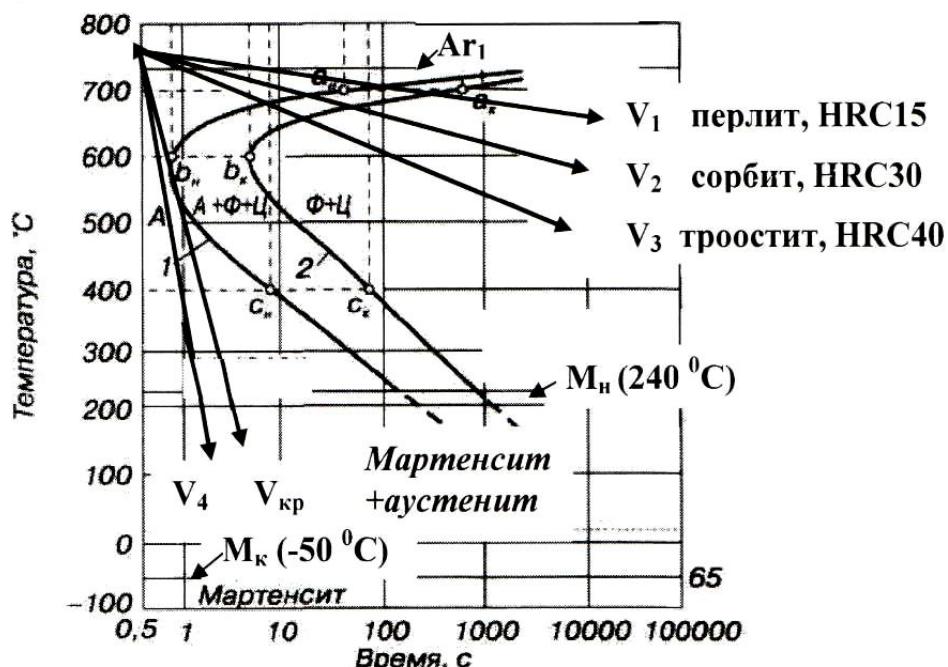


Рисунок 6.4 – Диаграмма изотермического превращения аустенита:

1 – левая С-образная кривая; 2 – правая С-образная кривая; a_h , b_h и c_h – начало превращения и a_k , b_k и c_k – конец превращения аустенита; M_h и M_k – соответственно начало и конец мартенситного превращения; V – скорости охлаждения; A – аустенит; Φ – феррит; Ц – цементит

Сорбит образуется при температуре 640...590 °С и представляет собой механическую смесь пластинок феррита и цементита со средней суммарной толщиной около 0,2 мкм и твёрдостью 25...30 HRC.

Троостит образуется при температуре 590...550 °С и представляет собой механическую смесь пластинок феррита и цементита со средней суммарной толщиной около 0,1 мкм и твёрдостью 37...44 HRC.

В интервале температур 550 °С и M_h при изотермической выдержке протекает промежуточное превращение с образованием структуры, называемой *бейнитом*. В зависимости от температуры изотермической выдержки образуется: верхний бейнит с твёрдостью 45 HRC (550..350 °C); нижний бейнит с твёрдостью 50 HRC

(350...240 °C). Верхний бейнит имеет перистое, а нижний – игольчатое строение.

Мартенситное превращение проходит только при непрерывном охлаждении в интервале температур M_n и M_k с определённой скоростью, бездиффузионно, в результате которого аустенит превращается в специальную структуру – мартенсит. При этом все атомы углерода остаются в объёмно-центрированной кристаллической решётке и искают её. Поэтому мартенсит – пересыщенный твёрдый раствор внедрения углерода и других элементов в α -железе. Он имеет тетрагональную кристаллическую решётку $c/a > 1$ (рис. 6.5), что и приводит к увеличению твёрдости до 65 HRC. Тетрагональность решётки мартенсита пропорциональна содержанию углерода. Твёрдость мартенсита с увеличением содержания углерода в стали возрастает.

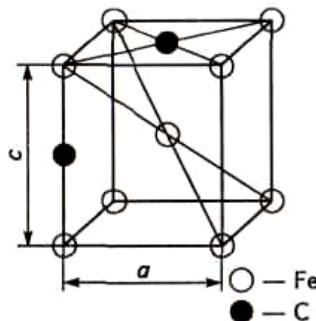


Рисунок 6.5 – Кристаллическая ячейка мартенсита

Углерод и легирующие элементы в значительной степени снижают температуру начала и конца мартенситного превращения. Так, уже при содержании углерода 0,5 % мартенситное превращение завершается в области отрицательных температур. Поскольку обычно охлаждение стали при закалке заканчивается при комнатной температуре, то наряду с мартенситом сталь после закалки содержит и некоторое количество аустенита, который называется аустенитом остаточным.

Для доэвтектоидных сталей проводится полная закалка с нагревом на 30...50 °C выше Ac_3 . После нагревания сталь будет иметь структуру аустенита, который при быстром охлаждении превратится в мартенсит. Неполная закалка для доэвтектоидной стали не проводится, поскольку при нагреве выше Ac_1 , но ниже Ac_3 , сталь будет иметь структуру аустенита и феррита, и тогда при быстром охлаждении аустенит превратится в мартенсит, а феррит останется в структуре закалённой стали. Присутствие феррита снизит твёрдость стали.

Для заэвтектоидных сталей проводится неполная закалка с нагревом на 30...50 °С выше Ac_1 . После нагревания сталь будет иметь структуру вторичного цементита и аустенита, который при быстром охлаждении превратится в мелкоигольчатый мартенсит с твёрдыми включениями цементита. Полная закалка для этих сталей не проводится, поскольку при нагреве её выше критической точки Ac_m происходят увеличение зерна аустенита и повышение хрупкости стали.

Время нагрева и выдержки при закалочной температуре определяется временем необходимым для завершения фазовых превращений в металле и зависит от температуры нагрева, формы и размеров детали (таблица 6.1).

*Таблица 6.1 – Время нагрева и выдержки
в лабораторных электрических печах*

Температура нагрева, °С	Форма детали		
	круг	квадрат	пластина
	время нагрева и выдержки в минутах		
	на 1 мм диаметра		на 1 мм толщины
600	2,0	3,0	4,0
700	1,5	2,2	3,0
800	1,0	1,5	2,0
900	0,8	1,2	1,6
1000	0,4	0,6	0,8

Скорость охлаждения детали выбирается исходя из требований, предъявляемых к структуре сплава и свойствам охлаждающих сред.

Таблица 6.2 – Скорость охлаждения в различных охлаждающих средах, °C/с

Охлаждающая среда	Интервал температур	
	650...550 °С	300...200 °С
10 %-ный раствор NaCl в воде при температуре 18 °С	1100	300
Вода при температуре 18 °С	600	270
Масло минеральное	150	30
Воздух спокойный	30	20

Структура закалённой стали имеет большие внутренние напряжения. Для снятия их и получения определённой структуры, а также перевода остаточного аустенита в мартенсит проводят отпуск.

Отпуск – операция термической обработки, заключающаяся в нагреве закалённой стали до температуры ниже критической точки Ac_1 , выдержки при этой температуре и последующем охлаждении до температуры окружающего воздуха. Структура закалённой стали приобретает зернистое строение. Исходя из условий работы детали, применяют три вида отпуска: низкий, средний и высокий (рис. 6.2).

Низкий отпуск проводят путём нагрева в интервале температур 150...200 °С с целью уменьшения внутренних напряжений и хрупкости с сохранением высокой твёрдости. Образуется структура отпущеного мартенсита с твёрдостью около 60 HRC, повышаются пластичность и ударная вязкость. Низкому отпуску подвергают измерительный и режущий инструменты.

Средний отпуск проводят в интервале температур 300...450 °С. При этом образуется мелкодисперсная двухфазная структура феррита и цементита, которую называют трооститом отпуска. При этом заметно снижается твёрдость (40 HRC), повышается вязкость и упругость. Среднему отпуску подвергают пружины, рессоры и другие упругие элементы.

Высокий отпуск проводят при температуре 500...650 °С. При этом образуется крупнодисперсная двухфазная структура феррита и цементита, которую называют сорбитом отпуска. При этом снижаются твёрдость (30 HRC), прочность, а повышаются пластичность и ударная вязкость. Применяют для деталей, испытывающих ударные и знакопеременные нагрузки: шатунов двигателей, полуосей, валов и др.

Порядок выполнения работы

1. По марке стали определить её структуру и вид закалки (полная, неполная).
2. По диаграмме состояния «железо – углерод» определить температуру нагрева стали для закалки, отжига и нормализации.
3. Определить время нагрева и выдержки стального образца.
4. Измерить на твердомере типа ТК твёрдость стали после отжига.

5. Загрузить три образца для нагрева в муфельную печь и после заданной выдержки провести охлаждение в воде, минеральном масле и на воздухе.

6. Измерить твёрдость образцов после термической обработки на твердомере типа ТК.

7. Результаты экспериментов занести в таблицу и перевести значения твёрдости по Роквеллу в значения твёрдости по Бринеллю.

8. Построить и проанализировать графическую зависимость твёрдости закалённой стали от скорости охлаждения.

9. Сформулировать выводы по работе.

Содержание отчёта

Отчёт по лабораторной работе должен включать:

1. Понятия видам термической обработки: закалка, нормализация, отжиг и отпуск.

2. Сущности перлитного, промежуточного и мартенситного превращений.

3. Понятия и характеристики структурам, образующимся в результате изотермического превращения аустенита.

4 Методика определения температуры нагрева углеродистой стали для проведения операций термической обработки с применением диаграммы «железо – углерод».

5. Расчёты по определению времени нагрева и выдержки образца из стали при выполнении операций термической обработки.

6. Привести сводные данные по термической обработке углеродистой стали.

7. Графическая зависимость твёрдости закалённой стали от скорости охлаждения.

8. Выводы (объяснить влияние скорости охлаждения на твёрдость углеродистой стали).

Контрольные вопросы

1. Назовите основные виды термической обработки сталей.

2. Как строится график термической обработки стали?

3. Для чего предназначена закалка стали?

4. Для чего проводят отжиг стали?

5. Что такое нормализация стали?

6. Для каких сталей проводят отпуск и какие виды его бывают?

7. Что называется улучшением стали?

8. Какова должна быть температура нагрева стали 60 для выполнения операции «закалка»?
9. Какова должна быть температура нагрева стали У12 для выполнения операции «закалка».
10. Что называется критической скоростью закалки?
11. Какова будет структура стали 50 после проведения неполной закалки?
12. Объясните сущность промежуточного превращения при изотермической выдержке аустенита.
13. Что такое мартенсит и когда он образуется?
14. Для чего и как проводят прерывистую закалку?
15. Как и почему скорость охлаждения влияет на твёрдость закалённой стали?
16. Приведите основные виды брака при закалке.
17. Для чего и как проводят диффузионный отжиг?
18. В чём заключается сущность рекристаллизационного отжига и для каких сталей его проводят?
19. Как проводят отжиг на зернистый перлит?
20. Назовите виды охлаждающих сред при закалке.
21. Назначьте режим термической обработки для зубила из стали У10 для получения твёрдости 45 HRC.
22. Назначьте режим термической обработки стали 50 для получения твёрдости 60 HRC.
23. Назначьте режим термической обработки для пружины из стали 65Г.

Лабораторная работа № 7

ИЗУЧЕНИЕ МИКРОСТРУКТУР ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

Цель работы: приобретение практических навыков в проведении микроанализа микроструктуры легированных сталей.

Краткие теоретические сведения. Элементы, специально вводимые в сталь с целью изменения ее строения и свойств, называют легирующими элементами (Л.Э.), а стали, содержащие Л.Э. – легированными. Легирование позволяет получать стали высокой коррозионной стойкости (хром, никель), жаропрочности (молибден, хром, ванадий), жаростойкости (хром, титан, кремний), износстойкости (марганец), теплостойкости (вольфрам, молибден, кобальт), повышенной прокаливаемости (хром, никель, молибден и др.) и другие.

Легированные стали классифицируют по назначению, структуре (в равновесном состоянии и после охлаждения на воздухе) и по химическому составу (содержанию легирующих элементов).

По назначению стали делятся на три группы: конструкционные (машиностроительные и строительные), инструментальные (для изготовления режущего, мерительного инструментов и штамповье) и стали с особыми физическими, химическими и другими свойствами (жаропрочные, коррозионно-стойкие, износстойкие и др.).

По структуре в равновесном (отожжённом) состоянии стали делятся на доэвтектоидные (структура легированный феррит + перлит), эвтектоидные (структура перлит), заэвтектоидные (структура перлит + избыточные карбиды) и ледебуритные (перлит + первичные карбиды, выделившиеся из жидкого раствора).

Кроме этих групп различают *аустенитные и ферритные стали*. Первые образуются под влиянием легирующих элементов (Ni, Mn, Cu, N и др.), существенно расширяющие и увеличивающие область устойчивости аустенита от температуры плавления до комнатной температуры (рис. 7.1, а), вторые под влиянием легирующих элементов (Cr, Ti, Mo, W, V, Si и др.), существенно расширяющие и увеличивающие область устойчивости феррита от температуры плавления до комнатной температуры (рис. 7.1, б).

По структуре после охлаждения на воздухе (рис. 7.2) стали делятся на перлитные (а), характеризующиеся невысокой устойчивостью переохлаждённого аустенита; мартенситные (б), с высокой устойчивостью аустенита до начала мартенситного превращения и ау-

стенитные (в), сохраняющие аустенитную структуру до комнатной температуры.

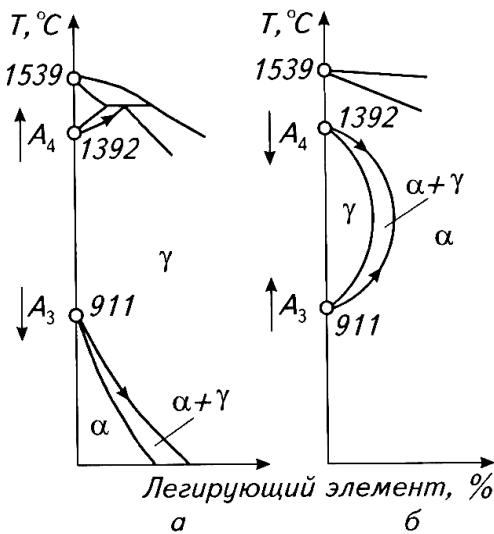


Рисунок 7.1 – Влияние легирующих элементов на положение критических точек A_3 и A_4

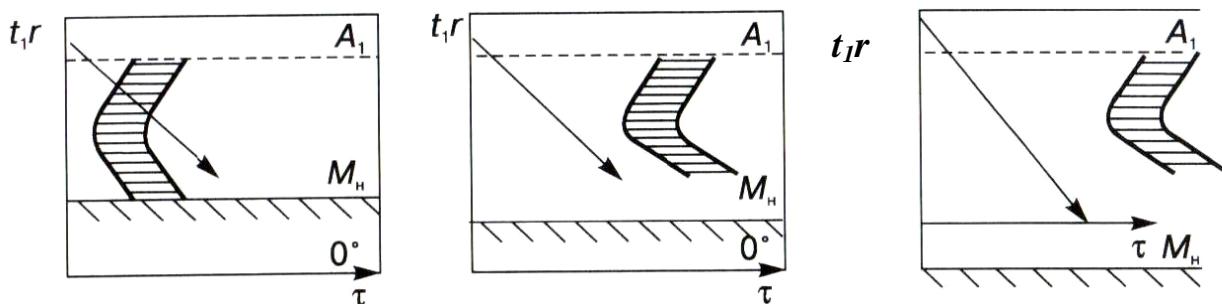


Рисунок 7.2 – Схемы диаграмм изотермического превращения сталей разных классов

По содержанию легирующих элементов различают низколегированные стали, содержащие до 2,5 % легирующих элементов, среднелегированные от 2,5 до 10 % и высоколегированные стали, содержащие более 10 % легированных элементов.

По взаимодействию с углеродом в стали, легирующие элементы подразделяют на две группы: 1) элементы: Si, Ni, Cu, Al, Co – растворяются в аустените и не взаимодействуют с углеродом (нейтральные); 2) карбидообразующие элементы: Fe, Mn, Cr, Mo, W, V, Nb, Zr, Ti (взаимодействующие с углеродом). При введении в сталь карбидообразующего элемента в небольшом количестве (1–2 %) образования его карбида не произойдет, но атомы легирующих элементов частично заменят атомы железа в решетке цементита. Следовательно, обра-

зуется легированный цементит, например, $(Fe, Mn)_3C$, мало отличающийся по свойствам от обычного цементита. Хром образует растворимые в аустените карбиды: в среднелегированных сталях Cr_7C_3 ; в высоколегированных сталях $Cr_{23}C_6$. Хром влияет на общий процесс карбиообразования. При его введении в сталь – W и Mo в соответствующем количестве появляются сложные карбиды, содержащие Cr, W, Mo и Fe. Их формула M_6C , где символ M показывает сумму металлических элементов в составе карбида. Карбиды M_6C могут растворяться в аустените при температурах, более высоких, чем карбиды хрома, и легировать его. В зависимости от свойств легированных сталей в них присутствуют различные виды и сочетания карбидов, что и определяет особенности их термической обработки.

Каждая марка стали обозначается определённым сочетанием букв и цифр. Легирующие элементы обозначаются буквами русского алфавита: X – хром, H – никель, B – вольфрам, M – молибден, Ф – ванадий, K – кобальт, T – титан, Ю – алюминий, D – медь, Г – марганец, C – кремний, Ц – цирконий, P – бор, Б – ниобий. Буква A в середине марки стали показывает содержание азота, а в конце марки – качество стали (высококачественная, с пониженным содержанием серы и фосфора, менее 0,025 %). В марке стали цифра после буквы указывает на примерное содержание легирующего элемента в процентах. Если цифры отсутствуют, то легирующего элемента содержится меньше или около 1 %, но не более 1,5 %.

Для конструкционных сталей первые две цифры указывают содержание углерода в сотых долях процентах. Например, 12ХН3 – конструкционная легированная сталь с содержанием углерода 0,12 %, хрома около 1 %, никеля 3 %; 50ХФА – конструкционная легированная высококачественная сталь с содержанием углерода 0,5 %, хрома, ванадия по 1 %. Буква «A» в конце марки стали означает, что сталь высококачественная, а буква «Ш» – особо высококачественная (30ХГСА-Ш). Основная масса сталей выплавляется качественными (12ХН3).

В инструментальных сталях в начале обозначения марки стали ставится цифра, показывающая содержание углерода в десятых долях процента. Если углерода около 1 %, то цифра не ставится. Например, 9ХС – инструментальная легированная сталь с содержанием углерода 0,9 %, хрома и кремния около 1 % каждого; ХВГ – инструментальная легированная сталь с содержанием углерода около 1 %, хрома,

вольфрама и марганца около 1 % каждого; Р6М5 – быстрорежущая сталь с содержанием углерода около 1 %, вольфрама 6 % и молибдена 5 %. Особенности термической обработки легированных сталей рассмотрим на примере быстрорежущей стали Р18 (рис. 7.3). Кроме вольфрама сталь содержит (как и другие быстрорежущие стали) около 4 % хрома и 2 % ванадия (если ванадия больше 2 %, то его наличие отражается в маркировке буквой Ф и цифрой).

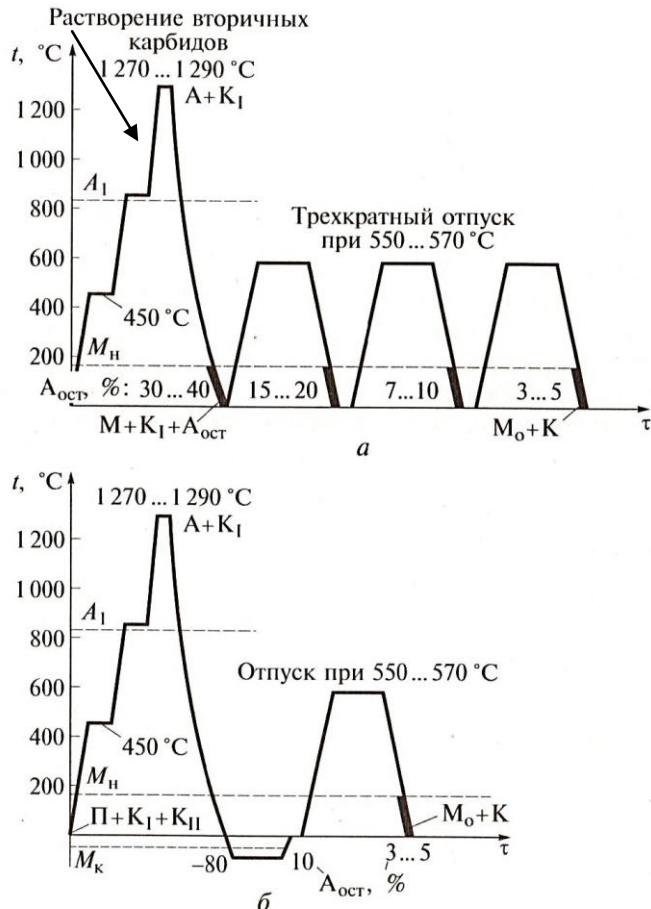


Рисунок 7.3 – Термическая обработка быстрорежущей стали:
а – с трёхкратным отпуском; б – с обработкой холодом; A₁ – температура критической точки;
M_h, M_k – температуры соответственно начала
и конца мартенситного превращения; П, K_I, K_{II}, A,
A_{ост}, M, M_o, K – структурные составляющие,
соответственно перлит, карбиды первичные,
карбиды вторичные, аустенит, аустенит
остаточный, мартенсит, мартенсит отпущеный,
спецкарбиды

Температура нагрева быстрорежущей стали для закалки (1280°C) гораздо выше температуры нагрева углеродистой стали с равным содержанием углерода, что обеспечивает максимальное растворение легирующих элементов (вторичных карбидов) в аустените. Вследствие низкой теплопроводности легированных сталей их нагрев ведут медленнее и ступенчато. Первую выдержку проводят при температуре 450°C , то есть ниже критической температуры A_1 , а вторую после осуществления превращения перлита в аустенит (около 850°C). При температуре около 1280°C структура стали состоит из аустенита и первичных карбидов (WC, VC), которые не растворяются при нагреве и тормозят рост зерна аустенита.

Низкие значения критической скорости закалки позволяют получить мартенситную структуру при охлаждении в масле (в отдельных случаях и на воздухе). Однако под влиянием легирующих элементов снижаются температуры критических точек начала и конца мартенситного превращения, что приводит к неполному превращению аустенита в мартенсит. Поэтому после закалки структура стали состоит из мартенсита, первичных карбидов и остаточного аустенита (до 40 %) (рис. 7.3, а).

Для уменьшения содержания остаточного аустенита $A_{\text{ост}}$ закалённую сталь подвергают трёхкратному отпуску при температуре около 560°C с выдержкой по 1 ч и последующему охлаждению на воздухе. При выдержке из аустенита выделяются легирующие элементы в виде специальных карбидов, он становится менее легированным, что приводит к повышению температур начала M_h и конца M_k мартенситного превращения, и при охлаждении на воздухе аустенит превращается в мартенсит. Мартенсит при отпуске также выделяет дисперсные карбиды, повышающие твердость стали. После первого отпуска остаётся 15...20 %, второго – 7...10 и третьего – 3...5 % остаточного аустенита. После третьего отпуска структура закалённой стали состоит из мартенсита отпуска, специальных карбидов и небольшого количества остаточного аустенита. Твёрдость стали достигает уровня 65 HRC.

Другой способ уменьшения в структуре закалённой стали остаточного аустенита заключается в обработке её холодом, то есть охлаждении до температуры ниже температуры конца мартенситного превращения M_k (рис. 7.3, б). Для превращения образовавшегося мартенсита закалки в мартенсит отпуска и уменьшения количества остаточ-

ного аустенита, сталь, обработанную холодом, подвергают однократному отпуску.

Порядок выполнения работы

1. Рассмотреть классификацию легированных сталей по назначению, структуре в равновесном состоянии, после охлаждения на воздухе, химическому составу.
2. Рассмотреть сущность маркировки конструкционных и легированных сталей.
3. Рассмотреть особенности термической обработки быстрорежущей стали.
4. Рассмотреть микрошлифы сталей, привести их описание (с указанием наименования стали по структуре, химическому составу и назначению) и режимы термической обработки.
5. Сформулировать выводы по работе.

Содержание отчёта

Отчёт по лабораторной работе должен включать:

1. Классификацию легированных сталей по назначению, структуре в равновесном состоянии, после охлаждения на воздухе, химическому составу.
2. Сущность маркировки конструкционных и легированных сталей.
3. Особенности термической обработки быстрорежущей стали.
4. Схемы микроструктур сталей, их описание (с указанием наименования стали по структуре, химическому составу и назначению), режимы термической обработки.
5. Выводы (указать, какие элементы придают сталям особые свойства, в чём заключается особенность термической обработки легированной стали, привести области применения конструкционных и инструментальных сталей).

Контрольные вопросы

1. Какие стали называют легированными?
2. Как влияют легирующие элементы на критические точки сталей?
3. Что образуют в сталях легирующие элементы?

4. Почему при термической обработке легированные стали надо нагревать медленно, а иногда и ступенчато?

5. Как выбрать температуру нагрева легированной стали при закалке?

6. Что применяют в качестве охлаждающей среды при проведении закалки быстрорежущей стали?

7. Для чего проводят отпуск быстрорежущей стали?

8. На какие классы делят легированные стали по структуре в равновесном состоянии?

9. Какие стали относят к малолегированным, среднелегированным и высоколегированным?

10. Расшифруйте следующие марки сталей: 10ХСНД, 12ХНЗА, 20Х, 18ХГТ, 25ХГТ, 40ХН2МА.

11. Выберите из приведённых марок шарикоподшипниковые стали и расшифруйте марки: 50ХГА, ШХ15, ШХ15-Ш, 40ХН.

12. Выберите из приведённых марок сталей автоматные стали: 12ХНЗА, АС40, 18ХГТ, АС40ХГНМ.

13. Укажите из названных коррозионно-стойкие стали: 20Х, 30Х13, 12Х17, 08Х13, 40Х13, АС40, 25ХГТ.

14. В каких условиях эксплуатации износостойкая сталь 110Г13Л имеет преимущества перед другими сталями?

15. Какой легирующий элемент придаёт быстрорежущим сталям красностойкость?

Лабораторная работа № 8

ИЗУЧЕНИЕ МИКРОСТРУКТУР ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ И ИХ СПЛАВОВ

Цель работы: приобретение практических навыков в проведении микроанализа микроструктуры цветных металлов и их сплавов.

Краткие теоретические сведения. К цветным металлам и сплавам относятся все металлы и их сплавы за исключением железа и его сплавов. В современной технике наибольшее применение имеют медь, алюминий, магний, цинк, свинец, олово, никель, титан и их сплавы.

Медь – металл красновато-розового цвета, имеет гранецентрированную кубическую решётку, высокую плотность – $8,94 \text{ г/см}^3$, невысокую прочность $\sigma_b = 220...240 \text{ МПа}$ и твёрдость 45 НВ, хорошую пластичность ($\delta = 25\%$ в литом состоянии и $\delta = 50\%$ в горячедеформированном). Обладает высокой электропроводностью, пластичностью, теплопроводностью и коррозионной стойкостью. Температура плавления – 1083°C . Она прокатывается в тонкие листы, ленту, из неё получают тонкую проволоку. Медь легко полируется, паяется и сваривается. По ГОСТ 859-78 маркируется буквой М и цифрами, зависящими от содержания примесей: М00 (99,99 % Cu), М0 (99,95 % Cu), М1 (99,9 % Cu), М2 (99,7 % Cu), М3 (99,5 % Cu). Наиболее часто встречающиеся в меди примеси подразделяют на три группы: 1. Растворимые в меди элементы – Al, Fe, Ni, Sn, Zn, Ag, повышающие прочность и твердость; 2. Нерастворимые элементы – Pb и Bi, ухудшающие свойства меди и однофазных сплавов на её основе; 3. Нерастворимые примеси O, S, Se, присутствующие в меди и её сплавах в виде промежуточных фаз (например, Cu_2O , Cu_2S), понижающие пластичность.

Медь используют для изготовления проводников тока (М00, М0 и М1) и для сплавов (М2 и М3).

Микроструктура меди марки М1 после прокатки и отжига состоит из крупных светлых зёрен меди с тёмными границами и следами пластической деформации в виде двойников (рис. 8.1).

Основные сплавы меди – латуни и бронзы.

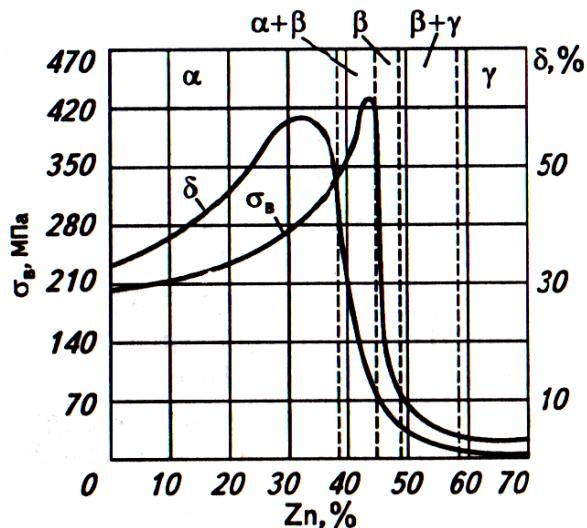
Латунь – сплав меди с цинком и другими элементами, в котором основным легирующим элементом является цинк.

Бронза – сплав меди с оловом и другими элементами, среди которых цинк не является основным легирующим элементом.



Рисунок 8.1 – Микроструктура меди M1 (травление в 10 %-ом растворе хлористого железа)

По химическому составу латуни бывают простые (двухкомпонентные) и сложные (многокомпонентные). В последних кроме цинка присутствуют другие легирующие элементы: алюминий – А, олово – О, кремний – К, никель – Н, железо – Ж, марганец – Мц, свинец – С. Цинк значительно влияет на механические свойства латуни (рис. 8.2).



*Рисунок 8.2 – Влияние цинка на механические свойства латуни:
 σ_0 – предел прочности, δ – пластичность*

Латуни, содержащие до 39 % цинка, являются однофазными, представляют собой твёрдый раствор цинка и меди. Их называют а-латуниями. Они хорошо деформируются в горячем и холодном состояниях. При увеличении содержания цинка с 39 до 45 % наряду с α -фазой в сплаве появляется β -фаза, представляющая собой твердый раствор, где растворителем меди и цинка является электронное соединение CuZn (рис. 8.3). На практике применяют латуни,

содержащие до 45 % цинка, поскольку при дальнейшем увеличении содержания его в сплаве прочность латуни уменьшается, а хрупкость увеличивается. Максимальную пластичность имеет однофазная α – латунь, содержащая 30 % Zn.

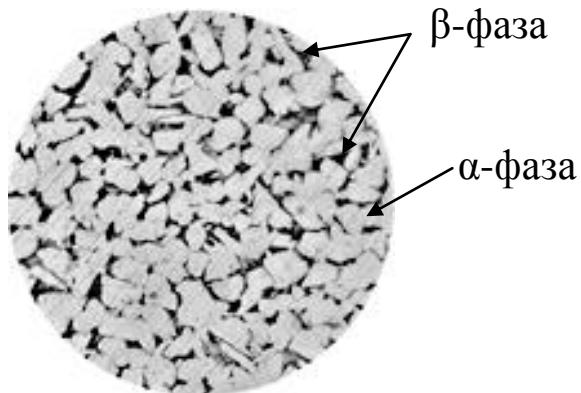


Рисунок 8.3 – Микроструктура двухфазной латуни

Латуни обладают хорошей жидкотекучестью и малой склонностью к ликвации, поэтому из них получают хорошие отливки. Основная же часть латуни идет на изготовление листов, лент, труб, проволоки и других изделий, получаемых обработкой давлением. Таким образом, по технологическому признаку латуни бывают литейные и деформируемые, которые маркируют по-разному.

Все марки латунь начинаются с буквы Л. В литейных латунях после буквы Л указывают основной легирующий элемент – цинк (Ц) и цифрами его содержание, затем также указывают другие компоненты и их содержание. Например, ЛЦ40Мц3Ж – латунь литейная, содержащая 40 % цинка, 3 % марганца, 1 % железа и остальное медь (56 %).

В деформируемых двухкомпонентных латунях после буквы Л указывают содержание меди в процентах, например, Л68 – латунь деформируемая, содержащая 68 % Cu, и остальное цинк. В многокомпонентных после буквы Л приводят буквенные обозначения всех легирующих элементов, а затем массовое содержание меди и легирующих элементов в соответствии с их буквенным обозначением. Например, ЛАЖ60-1-1 – латунь деформируемая, содержащая 60 % меди, по 1 % алюминия и железа, остальное (38 %) цинк.

Бронзы подразделяют по: химическому составу на оловянные и безоловянные; фазовому составу – однофазные и двухфазные; технологическому признаку – литейные и деформируемые.

Оловянные бронзы – это сплав меди с оловом, легированный цинком, свинцом, никелем, фосфором. Цинк улучшает литейные свойства, свинец – обрабатываемость, никель повышает прочность и износостойкость, фосфор раскисляет сплав и повышает его жидкотекучесть. Двухкомпонентные Cu-Sn сплавы, содержащие до 8 % олова, являются однофазными. При дальнейшем повышении процентного содержания олова бронза становится двухфазной и имеет структуру, состоящую из смеси а-твёрдого раствора и эвтектоида ($\alpha + \delta$) (рис. 8.4). С увеличением содержания олова до 18...20 % прочность бронзы возрастает, но затем снижается (рис. 8.5). Оловянные бронзы обладают прекрасными литейными свойствами.

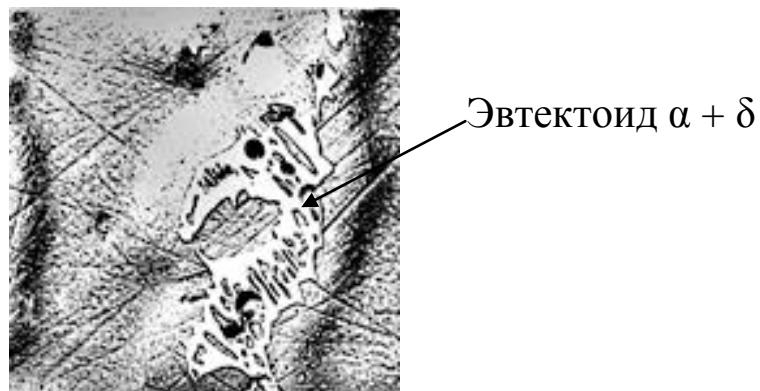


Рисунок 8.4 – Микроструктура литьей бронзы БрО10 (травление в 3 %-м растворе азотной кислоты в этиловом спирте)

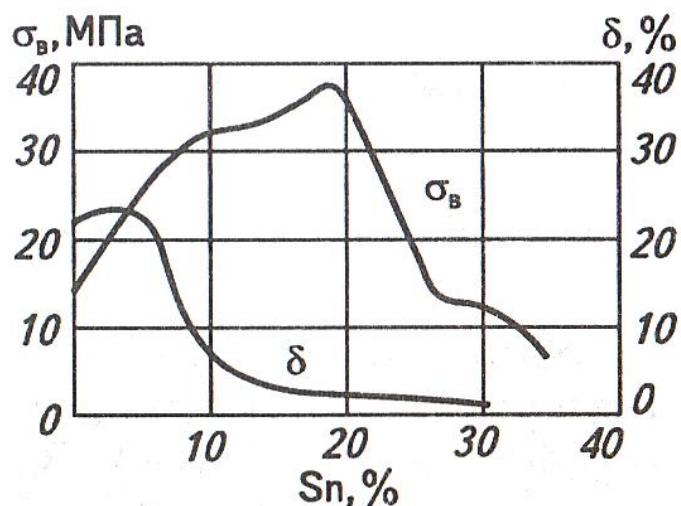


Рисунок 8.5 – Механические свойства сплава медь-олово

Все марки бронз начинаются с букв Бр. В литейных бронзах далее указывают легирующие элементы и их массовую долю, в деформируемых все легирующие элементы, присутствующие в сплаве и затем массовою долю каждого в соответствии с условным обозначением. Например, БрОЗЦ7С5Н – литейная бронза, содержащая 3 % олова, 7 % цинка, 5 % свинца, около 1 % алюминия, остальное (84 %) медь; БрАЖН 10-4-4 – дефорируемая бронза, содержащая 10 % алюминия, по 4 % железа и никеля, остальное медь (82 %).

Алюминий – металл серебристо-белого цвета, имеет гранецентрированную кубическую решётку, низкую плотность 2,7 г/см³, низкую прочность $\sigma_{\text{в}} = 80$ МПа и твёрдость 25 НВ, высокую пластичность $\delta = 40\%$. Обладает высокой электропроводностью и коррозионной стойкостью. Температура плавления – 660 °С. Маркируется буквой А.

В соответствии с ГОСТ 11069-74 в зависимости от количества примесей алюминий делят на три группы: алюминий особой чистоты А999 (99,999 % Al), высокой чистоты А995, А99, А97 и технической чистоты А85, А8 и др. Применяется алюминий для производства фольги, электропроводов. Как конструкционный материал используется мало. Наибольшее распространение получили сплавы алюминия с кремнием, медью, марганцем, магнием, медью и др. элементами. По технологическому признаку они делятся на литейные и деформируемые.

Из литейных сплавов наибольшее применение получили сплавы алюминия с кремнием, образующие эвтектику ($\alpha + \beta$) при содержании 11,6 % кремния (рис. 8.6) и их называют силуминами. Они имеют хорошие литейные свойства, но небольшую прочность ($\sigma_{\text{в}} = 180$ МПа). Обычный силумин содержит 12...13 % Si и по структуре является заэвтектическим (первичный Si + эвтектика). На практике применяют силумины с содержанием кремния до 13 %. Увеличение содержания кремния в сплаве приводит к повышению содержания в структуре первичных выделений хрупкого кремния, что ухудшает механические свойства. Для получения мелкозернистой структуры и повышения механических свойств силумины модифицируют, добавляя в расплавленный металл около 1 % натрия. При этом температура эвтектического превращения снижается, а сплав с концентрацией кремния до 14 % становится доэвтектическим. При

этом создаются благоприятные условия для образования большего количества центров кристаллизации α -фазы – твёрдого раствора внедрения атомов кремния в кристаллическую решётку алюминия, что приводит к повышению механических свойств (рис. 8.7).

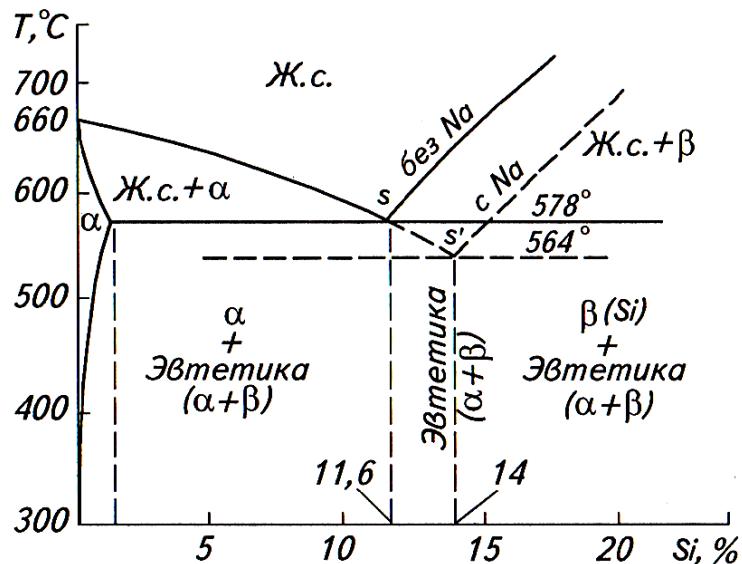


Рисунок 8.6 – Диаграмма состояния алюминий – кремний

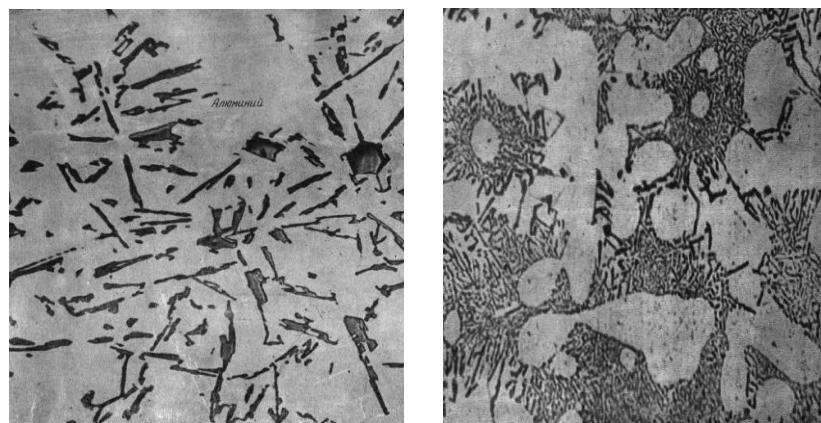


Рисунок 8.7 – Микроструктура силумина: а и б – до и после модифицирования соответственно

Силумины имеют хорошие литейные свойства, но небольшую прочность ($\sigma_b = 180$ МПа). Уменьшение содержания кремния и добавка меди, магния несколько снижает литейные свойства, но улучшает механические. В марках сплавов первая буква А обозначает, что сплав является алюминиевым; последующие буквы – основные легирующие элементы, а цифры(а) – их содержание. Например, АК12 – литейный алюминиевый сплав с содержанием кремния 12 %; АК5М2

– литейный алюминиевый сплав с содержанием кремния 5 %, меди 2 %; АМг10 содержит 10 % магния; АЦ4Мг – содержит 4 % цинка и 1 % магния, остальное во всех сплавах – алюминий.

Из силуминов изготавливают блоки цилиндров, головки блоков цилиндров, корпуса турбокомпрессоров и другие детали.

Деформируемые сплавы алюминия (ГОСТ 4784-97) делятся на упрочняемые и не упрочняемые термической обработкой. К не упрочняемым термической обработкой относятся сплавы алюминия с марганцем (АМц) и магнием (АМг2... АМг6). Они имеют низкую прочность, но высокую пластичность и коррозионную стойкость. Из них изготавливают сварные бензобаки, панели, трубопроводы для масла и бензина и др.

К сплавам, упрочняемым термической обработкой относятся дюралюминий, ковочные и высокопрочные сплавы алюминия. Термическая обработка заключается в закалке от температуры 500 °С и естественного старения, заключающегося в выдержке при комнатной температуре в течение нескольких суток. При этом прочность повышается в два раза (с 200...240 до 450...500 МПа), а пластичность не изменяется.

Дюралюминий – сплав с медью (до 5 %), марганцем (до 1,8 %) и магнием (до 0,9 %). Маркируются буквой Д и цифрой, показывающей порядковый номер: Д1, Д16 и т.п.). Выпускается в виде листов, труб и прутков. Применяется в основном в самолётостроении.

Ковочные сплавы алюминия предназначены для изготовления деталей ковкой, штамповкой и деталей, работающих при высокой температуре. Маркируются АК – алюминий ковочный и цифрой – обозначающей порядковый номер, соответствующий определённому составу и свойствам.

Высокопрочные алюминиевые сплавы содержат медь, магний и до 10 % цинка, а также добавки хрома или циркония. Маркируются буквой В и числом, например: В95 – содержит 6 % цинка, 2,3 % магния, 1,7 % меди, 0,4 % марганца, 0,2 % хрома. При проведении термообработки естественное старение заменяют искусственным старением – выдержкой в печи при температуре 120...140 °С в течение 16...24 ч. Предел прочности достигает 700 МПа.

Магний – самый лёгкий металл, используемый в промышленности. Его плотность 1,74 г/см³. Имеет гексагональную плотноупакованную кристаллическую решётку. Температура плавления – 651 °С.

Он имеет низкую прочность, пластичность и коррозионную стойкость, способность к возгоранию при нагреве. Поэтому чистый магний в качестве конструкционного материала не используется. Его сплавляют с алюминием, марганцем и цинком. Магниевые сплавы хорошо поглощают вибрацию, они легки, применяются в основном в авиационной промышленности

По технологическому признаку магниевые сплавы делят на литейные и деформируемые. Литейные маркируются буквами МЛ, деформируемые – МА. Далее идёт номер сплава, соответствующий его химическому составу и механическим свойствам (МА1, МА8, МА14; МЛ3, МЛ4, МЛ11). Деформируемые магниевые сплавы упрочняются термообработкой (закалка + старение).

Титан – металл серебристо-белого цвета с плотностью $4,5 \text{ г/см}^3$. Он обладает невысокой прочностью ($\sigma_b = 300 \text{ МПа}$) и твёрдостью (70 НВ), хорошей пластичностью ($\delta = 60\dots70 \%$), низкими электропроводностью и теплопроводностью, но высокой коррозионной стойкостью (за счёт плотной оксидной плёнки). Температура плавления – 1665°C . Для него характерны взаимодействие с газами при температуре $500\dots600^\circ\text{C}$, плохая обрабатываемость резанием, высокая стоимость.

Повышение механических свойств достигается легированием алюминием, хромом, молибденом, ванадием, марганцем.

По технологическому признаку сплавы титана делятся на литейные и деформируемые. Маркируются чаще всего буквами ВТ далее номер сплава, соответствующий его химическому составу и механическим свойствам. Среди сплавов титана имеются обладающие высокой прочностью до $\sigma_b = 1200 \text{ МПа}$ (ВТ6, ВТ14), жаропрочностью до 500°C (ВТ1, ВТ8). Литейные сплавы маркируются так же, только в конце марки ставится буква Л (ВТ5Л, ВТ6Л). Они обладают хорошими литейными свойствами. Сплавы применяются в химической промышленности, в ракетной и авиационной технике.

Порядок выполнения работы

1. Привести цветные металлы и их сплавы и дать им краткую характеристику.
2. Рассмотреть классификацию медных и алюминиевых сплавов и сущность их маркировки.

3. Рассмотреть и проанализировать зависимость механических свойств латуней от содержания цинка.
4. Рассмотреть и проанализировать диаграмму сплава алюминий-кремний.
5. Рассмотреть микрошлифы сплавов, привести их описание с указанием наименования сплава, химического состава, термической обработки.
6. Сформулировать выводы по работе.

Содержание отчёта

Отчёт по лабораторной работе должен включать:

1. Краткую характеристику цветных металлов и сплавов.
2. Классификацию медных и алюминиевых сплавов, их маркировку и применение.
3. Зависимость предела прочности и относительного удлинения латуни от содержания в ней цинка.
4. Влияние β -фазы на свойства латуней.
5. Схемы микроструктур цветных сплавов с указанием наименования сплава, химического состава, термической обработки.
6. Выводы по работе (привести области применения рассмотренных сплавов в сельскохозяйственном машиностроении, при производстве транспортных и технологических машин).

Контрольные вопросы

1. Назовите цветные металлы и приведите области их применения.
2. Что такое латунь? Приведите марки.
3. Что называется бронзой? Приведите марки.
4. На какие группы делятся латуни по способу изготовления?
5. Как маркируются деформируемые латуни и что из них изготавливают?
6. Как маркируются литейные латуни и что из них изготавливают?
7. Какой элемент придаёт латуни высокую коррозионную стойкость?
8. На какие группы делятся бронзы?
9. Как маркируются литейные и деформируемые бронзы?
10. Какой элемент придаёт бронзе антифрикционные свойства?
11. Из каких бронз изготавливают пружины?

12. Что предохраняет алюминий от коррозии?
13. На какие группы подразделяются алюминиевые сплавы по технологическим свойствам?
14. Как маркируются алюминиевые сплавы, не упрочняемые термической обработкой?
15. Что такое дюралюмины? Приведите примеры.
16. Какие сплавы называют силуминами? Что придаёт им высокие литейные свойства?
17. На какие группы делятся магниевые сплавы?
18. Приведите марки и области применения магниевых сплавов.
19. На какие группы по способу производства делятся титановые сплавы?
20. Приведите марки и области применения титановых сплавов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Оськин, В.А. Материаловедение. Технология конструкционных материалов. Кн. 1 / В.А. Оськин, В.В. Есинов.– М.: КолосС, 2008. – 447 с.
2. Материаловедение и технология материалов: учебное пособие / Под ред. А.И. Батышева и А.А. Смолькина. – М.: ИНФРА-М, 2013. – 288 с.
3. Материаловедение и технология металлов: учебник / Г.П. Фетисов, М.Г. Карпман, В.М. Матюнин и др.; под ред. Г.П. Фетисова.– М.: Высшая школа, 2002. – 638 с.
4. Технология конструкционных материалов: учебник / А.М. Дальский, Т.М. Барсукова, Л.Н. Бухаркин и др.; под общей редакцией А.М. Дальского. – 5-е изд., исправленное. – М.: Машиностроение, 2003. – 512 с.
5. Практикум по материаловедению и технологии конструкционных материалов / В.А. Оськин, В.Н. Байкарова, В.М. Соколова и др.; Под ред. В.А. Оськина, В.Н. Байкаловой. – 2-е изд., дополненное. – М.: БИБКОМ, ТРАНСЛОГ, 2015. – 400 с.
6. Волков, Г.М. Материаловедение: учебник для студ. высш. учеб. заведений / Г.М. Волков, В.М. Зуев. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 400 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
Лабораторная работа № 1 Определение твёрдости металлов.....	4
Лабораторная работа № 2 Микроскопический метод исследования металлов и сплавов.....	21
Лабораторная работа № 3 Анализ диаграммы состояния железоуглеродистых сплавов.....	38
Лабораторная работа № 4 Изучение микроструктур углеродистых сталей в равновесном состоянии.....	52
Лабораторная работа № 5 Изучение микроструктур и свойств чугунов.....	61
Лабораторная работа № 6 Термическая обработка углеродистой стали.....	74
Лабораторная работа № 7 Изучение микроструктур легированных сталей.....	84
Лабораторная работа № 8 Изучение микроструктур цветных металлов и их сплавов.....	91
Литература.....	101
Содержание.....	102

Иван Алексеевич Спицын

**МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ.
ТЕХНОЛОГИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**Раздел «Материаловедение»
Лабораторный практикум**

Редактор И.А Спицын
Компьютерная верстка И.А. Спицына
Корректор Л.А. Артамонова

Подписано в печать
Бумага SvetоСору
Усл. печ. л. ,

Тираж 80 экз.

Формат 60×84 1/16
Опечатано на ризографе
Заказ №

**РИО ПГАУ
440014, г. Пенза, ул. Ботаническая, 30**