

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
**«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»
(ВлГУ)**

Институт машиностроения и автомобильного транспорта
Кафедра технологии функциональных и конструкционных материалов

Л. В. КАРТОНОВА

ОСНОВЫ МЕТАЛЛОГРАФИИ

Учебное пособие

Владимир 2017

УДК 620.18

Рецензент:

*Кандидат технических наук,
доцент кафедры «Технология машиностроения»
Елкин Алексей Иванович*

Картонова, Л. В. Основы металлографии: учеб. пособие / Л. В. Картонова; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир, 2017. – 96 с.

Содержит изложение основных вопросов курса «Металлография», вызывающих наибольшую трудность при изучении данной дисциплины.

Предназначено для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки бакалавров 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов». Может быть полезно бакалаврам, обучающимся по техническим направлениям подготовки.

Табл. 13. Ил. 24. Библиогр.: 23 назв.

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, металлография - это наука о структуре металлов и сплавов.

Основоположниками металлографии являются П.П. Аносов (1799-1851 гг.) и Д.К. Чернов (1839-1921 гг.). Первые металлографические исследования железа и его сплавов были проведены Павлом Петровичем Аносовым. Значительно позднее, в 60-х годах XIX в. Видманштеттен и Сорби применили микроскоп для исследования строения железа метеоритов.

Именно П.П. Аносову принадлежит приоритет в создании легированных сталей. Он установил существование связи между строением и свойствами стали.

Велико значение работ Дмитрия Константиновича Чернова. Им были заложены основы научного металловедения. В 1868 г. Д.К. Чернов изложил свое представление о механизме кристаллизации стали. Он открыл зависимость свойств стали от температуры нагрева и охлаждения. Д.К. Чернов впервые указал на превращения, протекаемые в стали, при определенных температурах, сопровождающиеся тепловым эффектом. Он высказал предположение, что данные превращения являются аллотропическими. Графически изображенная Д.К.Черновым зависимость температуры этих превращений и плавления стали от содержания в ней углерода, найденная по цветам калия, являлась прототипом диаграммы равновесия железо-углерод. Он также показал значение времени выдерживания стали при той или иной температуре, тем самым заложив основы изучения кинетики фазовых превращений и формирования структуры.

Позднее французский ученый Ф. Осмонд с помощью пирометра указал температуры, тем самым определил критические точки, при которых происходят значительные изменения свойств стали. Он описал изменения микроструктуры при переходе через указанные точки, дал названия основным структурам железоуглеродистых сплавов, которые используются и сегодня.

В 1873-1876 гг. Гиббс, основываясь на законах термодинамики, изложил законы фазового равновесия (правило фаз). Однако его работы нашли дальнейшее применение лишь через десять лет из-за малодоступной формы изложения. В 1893 г., исходя из законов Гиббса о минимуме термодинамического потенциала, ванн Рейн ванн Алькемаде показал, что не прибегая дополнительно ни к каким другим допущениям, можно вывести все типовые диаграммы равновесия. В 1897 г. английский ученый Робертс-Аустен на основе своих исследований и работ Д.К. Чернова впервые построил диаграмму фазового равновесия железо-углерод.

Именно широкое использование металлов и сплавов в промышленности привело к дальнейшему быстрому развитию металловедения. В начале XX в. Н.С. Курнаков для исследования металлов применил методы физико-химического анализа, основы которого были заложены великим русским химиком Д.И. Менделеевым в 60-70-х годах XIX века. Н.С. Курнаков вместе со своими учениками провел исследования многих сплавов, построил диаграммы состояния этих сплавов, а также установил зависимости между их составом, структурой и свойствами (правило Курнакова). Были обнаружены ранее неизвестные фазы в металлических сплавах.

Необходимо отметить, что большое значение в создании теории диаграмм равновесия имели работы Г. Таммана.

В результате появилось учение о фазовом равновесии различных металлических систем, что и составляет значительную часть металлографии. Кроме понимания фазового равновесия металлических систем необходимы представления о структуре металлов и сплавов в широком смысле этого слова.

Неоценимый вклад в изучение кристаллического строения металлов, сплавов и различных фаз методами рентгеновского анализа внес Г.В. Вульф (1862-1925 гг.). В 1912 г. немецкий физик Лауэ (1879-1960 гг.) показал, что атомы регулярно заполняют пространство, образуя пространственную дифракционную решетку, и волновую природу рентгеновских лучей. После чего стало возможным определение атомного строения фаз.

Изучение атомного строения металлических фаз занимались советские рентгенологи Н.В. Агеев, Г.С. Жданов, С.Т. Конобеевский, Г.В. Курдюмов и зарубежные – Юм-Розери, Тейлор, Делингер, Кёстен и другие.

Развитие науки и техники позволило создать большое количество методов и средств для изучения структуры и свойств металлов и сплавов.

Глава 1. ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТАЛЛА И ЗАТВЕРДЕВАНИЕ

1.1. Характеристика металлического состояния

Как известно, среди 92 химических элементов, встречающихся в естественных условиях, подавляющее большинство является металлами. К неметаллам относят H, B, C, N, O; инертные газы (He, Ne, Ar, Kr, Xe, Rn); галогены (F, Cl, Br, I, At), а также Si, P, S, As, Se и др.

Слева от ломаной линии в Периодической системе Д.И. Менделеева (рис. 1.1), находятся металлы, а справа расположены неметаллы. Указанное деление является приближенным. Выделяют элементы, которые занимают промежуточное положение между металлами и неметаллами (Si, Ge, As, Se, Te).

В изолированном атоме все электроны распределены по энергетическим уровням. В порядке возрастания энергии эти уровни принято обозначать следующим образом: 1s, 2s, 2p, 3s, 3p, (3d, 4s), 4p, (4d, 5s), 5p, (5d, 4f), 6s, 6p, (6d, 5f), 7s. В данной последовательности происходит заполнение электронных уровней атома. Уровни, заключенные в скобки, почти одинаковы и в некоторых элементах могут менять свой порядок.

Среди металлов выделяют переходные металлы, расположенные в средней части Периодической системы Д.И. Менделеева. В этих металлах энергетические уровни заполняются непоследовательно.

периодическая система химических элементов д. и. менделеева																		VIII A	
I A														18					
1														4,00260					
1H														2He					
водород														гелий					
2														10Ne					
3														39,948					
4														83,798					
5														131,293					
6														222					
7														226					
8														222					
9														222					
10														222					
11														222					
12														222					
13														222					
14														222					
15														222					
16														222					
17														222					
18														222					
19														222					
20														222					
21														222					
22														222					
23														222					
24														222					
25														222					
26														222					
27														222					
28														222					
29														222					
30														222					
31														222					
32														222					
33														222					
34														222					
35														222					
36														222					
37														222					
38														222					
39														222					
40														222					
41														222					
42														222					
43														222					
44														222					
45														222					
46														222					
47														222					
48														222					
49														222					
50														222					
51														222					
52														222					
53														222					
54														222					
55														222					
56														222					
57														222					
58														222					
59														222					
60														222					
61														222					
62														222					
63														222					
64														222					
65														222					
66														222					
67														222					
68														222					
69														222					
70														222					
71														222					
72														222					
73														222					
74														222					
75														222					
76														222					
77														222					
78														222					
79														222					
80														222					
81														222					
82														222					
83														222					
84														222					
85														222					
86														222					
87														222					
88														222					
89														222					
90														222					
91														222					
92														222					
93														222					
94														222					
95														222					
96														222					
97														222					
98														222					
99														222					
100														222					
101														222					
102														222					
103														222					
104														222					
105														222					
106														222					
107														222					
108														222					
109														222					
110														222					
111														222					
112														222					
113														222					
114														222					
115														222					
116														222					
117														222					
118														222					
119														222					

138,905	140,116	140,908	144,242	[145]	150,36	151,964	157,25	158,925	162,500	164,930	167,259	168,934	173,054
57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb
ЛАНТАН	ЦЕРИЙ	ПРАЗЕОДИМ	НЕОДИМ	ПРОМЕТИЙ	САМАРИЙ	ЕВРОПИЙ	ГАДОЛИНИЙ	ТЕРБИЙ	ДИСПРОЗИЙ	ГОЛЬМИЙ	ЭРБИЙ	ТУЛИЙ	ИТТЕРБИЙ
[227]	232,038	231,036	238,029	[237]	[244]	[243]	[247]	[247]	[251]	[252]	[257]	[258]	[259]
89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No
АКТИНИЙ	ТОРИЙ	ПРОТАКТИНИЙ	УРАН	НЕПТУНИЙ	ПЛУТОНИЙ	АМЕРИЦИЙ	КЮРИЙ	БЕРКЛИЙ	КАЛИФОРНИЙ	ЭЙНШТЕЙНИЙ	ФЕРМИЙ	МЕНДЕЛЕВИЙ	НОБЕЛИЙ

138,905	140,116	140,908	144,242	[145]	150,36	151,964	157,25	158,925	162,500	164,930	167,259	168,934	173,054
57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb
ЛАНТАН	ЦЕРИЙ	ПРАЗЕОДИМ	НЕОДИМ	ПРОМЕТИЙ	САМАРИЙ	ЕВРОПИЙ	ГАДОЛИНИЙ	ТЕРБИЙ	ДИСПРОЗИЙ	ГОЛЬМИЙ	ЭРБИЙ	ТУЛИЙ	ИТТЕРБИЙ
[227]	232,038	231,036	238,029	[237]	[244]	[243]	[247]	[247]	[251]	[252]	[257]	[258]	[259]
89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No
АКТИНИЙ	ТОРИЙ	ПРОТАКТИНИЙ	УРАН	НЕПТУНИЙ	ПЛУТОНИЙ	АМЕРИЦИЙ	КЮРИЙ	БЕРКЛИЙ	КАЛИФОРНИЙ	ЭЙНШТЕЙНИЙ	ФЕРМИЙ	МЕНДЕЛЕВИЙ	НОБЕЛИЙ

Рис.1.1. Периодическая система Д.И. Менделеева

Несмотря на то, что в твердом теле атомы взаимодействуют между собой, свойства твердого металла зависят от атомной массы (рис. 1. 2.), т.е. от положения элемента в периодической системе. Следовательно, свойства твердого металла, представляющего собой коллектив атомов, непосредственно связаны со строением единичного атома.

Следует понимать, что электронное строение атомов, вступающих во взаимодействие, определяет тип связи, возникающий между частицами в кристалле. Частицы в кристалле сближаются на расстояние, при котором силы притяжения уравниваются силами отталкивания, и образуется молекула с наиболее стабильной конфигурацией.

При сближении атомов в кристалле электронное строение атомов претерпевает существенные изменения.

Энергетические подуровни превращаются в зоны, которые, перекрываясь, делают возможным обмен и обобществление валентных электронов. Электрические и тепловые свойства определяются плотностью заполнения электронами валентных зон.

Хорошая электрическая проводимость обеспечивается наличием в валентной зоне кристаллов незаполненных подуровней, что и наблюдается в металлах.

При полном заполнении валентной зоны переход электронов возможен только в том случае, если они сумеют преодолеть зону запрещенных энергий и перейдут в зону более высоких энергий, имеющую свободные подуровни. Для такого перехода электрону необходима большая энергия. Кристаллы подобной электронной структуры по своим электрическим свойствам относятся к полупроводникам или диэлектрикам.

У большинства металлов имеются два типа связи (металлическая и ковалентная) с преобладанием одной из них. Неметаллы и полупроводники, например I, C, Si, Ge, Se и др., образуют кристаллы при помощи ковалентной связи.

Кристаллы, в которых преобладает *ковалентный тип связи*, называют ковалентными. Данный тип связи устанавливается в результате образования устойчивых соединений путем обобществления электронов определенными атомами. При взаимодействии атомов, как указано

выше, наблюдается обобществление своих валентных электронов с соседними атомами, при этом происходит заполнение валентной зоны. Каждая связь образуется парой электронов, движущихся по замкнутым орбиталям между двумя атомами.

Число атомов n , с которыми происходит обобществление электронов, зависит от валентности элемента и может быть определено по формуле [14, с. 18]:

$$n = 8 - N,$$

где N – валентность элемента.

Поскольку ковалентная связь характеризуется направленностью, атомы в ковалентных кристаллах укладываются некомпактно и образуют кристаллические структуры с небольшим координационным числом.

Для ковалентных кристаллов свойственны высокие температуры плавления, поскольку они имеют большую энергию связи.

Ковалентные кристаллы могут являться не только полупроводниками, но даже диэлектриками, так как наблюдается заполнение валентных зон при таком виде связи. Алмаз – диэлектрик, а графит хорошо проводит электрический ток. Хорошая электропроводимость графита объясняется тем, что не все связи ковалентные, и даже наличие одной металлической связи из четырех может обеспечивать наличие свободных носителей электрического тока.

При нагреве электрическое сопротивление снижается, т. е. температурный коэффициент электрического сопротивления у ковалентных кристаллов имеет отрицательное значение. К ковалентным кристаллам относятся многие сложные кристаллические вещества, состоящие из разнородных атомов, например, нитрид алюминия, карбид кремния и ряд других веществ.

Кристаллы, в которых преобладает металлический тип связи, называются металлическими кристаллами. В таких кристаллах при взаимодействии с элементами других групп атомы легко отдают свои валентные электроны и превращаются в положительные ионы. Это объясняется тем, что атомы металлов имеют небольшое количество валентных электронов, которые слабо связаны с ядром. Явно выраженная

металлическая связь имеется, например, у одновалентных металлов, таких как Cu, Ag, Au, а также щелочных (Li, K, Na, Rb, Cs).

При взаимодействии валентные энергетические зоны атомов теряют связь со своими атомами, они перекрываются, образуя общую зону со свободными подуровнями, что дает возможность валентным электронам свободно перемещаться в пределах этой зоны, обеспечивая хорошую электрическую проводимость. При этом валентные электроны обобществляются атомами, поскольку они принадлежат не какому-то конкретному атому, а являются общими для всех атомов. Температурный коэффициент электрического сопротивления у металлических кристаллов имеет положительное значение, т. е. электрическое сопротивление при нагреве растет.

Металлическая связь является ненаправленной связью. Поэтому для кристаллических структур металлов характерны высокое координационное число и большая компактность. Отсутствие сильных направленных связей и образование плотноупакованных структур определяют способность пластически деформироваться, изменяя форму без разрушения, т. е. металлические кристаллы более пластичные и менее твердые, чем ковалентные. Поэтому при изготовлении металлопродукции широко применяют методы пластического деформирования – ковку, прокат, волочение, штамповку.

Поскольку энергия металлической связи в металлических кристаллах несколько ниже, чем ковалентной, металлы в большинстве случаев по сравнению с ковалентными кристаллами имеют более низкие температуры плавления, модуль упругости, но более высокий температурный коэффициент линейного расширения.

Для большинства случаев с увеличением энергии связи растут температура плавления, модуль упругости, энергия активации самодиффузии, а коэффициент линейного расширения, наоборот, уменьшается.

В переходных металлах наряду с преобладающей металлической связью имеется ковалентная связь. Первая из них реализуется с помощью свободных s-электронов, а вторая – некомпесированными d- или

f-электронами. Электропроводность этих металлов, также как и теплопроводность, ниже, чем у одновалентных. Они тверже и менее пластичны.

Необходимо отметить, что кристаллическое состояние твердого металла, как и всякого твердого тела, предопределяет собой зависимость его свойств от направления в кристалле. Такая зависимость называется анизотропией.

Чем симметричнее пространственная решетка металлов, тем меньше анизотропия. Она уменьшается также при переходе от направленной ковалентной связи к ненаправленной металлической. В металлах по этой причине, как правило, анизотропия свойств выражена не столь значительно, как в неметаллах. Тем не менее в металлах она имеет большое практическое значение.

1.2. Дефекты кристаллического строения

Выше приведена характеристика металла, исходя из того, что все атомы металла одинаковы и его кристаллическая решетка не имеет дефектов. Однако, реальный металл не является однородным, и даже в самом чистом металле имеются химические и физические нарушения.

Примесные атомы (химические нарушения) всегда присутствуют в металле. В некоторых случаях даже при очень малом их содержании, составляющем несколько тысячных долей процента, примеси весьма значительно влияют на свойства металла.

Понятие «чистый металл» – условное. Для практических целей, всегда оговаривают степень чистоты металла. Чем он чище, тем значительнее зависимость его свойств от степени загрязнения.

Дефекты (физические нарушения) твердых металлов обусловлены отклонениями от идеального регулярного расположения атомов в решетке кристалла. Идеальный кристалл можно представить себе только бесконечно большим. Реальный единичный кристалл (монокристалл) обладает свободной поверхностью, следовательно имеет де-

фекты. В силу поверхностного натяжения решетка на поверхности кристалла и в прилегающей к ней зоне искажена; это увеличивает свободную энергию кристалла.

Границы между кристаллами в поликристаллическом теле представляют собой зоны с искаженной решеткой. Кристаллы в поликристаллическом теле имеют криволинейные поверхности раздела (границы) неправильной формы, поэтому их в отличие от правильно ограниченных кристаллов называют кристаллитами или зернами.

Реальный кристалл состоит из блоков (субзерен), ориентированных один по отношению к другому под малыми углами. Границы блоков или субграницы так же, как и границы зерен, являются дефектами решетки.

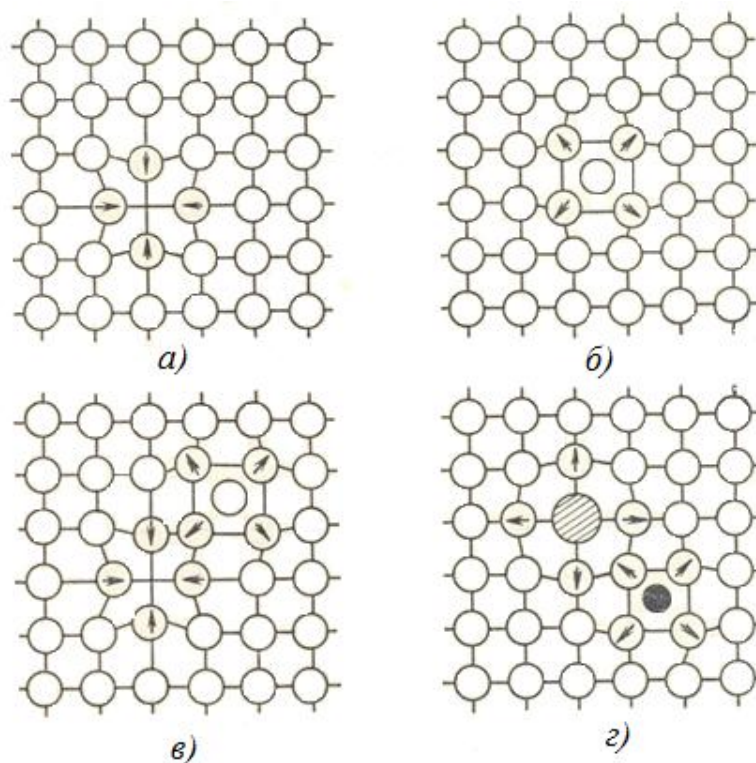
Кроме указанных поверхностных дефектов кристаллического строения, имеются также точечные и линейные несовершенства. Точечными дефектами являются вакансии и атомы, смещенные в междоузлия (дислоцированные атомы), а также примесные атомы. К линейным дефектами относятся дислокации.

На рис. 1.3. представлены основные виды точечных дефектов. Размеры таких дефектов не превышают несколько атомных диаметров. Наиболее распространенными из них являются вакансии – узлы кристаллической решетки, в которых отсутствуют атомы. Они могут возникать в кристалле по разным причинам, например, в результате пластической деформации. Однако характерно следующее: образование вакансий может вызвать термическая активация атомов в решетке.

В кристалле могут создаться условия, когда при соответствующей температуре кинетическая энергия некоторых атомов становится выше средней кинетической энергии. При перемещении таких атомов на поверхность кристалла, освободившее место может быть занято атомами из более глубоких слоев, при этом в кристалле возникают вакансии (дефект Шоттки).

Механизм образования дислоцированных атомом похож на механизм образования вакансий. Отличие состоит в том, что такие атомы уходят с поверхности в глубь кристалла, попадая в междоузлия ре-

шетки. При достаточной кинетической энергии может наблюдаться переход атома внутри кристалла из узла решетки в междоузлие. При этом образуется парный дефект (вакансия и дислоцированный атом), называемый дефектом Френкеля.



*Рис. 1.3. Точечные дефекты кристаллов:
а – вакансия; б – дислоцированные атомы;
в – дефект Френкеля; г – примесные атомы*

Примесные атомы приводят к искажению кристаллической решетки, т. е. являются не только химическими, но и физическими нарушениями.

Присутствие в кристалле точечных дефектов приводит к изменению свойств кристаллов (например, электропроводности). Наличие вакансий в кристалле позволяет атомам перемещаться и способствует диффузии и протеканию фазовых превращений в твердом состоянии.

Линейные дефекты имеют малые размеры в двух измерениях и большую протяженность в третьем измерении (рис. 1.4). К ним относятся *дислокации* – *краевые* и *винтовые*. Краевая дислокация представляет собой лишнюю незаконченную атомную плоскость (экстраплоскость).

Наиболее простой способ образования дислокаций в кристалле – сдвиг.

Если экстраплоскость находится в верхней части кристалла, то краевую дислокацию считают положительной и обозначают $\perp$, а если в нижней части кристалла, то дислокация считается отрицательной и обозначается $\neg$. Дислокации разных знаков взаимно притягиваются, что может приводить к их взаимному уничтожению (аннигиляции).

При закручивании дислокации в спираль образуется винтовая дислокация. Винтовая дислокация представляет собой прямую линию, вокруг которой атомные плоскости изогнуты по винтовой поверхности. Для наглядности можно представить себе кристалл, состоящий из одной атомной плоскости, закрученной в виде винтовой поверхности.

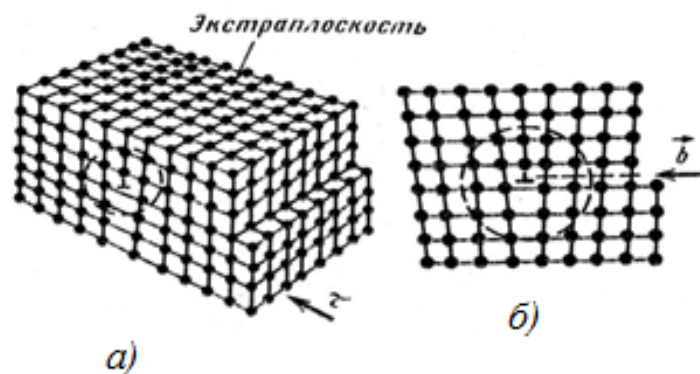


Рис. 1.4. Краевые дислокации (τ – вектор сдвига) [11, с. 20]:
 а – пространственная схема краевой дислокации;
 б – схемы расположения атомов у дислокаций

Также различают смешанные дислокации, которые имеют форму кривой линии, и могут быть разложены на краевую и винтовую составляющие.

Важной характеристикой дислокационной структуры является плотность дислокации ρ , под которой понимают суммарную длину дислокации Σl , см, приходящуюся на единицу объема V кристалла, см³:

$$\rho = \Sigma l / V, \text{ см}^{-2}.$$

В металлах технической чистоты и сплавах плотность дислокаций, как правило, не ниже 10^6 - 10^8 см⁻². Плотность дислокации в металле после сильной пластической деформации может достигать 10^{12}

см⁻². Попытка увеличить плотность свыше 10^{12} см⁻², быстро приводит к появлению трещин и последующему разрушению металла.

Дислокации не только присутствуют в металлических кристаллах в огромном количестве, они подвижны и способны к размножению. Вдоль дислокаций скорость диффузии значительно выше, чем сквозь кристаллическую решетку без дефектов. Дислокации являются местом концентрации примесных атомов, особенно примесей внедрения, что ведет к уменьшению искажений кристаллической решетки. Скопление примесных атомов внедрения вокруг дислокации ведет к образованию зоны повышенной концентрации, которую называют облаком (атмосферой) Коттрелла. Наличие облаков Коттрелла в кристалле затрудняет движение дислокаций, что ведет к упрочнению металла.

Наличие в кристаллической решетке разнообразных дефектов приводит к неравномерному распределению примесей. Свойства технических металлов легко воспроизводятся в производственных условиях. Однако наличие разного вида дефектов большей частью связано с технологией получения металлического изделия.

1.3. Затвердевание металлов

Пространственные решетки образуются в металле в процессе затвердевания (кристаллизации), то есть при переходе из жидкого состояния в твердое.

Несмотря на то, что атомы в жидком металле расположены не совсем хаотично, как в газообразной фазе, но в их расположении нет и той правильности, характеризующей твердое (кристаллическое) тело. В жидкости наблюдается тенденция к правильному расположению атомов. При сближении атомов происходит перераспределение зарядов, и силы притяжения начинают преобладать над силами отталкивания, так как одноименные заряды стремятся удалиться, а разноименные – сблизиться. Поэтому атомы стремятся притянуться друг к другу и занять положение наиплотнейшей упаковки, которое нарушается в жидкостях

их соударениями в процессе тепловых колебаний. Местами на мгновение возникают упорядоченные группы атомов (ближний порядок), которые тут же разрушаются.

Дальнейшее охлаждение жидкости ослабляет соударение атомов и силам притяжения удается упаковать их плотнейшим образом. Возникает дальний порядок – кристаллическое состояние. Металл уплотняется, запасенная в нем свободная энергия снижается, т.е. согласно второму началу термодинамики он переходит в более устойчивое состояние.

Процесс гомогенной (самопроизвольной) кристаллизации состоит из двух элементарных процессов: зарождение центров кристаллизации (зародыши) и рост кристаллов из этих центров. Следует понимать, что в жидком металле происходит непрерывное движение атомов. По мере понижения температуры это движение замедляется, атомы начинают группироваться, образуя первичные кристаллы. За счет атомов жидкого металла происходит рост кристаллов. В начале рост кристаллов не встречает препятствий, поэтому растущие кристаллы ещё сохраняют правильную форму, различаясь ориентировкой. В дальнейшем растущих кристаллов становится больше, а жидкого металла остается меньше. При столкновении кристаллов наблюдается прекращение их роста в месте соприкосновения. Дальнейший рост кристаллов продолжается в направлении, в котором нет препятствий, рост замедляется.

Скорость всего процесса кристаллизации количественно определяется двумя величинами: скоростью зарождения центров кристаллизации и скоростью роста кристаллов. При теоретической температуре кристаллизации эти значения равны нулю, т.е. кристаллизация не протекает. С увеличением переохлаждения значения число центров и скорость роста возрастают, достигают максимума и затем понижаются; при больших величинах переохлаждения практически падают до нуля.

Поэтому для быстрого зарождения большого числа мельчайших центров нужно переохлаждение большее, чем для быстрого роста уже имеющихся кристаллов.

Следовательно, при медленном охлаждении возникает малое переохлаждение, малое число центров, но наблюдается достаточно быстрый рост кристаллов, ведущий к образованию крупнозернистой структуры. При быстром охлаждении – большое переохлаждение и большое число центров, в следствии этого кристаллы растут медленно, и образуется мелкое зерно.

В реальных условиях на характер образующейся структуры существенно влияет количество имеющихся в расплаве центров кристаллизации. Источником образования зародышей могут служить всевозможные твердые частицы, например, неметаллические включения, оксиды, интерметаллидные соединения. В процессе кристаллизации атомы металла откладываются на поверхности примеси, как на кристаллическом зародыше. Такая кристаллизация называется *несамопроизвольной* или *гетерогенной*.

Чем большее количество примесей содержится в металле, тем больше центров кристаллизации и мельче зерно. Для измельчения структуры металлов и сплавов на практике в жидкий металл перед разливкой вводят специальные добавки – *модификаторы*. Такая технологическая операция получила название *модифицирование*.

Следует иметь в виду, что возможность измельчения структуры будет значительно увеличиваться при соблюдении размерного и структурного соответствия примесной фазы и основного металла, т.е. расхождение межатомных размеров не должно превышать 5-7 %.

Эти примеси, практически не изменяя химического состава сплава, вызывают при кристаллизации измельчение зерна и в итоге улучшение механических свойств. При литье слитков в фасонных отливках модифицирование чаще проводят введением в расплав добавок, которые образуют тугоплавкие соединения, такие как нитриды и оксиды, кристаллизующиеся в первую очередь.

Кристаллы, образующиеся в процессе затвердевания металла, могут иметь различную форму в зависимости от скорости охлаждения, характера и количества примесей. Нередко в процессе кристаллизации образуются разветвленные (древовидные) кристаллы, получившие название дендритов (рис. 1.5).

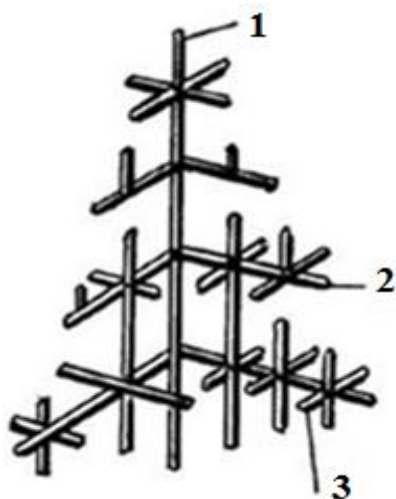


Рис. 1.5. Дендритный кристалл цифры у осей – соответственно оси первого, второго и третьего порядков

Рост кристаллов идет преимущественно в направлении, перпендикулярном к плоскостям с максимальной плотностью упаковки атомов, что ведет сначала к образуются длинные ветви – осей первого порядка. Одновременно на их ребрах зарождаются и растут перпендикулярные к ним такие же ветви – оси второго порядка. А на осях второго порядка зарождаются и растут оси третьего порядка и т. д. В конечном счете образуются разветвленные древовидные кристаллы.

В условиях, близких к равновесию, образуются правильно ограниченные кристаллы. Они растут медленно, поверхность их гладкая, хотя и содержит необходимые для застройки граней ступеньки. С увеличением степени переохлаждения межфазная поверхность становится неровной, на поверхности металла, как правило, появляется множество ячеек, средняя часть которых несколько выдвигается в расплав. Появление ячеистой структуры связывают с присутствием в расплаве примесей и их перераспределением.

В процессе кристаллизации металлов при наличии постоянного теплоотвода от поверхности в первую очередь кристаллизуются наиболее чистые по содержанию примесей участки жидкого металла, а наиболее загрязненные примесями объемы жидкого металла оттесняются и затвердевают в последнюю очередь.

Типичная структура литого слитка состоит из трех основных зон (рис. 1.6). Жидкий металл прежде всего переохлаждается в местах соприкосновения с холодными стенками формы, которые играют роль зародышей, поэтому образуются дезориентированные мелкие кристаллы – дендриты. Отсутствие направленного роста кристаллов объясняется их случайной ориентацией. Данная зона называется *зоной мелкозернистых кристаллов* (мелкозернистая корка) 1. Она имеет небольшую толщину, и не всегда различима невооруженным глазом.

Далее условия теплоотвода меняются, кристаллы преимущественно растут в направлении обратном направлению отвода тепла, т.е. нормально к поверхности. Поэтому образуются вытянутые (столбчатые кристаллы). Данная зона получила название – *зона столбчатых кристаллов* 2. Она является более плотной и содержит меньше раковин и пузырей. Однако места стыка таких кристаллов имеют низкую прочность, так как там собираются нерастворимые примеси.

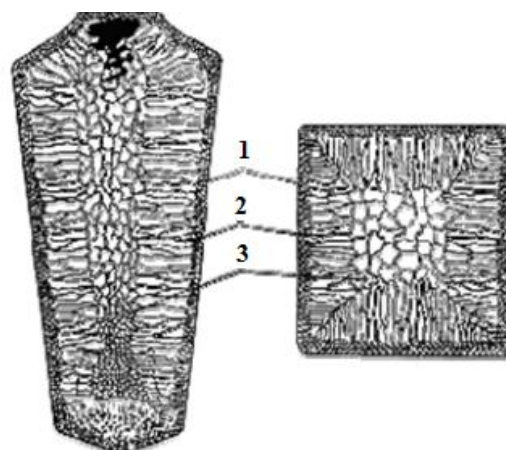


Рис. 1.6. Строение литого слитка [5, с. 47]: 1 – зона мелкозернистых кристаллов, 2 – зона столбчатых кристаллов, 3 – зона равноосных кристаллов

Зона равноосных кристаллов 3 образуется в центре слитка. В данной зоне наблюдается наименьшая степень переохлаждения и отсутствует направленный отвод тепла.

Используя различные технологические приемы можно изменить не только количественное соотношение зон, но и исключить из структуры слитка какую то зону вообще.

Контрольные вопросы

1. Как влияет ковалентный тип связи на свойства кристалла?
2. Поясните влияние металлической связи на свойства кристалла?
3. Что представляют собой поверхностные дефекты?
4. Какие дефекты относятся к точечным?
5. Что представляют собой дефект Френкеля?
6. Что относится к линейным дефектам?
7. Чем отличается гомогенное образование зародышей от гетерогенного?
8. Как можно получить мелкое зерно в литом металле?

9. На примере металла с гранецентрированной кубической решеткой поясните механизм образования дендритных кристаллов.
10. Каково строение кристаллического слитка?
11. Что такое модифицирование? С какой целью его применяют?

ГЛАВА 2. ПРАКТИЧЕСКАЯ МЕТАЛЛОГРАФИЯ

Изучение внутреннего строения (структуры) металлов и сплавов начинается с помощью наиболее простого и широко распространенного метода – световой микроскопии.

Изучение строения металлов и сплавов с помощью металлографического микроскопа (при увеличении в 50 – 2000 раз) называется *микроскопическим анализом (микроанализом)*.

Задачи микроанализа:

- оценка формы и размеров кристаллических зерен металлов и сплавов;
- определение формы и размеров неметаллических включений – сульфидов, оксидов и др.;
- определение микропороков – микротрещин, раковин, пор и др.;
- анализ изменения микроструктуры сплавов после термической, химико-термической обработки и обработки металлов давлением;
- определение химического состава некоторых структурных составляющих по их характерной форме и окраске после применения избирательных травителей.

2.1. Общие сведения о металлографических микроскопах

При нормальном зрении невооруженный глаз человека четко различает объекты, находящиеся от него на расстоянии не более 250 мм. Это расстояние принято называть расстоянием «наилучшего видения». На этом расстоянии глаз может видеть отдельно расположенные точки,

расстояние между которыми не превышает 0,2 мм. Для того чтобы увеличить рассматриваемый объект, нужно увеличить угол зрения.

С целью увеличения изображения объекта применяют оптические приборы, такие как лупы и микроскопы. Действие таких оптических приборов при исследовании мелких объектов, вооружающих человеческий глаз, сводится к увеличению угла зрения. Оптические приборы во столько раз увеличивают изображение объекта, во сколько раз угол зрения, создаваемый им при увеличении объекта, больше угла зрения, под которым невооруженный глаз человека видит данный объект на расстоянии приблизительно равное 250 мм.

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

В конструкции современного металлографического микроскопов имеются следующие основные узлы:

- собственно микроскоп, т.е. система объектива и окуляра с приспособлением для установки объекта и для фокусировки;
- осветительная часть микроскопа, включающая источник света, коллекторные и вспомогательные линзы, светофильтры и диафрагмы осветителя;
- фотокамера с оптической системой;
- штатив или оптическая скамья с приспособлениями, обеспечивающими строго определенное взаимное расположение всех элементов оптики микроскопа.

Необходимо понимать, что в микроскопе механическая часть также важна, как и оптическая. Механическая конструкция должна обеспечивать жесткость и точность установки отдельных узлов микроскопа, возможность смены и регулировки элементов схемы.

Увеличение объекта в микроскопе происходит в две стадии: первое увеличение дает объектив, второе – окуляр. Объектив и окуляр представляют собой сложные оптические системы и состоят из нескольких линз.

Общее увеличение микроскопа V равно:

$$V = V_{об} \cdot V_{ок},$$

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

Увеличение объектива $V_{об}$ определяется по формуле

$$V_{об} = \Delta / F_{об},$$

где $F_{об}$ – фокусное расстояние объектива, Δ – расстояние между задней фокальной плоскостью объектива и передней фокальной плоскостью окуляра – оптическая длина тубуса микроскопа.

Увеличение окуляра определяется по формуле

$$V_{ок} = D / F_{ок},$$

где D – расстояние наилучшего видения 250 мм; $F_{ок}$ – фокусное расстояние окуляра.

Максимальное полезное увеличение микроскопа, т. е. увеличение с которым выявляются детали рассматриваемого предмета, определяется по формуле [4, с. 64]

$$M = d_1 / d,$$

где d_1 – максимальная разрешающая способность человеческого глаза, равная 0,3 мм, d – максимальная разрешающая способность оптической системы.

Максимальная разрешающая способность оптической системы определяется из условий дифракции согласно уравнению

$$d = \lambda / (2n \sin \alpha/2),$$

где λ – длина волны света (для белого света 600 нм); n – коэффициент преломления; $\alpha/2$ – половина угла раскрытия входящего светового пучка.

Аберрации оптической системы. Аберрациями оптической системы называются ее недостатки, приводящие к искажению изображения. Различают сферическую и хроматическую аберрации.

Сферическая аберрация приводит к тому, что рассматриваемая точка изображается не резко, а расплывчато. Это происходит из-за того, что угол преломления лучей, попадающих на край линзы, больше, чем лучей, проходящих ближе к центру линзы. При этом лучи, прошедшие через линзу, пересекаются не в одной точке, а образуют в плоскости круг небольшого диаметра. Уменьшение сферической аберрации

достигается изменением геометрии поверхности линзы при ее изготовлении или срезая крайние лучи.

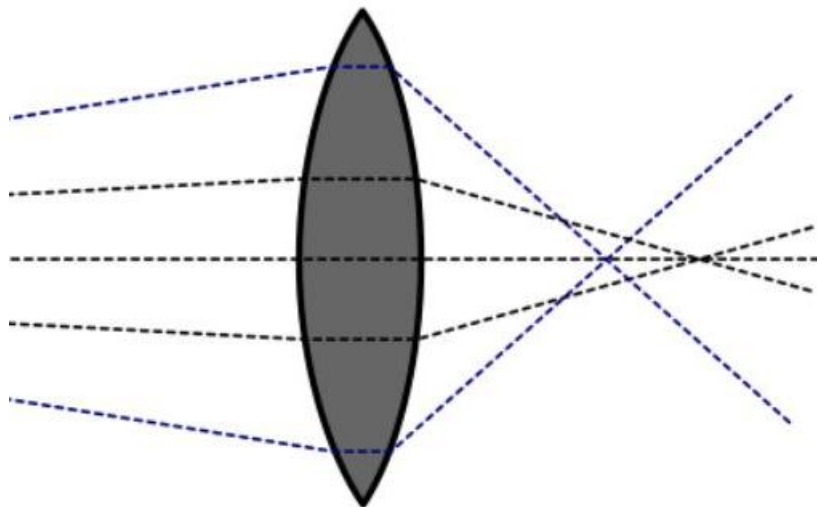


Рис. 2.1. Сферическая абберация

Хроматическая абберация приводит к несовпадению изображений, созданных лучами разной длины волны (различного цвета). Данный дефект возникает в результате дисперсии (разложения) света при прохождении через линзу. При хроматической абберации изображение, создаваемое красными лучами, не совпадает с изображениями, создаваемыми зелеными и синими лучами. В результате этого дефекта контуры изображения не имеют четкой границы; вокруг изображения имеется нерезкая кайма. Для уменьшения хроматической абберации в объектив устанавливают коррекционные линзы.

Объективы. Объектив является сложной оптической системой линз, собранных в металлическую трубчатую оправку. Объективы, как правило, характеризуются фокусным расстоянием и числовой апертурой. В зависимости от числовой апертуры объективы делятся на три группы:

- объективы малых апертур $A \leq 0,2$;
- объективы средних апертур $A \leq 0,65$;
- объективы больших апертур $A > 0,65$.

В зависимости от среды между фронтальной линзой и поверхностью объекта объективы больших увеличений бывают сухие и иммер-

сионные. Так как сильные объективы имеют очень малое рабочее расстояние (расстояние между шлифом и фронтальной линзой до 0,1 мм), чтобы не повредить фронтальную линзу, фокусировку ведут очень осторожно. Для предотвращения повреждений такие объективы изготавливают в специальной пружинной оправке.

По степени исправления хроматических aberrаций объективы делятся на

- ахроматические;
- полуахроматические;
- флюоритовые;
- апохроматические.

В ахроматах aberrация исправлена для двух длин волн, их применяют для малых и средних увеличений. В апохроматах aberrация исправлена для трех длин волн, поэтому в них выше степень коррекции. Апохроматы применяют для больших увеличений. Aberrации в полуахроматических и флюоритовых объективах меньше, чем в ахроматических.

Однако изображения, получаемые этими объективами, резкие только в центре, по краям же размытые. С целью получения плоского поля применяют планахроматические и планопохроматические объективы, устраняющие хроматические aberrации.

Окуляры увеличивают изображение, получаемое на объективе. Они характеризуются собственным увеличением, а также качеством коррекции изображения.

Собственное увеличение окуляров, используемых при визуальной работе, обычно выгравировано на их оправе. Металлографические микроскопы снабжаются окулярами с увеличением от 3 до 20.

По роду и степени коррекции различают:

- простые, или окуляры Гюйгенса;
- компенсационные окуляры;
- выравнители (гомалы).

Многообразие типов окуляров обусловлено задачами коррекции изображения в связи с выбором типа объектива и методами микроскопического исследования (визуальная работа или микрофотографирование).

Окуляр Гюйгенса имеет наиболее простую конструкцию. Передняя линза (глазная) дает увеличение изображения, образованного в плоскости диафрагмы окуляра объективом и задней линзой окуляра (полевой). Полевая линза в некоторой степени выправляет кривизну поля изображения.

Наиболее применяемые стандартные увеличения окуляров Гюйгенса – 4; 7; 10; 15.

Для визуальной работы окуляры Гюйгенса целесообразно использовать с объективами-ахроматами. В микрофотографической работе при малых увеличениях для получения хороших результатов рекомендуют использование темно-зеленого светофильтра.

Компенсационные окуляры специально рассчитывают для применения с объективами-апохроматами. Компенсационные окуляры малого и среднего увеличений (3; 5; 7; 10) по своей конструкции подобны окулярам Гюйгенса, но в отличие от них одна из линз двойная для исправления. Так как объективы-апохроматы дают изображение значительно лучшего качества, чем ахроматы, то также применяют окуляры с высоким увеличением (15; 20).

При использовании компенсационных окуляров поле зрения еще более искривлено, чем у объективов-ахроматов в комбинации с окулярами Гюйгенса, что ограничивает их использование при микрофотографировании.

Системы типа *гомал* имеют отрицательное фокусное расстояние (от -20 до -70) и, следовательно, не могут быть использованы как лупа или как окуляр для визуальной работы. Их ограниченно используют для микрофотографирования.

Гомалы в соединении с объективами-апохроматами дают плоское изображение довольно высокого качества. Они могут также применяться с объективами-ахроматами при средних и больших увеличениях.

Светофильтры используются с целью изменения контрастности изображения, повышения качества изображения, защиты от теплового излучения и уменьшения освещенности.

В системе оптического микроскопа поддаются регулированию и контролю с помощью светофильтров и полярофильтров как количество или интенсивность света, так и его основные качественные характеристики – спектральная и поляризованная.

Применяются две группы светофильтров:

- нейтральные светофильтры; они не изменяют качественные характеристики света, но снижают его интенсивность (прозрачные нейтральные светофильтры) или меняющие распределение интенсивности по направлению (рассеивающие пластики);
- цветные светофильтры; они обладают свойством избирательного или селективного поглощения света определенных дин волн (цветов).

Особо следует отметить следующие группы цветных светофильтров:

- монохроматические светофильтры, поглощающие все лучи за исключением узкой полосы спектра;
- компенсационные светофильтры, поглощающие излучение коротковолновой части спектра (синие, фиолетовые, ультрафиолетовые лучи);
- тепловые фильтры, пропускающие лучи широкой части спектра за исключением длинноволновых инфракрасных или тепловых лучей.

Человеческий глаз обладает разной чувствительностью к разным цветам спектра. Необходимо отметить, что наибольшая чувствительность проявляется в отношении желто-зеленым цветам. Желто-зеленые светофильтры не только уменьшают хроматическую аберрацию, они также повышают разрешающую способность объектива, выделяя лучи с меньшей длиной волны, что позволяет более четко наблюдать особенности микроструктуры.

2.2. Приготовление микрошлифов

Изучение микроструктуры ведут на специально подготовленных образцах, которые называют *микрошлифами*. Чтобы получить достоверное представление о структуре исследуемого материала, необходимо правильно определить место вырезки образцов.

В случаях, когда микроструктурный анализ предусмотрен стандартом, размеры микрошлифов и способы их отбора стандартизованы (ГОСТ 1778-70). В остальных случаях место вырезки образца определяется задачами исследования.

При осуществлении контроля микроструктуры крупного объекта, от него сначала отбирают пробу.

Проба – часть металлопродукции, предназначенная для изготовления заготовок образцов. Далее из пробы вырезают заготовку (тёмплет).

Заготовка – часть пробы, обработанная или необработанная механически, подвергнутая, в случае необходимости, термической обработке, и предназначенная для изготовления образцов.

Образцы – часть пробы или заготовки определенного размера, обработанная или необработанная механически и доведенная до состояния, необходимого для конкретного испытания.

Пробы, заготовки и образцы отбирают из наиболее характерных зон металлопродукции. В литом металле различия в структуре вызваны различными условиями отвода тепла как по сечению, так и по высоте отливки; в деформированном металле – различной степенью деформации внешних и внутренних слоев металла.

Для исследования металлопродукции с неоднородной по сечению структурой используют только поперечный шлиф; его плоскость должна быть перпендикулярна оси изделия. При неоднородности структуры по высоте и длине детали вырезают несколько образцов из различных наиболее характерных зон.

Для изделий, у которых один размер (толщина) значительно меньше остальных (длины и ширины), например, отливок типа плит,

структуру изучают на шлифе, плоскость которого перпендикулярна наибольшей плоскости изделия.

Место вырезки образцов и их количество определяется целями и задачами исследования. Пробы, заготовки и образцы можно вырезать любым способом (на металлорежущих станках, гильотинных ножницах и т.п.), обеспечивающим сохранение структуры металла.

При ручной обработке для удобства изготовления микрошлифов из образцов, размеры которых меньше общепринятых, используют специальные приспособления – зажимы (державки). Образцы также можно запрессовывать или заливать различными твердеющими массами. При отсутствии соответствующего оборудования их заливают в оправки-кольца.

Изготовление микрошлифов сводится к последовательному выполнению следующих операций:

- грубая шлифовка; при этом производят выравнивание поверхности среза и излома на абразивных кругах или грубой наждачной бумагой;
- тонкая шлифовка;
- полировка.

После грубой шлифовки образец очищают от абразива и частиц металла и производят шлифовку на специальных шлифовальных станках или в ручную на шлифовальной бумаге различной зернистости. Ручная шлифовка выполняется на шлифовальной бумаге, помещаемой на стекле для создания ровной твердой поверхности. Шлифуют до тех пор, пока не исчезнут риски от предыдущей обработки, после этого образец очищают от наждачной пыли, поворачивают на 90°С и выполняют шлифовку на более тонкой шлифовальной бумаге.

После тонкой шлифовки для удаления частиц абразива и металла образец промывают под струей воды и подвергают полировке. Применяют два способа полировки образцов: механический и электролитический.

При *механическом* способе полировку производят на полировальном станке. При этом круг покрывают мягкой тканью: сукном,

фетром и т.п. чем мягче полируемый материал, тем строение применяемой ткани должно быть тоньше. При полировке ткань равномерно смачивается полировочной жидкостью, как правило, смесь абразивного материала с водой.

Электролитическая полировка заключается в выравнивании поверхности, подвергаемой анодному растворению. Такой вид полировки позволяет подготовить шлиф без наклепа, однако возможно избирательное растворение отдельных фаз.

Если металлографическое исследование не проводится сразу после приготовления шлифа, то поверхность шлифа следует предохранить от возможного окисления. Такие шлифы особенно тщательно промывают спиртом и просушивают. Затем шлифы помещают в специальные сосуды (эксикаторы).

2.3. Методы выявления микроструктуры металлов

Изучение строения металлов и сплавов осуществляется на металлографических микроскопах сначала в полированном состоянии, затем после выявления микроструктуры границ между фазами.

Большинство способов выявления микроструктуры сводится к выявлению, получению рельефа на поверхности зерен и окрашиванию структурных составляющих.

Основные методы выявления микроструктуры:

- химическое травление;
- электрохимическое травление;
- тепловое травление;
- травление в солях при повышенных температурах.

При *химическом травлении* поверхность микрошлифа подвергается реактивам при заданной температуре. При этом выявление выполняют разными способами: погружением образца в травитель, смачиваем поверхности микрошлифа травителем и втиранием травителя в поверхность шлифа.

При составлении реактивов в качестве растворителей могут применять водопроводную или дистиллированную воду, различные спирты (этиловый, метиловый, бутиловый и т.п.). Все применяемые для составления реактивов вещества должны иметь высокую степень чистоты, от этого зависит качество микрошлифа. В приложении 1 приведены составы некоторых реактивов.

Под действием химических реагентов в чистых металлах и однофазных сплавах прежде всего выявляются границы зерен. Для выявления линий сдвига, двойников и т.п. необходимо более длительное и интенсивное травление. Растворение происходит и по поверхности зерен, но его скорость значительно ниже, чем на границах. После травления из-за потери отраженного света в углублениях между зернами границы зерен видны тонкими темными линиями.

При *электрохимическом травлении* приготовленный микрошлиф в качестве анода помещают в специальный раствор (электролит), катодом является металлическая пластина. При этом происходит растворение определенных фаз сплава и выявление его микроструктуры.

Особенно эффективен такой способ травления при выявлении структуры чистых металлов и твердых растворов. Однако приходится корректировать режим обработки для разных металлических материалов.

Электрохимическое травление обычно применяют для сплавов, из которых трудно приготовить микрошлифы, и если сплав сильно окисляется при химическом травлении или очень трудно поддается травлению.

При *тепловом травлении* на поверхности металла в следствии нагрева в результате взаимодействия с кислородом воздуха образуется окисная пленка. В первую очередь окисление происходит по границам зерен и различных фаз. При окислении поверхность микрошлифа сначала становится матовой, а потом приобретает различную окраску, которая зависит от химсостава сплава или фазы, температуры и продолжительности нагрева. Чем больше различаются фазы по способности к окислению, тем точнее будет результат.

Выявление структуры *травлением в солях при повышенных температурах* проводится тогда, когда другими методами она выявляется недостаточно хорошо или вообще не выявляется. Данный метод применяется для сплавов на основе хрома, вольфрама, никеля, ниобия и других металлов. Хорошо отполированный и обезжиренный микрошлиф погружают в расплавленную соль (NaCl , NaNO_3 , KNO_3 , KOH , K_2O) на определенное время при температурах 300-860⁰С. В зависимости от химсостава стали и используемой соли на поверхности микрошлифа окисные пленки разной окраски (разного состава).

2.4. Методы определения неметаллических включений

Неметаллические включения – макро и микрочастицы в металлах и сплавах, образующиеся в результате различных физико-химических процессов, которые происходят при выплавке металла и его кристаллизации.

Различают природные и посторонние неметаллические включения. Природные включения в основном образуются в результате химических реакций, проходящих при производстве металла. К этим включениям относятся, например, сульфиды и нитриды. Посторонние включения (частицы кварца и огнеупоров, включения шлака и др.) попадают в металл в процессе производства, внесение этих включений носит обычно механический характер.

В сталях могут быть неметаллические включения различного состава и строения. В основном это окислы простые и сложные, сульфиды, силикаты, фосфиды, нитриды и другие соединения.

В процессе раскисления стали образуются соединения кислорода и кремния, которые, как правило, переходят в шлак, и лишь незначительная их часть остается в стали в виде простых и сложных оксидных и силикатных включений (FeO , $\text{FeO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$, SiO_2 , $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$, и др.).

При охлаждении расплавленной стали растворенная в ней сера выделяется в виде сульфидных включений: сульфиды железа (FeS) и

марганца (MnS), оксисульфидные включения железа и марганца, сульфиды титана, молибдена и других элементов.

Фосфиды в стали обычно не встречаются, но в низкоуглеродистых сталях с повышенным содержанием фосфора имеются кислородные включения фосфора ($\text{FeO-P}_2\text{O}_5$) и фосфид железа (Fe_2P).

Нитриды и карбонитриды можно обнаружить в сталях, содержащих сильные нитридообразующие элементы (Ti , Zr , Nb , V), т.е. элементы, которые с азотом образуют стойкие нитриды.

Из посторонних включений в сталях встречаются частицы кварца, стекла различного состава, включения огнеупоров и шлака.

В чугунах присутствуют те же основные виды включений. Некоторое различие в их характере обусловлено более высоким содержанием углерода. Значительно чаще, чем в стали, в чугунах в составе эвтектики встречаются фосфидные включения.

В цветных металлах и сплавах чаще всего наблюдаются кислородные, сульфидные и фосфидные включения.

В большинстве случаев неметаллические включения оказывают вредное влияние на свойства металла: уменьшают прочность и пластичность, понижают сопротивление коррозии, ухудшают технологические свойства.

Неметаллические включения определяют по физическим, химическим, геометрическим и механическим признакам. К таким признакам относятся: размер и форма, изменение формы при пластической деформации, цвет, способность к отражению света, отношение к различным химическим реактивам.

Неметаллические включения могут иметь различные размеры, зависящие от условий выплавки и охлаждения. Природные включения обычно имеют размера в пределах 2-150 мкм. Для окиси алюминия характерны размеры от 2 до 7 мкм, сульфидов марганца и железа – от 2 до 8 мкм, силикатных включений – до 150 мкм. Размер силикатных частиц зависит от скорости затвердевания жидкого металла: чем меньше скорость охлаждения, тем крупнее частицы.

Наиболее крупными являются посторонние включения.

Частицы неметаллических включений могут иметь самую разнообразную форму. Включения закиси железа и силикатные стекла имеют округлую форму, нитриды титана и циркония – правильную кристаллическую формы. Могут наблюдаться включения в виде дендритов (сульфид марганца).

Кроме этого неметаллические включения могут располагаться в виде сплошной или прерывистой пленки по границам зерен: сульфиды железа (FeS), никеля (Ni_3S_2), закись меди (Cu_2O).

В процессе пластической деформации неметаллические включения могут изменять свою форму. Пластичные включения деформируются вместе с металлом, вытягиваясь в нити, в строчки (закись железа, сульфидные включения железа и марганца, оксисульфидные включения, ряд силикатов). Если включения недостаточно пластичны, то при деформации они разламываются и принимают прерывистые очертания (силикатные включения с повышенным содержанием кремнезема). Однако ряд твердых включений сохраняет при деформации свою первоначальную форму (нитриды титана и ниобия, карбонитриды титана). Хрупкие частицы при деформации разламываются и имеют вид цепочек (частицы посторонних включений огнеупоров).

Так как отражательная способность большинства неметаллических включений значительно ниже, чем металла, то под микроскопом они выглядят значительно темнее. Сульфиды и окислы обладают лучшей отражательной способностью, чем силикатные включения, поэтому под микроскопом выглядят более светлыми.

Для изучения неметаллических включений, чтобы избежать выкрашивания твердых и хрупких включений, шлифы изготавливают особенно осторожно.

При изучении неметаллических включений определяют их природу, количественное содержание и устанавливают закономерности в их распределении.

В сталях металлографические методы определения неметаллических включений регламентированы в соответствии с ГОСТ 1778-70.

2.5. Методы количественной металлографии

Все существующие стандартные методы количественного металлографического анализа основаны на исследовании структуры выявленной в сечении микрошлифа (ГОСТ 5639-82).

Величина зерна в плоскости металлографического шлифа определяется методами:

- визуального сравнения видимых под микроскопом зерен с эталонами шкал с определением номера зерна;
- подсчета количества зерен, приходящихся на единицу поверхности шлифа, с определением среднего диаметра и средней площади зерна;
- подсчета пересечений границ зерен отрезками прямых с определением среднего условного диаметра в случае равноосных зерен, количества зерен в 1 мм^3 в случае неравноосных зерен;
- измерения длин хорд под микроскопом или с использованием микрофотографий с определением относительной доли зерен определенного размера;
- ультразвуковым.

Величину зерна *методом сравнением с эталонными шкалами* определяют при увеличении $100\times$. После просмотра всей площади шлифа выбирают несколько типичных мест и сравнивают с эталонами, приведенными в шкалах приложения (ГОСТ 5639-82). Сравнение можно проводить, наблюдая изображение в окуляре микроскопа или фотоснимке. Шкалы 1-3 представлены десятью эталонами в виде схематизированной сетки, ограничивающей размеры зерен. Эталоны приведены в виде круга диаметром $79,8 \text{ мм}$, что соответствует площади на шлифе $0,5 \text{ мм}^2$.

Средние численные значения площади зерна, числа зерен в 1 мм^3 , диаметра и условного диаметра, а также числа зерен на площади в 1 мм^2 , соответствующие эталонам шкалы G (–3) – 14, приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1.

Номер зерна G	Средняя площадь сечения зерна a , мм ²	Число зерен на площади 1 мм ² m			Среднее число зерен в 1 мм ³ N_v	Средний диаметр зерна d_m , мм	Средний условный диаметр зерна d_L , мм
		минимальное	среднее	максимальное			
—3	1	0,75	1	1,5	1	1,0	0,875
—2	0,5	1,5	2	3	2,8	0,707	0,650
—1	0,25	3	4	6	8	0,5	0,444
0	0,125	6	8	12	22,6	0,353	0,313
1	0,0625	12	16	24	64	0,250	0,222
2	0,0312	24	32	48	181	0,177	0,157
3	0,0156	48	64	96	512	0,125	0,111
4	0,00781	96	128	192	1448	0,088	0,0783
5	0,00390	192	256	384	4096	0,062	0,0553
6	0,00195	384	512	768	11585	0,044	0,0391
7	0,00098	768	1024	1536	32768	0,031	0,0267
8	0,00049	1536	2048	3072	92682	0,022	0,0196
9	0,000244	3072	4096	6144	262144	0,015	0,0138
10	0,000122	6144	8192	12288	741485	0,011	0,0099
11	0,000061	12288	16384	24576	2097152	0,0079	0,0069
12	0,000030	24576	32768	49152	5931008	0,0056	0,0049
13	0,000015	49152	65536	98304	16777216	0,0039	0,0032
14	0,000008	98304	131072	96608	47449064	0,0027	0,0027

Метод *подсчета зерен* заключается в определении количества зерен на единице поверхности шлифа (1 мм²) и расчете средней площади зерна и среднего диаметра зерен. Подсчет зерен можно проводить на микрофотографиях, в которых поле зрения ограничивают одной из плоских фигур: окружностью диаметром 79,8 мм или квадратом со стороной 70,7 мм, или прямоугольником с размерами сторон 65х77, 60х83, 55х91 или 50х 100 мм, что соответствует 0,5 мм² поверхности шлифа при увеличении 100^x.

Подсчитывают число зерен, попавших внутрь выбранной фигуры (n_1), и число зерен, пересеченных ее границами (n_2).

Общее количество зерен (n_{100}) на площади 0,5 мм² шлифа при увеличении 100^x для круга подсчитывают по формуле:

$$n_{100} = n_1 + \frac{1}{2}n_2.$$

Количество зерен m , приходящихся на 1 мм² площади шлифа, определяют по формуле $m = 2n_{100}$.

Подсчет зерен проводят не менее чем в трех характерных местах шлифа и по полученным результатам рассчитывают среднеарифметическое значение.

Среднюю площадь сечения зерна (a) в мм² определяют по формуле:

$$a = \frac{1}{m},$$

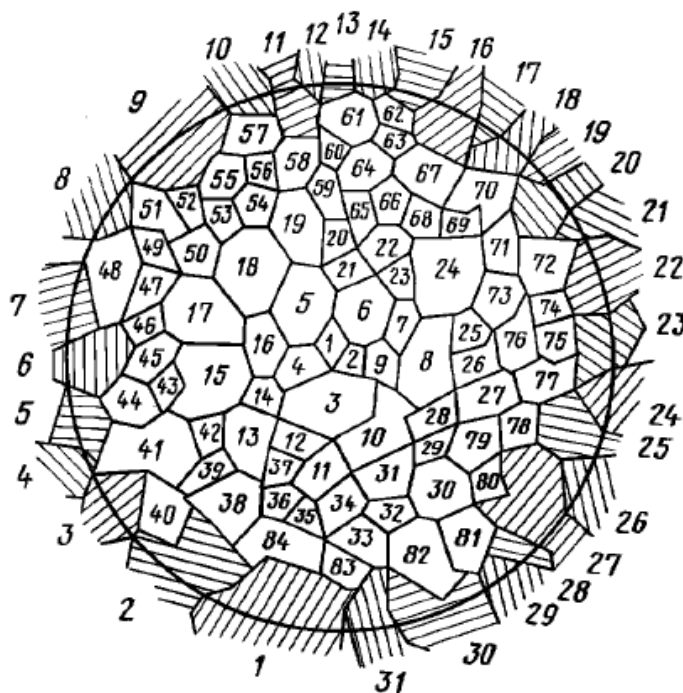
Средний диаметр зерна (d_m) в мм определяют по формуле:

$$d_m = \frac{1}{\sqrt{m}}.$$

Сравнением полученных значений m , a и d_m со значениями соответствующих параметров в табл. 2.1 определяют номер величины зерна G .

Пример подсчета количества зерен на единицу поверхности шлифа и расчета средней площади и среднего диаметра зерна (ГОСТ 5639-82):

На чертеже приведен один из трех наиболее характерных участков шлифа при увеличении 100^x.



Диаметр окружности 79,8 мм.

Площадь на шлифе 0,5 мм².

Запись результатов подсчета количества зерен в трех наиболее характерных участках шлифа при увеличении 100^x.

Таблица 2.2.

Номер поля зрения	Количество зерен		Общее количество зерен на площади 0,5 мм ² n_{100}	Количество зерен на 1 мм ² m	Средняя площадь зерна a , мм ²	Средний диаметр d_m , мм
	внутри окружности n_1	пересеченных окружностью n_2				
1	84	31	$84 + \frac{31}{2} = 99,5$	$2 \cdot 99,5 = 199$	$\frac{1}{199} = 0,0050$	$\frac{1}{\sqrt{199}} = 0,071$
2	86	32	$86 + \frac{32}{2} = 102$	$2 \cdot 102 = 204$	$\frac{1}{204} = 0,0049$	$\frac{1}{\sqrt{204}} = 0,069$
3	79	31	$79 + \frac{31}{2} = 94,5$	$2 \cdot 94,5 = 189$	$\frac{1}{189} = 0,0052$	$\frac{1}{\sqrt{189}} = 0,073$
				$m = 197$	$a = 0,0051$	$d_m = 0,071$

Метод подсчета пересечений границ зерен состоит в подсчете зерен, пересеченных отрезком прямой, и определении среднего условного диаметра – в случае равноосных зерен или количества зерен в 1 мм³ – в случае неравноосных зерен.

Подсчет пересечений зерен в обоих случаях можно проводить на микрофотографиях, на которых проводят несколько отрезков произвольной длины (например 80 или 100 мм при увеличении 100^x, что соответствует длине 0,8 или 1 мм на шлифе). Длину отрезков выбирают с таким расчетом, чтобы каждый из них пересекал не менее 10 зерен, при этом увеличение подбирают так, чтобы на исследуемой поверхности было не менее 50 зерен. Подсчитывают точки пересечений отрезков прямых линий с границами зерен. Зерна на концах прямой, не пересеченные ею целиком, принимают за одно зерно.

Определяют суммарную длину отрезков L , выраженную в миллиметрах натуральной величины на шлифе, и суммарное число пересеченных зерен N .

Измерения проводят не менее чем в пяти характерных местах шлифа. Подсчет количества пересечений равноосных зерен проводят на двух взаимно перпендикулярных отрезках прямых, проведенных в каждом из пяти мест шлифа.

Средний условный диаметр зерна (d_L) в мм вычисляют по формуле:

$$d_L = \frac{L}{N},$$

где L — суммарная длина отрезков, мм; N — общее число зерен, пересеченных отрезками длиной L .

Пример расчета среднего условного диаметра (равноосные зерна):

Таблица 2.3.

Количество полей зрения	Общая длина отрезков при $l = 0,6$ мм	Число пересечений в каждом поле зрения на двух прямых					Общее число пересечений	Средний условный диаметр d_L , мм	Номер зерна по шкале G
		1	2	3	4	5			
5	$5 \cdot 2 \cdot 0,6 = 6,0$	30	32	36	31	33	162	$\frac{6,0}{162} = 0,037$	6

2.6. Измерение микротвердости

Испытания на твердость используются не только как средство контроля материалов, но и как средство для исследования фазовых и структурных превращений.

Под *микротвердостью* следует понимать твердость материалов в его микроскопических объемах. Статическое испытание микротвердости вдавливанием является наиболее распространенным методом.

На рис. 2.2 представлен общий вид прибора ПМТ-3.

Результаты испытания главным образом зависят от формы индентора и прикладываемой нагрузки.

Число твердости H_μ определяется как отношение нагрузки к площади отпечатка:

$$H_\mu = \frac{2P \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2} = \frac{1,8544P}{d^2},$$

где α — угол при вершине между противоположащими гранями четырехгранной с квадратным основанием пирамиды, равный 136° ;

P — нагрузка, кг;

d — длина диагонали, мм.

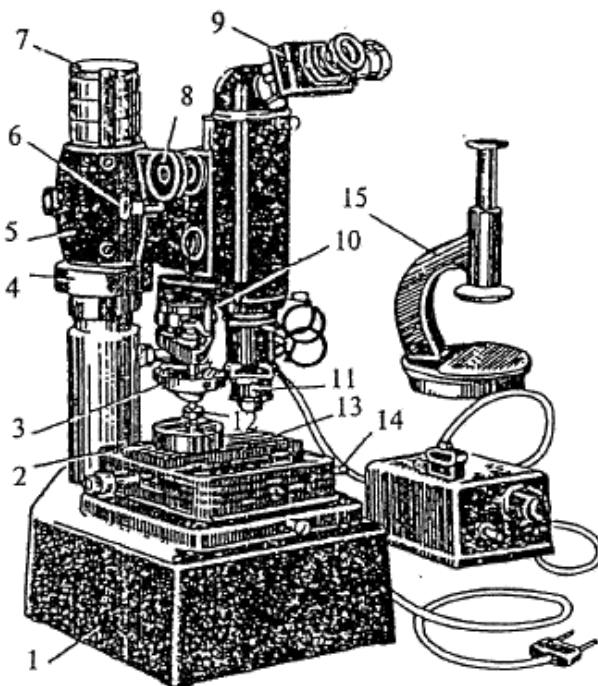


Рис. 2.2. Общий вид прибора ПМТ-3 для определения микротвердости:
 1 – основание прибора; 2 – предметный столик;
 3 – гиря из разнovesа; 4 – гайка для перемещения кронштейна с брусом;
 5 – кронштейн бруса; 6 – барашек микрометрического движения;
 7 – колонна; 8 – барашек грубого движения;
 9 – винтовой окулярный микрометр; 10 – рукоятка арретира;
 11 – объектив; 12 – оправка с алмазным наконечником,
 13 – планка для закрепления исследуемого образца;
 14 – рукоятка для поворота столика; 15 – ручной прессик

Контрольные вопросы

1. Каковы задачи микроструктурного анализа?
2. Узлы современного металлографического микроскопа
3. Как определяется общее увеличение микроскопа? Что такое максимальное полезное увеличение микроскопа
4. Что такое сферическая и хроматическая аберрации?
5. Каковы методы выявления микроструктуры металлов?
6. Какими методами выявляются неметаллические включения?
7. Классификация и виды неметаллических включений?
8. Какими методами выявляется величина зерна?
9. Что такое микротвердость? Как она определяется?

ГЛАВА 3. МЕТАЛЛОГРАФИЯ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА

3.1. Микроструктуры сталей при различных термических обработках

Суть любого вида термической обработки заключается в нагреве сплава при определенных температурах и его охлаждении с разными скоростями.

С целью уменьшения внутренних напряжений, устранения химической и структурной неоднородности, получения мелкозернистой структуры, понижения твердости для облегчения механической обработки проводят **отжиг или нормализацию**.

На производстве используются два принципиально вида отжига – отжиг I рода и отжиг II рода.

Особенностью всех разновидностей отжига I рода является то, что они протекают независимо от того, идут ли при этом фазовые превращения или нет.

Диффузионный отжиг (гомогенизация) проводится для устранения химической неоднородности – дендритной и внутрикристаллитной ликвации, которая свойственная слиткам и отливкам из легированных сталей.

В следствии высокой температуры нагрева ($1050-1250^{\circ}\text{C}$) и длительной выдержки (10-20 ч) образуется крупнозернистая структура, что устраняется при обработке давлением или последующей термической обработкой.

Рекристаллизационный (низкий) отжиг для устранения влияния наклепа и снятия внутренних напряжений в стали после холодной обработки металла давлением или как промежуточный отжиг для повышения пластичности и предупреждения появления трещин в стали при холодной обработке давлением.

При рекристаллизационном отжиге холоднодеформируемые стали греют выше температуры начала рекристаллизации (на $50-100^{\circ}\text{C}$

ниже линии A_{c1}), выдерживают при этой температуре, затем охлаждают на воздухе. В результате данного отжига образуется однородная мелкозернистая структура с небольшой твердостью и значительной вязкостью.

Отжиг для снятия внутренних напряжений проводят с целью уменьшения остаточных напряжений, возникающих в металле в процессе производства. На практике отжиг стальных деталей производят в интервале температур $160-700^{\circ}\text{C}$ с последующим медленным охлаждением. В результате этого происходит полное или частичное снятие внутренних напряжений.

Отжиг II рода основан на фазовом превращении.

Полный отжиг основан на фазовой перекристаллизации и измельчении зерна. Нагрев стали ведут на $30-50^{\circ}\text{C}$ выше линии A_{c3} (рис. 3.1), выдерживают при этой температуре, затем медленно охлаждают (вместе с печью).

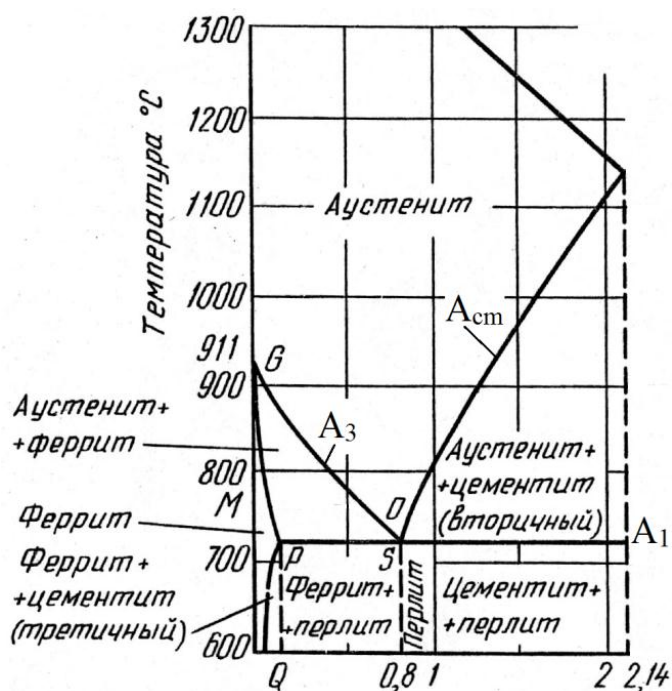


Рис. 3.1. Участок диаграммы Fe-Fe₃C

В результате полного отжига образуется мелкое зерно. Данным видом отжига можно устранить два порока структуры доэвтектодной стали видманштеттовую структуру и строчечность.

Неполный отжиг основан на частичной фазовой перекристаллизации и измельчении зерна. Нагрев стали ведут на 30-50⁰С выше линии A_{c1} , выдерживают при этой температуре, затем медленно охлаждают. При нагреве некоторые структурные составляющие (в доэвтектоидных сталях – феррит, в заэвтектоидных сталях – цементит) не переходят в твердых раствор, поэтому сохраняются в структуре после отжига. Такой вид отжига является альтернативой полному отжигу, что позволяет сэкономить время и уменьшить себестоимость обработки.

Для доэвтектоидных сталей неполный отжиг применяют с целью снятия внутренних напряжений и создания мелкозернистой структуры.

Неполный отжиг широко применяется для заэвтектоидных углеродистых и легированных сталей. Нагрев заэвтектоидных сталей осуществляют на 10-30⁰С выше линии A_{c1} с длительной выдержкой (5-6 ч), последующее охлаждение приведет к получению зернистой (сфероидальной) формы перлита вместо обычной пластинчатой, что позволит улучшить обрабатываемость резанием. Такой вид отжига называется сфероидизирующим.

Изотермический отжиг применяют для улучшения обрабатываемости легированных сталей. Нагрев таких сталей производят выше линии A_{c3} , как и при полном отжиге, затем сравнительно быстро охлаждают до температуры ниже A_{c1} (660-680⁰С) и изотермически выдерживают при этой температуре до полного распада аустенита, после чего охлаждают на воздухе. Так как распад аустенита происходит не при охлаждении, а при постоянной температуре, получается более однородная структура.

После изотермического отжига стали приобретают такие же свойства, как и после полного отжига. При этом происходит полное устранение внутренних напряжений и значительное сокращение времени отжига.

Нормализационный отжиг (нормализация) по режиму является промежуточной операцией между отжигом и закалкой.

При нормализации сталь нагревают на 30-50⁰С выше линий $A_{с3}$ и $A_{с1}$, выдерживают и охлаждают на воздухе. Ускоренное в сравнении с обычным отжигом охлаждение приводит к большему переохлаждению аустенита. Поэтому при нормализации получается более тонкое строение эвтектоидной смеси и более мелкое зерно.

Нормализацией можно решать разнообразные задачи: получение однородной мелкозернистой структуры, частичное снятие напряжений, улучшения обрабатываемости, устранение цементитной сетки (для эвтектоидных сталей).

Изменение свойств стали при **закалке** является результатом образования неравновесных структур. Быстрое охлаждение стали при закалке предотвращает превращение из аустенита в перлит.

В зависимости от температуры нагрева различают полную и неполную закалку.

При полной закалке доэвтектоидную углеродистую сталь нагревают на 30-50⁰С выше линии $A_{с3}$ для получения аустенитной структуры. В результате закалки образуется многократно пересыщенный раствор углерода в α -железе с тетрагональной кристаллической решеткой или мартенсит (рис. 3.2). Характерный признак мартенситной структуры – ориентированная игольчатая структура, имеющая высокую твердость (600-700 НВ). В результате полной закалки доэвтектоидной стали в структуре наряду с мартенситом присутствует некоторое количество остаточного аустенита.



Рис. 3.2. Мелкоигольчатый мартенсит, x500

При неполной закалке доэвтектоидную углеродистую сталь нагревают на 30-50⁰С выше линии A_{c1} . При этом образуется двухфазная структура: аустенит и феррит. При последующем быстром охлаждении аустенит превращается в мартенсит, а феррит остается без изменений. При рассмотрении структуры на металлографическом микроскопе кроме мелкоигльчатого мартенсита видны светлые зерна феррита. Вследствие наличия ферритной составляющей сталь с такой структурой неоднородна и недостаточно твердая, поэтому такой вид закалки для доэвтектоидных сталей не применяется.

При неполной закалке заэвтектоидные стали, также как и эвтектоидную сталь, нагревают на 30-50⁰С выше линии A_{c1} для получения двухфазной структуры с целью сохранения цементитной составляющей. После закалки эти стали приобретают структуру мартенсита и цементита. Округлые включения цементита увеличивают твердость и износостойкость стали. Так как нагрев производится ниже линии A_{cm} , это ведет к уменьшению роста зерна и некоторому снижению внутренних напряжений.

Повышение температуры закалки выше линии A_{cm} приводит к снижению твердости из-за растворения избыточного цементита и увеличению остаточного аустенита в мартенситной структуре таких сталей. Количество остаточного аустенита повышается с увеличением содержания углерода. Кроме того в результате закалки с такой температуры образуются крупные иглы мартенсита, что также ведет к снижению механических свойств.

Таким образом, для доэвтектоидных сталей рационально применять полную закалку, для заэвтектоидных сталей – неполную закалку.

Закаленная сталь всегда находится в структурно напряженном состоянии. С целью уменьшения остаточных напряжений проводится отпуск.

Чем выше температура отпуска и чем больше его продолжительность, тем в большей степени снимаются внутренние напряжения.

При отпуске уменьшаются или полностью снимаются внутренние напряжения как структурного, так и термического происхождения.

Максимальное снятие напряжений достигается при температуре отпуска 500-600⁰С и выдержке в течении 1-2 часов. Для предотвращения возникновения дополнительных напряжений после отпуска при 500-600⁰С большинство углеродистых сталей следует охлаждать на воздухе.

Основное влияние на свойства стали оказывает температура отпуска. В зависимости от температуры нагрева закаленной стали различают низкий, средний и высокий отпуск.

Низкий отпуск проводят при температуре 150-250⁰С с целью снижения внутренних напряжений и некоторого уменьшения хрупкости мартенсита. При этом мартенсит закалки переходит в мартенсит отпуска (рис. 3.3, а); сталь сохраняет твердость (58-63 HRC), а следовательно, высокую износостойкость.

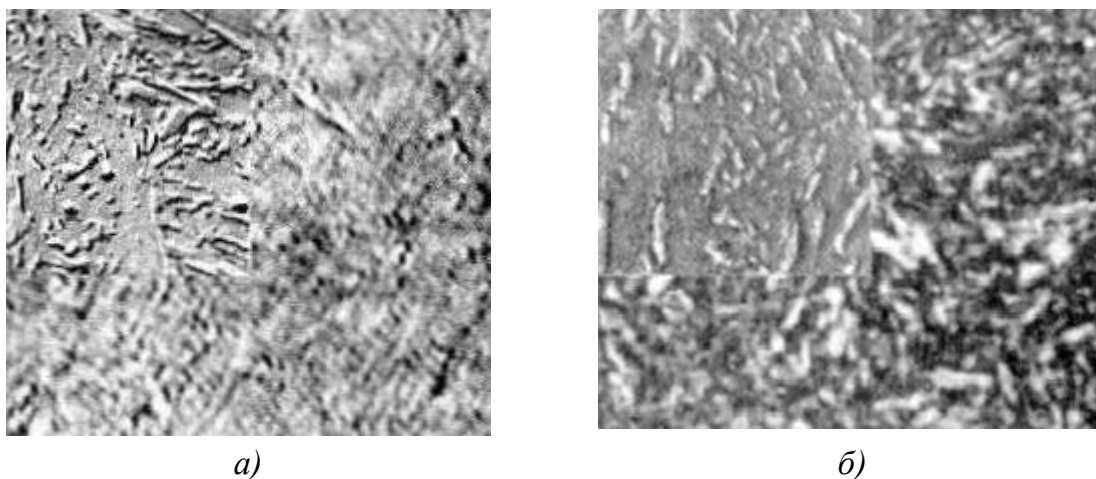


Рис. 3.3. Мартенсит отпуска (а) и сорбит отпуска (б)

Низкому отпуску подвергают режущий и мерительный инструмент из углеродистой и низколегированной стали, а также детали, которые должны иметь высокую твердость и износостойкость.

Средний отпуск проводят при 350-500⁰С с целью обеспечения высокого предела упругости, выносливости и релаксационной стойкости, главным образом для рессор и пружин. Структура стали после такого отпуска – троостит отпуска и троосто-мартенсит, твердость стали 40-50 HRC.

Охлаждение после отпуска при 400-450⁰С рекомендуют проводить в воде, для создания на поверхности сжимающих остаточных напряжений, чтобы увеличить предел выносливости пружин.

Высокий отпуск проводят при 550-680⁰С с целью обеспечения наилучшего соотношения прочности и вязкости стали. Структура стали после высокого отпуска – сорбит отпуска (рис. 3.3, б).

Высокий отпуск применяют для деталей, которые подвергаются воздействию высоких напряжений и ударным нагрузкам.

Термическая обработка, состоящая из закалки с высоким отпуском, называется улучшением. Улучшению подвергают среднеуглеродистые (0,3-0,4 % С) стали. По сравнению с отжигом и нормализацией закалка с высоким отпуском повышает предел прочности, предел текучести, относительное сужение и особенно ударную вязкость.

3.2. Металлография сварных швов

Данный вид контроля включает исследование макро- и микроструктуры и осмотр изломов сварных соединений. Исследование изломов швов производят невооруженным глазом или с помощью лупы.

По виду и цвету поверхности свежего излома определяют наличие непроваров, раковин, пор, шлаковых включений, а также пластические свойства наплавленного металла.

Мелкозернистый волокнистый серый излом, без блеска характеризует хорошую пластичность и высокую ударную вязкость металла. Крупнокристаллический блестящий излом указывает на хрупкость и низкую ударную вязкость металла. Исследование макроструктуры заключается в изучении макрошлифов сварного шва. Исследуемая поверхность образца, как правило, включает полное сечение наплавленного металла шва с прилегающими к нему зонами термического влияния и основного неизменившегося металла.

Поверхность макрошлифа промывают спиртом и травят специальными реактивами, после чего осматривают невооруженным глазом или с помощью лупы.

Макроисследования выявляют такие дефекты сварки, как непровары, трещины, поры, шлаковые включения, крупнозернистость основного и наплавленного металла, неоднородность структуры металла и другие.

На протравленной поверхности отчетливо видны границы и размеры основных зон сварного шва:

- наплавленного металла;
- термического влияния;
- основного неизмененного металла;
- участка сплавления основного металла с наплавленным;
- отдельные слои наплавленного металла.

Исследование микроструктуры сварных швов заключается в изучении поверхности протравленных микрошлифов с помощью микроскопа при увеличениях от 100 до 2000.

Наиболее часто обнаруживаются такие дефекты сварки: непровары; микротрещины; микропоры; шлаковые включения; нитриды (соединения железа с азотом в виде продолговатых игл), снижающие пластичность металла; окисные пленки по границам зерен наплавленного металла при его перегреве; карбиды – соединения железа и других элементов с углеродом – в сталях аустенитного класса (выпадение карбидов хрома уменьшает сопротивляемость коррозии нержавеющей стали); укрупненные зерна феррита (видманштеттовая структура), которые свидетельствуют о низких механических свойствах металла вследствие его перегрева; структуры закалки (троостит и мартенсит) при сварке легированных и углеродистых сталей.

Металлографические исследования позволяют наиболее тщательно контролировать качество металла швов.

Участок неполного расплавления 1 (рис. 3.4) – тонкая переходная полоска от металла шва к основному металлу.

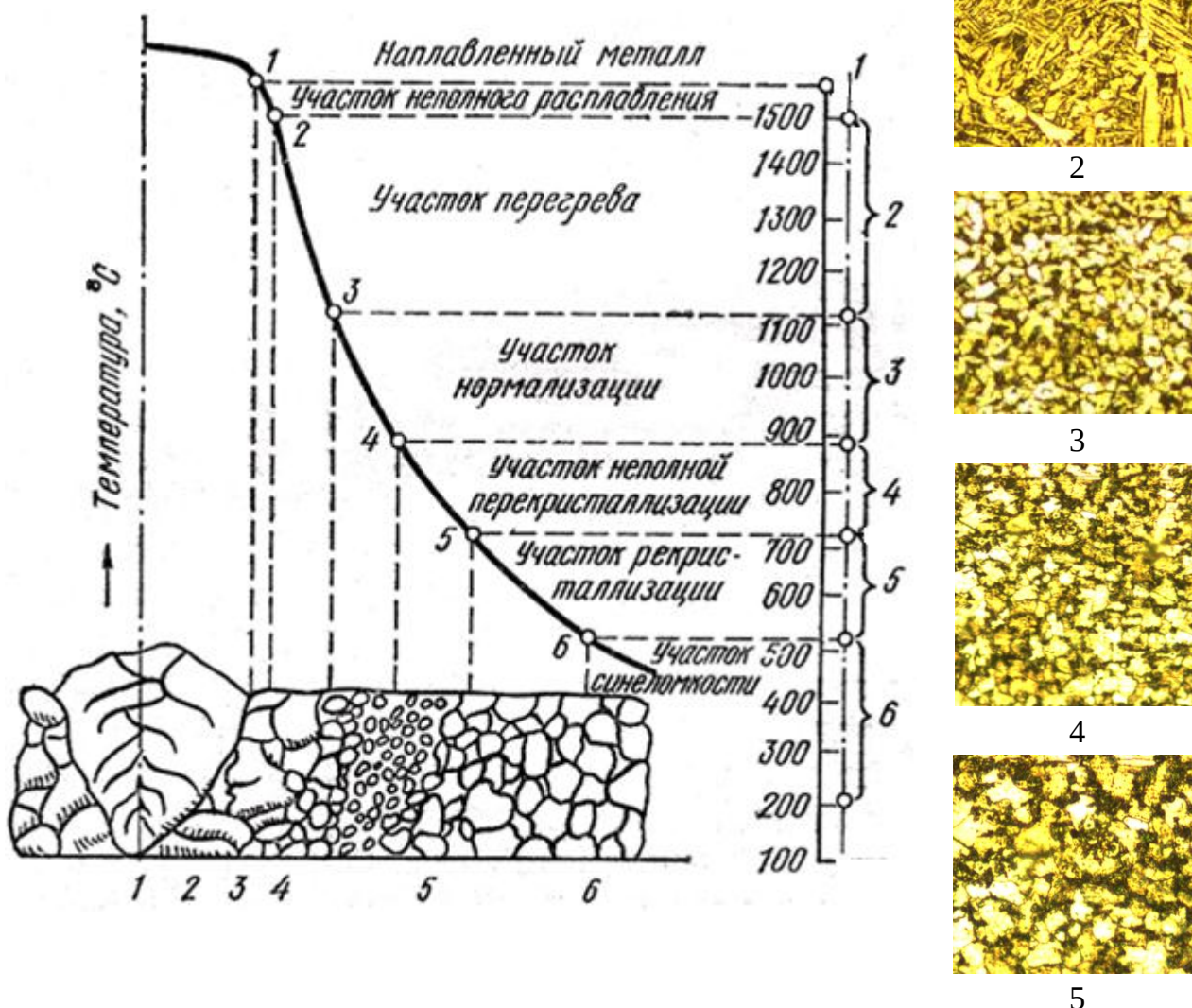


Рис. 3.4. Зона термического влияния:
 1 – неполного расплавления; 2 – перегрева; 3 – нормализации;
 4 – неполной перекристаллизации; 5 – рекристаллизации;
 6 – синеломкости.

Максимальные температуры нагрева – от температуры плавления металла до температуры солидус, т.е. происходит образование и жидкой, и твердой фазы, что приводит к образованию крупного зерна.

В данной зоне происходит непосредственное сращивание кристаллов металла шва с зерном основного металла, поэтому он зачастую и определяет качество сварного соединения. Структура данного

участка – феррито-перлитная с окантовкой перлитных выделений ферритными прослойками.

Участок перегрева 2 находится в интервале максимальных температур нагрева ~ 1130 °С. Металл данного участка имеет крупнозернистое строение, так как при указанных температурах зерно успевает сильно вырасти, а последующая перекристаллизация при охлаждении не дает его заметного измельчения. Феррит окружает укрупненные перлитные зерна своеобразной каймой, при этом может наблюдаться видманштеттова структура. Участок перегрева отличается ухудшенными механическими свойствами, поэтому, чем данный участок меньше, тем выше качество сварного соединения.

Участок нормализации 3 лежит в тех областях металла, которые нагреваются до максимальных температур. При этом зерно аустенита не успевает заметно вырасти, так как длительность пребывания металла при этих температурах невелика. Последующая перекристаллизация при охлаждении металла приводит к получению мелкой равноосной структуры. Металл этого участка имеет самые высокие механические свойства.

Участок неполной перекристаллизации 4 наблюдается в области нагрева металла до максимальных температур (между фазовыми точками). Протекающие здесь превращения таковы: при достижении металлом в процессе нагрева температуры, соответствующей точке, происходит эвтектоидное превращение, т. е. перлит переходит в аустенит и затем феррит начинает растворяться в аустените. Каждой температуре, лежащей выше, отвечает какое-то количество феррита, растворившегося в аустените, и только в полоске металла, примыкающего к участку нормализации, где будет достигнута температура точки A_3 , в аустените растворится весь феррит. В интервале температур, между фазовыми точками, часть феррита, не растворенная в аустените, сохранит прежние размеры зерен. А феррит, растворенный в аустените, при последующем охлаждении металла будет выделяться из аустенита и образовывать несколько новых зерен феррита. Закончится вторичная кристаллизация эвтектоидным превращением оставшегося аустенита в перлит.

Конечная структура металла на этом участке – крупные зерна феррита, не прошедшие перекристаллизацию, и расположенные вокруг них колонии мелких зерен феррита и перлита, образовавшихся в результате перекристаллизации. Механические свойства этого участка хуже, чем свойства участка нормализации.

При сварке металла, подвергнутого холодной обработке давлением, наблюдается *участок рекристаллизации 5*. Максимальная температура нагрева металла находится в пределах 500 °С. При этом протекает рекристаллизация зерен феррита, т.е. рост этих зерен из их раздробленных частей, полученных при пластической деформации металла. Рост возможен только за счет перехода атомов железа из решетки одного зерна в соседнюю решетку, обладающую меньшей свободной энергией. Протекающая в таком металле рекристаллизация возвращает деформируемому металлу прежние механические свойства. Структура участка рекристаллизации – равноосные зерна феррита и перлита.

Участок синеломкости 6 нагревается до ~ 200–500°С. Данный участок характеризуется снижением пластических свойств без видимых изменений структуры. Явление синеломкости объясняют выделением из твердого раствора субмикроскопических частиц различных примесей, располагающихся по границам зерен.

3.3. Микроструктура чугунов

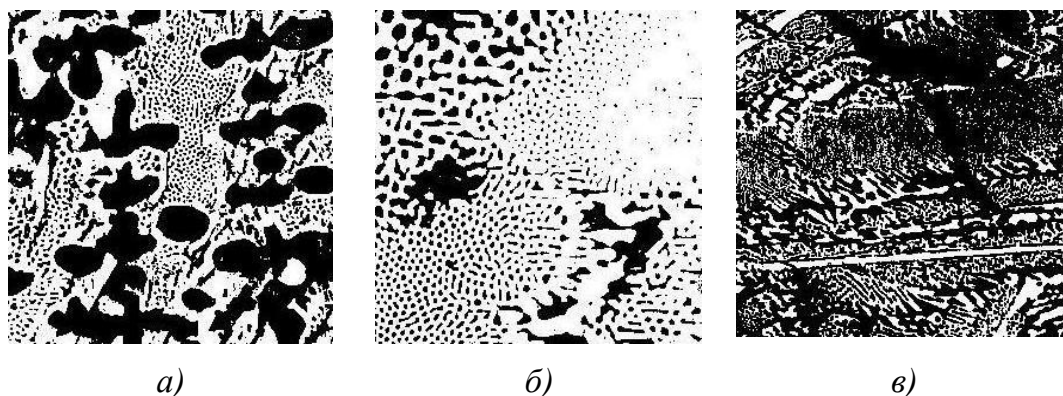
Чугуны являются железоуглеродистыми сплавами, содержащими более 2,14 % углерода. Присутствие эвтектики в структуре чугунов обуславливает высокие литейные свойства. Их используют для изготовления отливок сложной формы при отсутствии жестких требований по массе и габаритам детали.

В зависимости от формы, в которой присутствует углерод, различают белые, серые, ковкие, высокопрочные чугуны и чугуны с вермикулярным графитом.

В белых чугунах весь углерод находится в связанном виде в виде цементита. Название «белый» получил из-за матово-белого цвета излома. При кристаллизации белых чугунов образуется эвтектическая смесь аустенита и цементита – ледебурит, который образуется при температуре 1147 °С. При 727 °С происходит превращение аустенита в перлит, поэтому ниже 727 °С ледебурит представляет собой эвтектическую смесь перлита и цементита. При нормальной температуре фазовый состав белого чугуна – феррит и цементит.

По содержанию углерода согласно диаграммы Fe-Fe₃C различают доэвтектические, эвтектические и заэвтектические белые чугуны.

Доэвтектические белые чугуны содержат 2,14 – 4,3 % углерода, они имеют структуру, состоящую из перлита, вторичного цементита и ледебурита (рис.3.5). Количество ледебурита в доэвтектическом белом чугуне увеличивается с повышением содержания углерода. Эвтектический белый чугун содержит 4,3 % углерода и состоит только из ледебурита. В микроструктуре заэвтектических белых чугунов (больше 4,3% углерода) кроме ледебурита видны крупные пластины первичного цементита, количество которого увеличивается с повышением содержания углерода.



*Рис. 3.5. Микроструктура белых чугунов
а – доэвтектический; б – эвтектический;
в – заэвтектический*

Белые чугуны отличаются высокой твердостью и хрупкостью, низкой прочностью и трудоемкостью механической обработки. Из них изготавливают тормозные колодки, прокатные валки и другие детали, работающие в условиях износа.

В промышленности широкое применение получили серые, ковкие и высокопрочные чугуны, в которых большая часть или весь углерод находится в свободном состоянии в виде графита (рис. 3.6). Микроструктура таких чугунов состоит из металлической основы и графитовых включений. Чем меньше в металлической основе феррита, тем выше прочность чугунов. Хрупкие включения графита нарушают сплошность металлической основы, их можно расценивать, как пустоты и трещины. Включения графита играют роль концентратора внутренних напряжений, следовательно работа удара близка к нулю. Чем больший объем занимают включения графита, тем ниже механические свойства. Свойства этих чугунов будут зависеть не только от количества графитовых включений, но и от их формы и расположения.

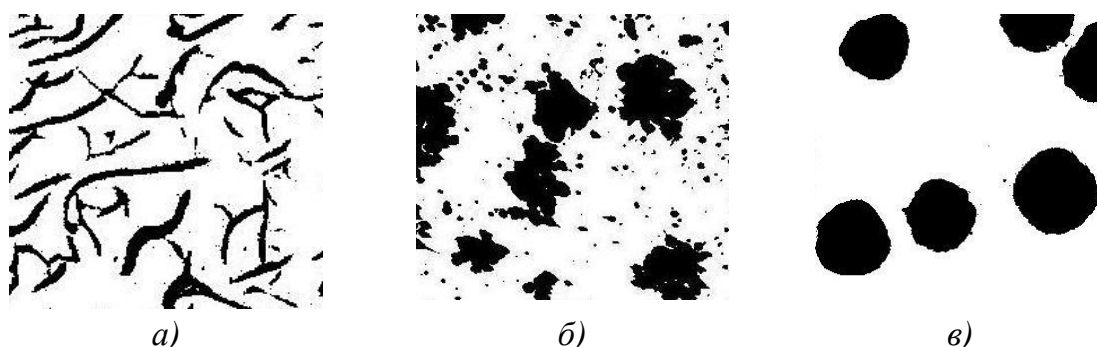


Рис. 3.6. Микроструктура чугунов:

а – серый чугун; б – ковкий чугун; в – высокопрочный чугун

Наличие графита снижает твердость и улучшает обрабатываемость резанием, делая стружку ломкой. Также графит повышает износостойкость и обеспечивает высокие антифрикционные свойства из-за низкого коэффициента трения вследствие собственного «смазывающего» действия и повышения прочности пленки смазывающего материала.

Серыми называются чугуны с пластинчатым графитом (рис. 3.6, а). Такое название они получили по виду излома, который имеет темно-серый цвет. Серые чугуны получают при медленном охлаждении и

повышенном содержании кремния. Прочность таких чугунов на растяжение находится в пределах 100 – 350 МПа (табл. 3.1 [22, с. 232]).

Таблица 3.1

Механические свойства и химический состав (%) серых чугунов

Марка чугуна	$\sigma_{вр}$, МПа, не менее	Твердость НВ, не более	С	Si	Mn	Р	С
						Не более	
СЧ10	100	190	3,5 – 3,7	2,2 – 2,6	0,5 – 0,8	0,3	0,15
СЧ15	150	210	3,5 – 3,7	2,0 – 2,4	0,5 – 0,8	0,2	0,15
СЧ20	200	230	3,3 – 3,5	1,4 – 2,4	0,7 – 1,0	0,2	0,15
СЧ25	250	245	3,2 – 3,4	1,4 – 2,4	0,7 – 1,0	0,2	0,15
СЧ30	300	260	3,0 – 3,2	1,3 – 1,9	0,7 – 1,0	0,2	0,12
СЧ35	350	275	2,9 – 3,0	1,2 – 1,5	0,7 – 1,1	0,2	0,12

В зависимости от распада цементита различают ферритные, феррито-перлитные и перлитные серые чугуны (рис. 3.7).

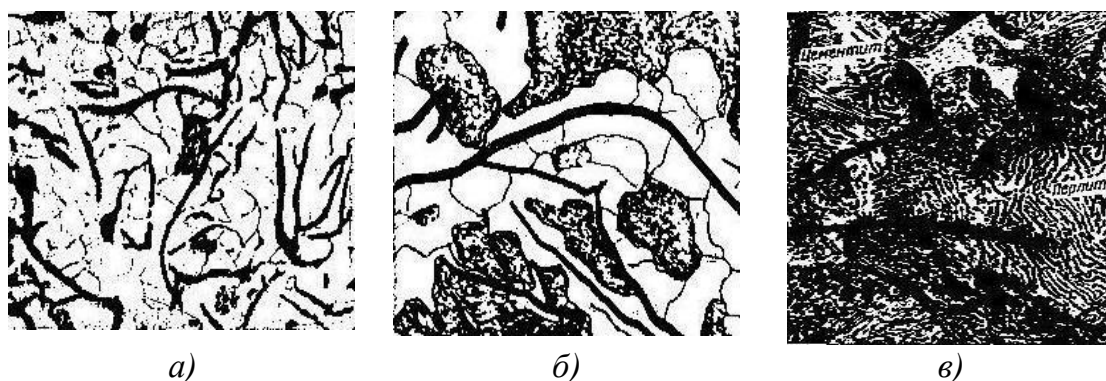


Рис. 3.7. Микроструктура серых чугунов:

- а – серый ферритный чугун;*
- б – серый феррито-перлитный чугун;*
- в – серый перлитный чугун*

Чем выше содержание углерода, тем больше графитовых включений и тем ниже механические свойства. В следствие этого максимальное количество углерода ограничивается пределами доэвтектической концентрации.

Серый перлитный чугун образуется, когда графитизации подвергается весь цементит, входящий в состав ледебурита, и вторичный цементит. Структура такого чугуна после окончательных превращений – перлит с пластинчатым графитом.

Серый ферритный чугун получается при полном распаде цементита, входящего в состав ледебурита, перлита и структурно свободного цементита. Структура данного чугуна – феррит и пластинчатый графит.

Серый феррито-перлитный чугун характеризуется меньшей степенью графитизации, в процессе которой происходит распад цементита, входящего в состав ледебурита, вторичного цементита и цементита, входящего в состав перлита, и образуется структурно свободный перлит, освобождающийся из перлита. Структура чугуна – феррит, перлит и пластинчатый графит.

Иногда в структуре чугунов наряду с пластинчатым графитом имеется ледебурит. Такой чугун серо-белый в изломе называется *половинчатым*. Структура – перлит, ледебурит и пластинчатый графит.

Пластинки графита уменьшают временное сопротивление на растяжение и значительно снижают пластичность. Наименьшей прочностью обладают ферритный серый чугун. Графит мало влияет на снижение временного сопротивления при сжатии. Именно поэтому чугун рекомендуется использовать для деталей, работающих на сжатие.

Серый чугун имеет высокие литейные свойства, менее хрупок по сравнению с белым чугуном, обладает хорошими антифрикционными свойствами и обрабатываемостью резанием.

Ковкие чугуны получают из белого чугуна при высоких температурах в процессе специального графитизирующего отжига (900 – 1000 °С) отливки – томления. При этом цементит распадается и образуется графит хлопьевидной формы. Такой графит по сравнению с пластинчатым значительно меньше снижает прочность и пластичность металлической основы, вследствие этого ковкие чугуны по сравнению с серыми имеют более высокую прочность при растяжении и пластичность (2 – 15 %).

В зависимости от степени распада цементита при отжиге ковкие чугуны подразделяют на ферритные и перлитные, а также на феррито-перлитные (рис. 3.8).

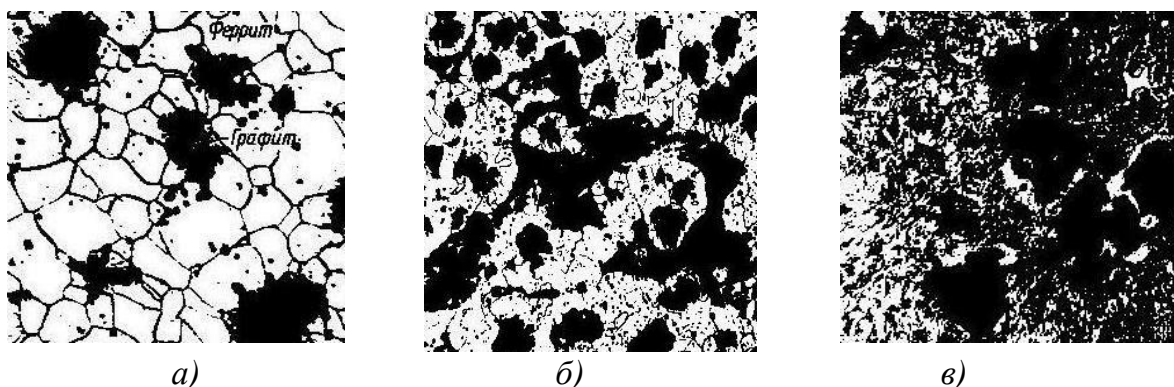


Рис. 3.8. Микроструктура ковких чугунов:

- а* – ковкий ферритный чугун;
б – ковкий феррито-перлитный чугун;
в – ковкий перлитный чугун

Ферритный ковкий чугун имеет структуру, состоящую из феррита и включений хлопьевидного графита, перлитный ковкий чугун – из перлита и включений хлопьевидного графита.

Прочность при растяжении ковкого чугуна может меняться от 300 до 800 МПа. В табл. 3.2 приведены механические свойства и химический состав ковких чугунов [22, с. 235].

Таблица 3.2

Механические свойства и химический состав (%) ковких чугунов

Марка чугуна	$\sigma_{вр}$, МПа	δ , %	Твердость НВ	C	Si	Mn	P	S
	Не более						Не более	
Ферритные чугуны								
КЧ33-8	323	8	100 – 163	2,6 – 2,9	1,0 – 1,6	0,4 – 0,6	0,18	0,20
КЧ37-12	362	12	110 – 163	2,4 – 2,7	1,2 – 1,4	0,2 – 0,4	0,12	0,06
Перлитные чугуны								
КЧ55-4	539	4	192 – 241	2,5 – 2,8	1,1 – 1,3	0,3 – 1,0	1,10	0,20
КЧ65-3	637	3	212 – 269	2,4 – 2,7	1,2 – 1,4	0,3 – 1,0	0,10	0,06

Из ковких чугунов изготавливают детали высокой прочности, работающие в условиях повышенного износа, способные воспринимать ударные и знакопеременные нагрузки.

Высокопрочными чугунами называются чугуны с включениями графита шаровидной формы, их получают при модифицировании

серых чугунов. Перед разливкой в чугун добавляют небольшое количество магния или церия (в количестве 0,03 – 0,08 % от массы обрабатываемого чугуна). Шаровидный графит менее сильный концентратор напряжений по сравнению с пластинчатым, что меньше ослабляет металлическую основу (рис. 3.6, в) и обеспечивает более высокие механические свойства. Прочность этого чугуна $\sigma_{вр} = 350 - 1000$ МПа.

Механические свойства высокопрочных чугунов приведены в табл. 3.3 [22, с. 235].

Таблица 3.3

Механические свойства высокопрочных чугунов

Марка чугуна	$\sigma_{вр}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	Твердость НВ
	Не менее			
ВЧ35	350	220	22	140 – 170
ВЧ40	400	250	15	140 – 202
ВЧ45	450	310	10	140 – 225
ВЧ50	500	320	7	153 – 345
ВЧ60	600	370	3	192 – 277
ВЧ70	700	420	2	228 – 302
ВЧ80	800	480	2	248 – 351
ВЧ100	1000	700	2	270 – 360

Из высокопрочных чугунов изготавливают ответственные детали, например, коленчатые валы, прокатные валки, зубчатые колеса и т.п.

Для повышения механических свойств отливки, изготовленные из высокопрочных чугунов могут подвергаться термической обработке: для увеличения прочности проводят закалку и отпуск при 500-600⁰С, для повышения пластичности – отжиг, способствующий сфероидизации перлита.

Наряду с шаровидным графитом высокопрочные чугуны могут содержать графит *вермикулярной* формы (рис. 3.9) в виде изогнутых лепестков, размеры которых меньше в сравнении с пластинами графита серых чугунов. Вермикулярный графит формируется под действием комплексного модификатора, который содержит магний и малые добавки Се и Те.

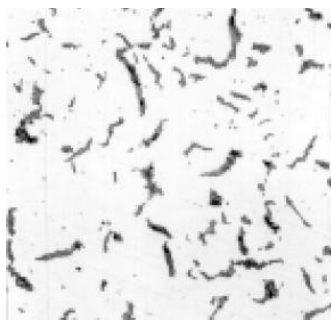


Рис. 3.9. Микроструктура чугуна с вермикулярной формой графита

По механическим свойствам чугуны с вермикулярным графитом являются переходной формой от пластинчатого к шарообразному графиту. Такой чугун применяют для изготовления деталей, которые подвергаются циклическим нагрузкам и частым теплосменам, например, поршни, гильзы и т.п.

Контрольные вопросы

1. В чем различие отжига I и II рода?
2. Как влияет отжиг на структуру и свойства сталей?
3. Что такое нормализация?
4. Какую закалку необходимо проводить для доэвтектоидных сталей?
5. Почему в результате полной закалки заэвтектоидных сталей наблюдается снижение механических свойств?
6. В чем заключаются металлографические исследования сварных швов?
7. Какова структура металла в зоне перегрева?
8. Что представляет собой в зоне термического влияния участок синеломкости?
9. В каком виде углерод находится в чугунах?
10. Что представляют собой белые чугуны? Почему они так называются?
11. Какой из чугунов прочнее серый или ковкий?
12. Можно ли обрабатывать давлением ковкие чугуны?

ГЛАВА 4. МЕТАЛЛОГРАФИЯ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

4.1. Микроструктура алюминия и его сплавов

Алюминий – парамагнитный легкий металл ($2,7 \text{ г/см}^3$) серебристо-белого цвета. Температура плавления 660°C . Алюминий кристаллизуется в гранецентрированную кубическую решетку с периодом $a = 0,4041 \text{ нм}$. Алюминий обладает хорошими теплопроводностью и электрической проводимостью, высокой коррозионной стойкостью вследствие образования на его поверхности тонкой прочной пленки Al_2O_3 . Чем чище алюминий, тем выше его коррозионная стойкость.

Оксидная пленка защищает алюминий от дальнейшего взаимодействия с окружающей средой даже в условиях чрезвычайно влажного климата и морской воды. Окись алюминия имеет удельный объем, близкий к удельному объему алюминия, поэтому не происходит ее коррозионное растрескивание. Алюминий устойчив в тех средах, которые не разрушают защитную оксидную пленку.

При обычных температурах алюминий не взаимодействует с водой, парами воды, CO , CO_2 , лишь при достаточно высоких температурах он реагирует с ними. Скорость коррозии алюминия резко возрастает в присутствии в воде примесей щелочей, солей ртути, меди и т.п.

Технический алюминий специально не легируют. Железо и кремний являются постоянными примесями, которые практически нерастворимы в алюминии. Даже при незначительном содержании железа, образуется эвтектика $\text{Al}+\text{Al}_3\text{Fe}$. При одновременном содержании железа и кремния появляется тройное химическое соединение Al-Fe-Si . Данные соединения выделяются по границам зерен, что снижает пластичность алюминия.

Сплавы на основе алюминия отличаются высокими механическими свойствами при малой плотности, что позволяет получить значительную удельную прочность. Количество легирующих элементов и их сочетание зависит от назначения сплава.

Алюминиевые сплавы классифицируют по

- *технологии изготовления* (литейные, деформируемые и спеченные (порошковые)),
- *способности к термической обработке* (упрочняемые и неупрочняемые термической обработкой),
- *свойствам* (сплавы повышенной пластичности, низкой прочности, нормальной прочности, высокопрочные, жаропрочные и др.).

Свойства деформированных полуфабрикатов во многом зависят от строения и свойств слитка. При макроисследованиях легко выявляется дендритное строение слитка. Внутреннее строение зерна определяется не только формой и размерами первично выкристаллизовавшихся ветвей дендритов, но формой, размерами и расположением интерметаллидных включений. Чем тоньше ветви и мельче интерметаллиды, тем тоньше внутреннее строение и тем выше прочность и пластичность сплава.

В производственных условиях при кристаллизации слитков и отливок из алюминиевых сплавов образуется неравновесная литая структура, которая может иметь следующие особенности:

- неравномерное распределение примесей и легирующих элементов по объему дендритов;
- наличие фаз, которые не должны быть при равновесной кристаллизации, например, фазы, входящие в неравновесные эвтектики и др.;
- фазы, взаимодействующие с алюминием по эвтектической реакции, располагаются по границам дендритных ячеек, а фазы, взаимодействующие с алюминием по перитектической реакции – в центре зерна.

Для обеспечения хороших литейных свойств необходим узкий интервал кристаллизации. Высокими литейными свойствами обладают сплавы, имеющие эвтектическую структуру. Эвтектика образуется в сплавах, в которых содержание легирующих элементов превышает их предельную растворимость в алюминии. Именно поэтому содержание легирующих элементов в литейных сплавах выше, чем в деформируемых.

Наиболее распространенными сплавами являются сплавы алюминия с кремнием (4...13 %, иногда до 23 % Si) – **силумины**, которые могут дополнительно легировать небольшим количеством меди, цинка, магния, марганца, титана.

Сплавы, содержащие до 11,3 % Si, являются доэвтектическими и имеют структуру из первичных кристаллов α -раствора (кремния в алюминии) и эвтектики ($\alpha + \text{Si}$), рис. 4.1. При более высокой концентрации кремния (заэвтектические сплавы) в структуре сплавов кроме эвтектики присутствуют первичные кристаллы кремния в виде пластинок.

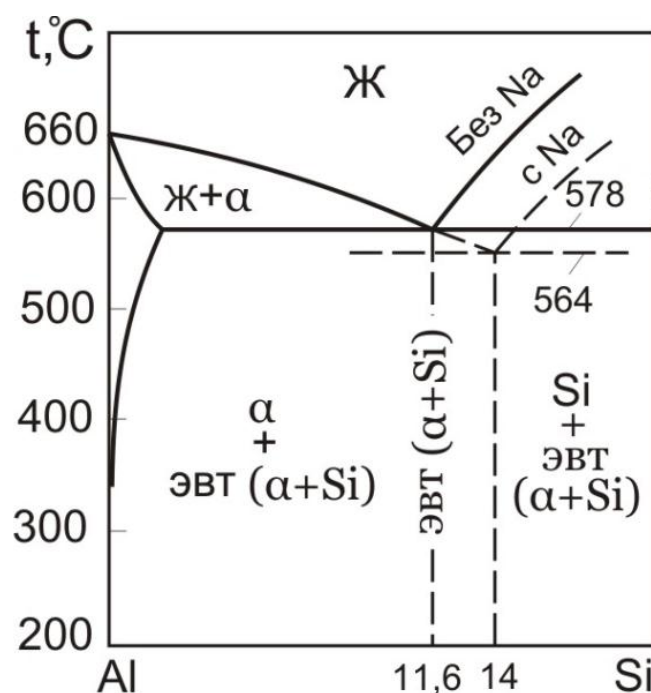


Рис. 4.1. Диаграмма состояния сплавов Al – Si

Химический состав и свойства наиболее применяемых литейных алюминиевых сплавов приведены в табл. 4.1 [22, с. 496].

Таблица 4.1

Химический состав и свойства литейных алюминиевых сплавов

Марка сплава	Содержание элементов, %				Режим термообработки	Механические свойства		
	Cu	Mg	Mn	Прочие		σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
АК12 (АЛ2)	–	–	–	10 – 13 Si	Литье в землю	180	80	6
					Литье в кокиль	220	90	5
АК9 (АЛ4)	–	0,17 – 0,3	0,2 – 0,5	8 – 10 Si	Литье в землю (закалка – старение)	260	200	4
АМ5 (АЛ19)	4,5 – 5,3	–	0,6 – 1,0	0,15 – 0,35 Ti	Литье в землю (закалка – старение)	360	250	3

Для измельчения зерна и улучшения механических свойств силумины обычно модифицируют натрием, который в виде хлористых и фтористых солей (NaCl и NaF) вводят в жидкий сплав в виде 2 – 3 % от массы сплава. Натрий сдвигает эвтектическую точку в системе Al – Si в сторону больших содержаний кремния.

Обычный силумин содержит 12 – 13 % Si и по структуре является заэвтектическим. Однако, если перед самой отливкой внести в такой сплав модификаторы, то происходит изменение структуры, и сплав становится доэвтектическим. При модифицировании температура выделения кремния и кристаллизации эвтектики понижается. Так как кристаллизация происходит при более низких температурах, следовательно, продукты кристаллизации становятся более мелкозернистыми. Измельчение структуры и отсутствие первичных выделений хрупкого кремния улучшают механические свойства.

При производстве полуфабрикатов из алюминиевых сплавов применяют различные способы горячей и холодной обработки давлением. При обработке давлением изменяется не только форма заготовки, но также существенно изменяется структура материала.

Деформируемые алюминиевые сплавы подразделяются на неупрочняемые и упрочняемые термической обработкой. Химический состав и свойства наиболее применяемых деформируемых алюминиевых сплавов приведены в табл. 4.2 [22, с. 496].

Деформируемые сплавы (Al-Mn и Al-Mg), неупрочняемые термической обработкой, обладают сравнительно низкой себестоимостью, однако имеют более высокую пластичность и достаточную коррозионную стойкость. Применяются такие сплавы в отожженном состоянии или упрочняются холодной пластической деформацией.

Таблица 4.2

Химический состав и свойства деформируемых
алюминиевых сплавов

Марка сплава	Содержание элементов, %				Режим термообработки	Механические свойства		
	Cu	Mg	Mn	Прочие		$\sigma_{\text{в}}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
Деформируемые сплавы, не упрочняемые термической обработкой								
АМц	0,1	0,2	1,0 – 1,6	–	Отжиг	130	50	20
АМг2	0,1	1,8 – 2,6	0,2 – 0,6	–	Отжиг	190	100	23
АМг5	0,1	5,8 – 6,8	0,5 – 0,8	–	Отжиг	340	170	20
Деформируемые сплавы, упрочняемые термической обработкой								
Д1	3,8 – 4,8	0,4 – 0,8	0,4 – 0,8	–	Закалка + старение	400	240	20
Д16	3,8 – 4,9	1,2 – 1,8	0,3 – 0,9	–	Закалка + старение	440	330	18
В95	1,4 – 2,0	1,8 – 2,8	0,2 – 0,6	0,01 – 0,25 Cr 5 – 7 Zn	Закалка + старение	540	470	10
В96	2,0 – 2,6	2,3 – 3,0	0,3 – 0,8	8 – 9 Zn	Закалка + старение	750	720	7
АК6	1,8 – 2,6	0,4 – 0,8	0,4 – 0,8	0,7 – 1,2 Si	Закалка + старение	400	300	12

Однако более широкое распространение получили деформируемые сплавы, упрочняемые термической обработкой – дуралюмины.

Дуралюминий (дуралюмин) – сплав шести компонентов: алюминия, меди, магния, марганца, кремния и железа. Указанный сплав относится к сплавам системы Al – Cu – Mg, кремний и железо являются постоянными примесями. Перечисленные компоненты образуют ряд растворимых соединений (CuAl_2 , фаза S, Mg_2Si) и нерастворимых (железистые и марганцовистые соединения). Структура дуралюмина в отожженном состоянии состоит из твердого раствора и вторичных включений различных интерметаллидных соединений.

На рис. 4.2 приведена диаграмма состояния сплавов Al – Cu.

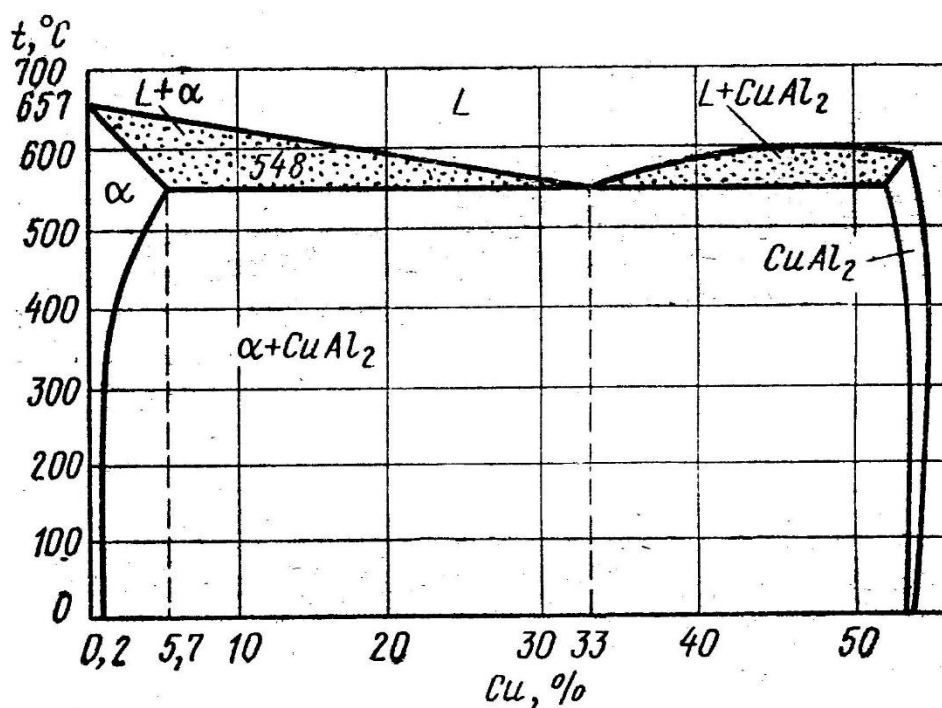


Рис. 4.2. Диаграмма состояния сплавов Al – Cu

Дуралюмин относится к сплавам, в которых не происходят полиморфные превращения при нагреве. Поэтому они могут подвергаться упрочняющей термической обработке, состоящей из закалки с последующим естественным и искусственным старением.

После закалки с оптимальных температур (500 °С) основное количество соединений CuAl_2 и Mg_2Si растворяется в алюминии, соединения железа не растворяются. Поэтому в закаленном состоянии структура состоит из алюминиевого твердого раствора (пересыщенного α -раствора) и нерастворимых включений соединений железа. Такая структура будет отличаться большей пластичностью, но меньшей твердостью и прочностью, т.е. в результате закалки дуралюмин становится мягким и пластичным. Старению предшествует 2 – 3-часовой инкубационный период, в течение которого сплав сохраняет высокую пластичность. Но полученный в результате закалки α -раствор является неустойчивым. Выдержка при комнатной температуре (естественное старение) или при искусственном повышении температуры (искусственное старение) приводит к изменениям в твердом растворе, ведущем в конечном итоге к выделению соединений (в сплавах, дополнительно легированных магнием, также выделяется S-фаза – CuMgAl_2).

Дуралюмины после закалки подвергают естественному старению, так как оно обеспечивает получение более высокой коррозионной стойкости, но естественное старение продолжается в течение 5 – 7 сут. Длительность старения значительно сокращается при увеличении температуры, температура искусственного старения различных алюминиевых сплавов колеблется от 20 до 200 °С.

4.2. Микроструктура меди и ее сплавов

Медь – тяжелый металл (8,94 г/см³) красного цвета. Температура плавления 1083 °С. Медь кристаллизуется в гранецентрированную кубическую решетку с периодом $a = 0,3608$ нм. После серебра медь обладает наибольшей теплопроводностью и электропроводностью, удельное электрическое сопротивление меди 0,0175 мкОм·м.

Важное значение имеет степень чистоты меди, так как даже мизерное количество некоторых примесей может существенно снизить электротехнические свойства, ухудшить ее технологические свойства.

Медь имеет высокую коррозионную стойкость в атмосферных условиях, пресной и морской воде, едких щелочах, органических кислотах и других агрессивных средах. Находясь на воздухе при наличии углекислого газа и влаги, медь медленно окисляется, покрываясь пленкой (патиной). Именно эта пленка предотвращает дальнейшую коррозию.

В качестве конструкционного материала чистая медь находит ограниченное применение из-за низкого значения предела текучести и высокой стоимости.

Сплавы на основе меди также устойчивы к коррозии, они обладают хорошими механическими, технологическими и антифрикционными свойствами, что позволяет их применять в качестве конструкционного материала.

Медные сплавы классифицируют по

- *химическому составу* (латуни, медно-никелевые сплавы, бронзы),
- *технологии изготовления* (литейные, деформируемые).

Латуни – сплавы меди с цинком содержат до 45 % цинка с небольшим количеством других компонентов.

В системе Cu-Zn образуется шесть твердых растворов: α , β , γ , δ , ϵ , η , но техническое применение имеют сплавы, имеющие структуры α -раствора и α + β -раствора (рис. 4.3).

Однофазная α -латунь представляет собой твердый раствор цинка в меди, α -фаза – светлая, состоящая из однородных зерен, что определяет ее высокую пластичность. При содержании более 39% цинка в структуре появляется хрупкая β -фаза (темная составляющая структуры), которая представляет собой твердый раствор на основе химического соединения CuZn. Такие латуни имеют двухфазную структуру (α + β -раствор).

Латуням присущи все положительные свойства меди (высокая электро- и теплопроводность, коррозионная стойкость, пластичность) при более высокой прочности и лучших технологических свойствах. Переход через границу однофазной области резко снижает пластичность.

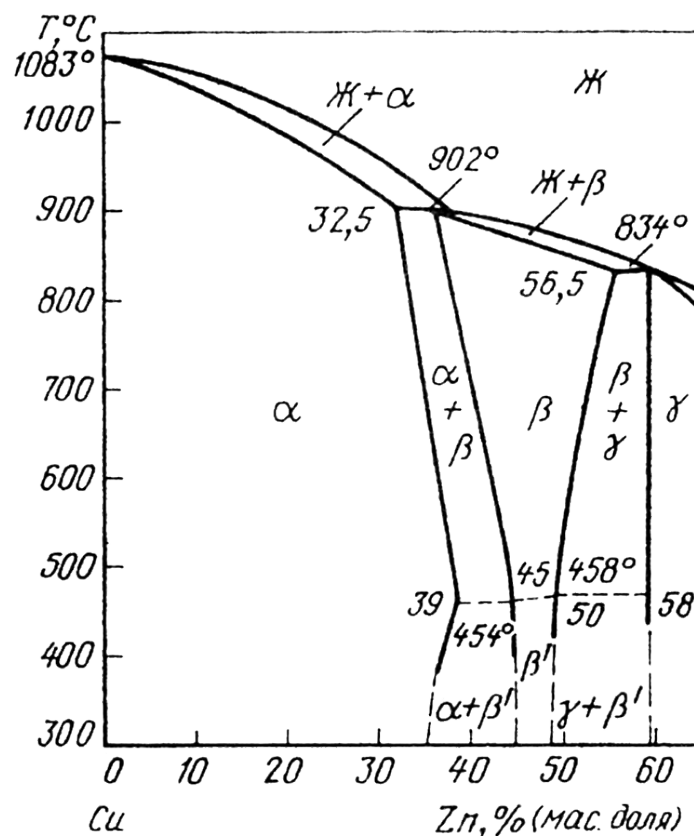


Рис. 4.3. Часть диаграмма состояния сплавов Cu-Zn

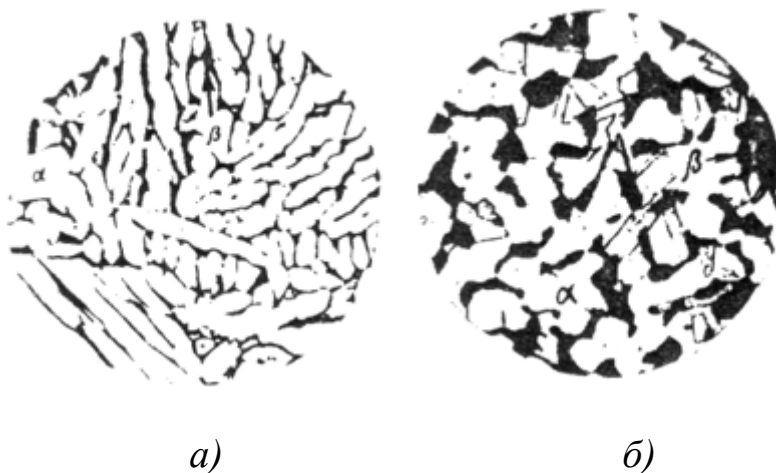
В зависимости от числа компонентов различают простые (двойные) и специальные (многокомпонентные) латуни.

Строение и свойства простых латуней зависят от содержания в них цинка.

Однофазные латуни (Л90, Л80, Л62) не упрочняются при термической обработке, такие латуни пластичны, хорошо обрабатываются давлением в горячем и холодном состояниях.

Двухфазные латуни (Л60, Л59, ЛЖМц59-1-1, ЛЦ23А6Ж3Мц2), обладают повышенной твердостью, хорошо обрабатываются давлением в горячем состоянии, но в холодном состоянии пластичность их невелика.

На рис. 4.4, а и б приведена микроструктура литейной латуни и латуни после деформирования.



*Рис. 4.4. Микроструктуры (х 100):
а – литейная латунь ($\alpha + \beta$);
б – латунь ($\alpha + \beta$) после деформирования;*

Для улучшения механических и технологических свойств, коррозионной стойкости латуни легируют Al, Ni, Sn, Mn, Pb и др.

Специальные латуни называют по основному дополнительному элементу: алюминиевые, кремнистые, марганцевые, никелевые, оловянные, свинцовые, они отличаются от простых специфичными свойствами. Например, свинец улучшает обрабатываемость резанием (ЛС60-1), олово повышает коррозионную стойкость (ЛО 62-1), кремний и алюминий повышают механические свойства (ЛК 80-3, ЛА77-2).

По технологическим признакам различают литейные и деформируемые латуни (табл. 4.3) [22, с. 524].

Литейные свойства латуней определяются взаимным расположением линий ликвидус и солидус. Благодаря узкому интервалу между этими линиями, литейные латуни мало склонны к ликвации, отличаются хорошей жидкотекучестью и склонностью к образованию концентрированной усадочной раковины.

Таблица 4.3

Химический состав и механические свойства некоторых марок латуней

Марка латуни	Структура	Содержание, %		$\sigma_{\text{в}}$, МПа	δ , %
		Cu	Легирующие элементы		
Деформируемые латуни					
Л90	α	88 – 91	–	260	45
Л80	α	79 – 81	–	320	52
Л62	$\alpha + \beta$	62 – 65	–	330	50
ЛС59-1	$\alpha + \beta$	57 – 60	0,8 – 1,9 Pb	400	45
ЛЖМц59-1-1	$\alpha + \beta$	57 – 60	0,6 – 1,2 Fe; 0,1 – 0,4 Al; 0,3 – 0,7 Sn; 0,5 – 0,8 Mn	450	50
ЛАЖ60-1-1	$\alpha + \beta$	58 – 61	0,75 – 1,5 Al; 0,75 – 1,5 Fe; 0,1 – 0,6 Mn	450	45
Литейные латуни					
ЛЦ16К4	$\alpha + \beta$	78 – 81	3,0 – 4,5 Si	300	15
ЛЦ40Мц3Ж	$\alpha + \beta$	53 – 58	3,0 – 4,0 Mn; 0,5 – 1,5 Fe	500	10
ЛЦ23А6Ж3Мц2	$\alpha + \beta$	64 – 68	4,0 – 7,0 Al; 2,0 – 4,0 Fe; 1,5 – 3,0 Mn	700	7

Медноникелевые сплавы выделяют в отдельную группу, они характеризуются хорошими механическими свойствами, коррозионной стойкостью, особыми электротехническими свойствами, хорошо обрабатываются давлением, как в горячем, так и в холодном состоянии.

Медноникелевые сплавы подразделяются на коррозионностойкие и электротехнические.

К коррозионностойким сплавам относятся мельхиоры, нейзильберы, куниали. К мельхиорам относятся двойные или более сложные сплавы на основе меди с основным легирующим элементом никелем (МН19, МНЖМц30-1-1). К нейзильберам относятся сплавы системы Cu-Ni-Zn, содержащие 5-35 % Ni и 13-45% Zn (МНЦ15-20). Поскольку мельхиоры и нейзильберы имеют однофазную структуру, они хорошо обрабатываются давлением. К куниалиям относятся сплавы тройной системы Cu-Ni-Al (МНА13-3, МНА6-1,5), которые упрочняются термической обработкой (закалка с 900-1000⁰С с последующим старением при 500-600⁰С) за счет дисперсных фаз Ni₃Al и NiAl.

Данные сплавы могут использоваться в качестве конструкционных (МН19, МНЦ15-20) и электротехнических (МНМц40-1,5) материалов.

Бронзы – это двойные и многокомпонентные сплавы меди с оловом, алюминием, кремнием, свинцом, бериллием (в настоящее время бронзами называют все сплавы меди, кроме латуней и медно-никелевых сплавов).

По химическому составу бронзы делятся на оловянные и безоловянные (специальные), по технологическим свойствам – на обрабатываемые давлением (деформируемые) и литейные. Кроме того, принято подразделять бронзы по главному легирующему элементу (алюминиевые, кремнистые, свинцовые и т.п.)

Сплавы меди с оловом (рис. 4.5) – *оловянные бронзы* (Бр010, БрО10Ф1) очень давно и широко применяются в промышленности благодаря высокой коррозионной стойкости и антифрикционным свойствам. Микроструктура литейной оловянной бронзы состоит из неоднородного твердого α -раствора (твердого раствора олова в меди) и эвтектоида $\alpha + \text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$. Темные участки неоднородного твердого α -раствора богаты медью, светлые – оловом, в эвтектоиде на светлом фоне соединения $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$ видны темные точечные включения α -фазы.

В виду высокой стоимости двойные бронзы применяются редко. Низкая жидкотекучесть, большая склонность к дендритной ликвации, рассеянная усадочная пористость обуславливается широким температурным интервалом кристаллизации.

Оловянные бронзы дополнительно легируют фосфором, цинком, свинцом, никелем. Фосфор улучшает жидкотекучесть и износостойкость, увеличение которой достигается за счет появления в структуре твердых включений Cu_3P . Обычное содержание цинка в таких бронзах 2-15%, при таком количестве цинк полностью растворяется в α -растворе, что приводит к увеличению механических свойств. За счет уменьшения интервала кристаллизации цинк улучшает жидкотекучесть, плотность отливок и свариваемость. Свинец улучшает обработку резанием таких бронз и их антифрикционные свойства. Неболь-

шие добавки никеля (1-1,5%) улучшают жидкотекучесть сплава, приводят к измельчению зерна, кроме того присутствие никеля увеличивает коррозионную стойкость.

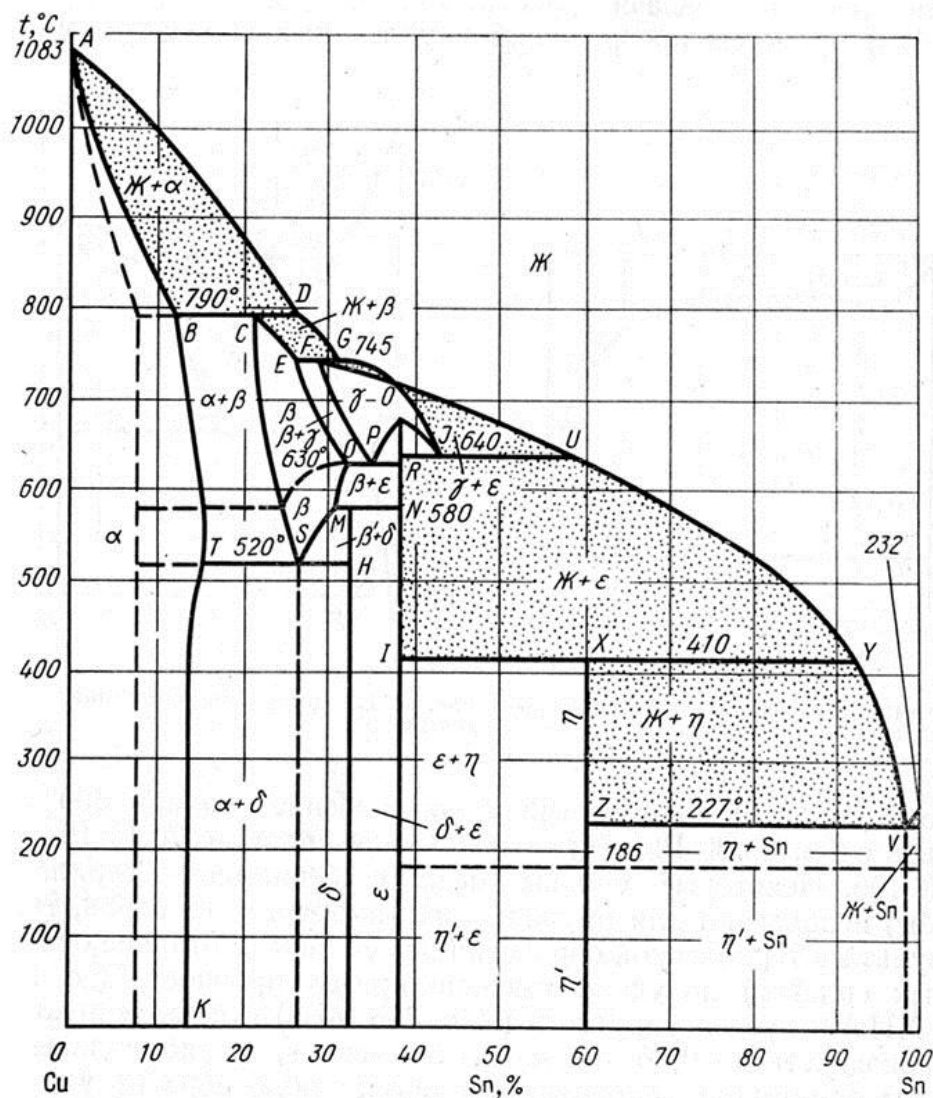


Рис. 4.5. Диаграмма состояния сплавов Cu-Sn

Различают деформируемые и литейные бронзы. На рис. 4.6 приведена микроструктура литейной бронзы и бронзы после деформирования и рекристаллизации

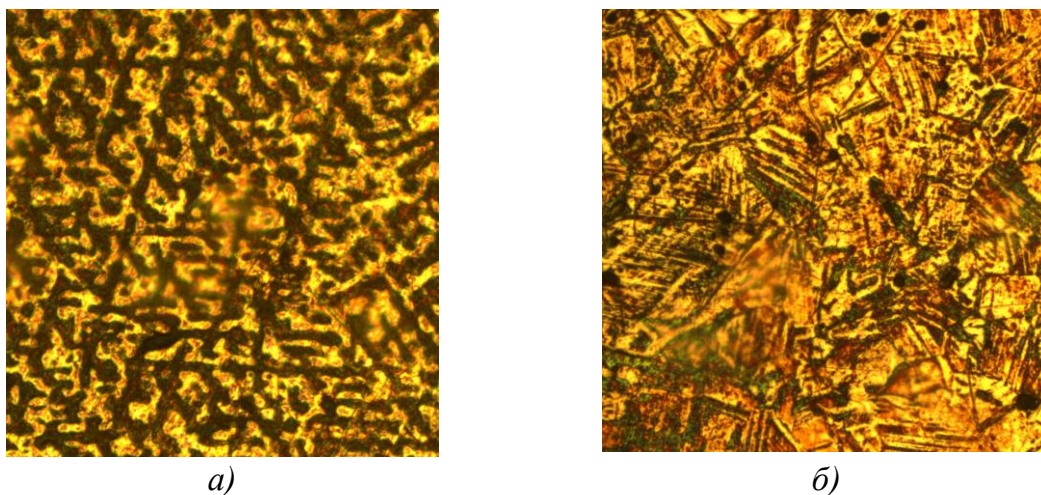


Рис. 4.6. Микроструктуры (х 100):
а – литейная бронза;
б – бронза после деформирования и рекристаллизации

Химический состав и механические свойства некоторых марок оловянных бронз представлены в табл. 4.4 [22, с. 527].

Таблица 4.4

Химический состав и механические свойства
некоторых марок оловянных бронз

Марка сплава	Содержание, %				σ _в , МПа	δ, %
	Sn	Zn	Pb	P		
Бронзы, обрабатываемые давлением						
БрОФ4-0,25	3,5 – 4,0	–	–	0,2 – 0,3	340	52
БрОФ6,5-0,15	6 – 7	–	–	0,1 – 0,25	400	65
БрОЦ4-3	3,5 – 4,0	2,7 – 3,3	–	–	350	40
Литейные бронзы						
БрО10Ф1	9 – 11	–	–	0,4 – 1,1	250	7
Брo5Ц5С5	4 – 6	4 – 6	4 – 6	–	180	4
БрО6Ц6С2	5 – 7	5 – 7	1 – 3	–	–	–

В последнее время широко применяются безоловянные бронзы (табл. 4.5 [22, с. 530]).

Таблица 4.5

Механические свойства и назначение безоловянных бронз

Марка бронзы	Содержание, %	Механические свойства		Назначение
		$\sigma_{\text{в}}$, МПа	δ , %	
Алюминиевые бронзы				
БрАЖ9-4	9 Al, 4 Fe	600	40	Для изготовления проката, штампованных шестерен, втулок, труб Арматура, обоймы подшипников
БрАЖН10-4-4	10 Al, 4 Fe, 4 Ni	650	35	
БрА10ЖЗМц2	10 Al, 3 Fe, 2 Mn	390	10	
Кремнистая бронза				
БрКМц3-1	3Si, 2 Mn	380	35	Прутки, лента, проволока для пружин
Свинцовая бронза				
БрС30	30Pb	600	4	Антифрикционные детали
Бериллиевая бронза				
БрБ2	2Be	1200	4	Полосы, лента, прутки, проволока, пружины, мембраны, контакты

Алюминиевые бронзы обычно содержат не более 11 % алюминия (БрАЖ9-4, БрА10Ж3Мц2). Эти бронзы кристаллизуются в узком интервале температур, поэтому обладают высокой жидкотекучестью и дают концентрированную усадочную раковину.

Сплавы, содержащие до 9% алюминия, имеют однофазную структуру. При увеличении содержания алюминия более 9% в структуре образуется эвтектид $\alpha + \gamma_2$ (γ_2 – это электронное соединение $\text{Cu}_{32}\text{Al}_{19}$). Однофазные алюминиевые бронзы характеризуются высокой пластичностью, поэтому их используют для глубокой вытяжки. Двухфазные бронзы подвергают горячей обработке давлением, их используют для изготовления фасонных отливок. Двухфазные бронзы отличаются более высокой твердостью и прочностью. Их можно упрочнять термически, в результате закалки β -фаза претерпевает мартенситное превращение.

Для повышения механических свойств в алюминиевые бронзы добавляют железо и никель.

В отожженном состоянии бронзы очень пластичны. Для повышения твердости проводят термическую обработку, которая состоит из закалки с 900 °С в воду и отпуска 650 °С. После закалки они имеют игольчатую структуру, состоящую из зерен α - и β -твердых растворов. Алюминиевые бронзы имеют хорошие механические и высокие антифрикционные свойства.

Кремнистые бронзы обычно содержат до 3,0 % Si (БрКМцЗ-1 БрКН1-3). Двойные сплавы системы Cu-Si не применяют, их дополнительно легируют марганцем и никелем, что улучшает механические и коррозионные свойства таких бронз. При введении в сплавы Cu-Si менее 1,5% марганца упрочнение достигается в результате растворения марганца. При большем количестве марганца образуется фаза Mn_2Si . В системе Cu-Si-Ni никель проявляется в соединении Ni_2Si .

Кремнистые бронзы могут служить заменителем оловянных бронз, например, бронза БрКЦ4-4 может заменить более дорогостоящую бронзу БрОЦС5-5-5. Сравнительно небольшой интервал кристаллизации кремнистых бронз обеспечивает хорошие литейные свойства. Они уступают оловянным бронзам по величине усадки, однако обладают более высокими механическими и коррозионными свойствами.

Кремнистые бронзы превосходят алюминиевые бронзы и латуни в прочности и стойкости в щелочных средах, отличаются высокой упругостью, поэтому такие бронзы применяют для изготовления пружин и пружинистых элементов. Кремнистые бронзы легко обрабатываются давлением, резанием и свариваются.

Бериллиевые бронзы относятся к сплавам упрочняемым термической обработкой, они содержат 1,8 ... 2,5 % Be (БрБ2). Они характеризуются чрезвычайно высокими пределами упругости, текучести и прочности, твердостью, а также высокой электропроводностью, теплопроводностью, сопротивлением усталости и ползучести, износостойкостью и коррозионной стойкостью, поэтому бериллиевые бронзы широко применяются для изготовления упругих элементов ответственного назначения.

Для данных бронз характерной особенностью является переменная уменьшающаяся с понижением температуры зависимость растворимости бериллия в меди (рис. 4.7), т.е. они являются дисперсионно упрочняемыми сплавами.

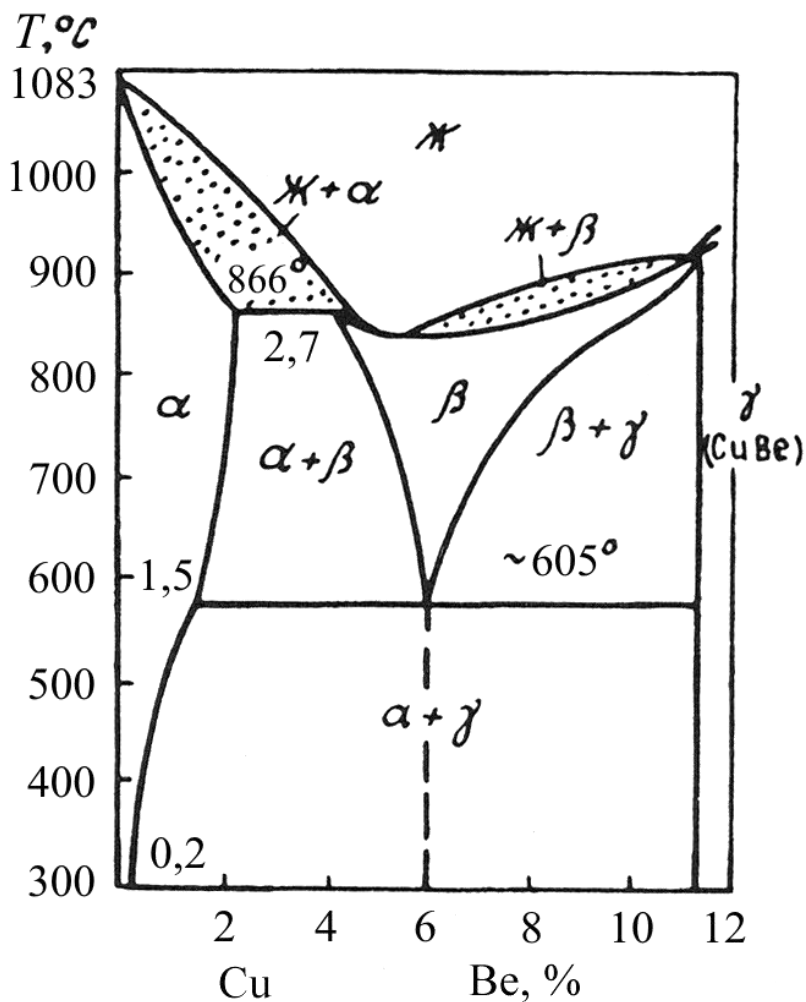


Рис.4.7. Часть диаграммы состояния медь-бериллий

Общепринятый диапазон температур нагрева под закалку 760-780 $^{\circ}\text{C}$, при этом скорость охлаждения бериллиевых бронз должна быть достаточно велика. Выше этих температур не следует нагревать из-за опасности роста зерна и ухудшения служебных характеристик. В закаленном состоянии бериллиевые бронзы отличаются высокой пластичностью и технологичностью. Это объясняется тем, что после закалки они имеют структуру пересыщенного α -раствора. Распад пересыщен-

ного α -раствора начинается с формирования тонкопластических образований по промежуточной γ' -фазы. Фаза γ' характеризуется тетрагональной объемно-центрированной решеткой с упорядоченным расположением атомов. По мере развития старения размеры выделений γ' -фазы увеличивается, а тетрагональность решетки уменьшается. Необходимо отметить, что на определенной стадии старения при повышенных температурах γ' -фаза превращается в стабильную γ -фазу с составом близким к CuBe.

Главным фактором, определяющим возникновение напряжений, является различие интенсивности объёмных изменений в поверхностных и срединных слоях детали уже в процессе закалки. Именно эта неоднородность оказывает влияние и на распад твёрдого раствора при старении, что сопровождается значительным объёмным эффектом, даже если деталь имеет небольшую толщину.

В ряде исследований отмечают, что наибольшее упрочнение при старении обеспечивают выделения γ' -фазы в форме пластинок толщиной 5-10 нм, что достигается в результате старения при 320-340⁰С в течение 2-5 часов.

Свинцовистые бронзы содержат 27... 33 % Pb (БрС30). Свинец практически не растворяется в жидкой меди, поэтому такие сплавы состоят из кристаллов свинца. Данная структура обеспечивает ее высокие антифрикционные свойств, что и определяет область применения свинцовистых бронз.

4.3. Микроструктура титана и его сплавов

Титан – металл серого цвета с невысокой плотностью (4,5 г/см³) и высокой температурой плавления (1668 °С). Титан имеет две полиморфные модификации: до 882 °С существует α -титан, который кристаллизуется в гексагональной решетке с периодами $a = 0,2951$ нм и $c = 0,4684$ нм, а при более высоких температурах – β -титан, имеющий ОЦК-решетку с периодами $a = 0,3282$ нм.

Высокая коррозионная и химическая стойкость титана обусловлена прочной защитной пленкой TiO_2 , сохраняющаяся в широком интервале температур от -250 до 550°C .

Титан и его сплавы благодаря высокой удельной прочности и хорошей коррозионной стойкости применяют в разных отраслях промышленности, особенно в авиа- и ракетостроении, судостроении и химической промышленности. Сплавы на основе титана получили значительно большее применение, чем технический титан.

Титановые сплавы классифицируются по способу производства, структуре, механическим свойствам и способности упрочняться термической обработкой.

Титановые сплавы классифицируются по:

- *способу производства* (деформируемые и литейные);
- *механическим свойствам* (нормальной прочности, высокопрочные, жаропрочные и повышенной пластичности);
- *способности упрочняться термической обработкой* (упрочняемые и неупрочняемые);
- *структуре*.

подавляющее большинство металлов образуют с титаном диаграммы состояния с эвтектоидным превращением. Все легирующие элементы по влиянию на полиморфизм титана можно разделить на три группы:

1) α -стабилизаторы (алюминий, галлий, индий, углерод, азот, кислород);

2) β -стабилизаторы (молибден, ванадий, хром, марганец, железо, медь, никель, кобальт);

3) нейтральные элементы (олово, цирконий, германий).

В соответствии со структурой различают:

α -сплавы (BT5, BT5-1), имеющие структуру твердого раствора легирующих элементов в α -титане. Основным легирующим элементом в таких сплавах является алюминий, в них также могут содержаться нейтральные элементы (Sn, Zr) и небольшое количество β -стабилизаторов (Mn, Fe, Cr, Mo);

псевдо- α -сплавы (OT4, BT20), имеющие структуру α -раствора с

небольшим количеством β -фазы (1 – 4 %) вследствие легирования β -стабилизаторами (Mn, Mo, V и др.);

($\alpha+\beta$)-сплавы (BT6, BT14), состоящие из α и β -растворов;

псевдо- β -сплавы (BT15, BT32), имеющие структуру β -раствора с небольшим количеством α -фазы;

β -сплавы (4201), состоящие из β -растворов.

Сплавы, имеющие структуру α -раствора, характеризуются невысокой прочностью и низкой технологичностью, они не упрочняются термически. Однако такие сплавы отличаются хорошей свариваемостью и высокими механическими свойствами при криогенных температурах.

Псевдо- α -сплавы сохраняют положительные свойства α -сплавов. Присутствие в них небольшого количества β -фаз увеличивает их технологическую пластичность, такие сплавы хорошо обрабатываются давлением.

Двухфазные ($\alpha+\beta$)-сплавы обладают наилучшим сочетанием свойств. По структуре после закалки различают сплавы мартенситного и переходного классов. ($\alpha+\beta$)-Сплавы мартенситного класса менее легированы, содержание β -фазы в них не превышает 25%. Для ($\alpha+\beta$)-сплавов переходного класса характерно большее содержание β -фазы (50%), что обуславливает высокую прочность таких сплавов, как в отожженном, так и закаленном состояниях.

Псевдо- β -сплавы после закалки приобретают структуру метастабильной β -фазы. В таком состоянии имеют невысокую прочность. Однако они имеют достаточную пластичность, что обеспечивает хорошую обрабатываемость давлением.

Сплавы, имеющие структуру β -раствора, отличаются хорошей коррозионной стойкостью, но имеют ограниченное применение в виду большей себестоимости.

Титановые сплавы подвергают термической обработке – отжигу, закалке и старению, химико-термической обработке (азотированию, силицированию). Упрочняющая обработка, состоящая из закалки с последующим старением, применима только для ($\alpha + \beta$)-сплавов.

С целью повышения твердости, износостойкости и жаропрочности титановые сплавы могут подвергать азотированию. Азотирование проводят в газовой среде при температуре 900 °С, процесс длителен (до 50 ч). Для уменьшения хрупкости азотированного слоя заготовки подвергают вакуумному отжигу при 800 – 900 °С.

Преобразования при закалке и старении в титановых сплавах похожи на соответствующие превращения в сталях. Однако в титановых сплавах не происходит такого существенного упрочнения, как в сталях.

Состав и свойства некоторых титановых сплавов приведены в табл. 4.6 [1, с. 258].

Титановые сплавы обладают хорошими литейными свойствами, они отличаются высокой жидкотекучестью и плотностью отливок, а также малой склонностью к образованию горячих трещин. Однако литейные титановые сплавы склонны к поглощению газов, их отличает высокая активность при взаимодействии с формовочными материалами, поэтому их плавку ведут в среде нейтральных газов или в вакууме. Литейные титановые сплавы имеют более низкие механические свойства по сравнению с деформируемыми сплавами.

Контрольные вопросы

1. Какими свойствами обладают алюминий? Как классифицируют алюминиевые сплавы?
2. С какой целью проводят модифицирование силуминов? Как при этом изменяется их структура?
3. Какова термическая обработка дуралюминов?
4. Каким образом упрочняется дуралюмин? Как при этом изменяется структура?
5. Какими свойствами обладает медь?
6. Какие медные сплавы и их свойства вы знаете? Область применения медных сплавов.
7. Какими свойствами обладают титан? Как классифицируют титановые сплавы?

8. Какие элементы не влияют на полиморфизм титана?

9. Что такое титановые псевдо- α -сплавы?

Таблица 9.4

Химический состав и механические свойства некоторых
ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

Сплав	Химический состав, %				Механические свойства			
	Al	V	Mo	Прочие	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	KCU, МДж/м ²
α-сплавы								
BT5	4,5 – 6,2	1,2	0,9	0,3 Zr	700 – 950	650 – 850	12	0,4
BT5-1	4,3 – 6,0	1,0	–	2 – 3 Sn	700 – 950	650 – 850	12	0,45
псевдо-α-сплавы								
OT4-1	1,5 – 2,5	–	–	0,7 – 2 Mn	600 – 750	470 – 650	30	0,5
OT4	3,5 – 5,0	–	–	0,8 – 2 Mo	700 – 900	550 – 650	18	0,5
BT20	5,5 – 7,0	0,8 – 2,5	0,5 – 2,0	1,5 – 2,5 Zr	950 – 1150	950 – 1150	8	0,45
($\alpha + \beta$)-сплавы								
BT6	5,3 – 6,8	3,5 – 5,3	–	–	1100 – 1150	1000 – 1050	15	0,3
BT14	3,5 – 6,3	0,9 – 1,9	2,5 – 3,8	0,3Zr	1150 – 1400	1080 – 1300	8	0,5
BT16	1,6 – 3,8	4,0 – 5,0	4,5 – 5,5	0,8 – 1,2 Cr	1250 – 1450	1100 – 1200	5	0,5
BT22	4,4 – 5,7	4,0 – 5,5	4,0 – 5,5	0,8 – 1,2 Cr	1100 – 1200	–	9	0,4

Примечание. Свойства сплавов BT6, BT14, BT22 приведены после закалки и старения; остальных – после отжига.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Реактивы для микроисследования структуры сплавов [4, с.58]

Наименование реактива	Состав реактива	Назначение и особенности применения
I. Реактивы для травления железа и его сплавов		
1. Для травления углеродистых, низколегированных сталей и чугуна		
1. Спиртовой раствор азотной кислоты (реактив Ржешотарского)	Азотная кислота 1-5 мл, этиловый или метиловый спирт 100 мл	Реактивы окрашивают перлит в темный цвет ^{*1} , выявляют границы зерен феррита, структуру мартенсита и продуктов отпуска
2. Спиртовой раствор пикриновой кислоты (реактив Ижевского)	Пикриновая кислота (кристаллическая) 3-5, этиловый или метиловый спирт 100 мл	Применяется также для выявления структуры азотированной и цементованной стали. С увеличением количества азотной кислоты в реактиве Ржешотарского возрастает скорость травления. Продолжительность травления от нескольких секунд до минут
3. Раствор азотной и пикриновой кислот	Азотная кислота 2-4 мл, пикриновая кислота 22 г, этиловый спирт 100мл	Для выявления границ зерен в закаленной стали ^{*2}
4. Раствор азотной и соляной кислоты	Азотная кислота 25 мл, соляная кислота 50 мл, двуххромовокислый калий 12 г, вода 25 мл	Для выявления величины зерен в закаленной стали. Травление в реактиве, выдержанном 24-48 ч; время травления 1-2 с
2. Для травления высоколегированных сталей и никелевых сплавов (№ 9 и № 10)		
5. Раствор азотной и соляной кислот в глицерине	Азотная кислота 10 мл, соляная кислота 20-30 мл, глицерин 30 мл	Для выявления структуры высокохромистой, быстрорежущей и аустенитной марганцовистой стали в закаленном состоянии рекомендуется производить попеременное травление и полирование

Наименование реактива	Состав реактива	Назначение и особенности применения
6. Царская водка	Соляная кислота 3 ч, азотная кислота 1 ч	Для выявления структуры нержавеющих сталей и никелевых сплавов. перед употреблением реактив надо выдержать 20-30 часов
7. Солянокислый раствор хлорного железа	Хлорное железо 5 г, соляная кислота 50 мл, вода 100 мл	Для исследования структуры высоконикелевой нержавеющей аустенитной стали
8. Раствор хромовой и соляной кислот	Соляная кислота 50 мл, хромовая кислота (10%-ная) 50 мл	Для выявления структуры термически обработанной аустенитной стали
9. Солянокислый раствор медного купороса (реактив Марбе)	Сернокислая медь 10 г, соляная кислота 50 мл, вода (или этиловый спирт) 50 мл	Для выявления структуры сложнолегированной аустенитной стали
10. Раствор хромпика в соляной и азотной кислотах	Соляная кислота 45 мл, азотная кислота 5 мл, двуххромовокислый калий 12 г	Для выявления структуры сплавов типа нимоник
3. Для выявления карбидов, фосфидов, вольфрамовидов		
11. Щелочной раствор пикрата натрия	Пикриновая кислота 2 г, едкий натр 25 г, вода 100 мл	Для выявления цементита, который окрашивается в темный цвет; карбиды хрома и вольфрама не окрашиваются. Реактив применяется в кипящем состоянии
12. Щелочной раствор красной кровяной соли (реактив Мурами)	Красная кровяная соль 10 г, едкий калий 10 г, вода 100 мл	Применяется в горячем состоянии для выявления хромистых карбидов, вольфрамовидов в быстрорежущей стали и других сталях. Этот же реактив выявляет фосфиды, в фосфидной эвтектике. Фосфид окрашивается в темный цвет

Наименование реактива	Состав реактива	Назначение и особенности применения
4. Для выявления линий напряжений		
13. Соляной раствор хлорной меди	Соляная кислота 40 мл, хлорная медь 5 г, вода 30 мл, этиловый спирт 25 мл	Для выявления напряжений и дисперсионного твердения стали. Реактив применяется на холоде. Время травления до 10 с
II. Реактивы для травления меди и медных сплавов		
14. Солянокислый раствор хлорного железа	Хлорное железо 10 г, соляная кислота 25 мл, вода 100 мл или хлорное железо 5 г, соляная кислота (плотность 1,19) 10 мл, вода 100 мл	Для выявления структуры меди, латуни, оловянной и алюминиевой бронзы, сплавов висмут-сурьма и др. В латунях β -фаза окрашивается в темный цвет. Применяется также для выявления макростроения.
15. Аммиачный раствор двойной соли хлорной меди и хлористого аммония	Двойная соль 10 г, вода 100 мл, аммиак до получения нейтральной или щелочной реакции	Для выявления структуры меди и её сплавов и в частности, двухфазных латуней (β -фаза окрашивается в темный цвет)
16. раствор персульфата (надсернокислого) аммония	Персульфат аммония 10 г, вода 90 мл	Для выявления структуры меди, латуни, оловянной бронзы, монель-металла
III. Реактивы для травления алюминиевых сплавов		
17. Плавиковая кислота	Плавиковая кислота (48%) 0,5 мл, вода 99,5 мл	Для выявления структуры дуралюминов и литых сплавов на алюминиевой основе
18. Едкий натр	Едкий натр 1-10 г, вода 99-90 мл	
19. Раствор кислот	Плавиковая кислота концентрированная 1,0 мл, соляная кислота 1,5 мл, азотная кислота 2,5 мл, вода 95,0 мл	Для выявления микроструктуры в сплавах типа дюралюмин
IV. Реактивы для травления титановых сплавов		
20. Реактив блестящего травления	Плавиковая кислота (48%-ная) 25%, азотная кислота 25%, глицерин 50%	Плавиковая кислота действует на металл, азотная кислота удаляет пятна или осадки и тем самым придает блеск; глицерин действует как растворитель и

Наименование реактива	Состав реактива	Назначение и особенности применения
		стабилизатор. Если блестящее травление не требуется, то реактив составляют из равных частей плавиковой кислоты и глицерина
21. Раствор плавиковой кислоты	5%-ный раствор плавиковой кислоты (48%) в воде	
V. Растворы для травления бериллия		
22. Спиртовой раствор кислот	Этиленгликоль 100 мл, соляная кислота 2 мл, серная кислота (плотность 1,84) 2 мл, азотная кислота 10 мл	Травление проводят 1-3 мин, 10-15 ⁰ С

*¹ При больших увеличениях (более 400-500) отчетливо обнаруживается, что перлит состоит из двух фаз – феррита и цементита

*² Для выявления фактического (или действительного) или наследственного аустенита зерна углеродистых и легированных сталей, машиностроительных и инструментальных сталей, а также сталей ферритного класса применяют реактивы №1 и 2.

Тестовое задание 1

(Выбрать один вариант ответа)

1. Наименьшую теплопроводность имеет _____.
а) электролитическое железо; б) техническое железо;
в) сталь 10; г) электротехническое железо.
2. _____ – атом примеси располагается в междоузлии кристаллической решетки.
а) примесный атом замещения; б) примесный атом внедрения;
в) дефект по Френкелю; г) бивакансия.
3. При малом переохлаждении очень чистых металлов в начале затвердевания образуются _____.
а) правильно ограненные кристаллы равновесной формы;
б) дендритные кристаллы;
в) столбчатые кристаллы;
г) игольчатые кристаллы.
4. Под *микроскопическим анализом (микроанализом)* понимают изучение строения металлов и сплавов с помощью металлографического микроскопа при увеличении в _____ раз.
а) 5-30, б) 30-50, в) 50-2000, г) 2500-3000.
5. Увеличение объектива $V_{об}$ определяется по формуле $V_{об} = \Delta / F_{об}$, в которой Δ обозначает _____.
а) расстояние наилучшего видения 250 мм;
б) фокусное расстояние объектива;
в) расстояние между задней фокальной плоскостью объектива и передней фокальной плоскостью окуляра – оптическая длина тубуса микроскопа;
г) максимальная разрешающая способность оптической системы.
6. Окуляры Гюйгенса _____.

а) имеют отрицательное фокусное расстояние (от -20 до -70) и, следовательно, не могут быть использованы как лупа или как окуляр для визуальной работы;

б) специально рассчитывают для применения с объективами-апохроматами; в связи с задачей исправления хроматической aberrации объектива одна из линз обязательно двойная;

в) имеют наиболее простую конструкцию. Передняя линза (глазная) дает увеличение изображения, образованного в плоскости диафрагмы окуляра объективом и задней линзой окуляра (полевой).

7. Имеющиеся надписи на окуляре микроскопа обозначают _____.

- а) увеличение; б) фокусное расстояние и числовую апертуру;
в) фокусное расстояние; г) числовую апертуру.

8. На рис.1 окуляр обозначен цифрой _____.

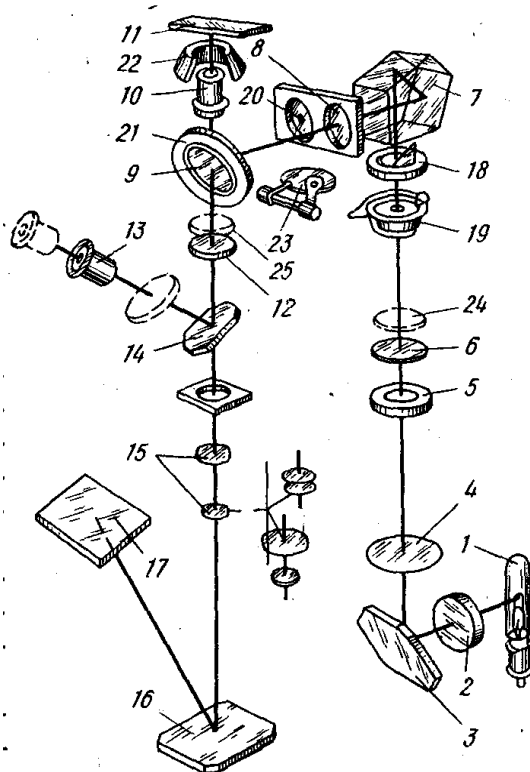


Рис.1.

- а) 1; б) 7; в) 10; г) 13.

9. На рис.1 светофильтр обозначен цифрой _____.

- а) 1; б) 4; в) 7; г) 11.

10. На рис.1 линза для работы в темном поле обозначена цифрой _____.
а) 2; б) 4; в) 8; г) 20;
11. На рис.1 отражающая пластинка обозначена цифрой _____.
а) 2; б) 4; в) 7; г) 9;
12. На шлифованных образцах видны _____.
а) поры; б) риски;
в) зерна; г) неметаллические включения и поры.
13. На образцах (чугун) после полировки видны _____.
а) поры; б) риски;
в) зерна; г) неметаллические включения и поры.
14. На стальных образцах после полировки и травления образцах видны _____.
а) поры; б) риски;
в) зерна; г) неметаллические включения и поры.
15. Проба – это _____.
а) часть металлопродукции, отобранная для изготовления из нее заготовок для образцов;
б) часть заготовки определенного размера, обработанная или необработанная и подготовленная для испытаний;
в) это заготовка, обработанная или необработанная механически, которая подвергается в случае необходимости термической обработке и предназначается для изготовления образцов.

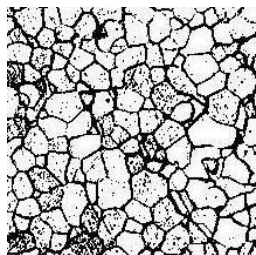
Тестовое задание 2

(Выбрать один вариант ответа)

1. Нетравленные образцы рассматривают _____.
а) при малом (50-100) увеличении и при больших увеличениях;
б) при 50-кратном увеличении;
в) при больших увеличениях;
г) при 100 кратном увеличении.

2. Для каких включений характерны размеры до 150 мкм.
а) для окиси алюминия; б) сульфидов железа;
в) силикатных включений; г) сульфидов марганца.
3. Округлую форму имеют _____.
а) сульфидные включения железа и марганца, окисульфидные включения;
б) сульфиды железа, никеля, закись меди;
в) закиси железа и силикатные стекла;
г) нитриды титана и ниобия, карбонитриды титана.
4. Включения закиси железа представляют собой выделения _____.
а) выделения довольно правильной кристаллической формы;
б) выделения в виде сплошной или прерывистой пленки по границам зерен;
в) сохраняют свою первоначальную форму;
г) мелкие кристаллы довольно правильной формы, чаще всего кубической.
5. Для каких включений характерны размеры от 2 до 7 мкм.
а) для окиси алюминия; б) сульфидов железа;
в) силикатных включений; г) сульфидов марганца.
6. В виде сплошной или прерывистой пленки по границам зерен располагаются _____.
а) сульфидные включения железа и марганца, окисульфидные включения;
б) сульфиды железа, никеля, закись меди;
в) закиси железа и силикатные стекла;
г) нитриды титана и ниобия, карбонитриды титана.
7. Аустенит – это...
а) твердый раствор внедрения в альфа-железе;
б) химическое соединение железа с углеродом;
в) твердый раствор внедрения в гамма-железе;
г) однородная механическая смесь феррита и цементита.
8. Какую структуру имеет сталь 60 в равновесном состоянии?
а) феррит; б) феррит + перлит;
в) перлит; г) перлит + цементит.

9. Представленная микроструктура стали является



- а) пластинчатым перлитом;
- б) ферритом;
- в) зернистым перлитом;
- г) аустенидом.

10. Представленная микроструктура стали является



- а) пластинчатым перлитом;
- б) ферритом;
- в) зернистым перлитом;
- г) аустенидом;

11. Какую структуру имеет сталь У10 после полного отжига?

- а) мартенсит;
- б) феррит + перлит;
- в) бейнит;
- г) перлит + цементит.

12. Какую структуру имеет сталь 40 после неполной закалки?

- а) мартенсит и небольшое количество аустенита;
- б) феррит + мартенсит;
- в) бейнит;
- г) мартенсит + цементит.

13. Какую структуру имеет сталь У9 после полной закалки?

- а) мартенсит;
- б) большое количество остаточного аустенита + мартенсит;
- в) бейнит;
- г) мартенсит + цементит.

14. Пластинчатая структура, образующаяся при распаде аустенита, с размером пластинок $\Delta l \approx (0,5 \dots 0,7) \cdot 10^{-3}$ мм называется _____

- а) сорбитом;
- б) трооститом;
- в) перлитом;
- г) бейнитом.

15. При распаде аустенита в интервале температур $640^{\circ}\text{C} - 590^{\circ}\text{C}$ образуется _____.

- | | |
|--------------|----------------|
| а) сорбитом; | б) трооститом; |
| в) перлитом; | г) бейнитом. |

Тестовое задание 3

(Выбрать один вариант ответа)

1. В какой стали при термической обработке может образоваться мартенсит и феррит?

- а) У11, б) 60, в) У8; г) Р6М5.

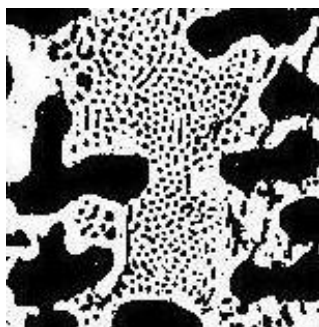
2. В какой стали при термической обработке может образоваться мартенсит и цементит?

- а) У10, б) 40, в) 45А; г) Р18.

3. В какой стали при термической обработке может образоваться троостит отпуска?

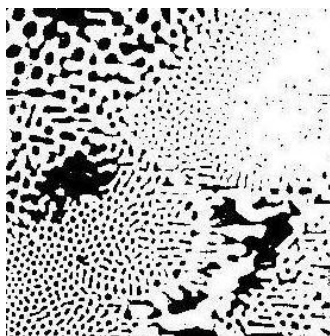
- а) У13, б) 60, в) Х12Ф1; г) ХВГ.

4. Представленная микроструктура является _____



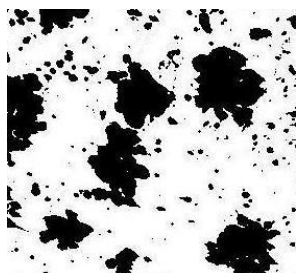
- а) доэвтекктическим белым чугуном;
б) эвтекктическим белым чугуном;
в) высокопрочным чугуном на феррито-перлитной основе;
г) ковким чугуном на ферритной основе.

5. Представленная микроструктура является _____



- а) доэвтекктическим белым чугуном;
- б) эвтекктическим белым чугуном;
- в) высокопрочным чугуном на феррито-перлитной основе;
- г) ковким чугуном на ферритной основе;

6. Такую микроструктуру имеет _____.



- а) серый чугун;
- б) белый чугун;
- в) высокопрочный чугун,
- г) ковкий чугун.

7. Представленная микроструктура чугуна является серым чугуном с _____ формой графита.



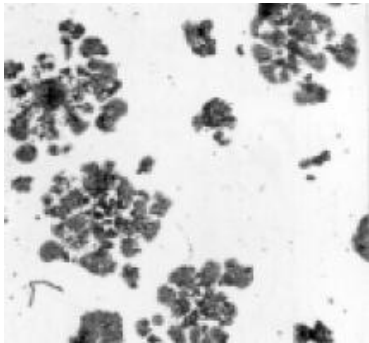
- а) пластинчатой прямолинейной;
- б) пластинчатой завитой;
- в) игольчатой;
- г) гнездообразной.

8. На рисунке изображен серый чугун с _____ распределением включений графита.



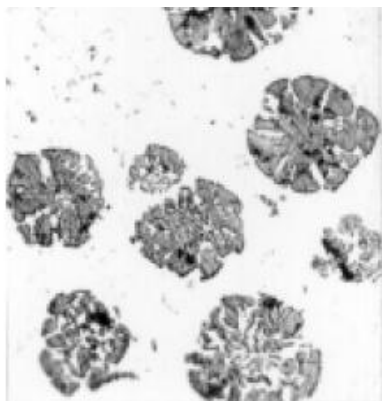
- а) равномерным;
- б) неравномерным;
- в) веточным;
- г) сетчатым.

9. На рисунке изображен высокопрочный чугун с _____ формой графита.



- а) разорванной;
- б) звездообразной;
- в) компактной;
- г) шаровидной правильной.

10. На рисунке изображен высокопрочный чугун с _____ формой графита.



- а) разорванной;
- б) звездообразной;
- в) компактной;
- г) шаровидной правильной.

11. С какой целью проводят гомогенизационный отжиг цветных сплавов?

- а) повышение однородности структуры и химического состава слитков;
- б) получение неравновесной структуры;
- в) повышение прочности и твердости;
- г) понижение прочности и восстановление пластичности деформированного металла.

12. Алюминиевым деформируемым сплавом, упрочняемым термической обработкой, является ...

- а) ЛАЖ59-1-1; б) Д16; в) 38ХМЮА; г) АМг2.

13. После какой термической обработки алюминиевым сплавам свойственна структура пересыщенного твердого раствора с дисперсными выделениями интерметаллидных фаз?

- а) после закалки; б) после закалки с последующим старением;
в) после отжига; г) после термомеханической обработки.

14. Для каких бронз характерна хорошая начальная прирабатываемость, не-большой коэффициент трения и способность работать при достаточно высоких нагрузках.

- а) марганцевые; б) алюминиевые; в) кремнистые; г) свинцовые;

15. Какие титановые сплавы не нашли промышленного применения?

- а) $(\alpha+\beta)$ -сплавы; б) α -сплавы;
в) β -сплавы; г) псевдо- α -сплавы.

Ответы на тестовое задание 1:

1. в; 2. б; 3. а; 4. в; 5. в; 6. в; 7. а; 8. г; 9. б; 10. г; 11. г; 12. б; 13. г;
14. в; 15. а.

Ответы на тестовое задание 2:

1. а; 2. в; 3. в; 4. а; 5. а; 6. б; 7. в; 8. б; 9. б; 10. а; 11. г; 12. а; 13. б;
14. в; 15. а.

Ответы на тестовое задание 3:

1. б; 2. а; 3. б; 4. а; 5. б; 6. г; 7. а; 8. в; 9. а; 10. б; 11. а; 12. б; 13. б;
14. г; 15. в.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Адаскин, А. М. Материаловедение в машиностроении: учеб. для бакалавров / А. М. Адаскин [и др.]. – М.: Юрайт, 2013. – 535 с. – ISBN 978-5-9916-2867-9. – (Сер. Бакалавр. Углубленный курс).
2. Волков, Г. М. Материаловедение: учеб. для техн. вузов по немашиностроительным направлениям и специальностям / Г. М. Волков, В. М. Зуев. – М.: Академия, 2008. – 398 с. (Сер. Высшее профессиональное образование, Технические специальности). – ISBN 978-5-7695-4248-0.
3. Гелин, Ф. Д. Металлические материалы: справочник / Ф. Д. Гелин. – Минск: Высш. шк., 1987. – 368 с.
4. Геллер, Ю. А. Материаловедение: учеб. пособие для вузов / Ю. А. Геллер, А. Г. Рахштадт ; под ред. А. Г. Рахштадта. – Изд. 6-е, перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1989. – 456 с. – ISBN 5-229-00228-X.
5. Гуляев, А. П. Металловедение: учеб. для втузов / А. П. Гуляев. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1986. – 542 с.
6. Журавлев, В. Н. Машиностроительные стали: справочник / В. Н. Журавлев, О. И. Николаева. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1992. – 480 с. – ISBN 5-217-01306-0.
7. Золоторевский, В. С. Механические свойства металлов: учеб. для вузов по специальности "Металловедение, оборудование и технология термической обработки металлов" / В. С. Золоторевский. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1983. – 350 с.
8. Иванов, Г. П. Надежность материала в технических расчетах / Г. П. Иванов [и др.]; под ред. Д. В. Бушенина. – Владимир: Посад, 2002. – 128 с.
9. Картонова, Л. В. Основы материаловедения металлических и неметаллических веществ : учеб. пособие / Л. В. Картонова, В. А. Кечин; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2014. – 176 с. – ISBN 978-5-9984-0503-7.
10. Колачев, Б. А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов: учеб. пособие для вузов по специальности "Металловедение и технология термической обработки металлов" / Б. А. Колачев, В. А. Ливанов, В. И. Елагин. – Изд. 3-е, испр. и доп. – М.: МИСИС, 2001. – 414 с. – ISBN 5-8763-027-8.

11. Лахтин, Ю. М. Материаловедение: учеб. для вузов / Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1990. – 528 с. – ISBN 5-217-00858-X. – (Сер. Для вузов).

12. Лейкин, А. Е. Материаловедение: учеб. для для машиностроит. специальностей вузов / А. Е. Лейкин, Б. И. Родин. – М.: Высш. шк., 1971. – 416 с.

13. Лившиц Б.Г. Металлография. Изд. 2-е, испр. и доп. – М. : Металлургия, 1971. – 405 с.

14. Материаловедение: учеб. для вузов / Б. Н. Арзамасов [и др.] ; под ред. Б. Н. Арзамасова. – Изд. 3-е, перераб. и доп. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. – 646 с. – ISBN 5-7038-1860-5. – (Сер. Учебник для технических вузов).

15. Материаловедение и технология конструкционных материалов: учеб. для вузов по направлению "Технология, оборудование и автоматизация машиностроительных производств" и "Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств" / В. Б. Арзамасов [и др.]; под ред. В. Б. Арзамасова, А. А. Черепихина. – 2-е изд., стер. – М.: Академия, 2009. – 447 с. – ISBN 978-5-7695-6499-4. – (Сер. Высшее профессиональное образование, Машиностроение).

16. Материаловедение и технология металлов: учеб. для вузов / Г. П. Фетисов [и др.]; под ред. Г. П. Фетисова. – Изд. 4-е, испр. и доп. – М. : Высш. шк., 2006. – 862 с. – ISBN 5-06-004418-1.

17. Материалы в машиностроении: выбор и применение: справочник: в 5 т. / под ред. И. В. Кудрявцева. – М.: Машиностроение, 1967. – Т. 1: Цветные металлы и сплавы / И. А. Алексахин [и др.]; под ред. Л. П. Лужникова. – 1967. – 304 с.

18. Мозберг, Р. К. Материаловедение: учеб. пособие для вузов / Р. К. Мозберг. – Изд. 2-е, перераб. – М.: Высш. шк., 1991. – 448 с. – ISBN 5-06-001909-8.

19. Ржевская, С. В. Материаловедение: учеб. для вузов в области техники и технологии / С. В. Ржевская. – Изд. 4-е, перераб. и доп. – М.: Логос, 2006. – 421 с. – ISBN 5-98704-179-X.

20. Рогов, В. А. Современные машиностроительные материалы и заготовки : учеб. пособие для вузов по направлениям "Технология, оборудование и автоматизация машиностроительных производств", "Кон-

структорско-технологическое обеспечение машиностроительных производств" / В. А. Рогов, Г. Г. Позняк. – М.: Академия, 2008. – 330 с. – ISBN 978-5-7695-4254-1. – (Сер. Высшее профессиональное образование, Машиностроение).

21. Сильман, Г. И. Материаловедение: учеб. пособие для вузов / Г. И. Сильман. – М. : Академия, 2008. – 336 с. – ISBN 978-5-7695-4255-8.

22. Солнцев, Ю. П. Материаловедение: учеб. для вузов по металлург., машиностроит. и общетехн. специальностям / Ю. П. Солнцев, Е. И. Пряхин ; под ред. Ю. П. Солнцева. – Изд. 3-е, перераб. и доп. – СПб. : Химиздат, 2004. – 735 с. – ISBN 5-93808-075-4. – (Сер. Учебник для вузов).

23. Химико-термическая обработка металлов и сплавов: справочник / Г. В. Борисенок [и др.] ; под ред. Л. С. Ляховича. – М. : Металлургия, 1981. – 424 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
Глава 1. Характеристика металла и затвердевание	5
1.1. Характеристика металлического состояния	5
1.2. Дефекты кристаллического строения	11
1.3. Затвердевание металлов	15
Контрольные вопросы	19
Глава 2. Практическая металлография	20
2.1. Общие сведения о металлографических микроскопах	20
2.1. Приготовление микрошлифов	27
2.3. Методы выявления микроструктуры металлов	29
2.4. Методы определения неметаллических включений	31
2.5. Методы количественной металлографии	34
2.6. Измерение микротвердости	38
Контрольные вопросы	39
Глава 3. Металлография сплавов на основе железа	40
3.1. Микроструктуры сталей при различных термических обработках	40
3.2. Металлография сварных швов	46
3.3. Микроструктура чугунов	50
Контрольные вопросы	57
Глава 4. Металлография цветных металлов и сплавов	58
4.1. Микроструктура алюминия и его сплавов	58
4.2. Микроструктура меди и ее сплавов	64
4.3. Микроструктура титана и его сплавов	75
Контрольные вопросы	78
ПРИЛОЖЕНИЯ	80
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	93