

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего профессионального образования  
«ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ»

---

Кафедра «Технология металлов»

## **МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

Учебное пособие к контрольной работе  
и лабораторным работам для студентов специализаций:  
«Подъемно-транспортные, строительные, дорожные средства  
и оборудование», «Пассажирский комплекс железнодорожного  
транспорта», «Грузовая и коммерческая работа»,  
«Магистральный транспорт»

Санкт-Петербург  
2013

Главной целью изучения материаловедения является умение правильно осуществлять выбор материала для изготовления изделия. Для этого необходимо знать строение и свойства металлов, основы теории сплавов, маркировку сталей, чугунов, цветных металлов, неметаллических материалов. Развернутые ответы на вопросы контрольной работы дадут возможность усвоить основы материаловедения студентами специализаций «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные средства и оборудование», «Пассажирский комплекс железнодорожного транспорта», «Грузовая и коммерческая работа», «Магистральный транспорт».

Рассмотрены основы макро- и микроисследований конструкционных материалов, изложены основы строения железоуглеродистых сплавов (сталей и чугунов), теория и практика их термической обработки.

Рассчитаны для студентов заочной формы обучения специальностей Механического факультета и факультета Управление процессами перевозок.

Составили: Д.А. Жуков, Д.П. Кононов

## СОДЕРЖАНИЕ

1	Исходные данные к контрольной работе.....	4
2	Рекомендации по выполнению контрольной работы.....	8
3	Учебное пособие для выполнения лабораторных работ.....	17
3.1	Лабораторная работа «Макроскопический анализ металлов и сплавов».....	17
3.2	Лабораторная работа «Исследование микроструктуры металлов и сплавов».....	22
3.3	Лабораторная работа «Стабильные и некоторые особые структуры стали».....	35
3.4	Лабораторная работа «Исследование структуры и свойств чугунов».....	42
3.5	Лабораторная работа «Исследование метастабильных структур сталей».....	50
	Библиографический список.....	57

## 1 ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ К КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЕ

Номера вопросов к контрольной работе приведены в табл. 1.

Таблица 1

Окончание шифра (две последние цифры)	Номера вопросов к контрольной работе:
01, 21, 41, 61, 81	1, 21, 41, 61, 81
02, 22, 42, 62, 82	2, 22, 42, 62, 82
03, 23, 43, 63, 83	3, 23, 43, 63, 83
04, 24, 44, 64, 84	4, 24, 44, 64, 84
05, 25, 45, 65, 85	5, 25, 45, 65, 85
06, 26, 46, 66, 86	6, 26, 46, 66, 86
07, 27, 47, 67, 87	7, 27, 47, 67, 87
08, 28, 48, 68, 88	8, 28, 48, 68, 88
09, 29, 49, 69, 89	9, 29, 49, 69, 89
10, 30, 50, 70, 90	10, 30, 50, 70, 90
11, 31, 51, 71, 91	11, 31, 51, 71, 91
12, 32, 52, 72, 92	12, 32, 52, 72, 92
13, 33, 53, 73, 93	13, 33, 53, 73, 93
14, 34, 54, 74, 94	14, 34, 54, 74, 94
15, 35, 55, 75, 95	15, 35, 55, 75, 95
16, 36, 56, 76, 96	16, 36, 56, 76, 96
17, 37, 57, 77, 97	17, 37, 57, 77, 97
18, 38, 58, 78, 98	18, 38, 58, 78, 98
19, 39, 59, 79, 99	19, 39, 59, 79, 99
20, 40, 60, 80, 00	20, 40, 60, 80, 100

### Вопросы

1-40. Начертите диаграмму состояний сплавов железо-цементит. Для сплавов с заданным процентным содержанием углерода (табл. 2) согласно варианту постройте кривые охлаждения. Для первого сплава опишите фазовые и структурные превращения, которые будут происходить в нём при медленном охлаждении из расплавленного состояния до нормальной температуры, а для второго – при медленном нагреве. Определите вес фаз, а если возможно, то и структур при 2-х произвольно выбранных температурах в стали и чугуна.

Таблица 2

Номер вопроса	Количество углерода, %	Номер вопроса	Количество углерода, %	Номер вопроса	Количество углерода, %
1	0,20	15	1,0	29	3,7
2	0,25	16	1,05	30	3,9
3	0,30	17	1,10	31	4,0
4	0,35	18	1,15	32	4,4
5	0,40	19	1,2	33	4,6
6	0,45	20	1,3	34	4,8
7	0,50	21	2,3	35	5,0
8	0,55	22	2,5	36	5,2
9	0,60	23	2,7	37	5,4
10	0,65	24	2,9	38	5,5
11	0,70	25	3,1	39	5,6
12	0,75	26	3,3	40	5,7
13	0,85	27	3,4		
14	0,95	28	3,5		

41-60. Расшифруйте марки сплавов согласно варианту (табл. 3) и укажите их назначение. Из этих сплавов выберите углеродистую конструкционную или инструментальную сталь, определите для неё оптимальные температуры закалки и отпуска. Опишите превращения, происходящие в процессе нагрева до выбранной температуры, при охлаждении со скоростью больше критической и при отпуске.

Таблица 3

Номер вопроса	Марки сплавов	Номер вопроса	Марки сплавов
41	СЧ15, 45, 12ХН3А	51	СЧ18, 50, Л96
42	СЧ12, 50, БрАЖ9-2	52	КЧ38-8, У8, 18ХГТ
43	СЧ18, 40, 30ХГСА	53	ВЧ40, У10А, БрБ2
44	СЧ21, 55, БрОЦС5-5-5	54	СЧ35, У11, 20Х2Н4А
45	СЧ28, У7, 18ХГТ	55	КЧ35-10, У12, Л62
46	СЧ24, 60, 20Х2Н4А	56	ВЧ60, У13, 60С2
47	СЧ32, У10, БрАЖН10-4-4	57	СЧ38, 35, ЛС59-1
48	КЧ37-12, У7А, Л62	58	СЧ18, 45, 20ХГС
49	КЧ30-6, У12, 18ХНВА	59	КЧ37-12, 50, 30ХГСН2А
50	ВЧ45, 40, 12Х18Н9Т	60	ВЧ50, У10, Б16

61. Атомно-кристаллическое строение металлов и сплавов. Классификация дефектов кристаллической решётки. Влияние количества дефектов кристаллического строения на сопротивление деформации.

62. Методы исследования структуры металлов и сплавов. Макроисследование. Строение изломов при однократном и длительном действии

статических нагрузок и при усталости. Цели. Перспективы использования в научно-производственном комплексе.

63. Механические, технологические, металлографические методы исследования конструкционных материалов.

64. Электронно-микроскопические, рентгено- и гаммаграфические методы исследования качества материалов и технологий. Области применения.

65. Процесс кристаллизации. Кривые охлаждения. Первичная и вторичная кристаллизация сплавов, их отражение на диаграмме состояний.

66. Диаграмма состояний сплавов: *a* – с полностью инертными компонентами; *б* – с непрерывными рядами жидких и твёрдых растворов.

67. Диаграмма состояний сплавов, образующих: *a* – твёрдые растворы ограниченной растворимости в твёрдом состоянии; *б* – химические соединения.

68. Доказать правило отрезков для расчета фазового, структурного составов сплавов.

69. Изменение свойств сплавов в зависимости от вида их диаграмм состояний. Практическая значимость закономерностей Н.С. Курнакова.

70. Строение слитка. Ликвация первого и второго родов и методы борьбы с ликвацией. Факторы, определяющие величину и форму зерна.

71. Кривая охлаждения чистого железа. Диаграмма Fe-Fe<sub>3</sub>C, основные данные о фазах и структурных составляющих.

72. Последовательность расчета предела прочности, твердости по Бринеллю углеродистых сталей в состоянии поставки по микроструктуре и по содержанию углерода.

73. Процесс изменения зерна при медленном нагреве до 1200 °С и охлаждении доэвтектоидной и заэвтектоидной стали. Влияние углерода на величину зерна.

74. Классификация и маркировка углеродистых конструкционных сталей. Основные требования, предъявляемые к ним. Их применение.

75. Белые и ковкие чугуны. Условия получения. Микроструктура. Свойства. Применение.

76. Серые, модифицированные и высокопрочные чугуны. Условия получения, микроструктура, свойства, применение.

77. Основные виды термической обработки полуфабрикатов, готовых изделий. Положение их температурных интервалов на диаграмме состояния Fe-Fe<sub>3</sub>C.

78. Отжиг стали, его разновидности, назначение. Примеры применения.

79. Нормализация стали, её режимы, назначение. Примеры применения.

80. Диаграмма изотермического распада переохлажденного аустенита эвтектоидной стали. Влияние температурных условий превращения на интенсивность распада и строение продуктов превращения.

81. Превращения аустенита при непрерывном и изотермическом охлаждении. Практическое значение термокинетических диаграмм распада аустенита.

82. Объемная закалка, её разновидности. Сущность и особенности мартенситного превращения. Дефекты закалки и их предупреждение. Улучшение стали.

83. Закаливаемость и прокаливаемость сталей. Их учет при выборе рациональной марки материала.

84. Термообработка деталей после закалки (обработка холодом, отпуск). Сущность явления отпускной хрупкости и способы её устранения.

85. Влияние легирующих элементов на структуру, критические точки и свойства стали. Коррозионностойкие, жаро- и окалиностойкие стали и сплавы.

86. Классификация и маркировка легированных сталей. Основные принципы выбора рациональной марки. Применение.

87. Влияние легирующих элементов на превращения при отпуске. Особенности термообработки легированных сталей.

88. Конструкционные цементируемые легированные стали. Их использование в машиностроении.

89. Стали с повышенной обрабатываемостью резанием. Особенности их свойств и область применения.

90. Рессорно-пружинные стали. Основные марки и технология их термообработки для получения оптимальных свойств.

91. Шарикоподшипниковые стали. Технология их упрочнения, обусловленная спецификой эксплуатации изделий.

92. Износостойкие стали. Их маркировка, специфика изготовления и упрочнения.

93. Инструментальные материалы, их классификация. Основы термообработки. Особенности микроструктуры. Их эксплуатационные и технологические свойства. Сущность явления красностойкости и способы её повышения.

94. Твердые сплавы. Их классификация. Микроструктура. Свойства. Применение.

95. Сплавы на основе алюминия, их классификация. Особенности микроструктуры, свойства. Применение.

96. Деформируемые алюминиевые сплавы, их упрочнение и обработка на возврат.

97. Литейные алюминиевые сплавы, их классификация, микроструктура. Применение

98. Медь и сплавы на её основе. Микроструктура, назначение. Термообработка сплавов, не имеющих фазовых превращений в твердом состоянии.

99. Антифрикционные сплавы на основе олова, свинца и цинка: их разновидности, микроструктура, свойства и область применения.

100. Коррозия, её разновидности. Сущность электрохимической коррозии. Оценка коррозионной стойкости материалов.

## 2 РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

Отвечать на вопросы контрольной работы следует только после изучения всего учебного материала данного раздела.

Прежде всего, необходимо начертить в масштабе диаграмму состояний железо-цементит, поставить принятые буквенные обозначения и написать структурные составляющие в каждой её области. Затем провести на диаграмме до температуры, превышающей линию ликвидус, вертикальную прямую (ординату), соответствующую заданному процентному содержанию углерода в сплаве. Точки пересечения этой ординаты с линиями диаграммы определяют критические температуры, при которых в сплаве при медленном его охлаждении происходят фазовые и структурные превращения. Эти точки надо обозначить сверху вниз, например, цифрами 1, 2 и т.д. После этого, начертив кривую охлаждения сплава, поместить на ней те же критические точки и объяснить сущность превращений, происходящих в нём при медленном нагреве или охлаждении.

Положение общепринятых точек на диаграмме состояния приведено в табл. 4.

Таблица 4

Характерные точки	<i>A</i>	<i>H</i>	<i>J</i>	<i>B</i>	<i>N</i>	<i>D</i>	<i>E</i>
Температура, °С	1536	1499	1499	1499	1392	1252	1147
Концентрация углерода, %	0	0,1	0,16	0,51	0	6,67	2,14
Характерные точки	<i>C</i>	<i>F</i>	<i>G</i>	<i>P</i>	<i>S</i>	<i>K</i>	<i>Q</i>
Температура, °С	1147	1147	911	727	727	727	20
Концентрация углерода, %	4,3	6,67	0	0,02	0,8	6,67	0,006

Фазы и структурные составляющие в различных областях диаграммы состояния указаны на рис. 1.

Закономерности фазовых и структурных превращений, происходящих при медленном охлаждении из жидкого состояния сплавов с заданным содержанием углерода, а также при их медленном нагреве рассмотрим на примерах.



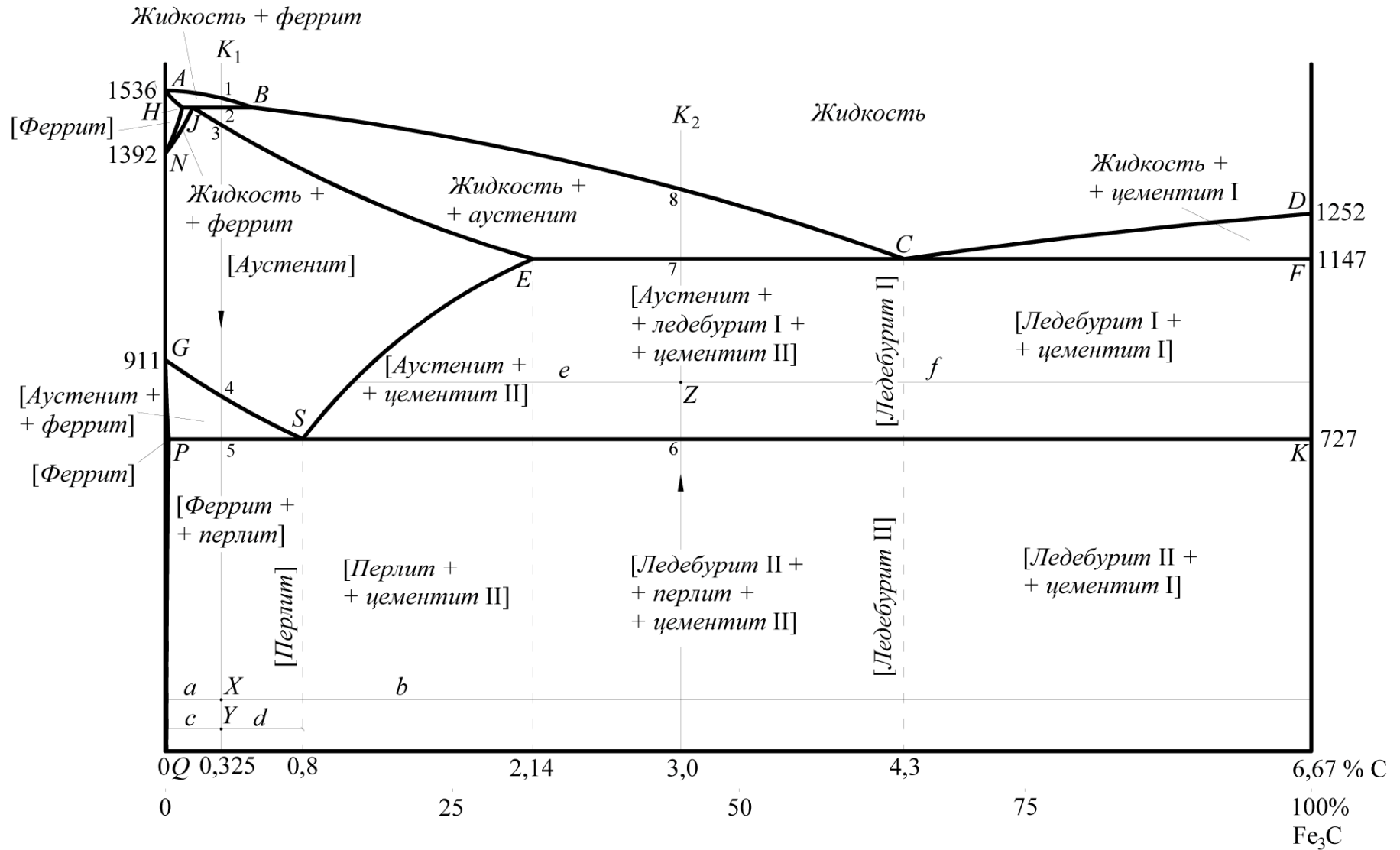
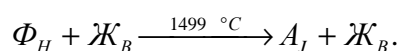


Рис. 1. Диаграмма состояния Fe-Fe<sub>3</sub>C

## Преобразования при охлаждении сплавов

*Пример 1.* Охлаждается расплавленная сталь марки Ст5, содержащая 0,28-0,37% углерода (ГОСТ 380-2005). Среднее количество углерода в ней составляет 0,325% (вертикаль  $K_1$  на рис. 1). Затвердевание происходит в интервале температур между точками 1 и 3. Когда температура достигает точки 1, из жидкой фазы выделяются первичные кристаллы дельта-феррита, химический состав которого изменяется по линии  $AH$ , а жидкой фазы - по линии  $AB$  (см. рис. 1).

При температуре 1499 °С (точка 2) в связи с избытком жидкой фазы затвердевание сплава не заканчивается, происходит перитектическая реакция. Кристаллы дельта-феррита состава  $H$  взаимодействуют с жидкой фазой состава  $B$ , образуя кристаллы аустенита состава точки  $J$  и остаток жидкой фазы состава точки  $V$ :

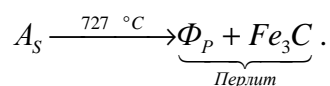


При дальнейшем охлаждении в интервале температур точек 2-3 из остатков жидкой фазы непрерывно возникают центры кристаллизации  $Fe_\gamma$ , из которых растут дендриты, образуя кристаллы аустенита, химический состав которых изменяется по линии  $JE$ . Количество жидкой фазы непрерывно уменьшается, а концентрация углерода в ней возрастает по линии  $BC$  (см. рис. 1). В точке 3 кристаллизация аустенита заканчивается. Сплав находится в твердом состоянии и приобретает однофазную структуру - аустенит, отличающуюся химической неоднородностью, так называемой дендритной (внутрикристаллической) ликвацией.

При дальнейшем охлаждении сплава от точки 3 до точки 4 за счет выравнивающей диффузии ликвация частично снижается.

В интервале температур точек 4 и 5 происходит аллотропическое  $Fe_\gamma \rightarrow Fe_\alpha$  превращение. На границах зерен аустенита возникают зародыши (центры кристаллизации) феррита, которые растут и развиваются за счет атомов аустенитной фазы. Имеет место перераспределение углерода между аустенитом и ферритом. Состав аустенита изменяется по линии  $GS$ , феррита - по линии  $GP$ . Концентрация углерода в кристаллах аустенита возрастает, что приводит к снижению температуры перехода  $Fe_\gamma$  в  $Fe_\alpha$ .

При температуре 727 °С (точка 5) концентрация углерода в аустените достигает 0,8% и из него образуется эвтектид – феррито-цементитная смесь ( $Fe_\alpha$  и  $Fe_3C$ ), получившая название перлит:



Преобразование аустенита состава 0,8% углерода в перлит заключается в перестройке решетки  $Fe_\gamma \rightarrow Fe_\alpha$  и диффузионном перераспределении углерода между фазами  $Fe_\alpha$  и  $Fe_3C$ . Ведущей фазой в этом превращении является цементит. Зародыши новой фазы  $Fe_3C$  возникают на границах зерен исходного аустенита, в местах скопления дислокаций или вакансий, неметаллических включений и различных примесей, дефектов упаковки. Рост частиц карбида  $Fe_3C$  (6,67% C) вызывает в прилегающих к нему объемах аустенита резкое снижение углерода (обезуглероживание). В этих участках происходит аллотропическое  $Fe_\gamma \rightarrow Fe_\alpha$  превращение, т.е. образование феррита (почти чистое железо).

Рост кристалликов  $Fe_\alpha$  в свою очередь ведет к обогащению окружающего аустенита углеродом и способствует зарождению и росту новых частиц  $Fe_3C$ . Совместный рост кристалликов  $Fe_\alpha$  и  $Fe_3C$  наблюдается в форме пластинок. Пластинки феррита и цементита непрерывно возникают непосредственно друг возле друга до полного исчезновения аустенита, образуя одну перлитную колонию. В различных участках аустенита возникают и формируются несколько перлитных колоний с различной ориентацией пластин феррита и цементита<sup>1</sup>.

Дальнейшее охлаждение сплава от 727 °С (точка 5) до комнатной температуры приводит к выделению незначительного количества третичного цементита вследствие уменьшения растворимости углерода в феррите по линии  $PQ$  от 0,025% при 727 °С до 0,006% при 20°С. Однако в микроструктуре при наличии перлита обнаружить цементит невозможно. При температуре 210 °С наблюдается магнитное превращение цементита.

Рассмотрим кратко другие общие закономерности процессов затвердевания, формирования первичной структуры, фазовых и структурных превращений в твердом состоянии при медленном охлаждении во всех остальных сплавах.

### *Первичная кристаллизация*

1. В сталях с содержанием углерода до 0,1% затвердевание на начальной стадии протекает так же, как и в сплаве  $K_1$ . Перитектическое превращение в них отсутствует, а при охлаждении до температур, лежащих ниже  $АН$ , их структура состоит из  $Fe_\alpha$ , которое в интервале температур между линиями  $NH$  и  $NJ$  претерпевает аллотропическое превращение в  $Fe_\gamma$ .

2. Стали, содержащие углерода 0,1...0,16%, при температуре 1499 °С полностью затвердевают, испытывая при этом перитектическое превращение с образованием аустенита состава точки  $J$ . Феррит состава точки  $H$  остаётся. При дальнейшем охлаждении протекает аллотропическое  $Fe_\alpha \rightarrow Fe_\gamma$  превращение, в результате которого структура сплавов ниже линии  $NJ$  становится аустенитной.

3. В сплавах, содержащих 0,51-4,3% углерода из жидкой фазы в интервале температур между линиями  $BC$  и  $JE$  кристаллизуется  $\gamma$ -твердый раствор (аустенит), состав которого в интервале затвердевания изменяется по линии  $JE$ , а жидкой фазы - по линии  $BC$ . Кристаллы аустенита имеют форму крупных дендритов, обладающих химической неоднородностью, называемой внутрикристаллической (дендритной) ликвацией.

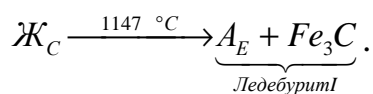
4. В заэвтектических чугунах (более 4,3% углерода) в интервале затвердевания между линиями  $CD$  и  $CF$  вследствие избытка углерода из

---

<sup>1</sup> Аналогичный механизм распада аустенита при 727 °С на перлит характерен и для всех остальных сплавов. В чугунах, кроме того, имеется аустенит, входящий составной частью в эвтектику (ледебурит первичный). Этот эвтектический аустенит также по рассмотренному механизму при 727 °С превращается в перлит.

жидкой фазы выделяются кристаллы первичного цементита, состав которого не изменяется, но содержание углерода в жидкой фазе непрерывно уменьшается по линии  $CD$  до 4,3% при достижении температуры 1147 °С.

5. В любом сплаве, содержащем углерода более 2,14%, при температуре 1147 °С остаток жидкой фазы, находящейся между первичными кристаллами аустенита (доэвтектические чугуны) либо цементита (заэвтектические чугуны), всегда получает постоянный состав 4,3% С и затвердевает, образуя отдельную структурную составляющую - эвтектику (ледебурит первичный). Она состоит из смеси двух типов кристаллов с предельным насыщением углерода:  $Fe_\gamma$  (2,14%) и  $Fe_3C$  (6,67%):



Полностью затвердевшие сплавы при эвтектической температуре 1147 °С получают фазовый состав:  $Fe_3C$  и  $Fe_\gamma$ , а структурный – эвтектика и аустенит для доэвтектических, либо цементит первичный – для заэвтектических.

### *Превращения в твердом состоянии*

1. В сплавах, содержащих углерода более 0,8%, в процессе охлаждения от 1147 до 727 °С растворимость углерода в аустените непрерывно уменьшается соответственно от 2,14 до 0,8% согласно линии ограниченной растворимости  $SE$ , поэтому из первичных и эвтектических кристаллов аустенита происходит выделение избыточного углерода в виде цементита вторичного. В инструментальных углеродистых сталях и доэвтектических чугунах вторичный цементит окружает зерна аустенита, создавая вокруг них оболочку. Избыточные вторичные кристаллы эвтектического цементита присоединяются (сливаются) к кристаллам первичного эвтектического цементита.

2. Если при температурах выше 727 °С ледебурит первичный представляет смесь аустенита с цементитом, то при температуре 727 °С образуется смесь из перлита и цементита – ледебурит вторичный.

### **Превращения при нагреве сплавов**

*Пример 2.* Нагревается доэвтектический белый чугун, содержащий 3% углерода (вертикаль  $K_2$  на рис. 1).

При нагреве до 727 °С исходные фазы  $Fe_\alpha$  и  $Fe_3C$ , а также структура, состоящая из эвтектоида (ледебурита вторичного) и крупных зерен перлита, окруженных вторичным цементитом, сохраняются.

В точке 6 (температура 727 °С) происходит превращение перлита в аустенит, в результате чего из двух гетерогенных фаз ( $Fe_\alpha$  и  $Fe_3C$ ) путем перестройки решетки  $Fe_\alpha \rightarrow Fe_\gamma$  и диффузионного перераспределения углерода возникает одна -  $Fe_\gamma$ . Этот процесс состоит в следующем.

В местах соприкосновения пластин  $Fe_\alpha$  и  $Fe_3C$  возникают центры кристаллизации  $Fe_\gamma$ , которые растворяют в себе пластинки  $Fe_3C$ , входящие в состав перлита. Зарождение и рост кристаллов  $Fe_\gamma$  вызывает в примыкающих к ней новых участках  $Fe_\alpha$  под действием углерода  $Fe_\alpha \rightarrow Fe_\gamma$  превращение. Этот процесс продолжается до полного исчезновения перлитного зерна. При медленном нагреве он начинается и заканчивается при 727 °С. Поскольку каждая перлитная колония имеет большое количество пластин цементита и феррита, зарождается несколько центров кристаллизации аустенита, что приводит к получению мелких зерен, концентрация углерода в них выравнивается и составляет 0,8%<sup>2</sup>.

Исходная перлитно-цементитная смесь (ледебурит II) становится аустенито-цементитной (ледебурит I).

При дальнейшем нагреве сплава  $K_2$  растворимость углерода в аустените возрастает по линии  $SE$  с 0,8 при 727 °С до 2,14% при 1147 °С. Происходит растворение ледебуритного и избыточного вторичного цементита в аустените. При достижении температуры 1147 °С (точка 7) осуществляется диффузия углерода из ледебуритного и вторичного цементита в аустенит. Ледебурит I полностью расплавляется, а при дальнейшем повышении температуры начнут плавиться кристаллы аустенита. В точке 8 сплав находится в жидком состоянии.

В доэвтектоидных сталях при нагреве в интервале температур между линиями  $PS$  и  $GS$  в отличие от заэвтектоидных сталей и чугунов в результате диффузии углерода происходит растворение избыточного феррита в аустените. На линии  $GS$  этот диффузионный процесс завершается, сталь получает мелкозернистую аустенитную структуру. Дальнейший нагрев стали в аустенитной области, начиная с температуры около 1100 °С, вызывает рост зерен аустенита. Атомы углерода переходят от одного зерна к другому через границу раздела. Это приводит к постепенному уменьшению, а затем и исчезновению одних зерен и укрупнению других. Чем выше температура нагрева, тем крупнее зерна аустенита

*Пример 3.* Рассчитать относительное весовое количество фаз и структурных составляющих при комнатной температуре (20 °С) у сплава  $K_1$  и при температуре выше 727 °С у сплава  $K_2$ .

Количество фаз или структурных составляющих  $Q$  в заданной точке на диаграмме состояний определяют по известному правилу отрезков:

$$Q = \frac{l}{L} \cdot 100\%,$$

---

<sup>2</sup> Аналогичное превращение перлита, в том числе эвтектоидного, в аустенит происходит в остальных сплавах, содержащих до 6,67% углерода.

где  $l$  - отрезок, противоположащий определяемой фазе или структуре относительно заданной точки;

$L$  - общая длина отрезка (коноды), в пределах которого количество определяемых фаз или структур изменяется от 0 до 100%.

1. В сплаве  $K_1$  (как и в любых других сплавах) при комнатной температуре (точка  $X$  на рис. 1) фазами являются  $\alpha$  и  $Fe_3C$ . Общая длина коноды равна сумме отрезков  $a$  и  $b$ , на границах которых соотношение между фазами изменяется от 0 до 100%.

Отрезок  $a$  является противоположащим для  $Fe_3C$ . Отрезок  $b$  является противоположащим для  $\alpha$ -фазы. Длины этих отрезков можно измерить линейкой по диаграмме или посчитать по количеству углерода.

Отсюда относительные весовые количества  $\alpha$ -фазы ( $Q_\alpha$ ) и  $Fe_3C$  ( $Q_{Fe_3C}$ ) составят:

$$Q_\alpha = \frac{b}{a+b} \cdot 100\%;$$

$$Q_{Fe_3C} = \frac{a}{a+b} \cdot 100\%.$$

2. Сплав  $K_1$  при  $t = 20^\circ C$  имеет структуру феррита и перлита (точка  $Y$  на диаграмме). Общая длина коноды  $c + d = 0,8\% C$  (см. рис. 1). В пределах этой коноды соотношение между ферритом и перлитом изменяется от 0 до 100%.

Отсюда относительное весовое количество перлита ( $Q_n$ ) и феррита ( $Q_\phi$ ):

$$Q_n = \frac{c}{c+d} \cdot 100\%;$$

$$Q_\phi = \frac{d}{c+d} \cdot 100\%.$$

3. В сплаве  $K_2$  при температуре, соответствующей точке  $Z$  (см. рис. 1) фазами являются  $\gamma$  и  $Fe_3C$ . Общая длина коноды равна сумме отрезков  $e$  и  $f$ , на границах которых соотношение между фазами изменяется от 0 до 100%.

Отрезок  $e$  является противоположащим для  $Fe_3C$ . Отрезок  $f$  является противоположащим для  $\gamma$ -фазы.

Отсюда относительные весовые количества  $\gamma$ -фазы ( $Q_\gamma$ ) и  $Fe_3C$  ( $Q_{Fe_3C}$ ) составят:

$$Q_\gamma = \frac{f}{e+f} \cdot 100\%;$$

$$Q_{Fe_3C} = \frac{e}{e+f} \cdot 100\%.$$

Чтобы правильно и полно ответить на вопросы 41-60, надо изучить принципы классификации и маркировки различных сплавов.

Принципы маркировки, химический состав и механические свойства сплавов определяют по соответствующим ГОСТам, например, сталь угле-

родистую обыкновенного качества – ГОСТ 380-2005; сталь углеродистую качественную по ГОСТ 1050-88, серый чугун по ГОСТ 14120-85, высокопрочный чугун – по ГОСТ 7293-85, ковкий чугун – по ГОСТ 1215-79 и т.д.

Расшифровывая марки сплавов, необходимо указать к какой группе по основным признакам классификации относится каждая из них, привести в соответствии с маркировкой их примерный химический состав и пояснить, каково их назначение и применение.

В ответе на вторую часть вопроса нужно, прежде всего, объяснить, с какой целью производится закалка, и охарактеризовать структуру заданного в исходном (отожженном) состоянии сплава.

Затем, воспользовавшись ранее начерченной диаграммой состояния железоуглеродистых сплавов, показать на ней заданную сталь (привести ординату) и указать выше какой критической точки следует нагревать заданную сталь под закалку. Соответствующую температуру рекомендуется отметить на ординате, а выбор этой температуры обосновать.

Рассматривая превращения, происходящие в заданной стали в процессе ее нагрева под закалку, надо поступить так же, как при описании процесса ее охлаждения, но уже без построения кривой нагревания.

Необходимо описать превращения, которые будут происходить в аустените при непрерывном его охлаждении со скоростью больше критической, и указать, какую структуру после закалки будет иметь сталь, содержащая заданное количество углерода, и какие превращения произойдут в процессе отпуска.

Вопросы охлаждения аустенита лучше разобрать, используя диаграмму изотермических превращений аустенита, и на ее основании уяснить, при какой скорости охлаждения образуется перлит, сорбит, троостит и мартенсит, что называется критической скоростью закалки, в чем различие между мартенситом и приведенными выше структурами.

Следует иметь в виду, что чем ниже содержание углерода в стали, тем больше критическая скорость закалки, вследствие чего низкоуглеродистые стали (менее 0,25% С) в практических условиях не принимают закалку на мартенсит.

Нужно усвоить, что при образовании мартенсита кристаллическая решетка перестраивается из гранцентрированной в объемноцентрированную, но вследствие того, что углерод не успевает выделиться, а остается в пересыщенном твердом растворе в объемноцентрированной решетке, она искажается и приобретает тетрагональность.

Необходимо разобраться в структурных превращениях, происходящих при отпуске стали, а также проследить за изменением свойств закаленной стали в результате низкого, среднего и высокого отпуска. Важно понять, почему уменьшается искаженность мартенсита, какие условия необходимы

для перехода остаточного аустенита в мартенсит и для его распада на феррито-цементитную смесь.

Отвечая на первую часть вопросов 61-100 необходимо изучить строение и свойства металлов, основы теории сплавов, положение температурных интервалов термической обработки на диаграмме состояния Fe-Fe<sub>3</sub>C. Вторая часть вопросов требует знания маркировки легированных сталей, твердых сплавов, цветных сплавов, а также процессов термической и химико-термической обработки.

Отвечая на них необходимо привести полный химический состав и свойства рассматриваемого материала, указать влияние легирующих элементов, привести примеры применения этих материалов.



## **3 УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ**

### **3.1 Лабораторная работа МАКРОСКОПИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ**

*Цель работы:* изучить один из методов исследования металлических материалов, получить практические навыки по выполнению некоторых операций, связанных с подготовкой металла к исследованию, а также по определению качества металлов посредством травления их реактивом Гейна, выполнения пробы на серу и по определению технологии изготовления различных образцов.

#### **Порядок выполнения работы**

Методом макроанализа студенты исследуют изломы деталей, макрошлифы, выполняют пробу металла на серу; дают заключение о качестве металла по наличию и характеру распределения серы в исследуемом макрошлифе и определяют способы (технологии) изготовления деталей, представленных в учебной коллекции.

Бригада студентов из трех-четырех человек получает один макрошлиф для практического визуального исследования макроструктуры и альбом характерных макроснимков. Сначала выполняют травление макрошлифа реактивом Гейна, затем характерные образцы зарисовывают в отчеты и дают им истолкование. После этого выполняют исследование распределения сернистых включений по методике Баумана. Полученные отпечатки приклеивают в отчеты и по ним дают заключение о качестве металла исследуемого макрошлифа.

Коллекцию макрошлифов и альбом характерных макроснимков используют для визуального исследования различных макроструктур и освоения их схематической зарисовки.

#### **Теоретическая часть работы**

*Макроанализ* - это способ исследования металлов и сплавов, осуществляемый невооруженным глазом или при небольшом увеличении (до 30 раз) с помощью лупы. Видимую при этом структуру металла называют макроструктурой.

Макроскопический анализ позволяет выявить различные виды нарушения сплошности (трещины, усадочные раковины, газовую пористость и др.), характер излома, химическую неоднородность (ликвацию), направле-

ние волокон в деформированном металле, расположение кристаллических зерен в литом металле и т.п.

Несмотря на кажущуюся простоту этого метода анализа металлических материалов он позволяет получить значительный объем полезной информации (в основном качественной) и наметить пути дальнейших исследований. Поэтому он находит широкое применение на практике.

Макростроение металла исследуют по изломам и макрошлифам. Изломы бывают вязкими, усталостными и хрупкими. Вязкий излом - это результат разрушения металла после пластической деформации (рис. 2, *а*), хрупкий - без заметной деформации (рис. 2, *б*).

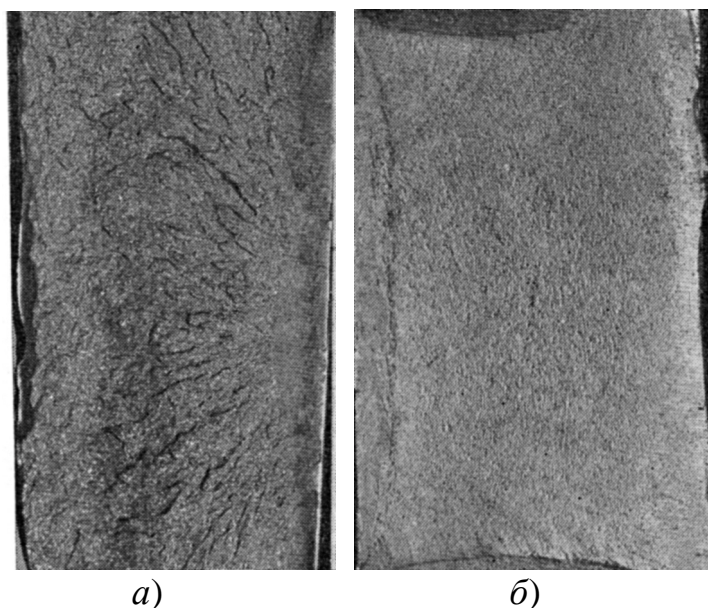


Рис. 2. Виды изломов:  
*а* – вязкий; *б* - хрупкий

Изломы могут иметь волокнистое и кристаллическое (зернистое) строение. По излому можно судить о размере зерна, особенностях выплавки и литья (температуре литья, скорости и равномерности охлаждения сплава и т.д.), термической обработке, а следовательно, и о некоторых свойствах металла. Вид излома является критерием при определении склонности стали к хрупкому разрушению. Среди хрупких изломов различают крупнозернистый, мелкозернистый, межкристаллический, транскристаллический, нафталинистый и другие.

Крупнозернистый излом, например, образуется по граням крупных зерен. Такой излом в большинстве случаев является признаком недоброкачественной структуры. Чем более крупнозернистое строение в изломе, тем ниже механические свойства металла. Крупное зерно в структуре металла приводит к снижению ударной вязкости и, как следствие, снижает работоспособность детали при динамических и циклических нагрузках. Крупно-

зернистая структура, которую имеет литая сталь, может возникнуть также при нарушении технологии обработки: рекристаллизационном отжиге, перегреве стали при термообработке.

Мелкозернистый излом является признаком доброкачественной структуры и может наблюдаться у сталей, подвергнутых закалке. Механические свойства сталей с мелкозернистой структурой более высоки, чем с крупнозернистой.

Причиной возникновения усталостного излома является воздействие знакопеременных или пульсирующих нагрузок. При подобном изломе (рис. 3), как правило, имеются концентратор - очаг возникновения трещины 1, зона предварительного разрушения со светлой сглаженной поверхностью 2, зона окончательного долома 3, образующаяся в момент окончательного разрушения и имеющая зернистое строение. Концентраторами напряжений чаще всего являются трещины, забоины, риски, неметаллические включения и т.д.

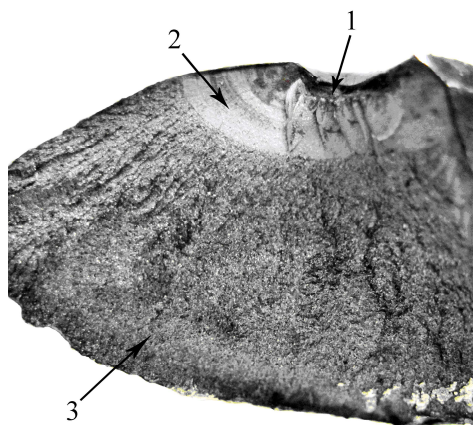
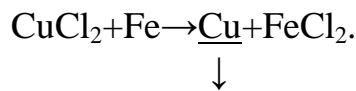


Рис. 3. Строение усталостного излома:  
1 – зона зарождения усталостной трещины;  
2 – зона усталостного развития трещины;  
3 – зона окончательного долома

Макрошлиф представляет собой часть исследуемого металла, подвергнутого специальной подготовке. Она состоит в выравнивании напильником подлежащей обследованию поверхности и шлифовании ее наждачной бумагой. При необходимости шлиф травят реактивами (кислотами, щелочами или растворами солей), которые по-разному растворяют или окрашивают различные по составу или ориентации части металла. Например, обычные стали травят реактивом Гейна (8%  $\text{CuCl}_2$ , 5%  $\text{NH}_4\text{Cl}$ , 87%  $\text{H}_2\text{O}$ ). Режим травления: время 30-90 с, температура 18-24 °С. Во время травления протекает реакция:



Налет меди удаляют тампоном под струей воды.

Исследование макрошлифов позволяет определить форму и расположение зерен в литом металле; волокна (деформированные кристаллы) в прокатанном металле, поковках и штамповках; химическую неоднородность сплава (ликвацию), вызванную процессом кристаллизации или созданную термической или химикотермической обработкой (цементация, азотирование и т.д.). На них также четко выявляются металл сварного шва и наплавленных участков, зоны сплавления и термического влияния.

Макрошлифы используются также и для выявления серы в стали. Она является вредной примесью, понижающей пластичность и прочность стали, сопротивление истиранию и коррозионную стойкость. Сера не растворяется в железе, а образует с ним химическое соединение FeS. Сернистое железо с железом образует эвтектику FeS-Fe с температурой плавления 988 °С. При затвердении стали эта эвтектика располагается в виде легкоплавких оболочек вокруг зерен. Наличие таких оболочек является причиной красноломкости (хрупкости при красном калении) стали с повышенным содержанием серы при горячей обработке (ковке, прокатке и сварке). Оболочки расплавляются, в результате чего между зернами теряется связь и образуются трещины.

Согласно нормативным документам, в зависимости от количества и характера распределения серы в металле последний характеризуется как:

- *высококачественный* – серные включения распределены равномерно, общее содержание серы не превышает допустимых величин;
- *качественный* – прямая ликвация серных включений или очаговая (междендритная) ликвация с ориентацией к центру сечения;
- *обыкновенного качества* – очаговая ликвация без ориентации или с ориентацией к периферии, если количество пятен не больше нормы;
- *брак* – ликвация к периферии сечения и очаговая без ориентации или с ориентацией к периферии, если количество точек больше нормы по техническим условиям на данную деталь.

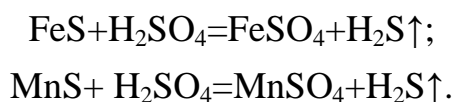
С целью выявления наличия ликвации серы и определения характера ее распределения выполняется проба металла на серу. Она осуществляется по следующей методике.

1. Бромосеребряную фотобумагу засвечивают и помещают на 5...10 мин в 5%-ный раствор серной кислоты. Эмульсионный слой фотобумаги при этом насыщается серной кислотой.

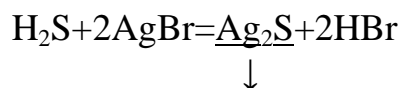
2. Макрошлиф обезжиривается и укладывается на стол подготовленной поверхностью вверх.

3. На подготовленную поверхность макрошлифа укладывается фото-бумага эмульсионной стороной; валиком осуществляется ее прикатка к шлифу в течение 25-30 мин, но не менее 7-8 мин.

В результате взаимодействия сернистых соединений FeS и MnS макрошлифа с серной кислотой протекают следующие реакции:



Образующийся сероводород взаимодействует с бромистым серебром эмульсионного слоя фотобумаги, что приводит к образованию сернистого серебра  $\text{Ag}_2\text{S}$ :



$\text{Ag}_2\text{S}$  проявляется на фотобумаге в виде темно-коричневых точек и пятен, которые отражают места расположения серы в металле.

4. Сняв фотобумагу с макрошлифа, промывают ее водой и фиксируют, т.е. на 10...15 мин кладут в закрепитель.

5. Отпечаток на серу промывают и сушат.

Полученный фотоотпечаток, являющийся документальным отражением характера распределения сернистых соединений в конкретном макрошлифе, позволяет сделать заключение о качестве металла, из которого изготовлен данный шлиф.

### **Контрольные вопросы**

1. Что представляет собой метод макроскопического анализа металлов?
2. Каких видов бывают изломы деталей?
3. Какое влияние оказывают размеры зерен кристаллического строения на склонность металла к разрушению?
4. Каков характер излома детали при воздействии знакопеременных или пульсирующей нагрузок?
5. Что называется макрошлифом?
6. Какова технология изготовления макрошлифа?
7. Что называется ликвацией?
8. Как определяется ликвация серы?
9. Как зависит качество металла от характера распределения в нем серы?

10. Каковы особенности макроструктур образцов, изготовленных по различным технологиям (литьем, штамповкой, наплавкой и т. д.)?

11. Каков должен быть характер взаиморасположения волокон в прокатанном металле и максимально действующих на него усилий?

12. Почему при травлении реактивом Гейна наиболее быстро протравливают границы зерен?

13. Всегда ли металл будет некачественным, если сера в нем распределена неравномерно?

14. Почему в конце шлифования все риски на макрошлифе должны располагаться в одном направлении?

### **3.2 Лабораторная работа**

#### **ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ**

*Цель работы:* изучить метод анализа микроструктуры металлических материалов и приобрести практические навыки исследования микроструктур; ознакомиться и исследовать диаграммы состояния двойных сплавов двух типов.

#### **Порядок выполнения работы**

Группа студентов из трех-четырех человек получает пособие для изучения принципа действия и конструкции металлографического микроскопа МЕТАМ. Заполняя рабочую тетрадь, студенты отвечают на ряд вопросов по данному разделу; затем просматривают микрошлифы технически чистых металлов и сплавов с использованием микроскопов МЕТАМ. Выявляют особенности микроструктуры и выполняют в рабочих тетрадях их схематические зарисовки. Для сплавов, образующих механическую смесь исходных компонентов (на примере сплава Pb-Sb), ведут расчет химического состава каждого из исследуемых микрошлифов. Изучая сплав с неограниченной растворимостью компонентов в жидком и твердом состояниях (на примере сплава Cu-Ni), обращают внимание на структуру сплава до и после диффузионного отжига.

#### **Теоретическая часть работы**

Исследование внутреннего строения металлов и сплавов с помощью оптического или электронного микроскопа называется микроанализом. Внутреннее строение, изучаемое при помощи микроскопа (величина и форма зерен, структурные составляющие, вид и распределение неметалли-

ческих включений и т. д.), называется микроструктурой. Металлографические микроскопы обеспечивают увеличение до 1500-2000 раз.

Микроскопический анализ составляют следующие этапы: приготовление шлифов, травление шлифов, исследование шлифов с использованием микроскопа.

### *1. Приготовление микрошлифов*

Микрошлифом называют небольшой образец металла, имеющий поверхность, подготовленную для микроанализа. Этот металлический образец вырезают из детали, подлежащей исследованию. Затем механической обработкой добиваются получения плоской поверхности, которую подвергают шлифованию шлифшкурками с различными номерами зернистости. Шлифование производится только в одном направлении. При переходе на шкурку другого номера (т.е. более мелкозернистую) обработку производят в направлении, перпендикулярном к рискам, оставшимся после шлифования на предыдущей шкурке, до полного их исчезновения (т.е. шлиф нужно поворачивать на 90°). После шлифования микрошлифы обязательно промывают предварительно в мыльном водном растворе и окончательно в чистой теплой либо проточной холодной воде. Полирование осуществляют на полировальном круге, обтянутом тонким сукном, фетром, бархатом или другим материалом. В качестве абразивных частичек применяются суспензии различных окислов металлов ( $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $Cr_2O_3$  и др.), алмазные пасты и суспензии. Полирование считается законченным, если со шлифа удалены все риски и он имеет зеркальную поверхность. Готовый полированный шлиф последовательно тщательно промывают водой, спиртом и сушат при помощи фильтровальной бумаги.

### *2. Травление шлифов*

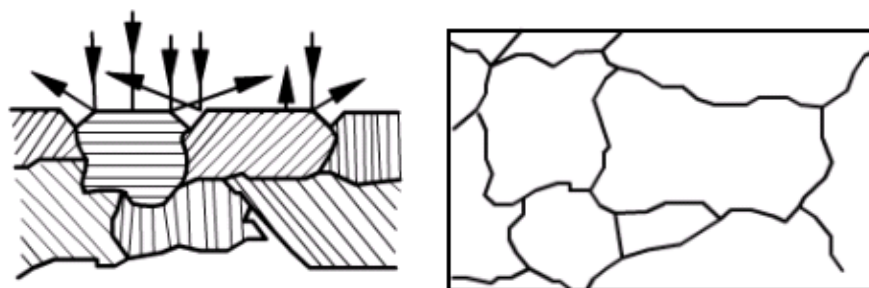
Хорошо отполированный микрошлиф под микроскопом имеет светлую блестящую поверхность. В виде темных участков на нем могут наблюдаться только неметаллические включения (графит, сульфиды, окислы и т.д.).

Для выявления микроструктуры шлиф травят. В зависимости от химического состава шлифа, способа обработки, а также целей исследования применяют различные реактивы. Чаще всего используются слабые спиртовые или водные растворы кислот или щелочей, а также смеси различных кислот.

При травлении микрошлиф погружают в реактив на определенное время (от 1 до 40 с и более в зависимости от исследуемого материала), немедленно промывают его водой и окончательно спиртом, просушивают фильтровальной бумагой и просматривают под микроскопом. Если структура выявлена слабо, шлиф травят дополнительно. Если структура слиш-

ком затемнена, его необходимо переполлировать и травить с меньшей выдержкой.

После травления чистого металла или однофазного сплава можно определить форму и размер зерна вследствие неодинакового травления пограничных участков и остальной части. Световые лучи, направленные на микрошлиф, отразятся от зерен под различными углами, на участке стыков зерен возникает значительное рассеяние и отраженные лучи не попадают в поле зрения (рис. 4, а). Поэтому по границам зерен возникнут темные линии, которые и воспроизведут картину действительных стыков между зернами (рис. 4, б).



а)

б)

Рис. 4. Выявление микроструктуры сплава:

а – схема падения световых лучей;

б – границы зёрен

Фазы, имеющиеся в сплавах, хорошо выявляются под микроскопом за счет различной травимости.

### 3. Исследование шлифов под микроскопом

Основным оборудованием лаборатории являются микроскопы, которые для изучения металлов впервые применил русский инженер П.П. Аносов в 1831 году.

Металлографический микроскоп ЕС МЕТАМ РВ-21 предназначен для изучения структуры металлов и сплавов. Его основные узлы и агрегаты представлены на рис. 5. Микроскоп состоит из штатива 1, внутри которого смонтированы механизмы грубого перемещения тубуса 6 и микрометрической фокусировки. Рукоятки грубой и микрометрической фокусировки располагаются с правой стороны микроскопа (не видны на рисунке) и находятся на одной оси. В верхней части штатива расположена направляющая типа «ласточкин хвост» для установки предметного столика 2.

Столик 2 с помощью рукояток может перемещаться в горизонтальной плоскости в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Исследуемый материал закрепляется на предметном столике пружинными клеммами 3.



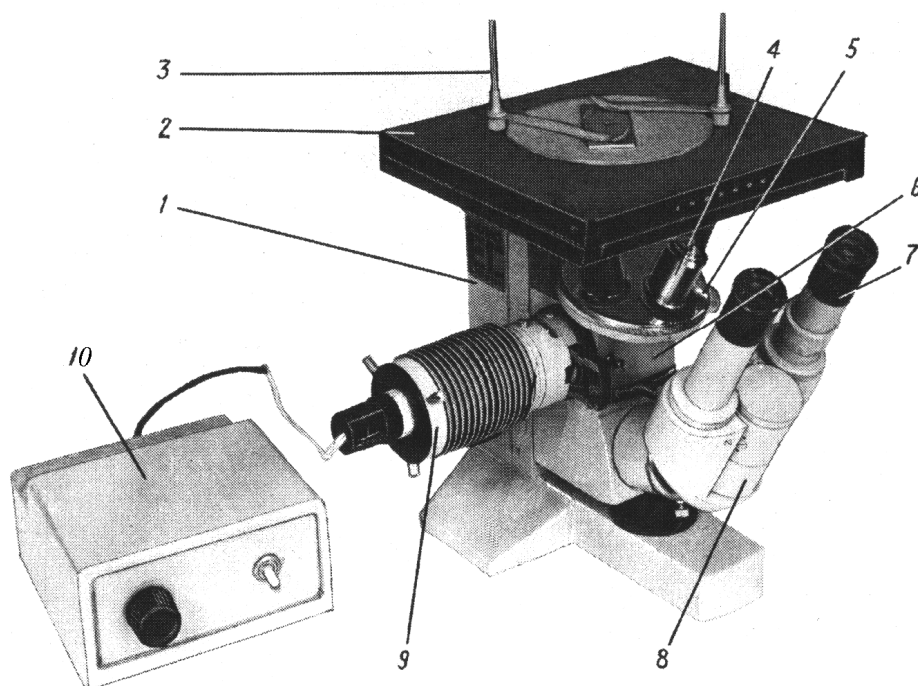


Рис. 5. Общий вид микроскопа ЕС МЕТАМ РВ-21

Тубус 6 устанавливается на направляющие штатива 1 и закрепляется винтом. В верхней части тубуса расположено гнездо для установки револьвера 5 с объективами 4. На револьвере установлено четыре объектива с различным фокусным расстоянием (25, 16, 6,3, 4,0 мм). Переключать объективы можно только вращением револьвера 5 за накатку. Также на тубусе закрепляется бинокулярная насадка 8. В бинокулярную насадку устанавливаются окуляры 7. В комплект микроскопа входят компенсационные окуляры с увеличением  $\times 6,3$ ;  $\times 10$ ;  $\times 12,5$ ;  $\times 16$  и  $\times 20$ . Увеличение микроскопа определяется как произведение увеличений объектива и окуляра.

Значения увеличения микроскопа при работе в светлом поле и поляризованном свете указаны в табл. 5.

В микроскопе реализована оптическая схема, позволяющая изучать объект в отраженном свете, характерная для металлографических микроскопов. Луч от источника света 9, отражаясь от поверхности микрошлифа, через объектив 4 попадает на окуляр 7. Питание лампы источника света осуществляется от источника питания 10.

При микроисследовании чистых металлов (например, железа, меди, никеля) прежде всего выявляются размеры отдельных зерен, их форма и характер границ между ними. При травлении шлифов происходит растворение металла. Однако на поверхности зерна оно протекает с меньшей скоростью, чем на границах. Поэтому границы зерен после травления обозначаются тонкими темными линиями – из-за потери отраженного света в углублениях между зернами.

## Значения увеличений микроскопа

Объективы (фокусное расстояние, мм)	Окуляры									
	x6,3		x10		x12,5		x16		x20	
	Увеличение	Линейное поле в пространстве предмета, мм	Увеличение	Линейное поле в пространстве предмета, мм	Увеличение	Линейное поле в пространстве предмета, мм	Увеличение	Линейное поле в пространстве предмета, мм	Увеличение	Линейное поле в пространстве предмета, мм
25	50	2,5	80	2,0	100	1,6	125*	1,5	-	-
16	-	-	125*	1,4	160*	1,2	200	0,90	250	0,7
6,3	200	0,6	300	0,5	400	0,4	500	0,35	-	-
4,0	-	-	500	0,3	630*	0,3	800	0,22	1000	0,18

\* - значения увеличений применять не рекомендуется

Одновременно с выявлением границ наступает стадия селективного окрашивания зерен, что связано с различной ориентировкой их атомно-кристаллических плоскостей относительно полированной поверхности.

После просмотра ряда шлифов технически чистых металлов необходимо сделать вывод, в котором должно быть отражено сходство или различие среди просмотренных шлифов по размерам зерен, их форме и характеру границ между ними.

### Изучение сплавов двойных систем

Приступая к изучению сплавов, прежде всего, необходимо ознакомиться с некоторыми вопросами теории сплавов: видами сплавов, кривыми охлаждения, правилом фаз, методом построения диаграмм состояния и правилом отрезков. Большое значение для теоретического изучения и практического использования сплавов имеют их диаграммы состояния. Они отражают взаимосвязь между химическим составом, температурой и фазово-структурным строением сплавов.

Диаграммы состояния представляют собой графическое изображение состояния сплава. Они позволяют определять температуры начала и конца плавления сплавов, судить о структуре, а следовательно, и о свойствах сплава при различных видах термического воздействия, выбирать оптимальные режимы термообработки, сварочных и наплавочных работ и т.д.

Диаграммы состояния показывают устойчивые состояния, т.е. состояния, которые при данных условиях обладают минимумом свободной энергии. Поэтому диаграмма состояния может также называться диаграммой

равновесия, так как она показывает, какие при данных условиях существуют равновесные фазы.

В металловедении широко используются понятия компоненты, фаза, система, структура.

*Система* – это совокупность фаз, находящихся в состоянии равновесия.

*Компоненты* – это вещества, образующие систему. Следовательно, чистый металл представляет собой однокомпонентную систему, сплав двух металлов – двухкомпонентную и т.д. Химические соединения можно рассматривать как компоненты лишь в том случае, если они не диссоциируют на составные части в исследуемых интервалах температур.

*Фаза* – это однородная часть системы, отделённая от других частей системы (фаз) поверхностью раздела при переходе через которую химический состав или структура вещества резко меняется. На диаграмме области с различным фазовым составом разделяются сплошными линиями.

Следовательно, однородная жидкость является однофазной системой, а механическая смесь двух видов кристаллов – двухфазной, так как каждый кристалл отличается от другого по составу или по строению и они отделены друг от друга поверхностью раздела.

*Структура* – это форма, размеры и характер взаимного расположения соответствующих фаз в металлах и сплавах.

*Структурные составляющие* – это обособленные части сплава, имеющие одинаковое строение с присущими им характерными особенностями.

Каждая диаграмма соответствует системе, образующей при кристаллизации какой-либо характерный вид сплава, например: механическую смесь компонентов, твердые растворы с неограниченной и ограниченной растворимостью и др. Условно они пронумерованы.

### 1. Диаграмма состояния I рода

Диаграмма состояния сплавов I рода соответствует сплавам, компоненты которых в жидком состоянии неограниченно растворяются друг в друге, а в твердом – образуют механическую смесь.

В соответствии с этой диаграммой плавятся и затвердевают, например, сплавы: Pb-Sb, Sn-Zn, Ag-Al и др. Они имеют следующие особенности:

- обладают неограниченной взаимной растворимостью в жидком состоянии, т.е. смешиваются друг с другом в любых отношениях, образуя при этом однородный жидкий раствор;

- в процессе кристаллизации исходные компоненты выпадают в виде самостоятельных включений, образуя механическую смесь.

На рис. 6 приведена диаграмма состояния сплава свинец-сурьма (Pb-Sb). Линия ABC диаграммы, являющаяся началом затвердевания сплавов,

называется *ликвидусом*. Выше неё все сплавы находятся в жидком состоянии.

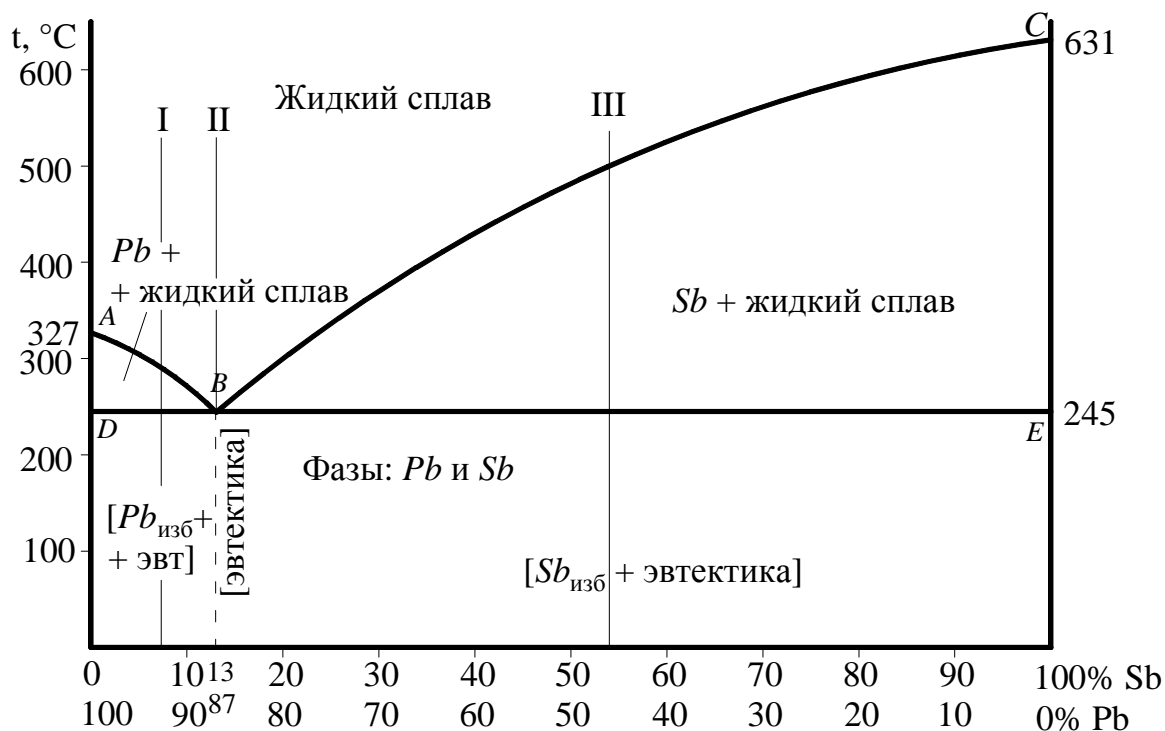


Рис. 6. Диаграмма состояний сплавов Pb-Sb

Линия *DBE* - *солидус* - является концом затвердевания сплава. Ниже этой линии все сплавы в твердом состоянии.

В интервале между линиями ликвидус и солидус в сплаве одновременно находятся две фазы: жидкая и твердая. Этот промежуток является интервалом кристаллизации сплавов.

#### *Кристаллизация эвтектического сплава (сплав II)*

*Эвтектикой* называется механическая смесь двух фаз, образующаяся в сплаве строго определенного химического состава при определенной температуре затвердевания, являющейся низшей из всех температур затвердевания сплавов данной системы. Сплав, обладающий данными особенностями, называется эвтектическим.

Из диаграммы (рис. 6) видно, что одновременная кристаллизация обоих компонентов протекает на всей линии нонвариантного эвтектического превращения *DBE*. Эти компоненты будут чистыми и, следовательно, разделены друг от друга. Левее и правее точки *B* предварительно кристаллизуются чистые избыточные компоненты, являющиеся твёрдыми фазами в рассматриваемой системе. Таким образом, получается механическая смесь двух фаз, которыми и будут являться в данном случае чистые компоненты. Из диаграммы следует, что сплав, отвечающий по составу точке *B*, отлича-

ется от всех прочих сплавов тем, что имеет лишь одну критическую точку, т.е. его кристаллизация происходит при строго определенной температуре и, значит, весь жидкий сплав перейдет при этой температуре в твердое состояние, а именно, в смесь двух твердых фаз. Видно также, что температура начала и конца затвердевания этого сплава одна и та же и, кроме того, самая низкая среди прочих сплавов данной системы. Состав этого сплава отвечает только точке *B*, т.е. является постоянным (рис. 7).

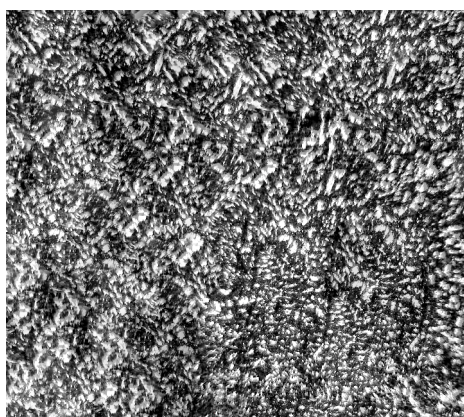


Рис. 7. Сплав Pb-Sb эвтектического состава

Сплавы, находящиеся левее эвтектического, называются доэвтектическими, а правее - заэвтектическими.

#### *Кристаллизация доэвтектического сплава (сплав I)*

При достижении линии ликвидус (*AB*) при охлаждении из жидкости начинают образовываться кристаллы твёрдой фазы (в данном случае, свинца). В данных сплавах ниже этой линии существуют две фазы - кристаллы выпадающего из раствора Pb и жидкий раствор переменного состава. При охлаждении количество кристаллов свинца возрастет, а концентрация жидкого раствора изменяется по линии ликвидус (*AB*) и при температуре 245 °С, т.е. на линии *DE*, достигает эвтектического состава. При этой температуре жидкость, кристаллизуясь, образует эвтектику. В процессе кристаллизации эвтектики на линии *DB* сплавы имеют три фазы: жидкий раствор эвтектического состава; кристаллы избыточного свинца и свинца из эвтектики; кристаллы сурьмы из эвтектики. После окончательного затвердевания доэвтектические сплавы будут иметь две фазы Pb и Sb, а их структура будет состоять из кристаллов свинца и эвтектики (рис. 8).

#### *Кристаллизация заэвтектических сплавов (сплав III)*

Она протекает по той же схеме, что и для доэвтектических. Однако избыточной фазой в заэвтектических сплавах будет не свинец, а сурьма (рис. 9).

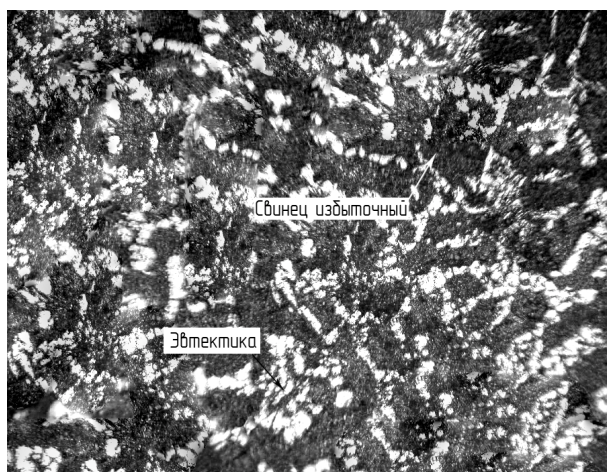


Рис. 8. Доэвтектический сплав Pb-Sb

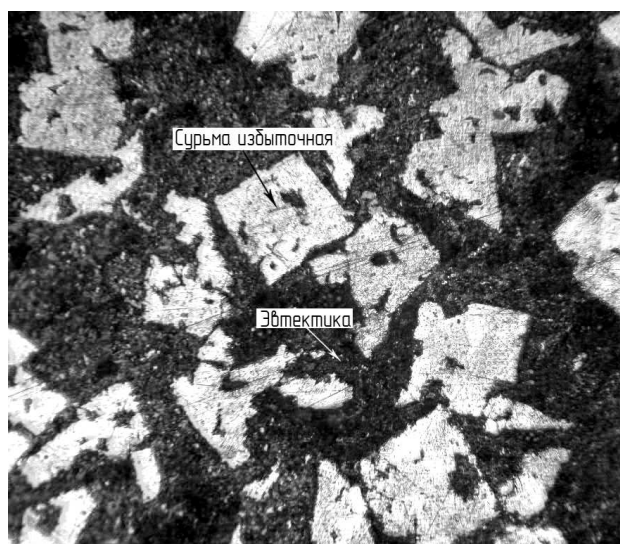


Рис. 9. Заэвтектический сплав Pb-Sb

При нагревании сплавов все превращения протекают в обратной последовательности.

Для сплавов, компоненты которых образуют механическую смесь и не имеют ликвации, можно выполнить расчет их химического состава. Последовательность расчета следующая.

1. При микроисследовании визуально определяется количество избыточной структурной составляющей, т.е. определяется занятая ею площадь и выражается в процентах от всей видимой площади микрошлифа.

2. Выполняется расчет химического состава сплава:  
а) для доэвтектических сплавов

$$A = A_{изб} + \frac{(100 - A_{изб}) \cdot A_{эвт}}{100};$$

б) для заэвтектических сплавов

$$B = B_{изб} + \frac{(100 - B_{изб}) \cdot B_{эвт}}{100},$$

где  $A$ ,  $B$  и  $A_{изб}$ ,  $B_{изб}$  - количество соответственно искомых и избыточных компонентов (определенных визуально), %;

$A_{эвт}$  и  $B_{эвт}$  - содержание искомых компонентов в эвтектике, %.

Второй элемент сплава в каждом случае определяется как разность между всем количеством сплава и рассчитанным компонентом.

*Пример.* При микроисследовании сплава Pb-Sb видны темные вытянутые кристаллы. Это – избыточный свинец. Следовательно, сплав доэвтектический. Визуально определено, что занимаемая избыточным свинцом площадь составляет примерно 90% ( $Pb_{изб} = 90\%$ ). Количество свинца в эвтектике  $Pb_{эвт} = 87\%$  (см. рис. б). По выше приведённой формуле определяем количество свинца, содержащегося в сплаве:

$$Pb = 90 + \frac{(100 - 90) \cdot 87}{100} = 98,7\%.$$

Соответственно, количество сурьмы:

$$Sb = 100 - Pb = 100 - 98,7 = 1,3\%.$$

Известно, что свинец и сурьма различаются по удельной массе. В процессе медленного охлаждения сплавов системы Pb-Sb в них выделяется избыточный свинец или сурьма, значительно отличающиеся по удельному весу от остального (маточного) раствора. Поэтому избыточные компоненты либо всплывают наверх (избыточная Sb), либо оседают на дно (избыточный Pb). В подобных случаях сплавы по всему объёму будут неоднородны (рис. 10). Этот процесс называется ликвацией I рода или ликвацией по удельной массе. По макрошлифам с подобной ликвацией определить химический состав сплава нельзя, так как при изменении места расположения исследуемой поверхности шлифа меняется количество избыточного компонента.

Ликвация является негативным явлением, поэтому для её устранения необходимо применять определённые меры. Это:

- ускоренное охлаждение жидкого сплава в процессе кристаллизации;
- перемешивание;
- добавление третьего, более тугоплавкого компонента (например, меди), который, кристаллизуясь первым, образует каркасную решётку, не дающую всплыть сурьме и осесть свинцу.



Рис. 10. Сплав Pb-Sb с ликвацией по удельной массе

## 2. Диаграмма состояния II рода

Сплавы, компоненты которых образуют твердые растворы с неограниченной растворимостью, относятся к сплавам II рода. Их диаграммы состояний характеризуют системы, компоненты которых полностью растворяются друг в друге как в жидком, так и в твердом состоянии. В соответствии с этой диаграммой затвердевают и плавятся такие системы, как Fe-Ni, Cu-Au, Cu-Ni и др. После затвердевания эти сплавы имеют структуру твердого раствора.

Рассмотрим диаграмму состояния сплавов системы Cu-Ni (рис. 11).

Выше линии ликвидус ( $FmG$ ) сплавы находятся в жидком состоянии. Ниже линии солидус ( $FnG$ ) - в твердом. Кристаллизация сплава (например, состоящего из 50% Cu и 50% Ni) протекает следующим образом. При температуре выше точки  $m$  сплав находится в жидком состоянии. При охлаждении несколько ниже нее из сплава выделяются первые кристаллы твердого раствора. Дальнейшее охлаждение приводит к увеличению количества твердого раствора и уменьшению жидкого компонента сплава. Между линиями ликвидус и солидус сплавы находятся в двухфазном состоянии и состоят из жидкости и кристаллов твердого раствора. Достигнув температуры точки  $n$ , т.е. солидус, кристаллизуется последняя капля жидкости, превращаясь в твердый раствор.

В процессе кристаллизации сплава концентрации образующегося твердого раствора и остающейся жидкости непрерывно меняются. Так, в точке  $m$  (рис. 11) выпадают кристаллы твердого раствора концентрации точки  $m_1$ , в точке  $p$  - концентрации  $p_1$ . Таким образом, в интервале температур между точками  $m$  и  $p$  состав твердого раствора меняется по участку линии солидус  $m_1p_1$ . Состав жидкой фазы рассматриваемого сплава меняется по участку линии ликвидус  $mp_2$ . Следовательно, в интервале между



линиями ликвидус и солидус состав образующегося твердого раствора меняется по линии солидус, а остающейся жидкости - по линии ликвидус.

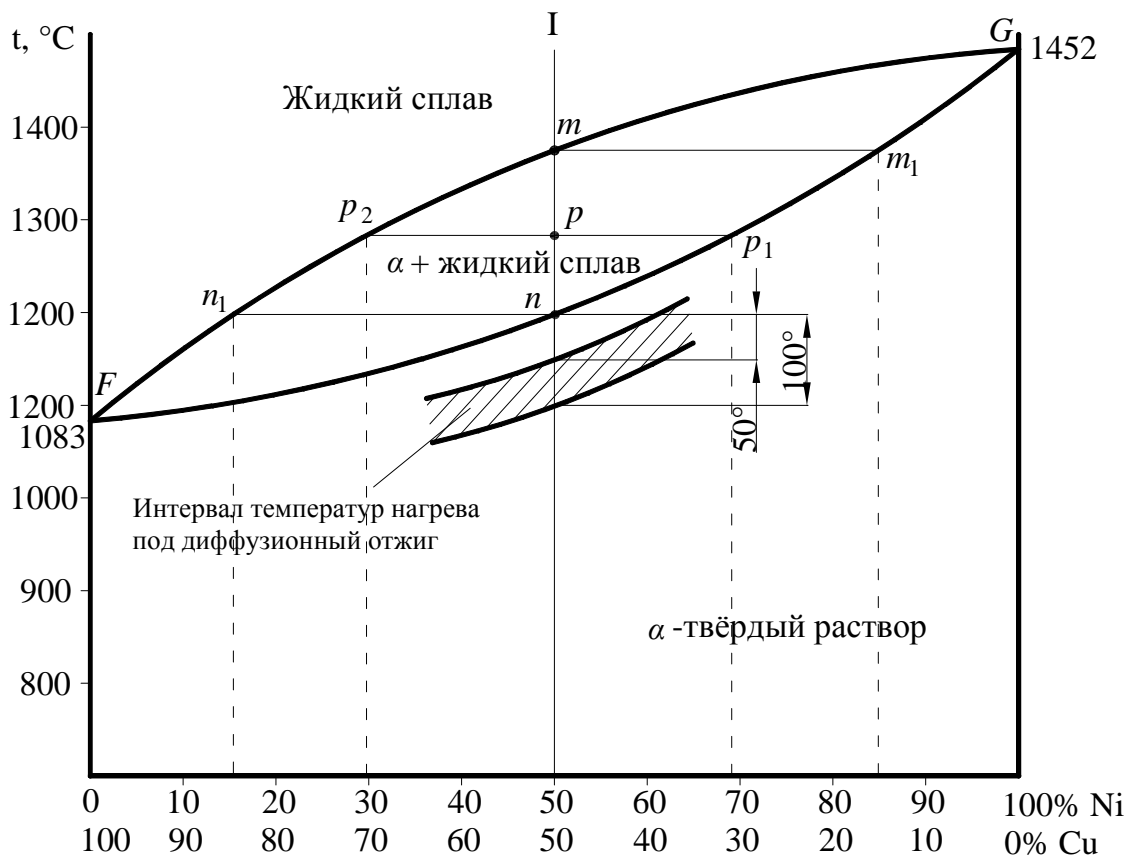


Рис. 11. Диаграмма состояний сплавов Cu-Ni

В результате кристаллизации оси образующихся кристаллов твердого раствора будут иметь один, а пространства между ними - другой, резко отличающийся состав. Подобная химическая неоднородность в пределах кристалла (дендрита) называется ликвацией II рода (или внутрикристаллической, дендритной) (рис. 12). Она приводит к возникновению разности электрохимических потенциалов, вследствие чего в процессе эксплуатации деталей развивается особо опасный вид межкристаллитной коррозии.

Дендритная ликвация может быть устранена посредством диффузионного отжига. С этой целью сплав нагревают до температуры, лежащей ниже линии солидус на 50...100 °C (см. рис. 11). Вследствие протекающей диффузии химический состав кристалла выравнивается. Такой сплав будет обладать одинаковыми свойствами по всему объему (рис. 13).

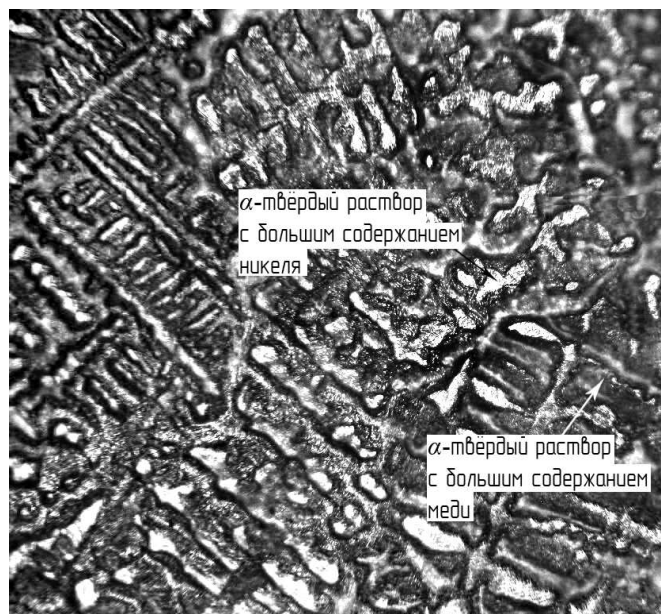


Рис. 12. Сплав Cu-Ni с внутрикристаллической ликвацией



Рис. 13. Сплав Cu-Ni после диффузионного отжига:  
α-твёрдый раствор

### Контрольные вопросы

1. Сущность и назначение микроструктурного анализа.
2. Типы и особенности микроскопов, применяемых при металлографических исследованиях.
3. Принцип действия металлографического микроскопа.
4. Основные конструктивные элементы оптической системы металлографического микроскопа.
5. Основные требования к поверхности металла при микроисследовании.
6. Назначение микрошлифа и технология его изготовления.

7. Что называется сплавом? Основные типы сплавов двойных систем.
8. Назначение диаграмм состояний сплавов.
9. Сплавы I типа и их особенности.
10. Что называется эвтектикой? Ее особенности.
11. Особенности кристаллизации доэвтектических сплавов I типа.
12. Особенности кристаллизации заэвтектических сплавов I типа.
13. Причины возникновения ликвации I рода и способы борьбы с ней.
14. Сплавы II типа и их особенности.
15. Как протекает кристаллизация в сплавах II типа?
16. Причины возникновения ликвации II рода. Способы борьбы с ней.

### **3.3 Лабораторная работа СТАБИЛЬНЫЕ И НЕКОТОРЫЕ ОСОБЫЕ СТРУКТУРЫ СТАЛИ**

*Цель работы* - исследовать и выявить особенности микроструктуры сталей обыкновенного качества, качественных конструкционных и углеродистых инструментальных в состоянии поставки; установить ее связи с изменением свойств стали, освоить и получить практические навыки по методике расчета процентного содержания углерода, механических свойств стали и работе на прессе Бринелля.

#### **Порядок выполнения работы**

Группа студентов из трех-четырех человек получает коллекцию микрошлифов из различных марок сталей в нормализованном, отожженном и литом состояниях. Просматривают микрошлифы, используя металлографический микроскоп, выявляют особенности микроструктуры, тщательно ее зарисовывают, указывают фазы и структурные составляющие. Ориентировочно (на глаз) определяют площади, занятые структурными составляющими, рассчитывают содержание углерода и устанавливают марку стали и ее назначение. В одной из марок сталей необходимо рассчитать теоретически значение твердости и предела прочности при растяжении. В процессе исследования микроструктуры сталей в литом, деформированном и перегретом состояниях выявить характерные признаки, объяснить влияние деформации, перегрева, литья на размеры, форму зерна и свойства стали, указать недостатки и способы их устранения.. По микроструктуре контрольного шлифа определить теоретическую твердость, а затем проверить испытанием на прессе Бринелля.

## Теоретическая часть работы

Для изготовления и ремонта элементов конструкций, деталей многообразной железнодорожной техники, подъемно-транспортных механизмов, технологической оснастки и инструмента широко применяют углеродистые конструкционные и инструментальные стали. Различные виды проката, поковок, штамповок и других полуфабрикатов поставляют в отожженном, нормализованном, термически обработанном, нагартованном и др. состояниях. Наиболее характерным состоянием поставки сталей являются нормализованная или отожженная.

Прежде чем рассматривать термообработку стали, необходимо привести общепринятые обозначения критических точек.

Критические точки обозначаются буквой  $A$ .

Нижняя критическая точка, обозначаемая  $A_1$ , лежит на линии  $PSK$  и соответствует превращению аустенит $\leftrightarrow$ перлит. Верхняя критическая точка  $A_3$  лежит на линии  $GSE$  и соответствует началу выпадения или концу растворения феррита в доэвтектоидных сталях или цементита (вторичного) в заэвтектоидных. Для заэвтектоидных сталей точка  $A_3$  часто обозначается как  $A_{cm}$ .

Чтобы отличить критическую точку при нагреве от критической точки при охлаждении, рядом с буквой  $A$  ставят букву  $c$ , в первом случае и  $r$  – во втором.

Следовательно, критическая точка превращения аустенита в перлит обозначается  $A_{r1}$ , а перлита в аустенит –  $A_{c1}$ ; начало выделения феррита из аустенита обозначается  $A_{r3}$ ; конец растворения феррита в аустените –  $A_{c3}$ . Начало выделения вторичного цементита из аустенита –  $A_{r3}$  ( $A_{r_{cm}}$ ), а конец растворения вторичного цементита в аустените –  $A_{c3}$  ( $A_{c_{cm}}$ ) (рис. 14).

Теперь дадим определения нормализации и отжига.

**Нормализация** - нагрев выше критических точек  $A_{c3}$  или  $A_{cm}$  на 30-50 °С (область 1, рис. 14), непродолжительная выдержка при этих температурах и охлаждение на воздухе или в воздушной струе. Нередко нормализацию проводят с ковочного нагрева. В результате фазовой перекристаллизации нормализация устраняет крупнозернистую структуру видмандштетта. Также исправляет структуру, полученную при прокатке, ковке, штамповке, литье, в зоне термического влияния сварных швов и наплавов. В результате прочность и твердость увеличивается до 25% по сравнению с отжигом.

**Отжиг** - нагрев стали до температуры выше точек  $A_{c3}$  или  $A_{c1}$  (области 2, 3, рис. 14), выдержке и последующем медленном охлаждении вместе с печью со скоростью не более 100 °С в час до 500-550°С, а затем – на воздухе. Повышенная скорость охлаждения приведет к образованию структу-

ры с более высокой твердостью. Отжиг по режиму 2 (рис. 14) приводит к полной фазовой перекристаллизации, устраняет дендритную внутрикристаллическую ликвацію, видманштеттову структуру, частично, при необходимости, исправляет строчечность.

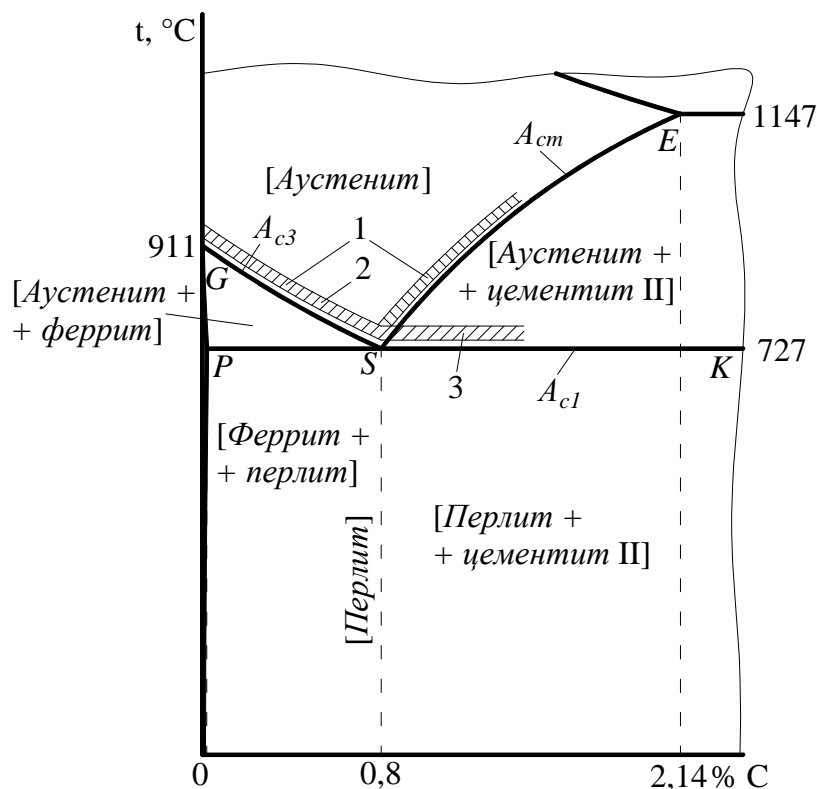


Рис. 14. Оптимальный температурный интервал нормализации и отжига углеродистых сталей

После полного отжига структура приобретет равновесное состояние, представляющее сравнительно одинаковые по форме равноосные зерна (полиэдры). Неполный отжиг 3 (рис. 14) применяют преимущественно для заэвтектоидных сталей. В результате получают структуру зернистого перлита (цементита). В результате отжига сталь приобретет более высокую пластичность, вязкость.

Маркируется сталь следующим образом:

- стали обыкновенного качества по ГОСТ 380-2008 (Ст0, Ст1кп, Ст1пс, Ст1сп, Ст2кп, ..., Стбсп): буквы «Ст» обозначают «Сталь»; цифры – условный номер марки в зависимости от химического состава; буквы «кп», «пс», «сп» - степень раскисления («кп» - кипящая, «пс» - полуспокойная, «сп» - спокойная);

- стали углеродистые качественные конструкционные по ГОСТ 1050-88 (марки: 08, 10, 15, 20, ... , 60): здесь, цифра соответствует средней мас-

совой доле углерода в сотых долях процента. Например, сталь марки 45 содержит примерно 0,45% углерода;

- стали углеродистые инструментальные по ГОСТ 1435-99 (У7, У8, ..., У12 или У7А, ..., У12А): буква «У» обозначает «Углеродистая», следующая за ней цифра – средняя массовая доля углерода в десятых долях процента (например, У10 – сталь содержит примерно 1,0% углерода), буква «А» показывает, что сталь повышенного качества, т.е. в ней понижено содержание таких вредных примесей, как сера и фосфор (серы меньше или равно 0,018%, фосфора – 0,025%).

Стали углеродистые качественные конструкционные и стали углеродистые обыкновенного качества являются доэвтектоидными, и поэтому имеют феррито-перлитную структуру (рис. 15, а), а углеродистые инструментальные – перлитную и перлито-цементитную (рис. 15, б) (кроме стали У7 (У7А), которая тоже является доэвтектоидной). После травления микрошлифов 2-4%-ным раствором азотной кислоты в этиловом спирте при рассмотрении в микроскоп зерна феррита и вторичного цементита выглядят светлыми, а перлита - темными.

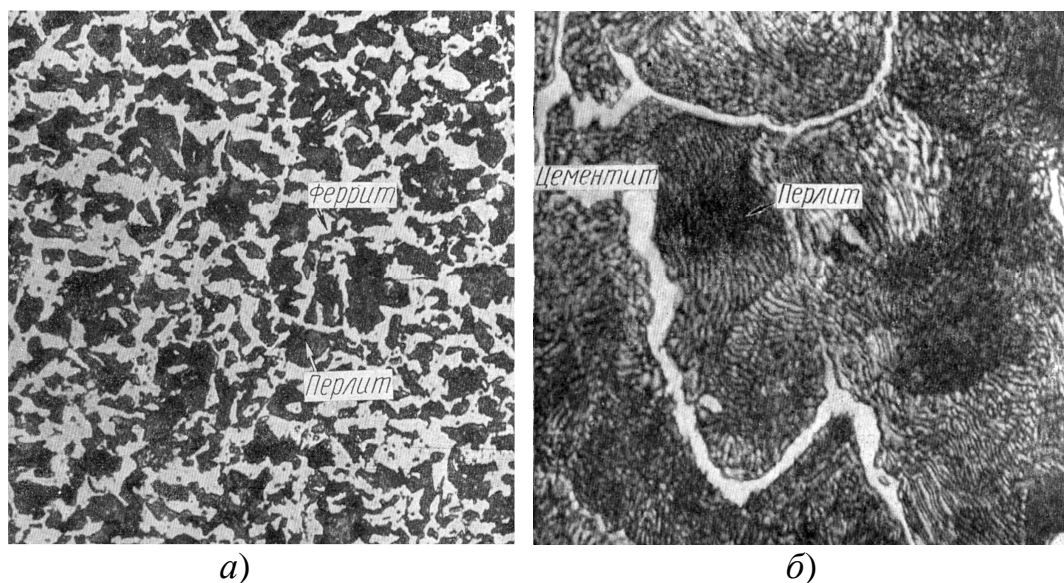


Рис. 15. Микроструктура стали:  
а – доэвтектоидной; б - заэвтектоидной

Основной структурной составляющей заэвтектоидных сталей является перлит. Незначительное количество избыточного вторичного цементита распределено в виде тонкой светлой сетки вокруг зерен перлита. При травлении такой стали пикратом натрия происходит окрашивание цементита вторичного в темный цвет, феррит и перлит остаются светлыми. Этот прием применяют для распознавания феррита и цементита.

При содержании в стали углерода 0,6-0,7% феррит выделяется вокруг зерен перлита в виде сетки. Физико-механические и другие свойства ста-

лей зависят от процента содержания углерода и характера сформированной микроструктуры. С увеличением процентного содержания углерода прочность, твердость возрастают, а пластичность, вязкость снижаются. Крупнозернистые структуры по сравнению с мелкозернистыми, обладают пониженными пластичностью и вязкостью.

Определение концентрации углерода в стали, твердости, прочности, пластичности и др. характеристик выполняют по долям площадей, занимаемых структурными составляющими.

Для доэвтектоидных и заэвтектоидных сталей содержание углерода ( $C$ ) рассчитывают по формулам:

$$C = \frac{0\% \cdot S_{\phi} + 0,8\% \cdot S_n}{100} \text{ - для доэвтектоидных сталей;}$$

$$C = \frac{0,8\% \cdot S_n + 6,67\% \cdot S_{\psi}}{100} \text{ - для заэвтектоидных сталей,}$$

где 0; 0,8; 6,67 - количество углерода соответственно в феррите, перлите и цементите, %;

$S_{\phi}$ ,  $S_n$ ,  $S_{\psi}$  - доли площадей, занимаемые в структуре соответственно ферритом ( $\Phi$ ), перлитом ( $\Pi$ ) и цементитом вторичным ( $\psi$ ).

Теоретическое значение твердости по Бринеллю, прочности и относительного удлинения определяется аналогично, как и в лабораторной работе «Диаграмма состояния железо-углерод (цементит)».

В процессе исследования микроструктуры литой, перегретой стали следует иметь в виду, что избыточные фазы:  $Fe_{\alpha}$  в доэвтектоидных и  $Fe_3C$  в заэвтектоидных сталях, выделившиеся из  $\gamma$ -твёрдого раствора, могут образовать кристаллы (зерна) игольчатой, зернистой формы, либо сетку по границам зерен (так называемая структура видмандштетта (рис. 16, а)).

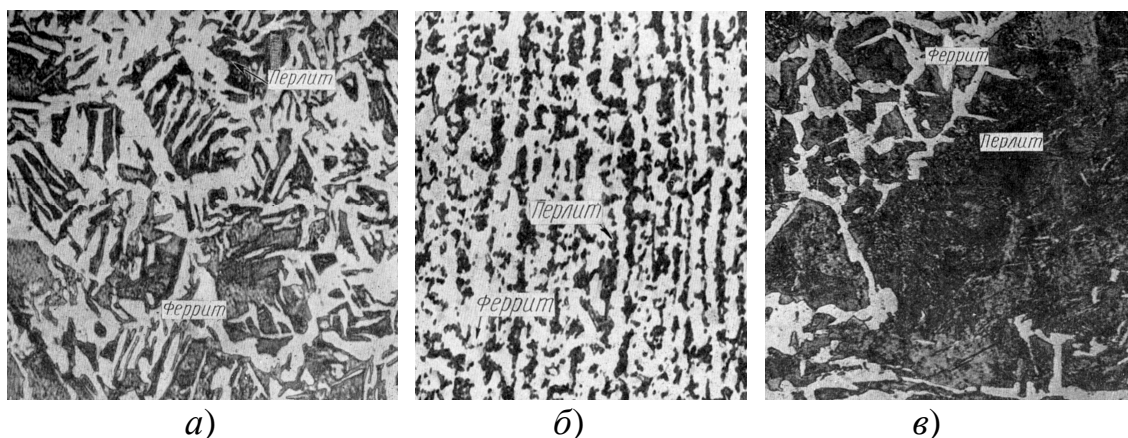


Рис. 16. Пороки микроструктуры стали:

а – структура видмандштетта; б – строчечная; в - крупнозернистая

В катаной углеродистой стали участки перлита и феррита, а также имеющиеся в ней неметаллические включения вытянуты вдоль направления прокатки. Сталь имеет полосчатое (строчечное) строение (рис. 16, б). Ударная вязкость поперек волокон является более высокой, чем при испытании вдоль волокон. Предел прочности при растяжении наибольшее значение имеет вдоль прокатки. Различие свойств вдоль и поперек прокатки учитывают на стадии проектирования элементов конструкций, Этот недостаток нельзя устранить и, как правило, его не требуется устранять, так как пластическая деформация существенно увеличивает конструкционную прочность материала. В случае необходимости (частично отжигом) микроструктуре можно придать равноосный характер, но строчечность и различие свойств по направлению сохраняются.

Литая сталь обычно характеризуется крупнозернистостью, дендритным строением, внутрикристаллической ликвацией (рис. 16, в). Это связано с особенностями роста избыточной фазы в процессе затвердевания сплава. Из образовавшихся разнотернистых кристаллов аустенита при медленном охлаждении возникают различные по величине и форме зерна феррита и перлита. Такая структура не обладает стабильными и высокими свойствами, создает внутренние напряжения, приводящие к возникновению трещин и последующему разрушению детали. Отжиг или нормализация отливок позволяют получить в них равновесную структуру, состоящую из сравнительно одинаковых по форме и размерам равноосных зёрен (полиэдров). Возрастает предел текучести, пластичность, вязкость. Например, в качественной конструкционной стали 40 относительное удлинение с 10-12% (до отжига) возрастает до 15-16% (после отжига).

Температуры нагрева, значительно превышающие  $A_3$  и  $A_{cm}$ , или продолжительная выдержка приводят к образованию в сталях перегретой, видманштеттовой структуры, отличающейся крупнозернистостью. При этих температурах многие мелкие зерна аустенита в результате собирательной рекристаллизации объединяются в одно крупное. Этому слиянию способствуют и сосредоточения на границах зерен аустенита различных дефектов, в первую очередь, дислокаций, вакансий. Их миграция приводит к уничтожению границ зерен. Скорость роста кристаллов зависит от исходного структурного состояния, предшествующей пластической деформации и др. факторов. Особенно интенсивный рост зёрен обуславливает малая степень деформации (~5%), называемая критической. Поэтому, если после деформации предусмотрен нагрев материала, то следует избегать данной критической степени деформации,

При медленном охлаждении перегретой стали (например отжиге) по границам зерен аустенита кристаллизуется феррит или вторичный цементит, а при температуре 727 °С аустенит превращается в перлит, сохраняя крупнозернистую форму.



В случае более быстрого охлаждения (например, нормализации) из области перегретого крупнозернистого аустенита избыточные  $\alpha$ -фаза (феррит) или  $Fe_3C$  (цементит) не успевают полностью выделиться на границы зёрен и образуют внутри их пластины (иглы) структурно свободного феррита, либо цементита вторичного.

Видманштеттова структура характерна для отливок, сильно перегретой нормализованной стали, зон термического влияния сварных швов и наплавов. Она отличается пониженной пластичностью и ударной вязкостью. В доэвтектоидных сталях ее можно устранить отжигом или нормализацией, а в заэвтектоидных сталях, как правило, нормализацией.

Если допущены еще более значительные нагревы, то происходит на границах зерен аустенита интенсивное образование окислов железа. Имеет место пережог стали, который устранить нельзя.

### Контрольные вопросы

1. Дайте определение нормализации и отжига.
2. Назовите фазовые и структурные составляющие сталей 45, Ст3 после полного отжига.
3. Влияние углерода на механические свойства и микроструктуру отожженных сталей.
4. Какую структуру должна получить сталь марки Ст5 после нагрева до 1050-1100 °С и охлаждении на воздухе? То же, вместе с печью.
5. Назовите фазовые и структурные составляющие сталей 40, Ст4, У12 при температуре 760 °С.
6. Для изготовления каких элементов конструкции железнодорожной техники применяют стали марок Ст3, 20?
7. В чем состоит различие между литой и катаной низкоуглеродистой сталью?
8. Можно ли по микроструктуре отличить металл, деформированный в горячем состоянии, от металла, деформированного в холодном состоянии?
9. Какое влияние на форму и размеры зерен в процессе отжига окажет замедленное или ускоренное охлаждение?
10. Каким образом получают в стали структуру зернистого перлита?
11. Почему в прокате, имеющем строчечную структуру, отжигом или нормализацией нельзя полностью устранить различие свойств по направлению?
12. Каким образом в доэвтектоидной стали устранить внутрикристаллическую ликвацию?
13. Каким образом в заэвтектоидной стали устранить цементитную сетку?

14. Укажите и объясните, в какой форме и где выделится избыточный феррит или вторичный цементит в случае медленного и ускоренного охлаждения перегретой стали?

### **3.4 Лабораторная работа**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ЧУГУНОВ**

*Цель работы* - изучение условий получения, структур, свойств и назначения чугунов, используемых на железнодорожном транспорте.

### **Порядок выполнения работы**

Бригада из трех-четырех студентов получает микроскоп и коллекцию шлифов. При их исследовании обращают внимание на характерные особенности структуры, зарисовывают в отчет и отвечают на вопросы, поставленные в бланке отчета. Для этого необходимо пользоваться данным методическим пособием, плакатами в лаборатории и слушать пояснения ведущего занятия преподавателя.

В конце занятия каждая из бригад студентов должна по микроструктуре определить тип чугуна у двух контрольных шлифов, охарактеризовать отличительные признаки в его структуре и отметить особенности условий его получения.

### **Теоретическая часть работы**

Чугуны представляют собой тройные системы Fe-C-Si со сравнительно небольшими температурами плавления (около 1200-1350 °С), поэтому человечество самые простые из них - серые - освоило более 2000 лет назад. Более сложные по технологии производства чугуны удалось человечеству получить только в последнее столетие, когда люди установили существование четкой зависимости свойств материалов от их структуры. Большой вклад в металлографию чугуна внесли советские ученые А.А. Бочвар, М.Г. Окнов, И.Н. Богачев, М.Г. Гиршович, К.П. Бунин, К.И. Таран и др.

Большое содержание кремния, а также медленная скорость охлаждения способствуют при кристаллизации выделению углерода в свободном виде – в виде графита. Этот процесс называется *графитизация*. В зависимости от того, каким образом будет протекать графитизация, основа чугуна тоже будет меняться. Рассматривать процесс графитизации удобно по схеме, представленной на рис. 17.

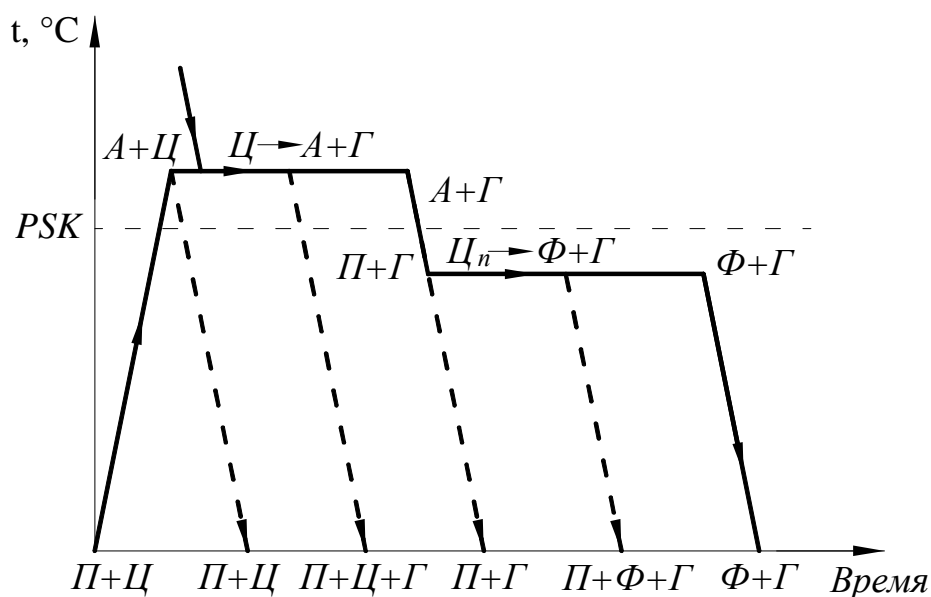


Рис. 17. Схема образования структур при графитизации чугуна

Предположим, что охлаждение было достаточно быстрое и получился белый чугун (перлит + цементит), - исходное состояние. В результате нагрева белого чугуна выше линии  $PSK$  перлит превращается в аустенит; выдержка при этой температуре приводит к графитизации избыточного нерастворившегося цементита. Если процесс закончился полностью, то при высокой температуре структура будет состоять из аустенита и графита, а после охлаждения из перлита и графита (рис. 17). При незавершённости процесса первичной графитизации (выше линии  $PSK$ ) сохраняется цементит, и структура состоит из аустенита, графита и цементита при высокой или перлита, графита и цементита при низкой температуре.

При переходе через критическую точку (линия  $PSK$ ) аустенит превращается в перлит и выдержка при температурах, близких, но ниже критической точки, может привести к распаду цементита перлита (вторая стадия графитизации). При полностью завершённом процессе весь цементит перлита разложится и в результате образуется феррито-графитная структура, а при частичном превращении – феррито-перлитно-графитная (феррито-перлитный чугун).

Кремний особенно сильно влияет на структуру чугуна, усиливая графитизацию. Содержание кремния в чугунах колеблется в широких пределах: от 0,3-0,5 до 3-5%. Изменяя содержание кремния, можно получить чугуны, совершенно различные по свойствам и структуре – от малокремнистого белого до высококремнистого ферритного.

Для приближённого определения структуры чугуна в зависимости от содержания примесей пользуются так называемыми структурными диаграммами (рис. 18). Из диаграмм видно, какой будет структура у отливок с

толщиной стенок 50 мм в зависимости от содержания в чугунах углерода и кремния (рис. 18, а), и с различной толщиной стенок (рис. 18, б).

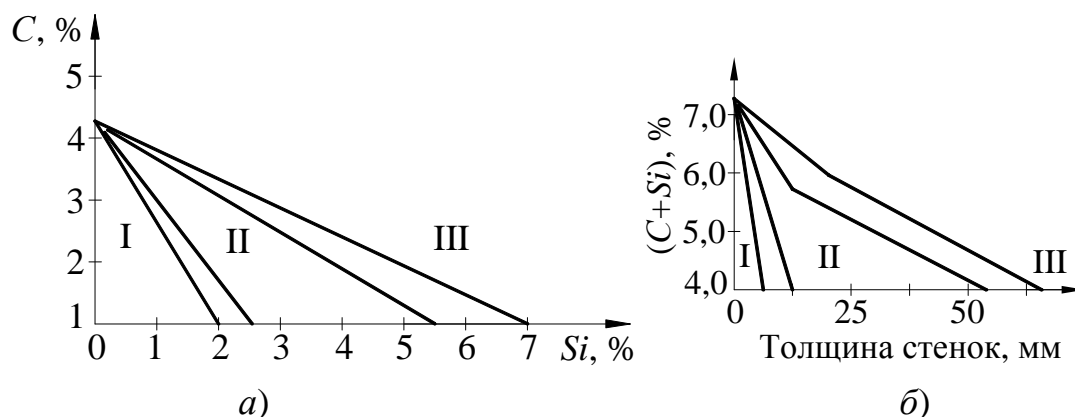


Рис. 18. Структурная диаграмма для чугуна, показывающая, какая должна получиться структура в отливке в зависимости от:  
 а – содержания кремния и углерода (толщина стенки 50 мм);  
 б – суммы содержаний углерода и кремния и от толщины стенки;  
 I – белые чугуны; II – перлитные чугуны; III – серые ферритные чугуны

Количество графита и форма его выделений (розетки, чешуйки, толстые чешуйки, тонкие, мелкие, хлопья и глобули), а также количество связанного углерода в металлической основе чугуна, зависящие от условий его получения, в конечном итоге определяют его тип и группу (ферритный, феррито-перлитный, перлитный), а следовательно, и его свойства, назначение.

### Белый чугун (ГОСТ 805-95)

Такое название получил по виду излома, который имеет матово-белый цвет. Фазовый состав белого чугуна (при нормальной температуре) цементит и феррит. Следовательно, в белом чугуне весь углерод находится в форме цементита, степень графитизации равна нулю. Белый чугун обладает высокой твёрдостью и хрупкостью, практически не поддаётся обработке режущим инструментом.

На практике используют три группы белых чугунов:

1) доэвтектические с содержанием 2,5-3,5% углерода, которые применяются для передела в сталь и ковкий чугун (поэтому их ещё называют передельными), а также из него производят износостойкие (HB ≈ 4000-4500 МПа, δ = 0%) детали (шары для шаровых мельниц, катки и т.д.) и посуду: сковородки, котлы и т.д.;

2) эвтектический, с содержанием 4,2-4,4% углерода, который вынужденно используется для производства стали, если не хватает доэв-

тектического; для других целей он практически неприменим, так как очень тверд ( $HV = 5500$  МПа) и хрупок ( $\delta = 0\%$ );

3) заэвтектические, с содержанием 5-6% углерода, которые нашли применение для изготовления стационарных защит от радиации. Механические свойства этих чугунов ( $HV \approx 6000-6500$  МПа и  $\delta = 0\%$ ) не позволяют их использовать для нагруженных деталей.

Структура ледебурита вторичного у эвтектического чугуна показана на рис. 19, а; у доэвтектического чугуна дополнительно будут перлит и цементит вторичный (рис. 19, б), а у заэвтектического - пластины цементита первичного (рис. 19, в).

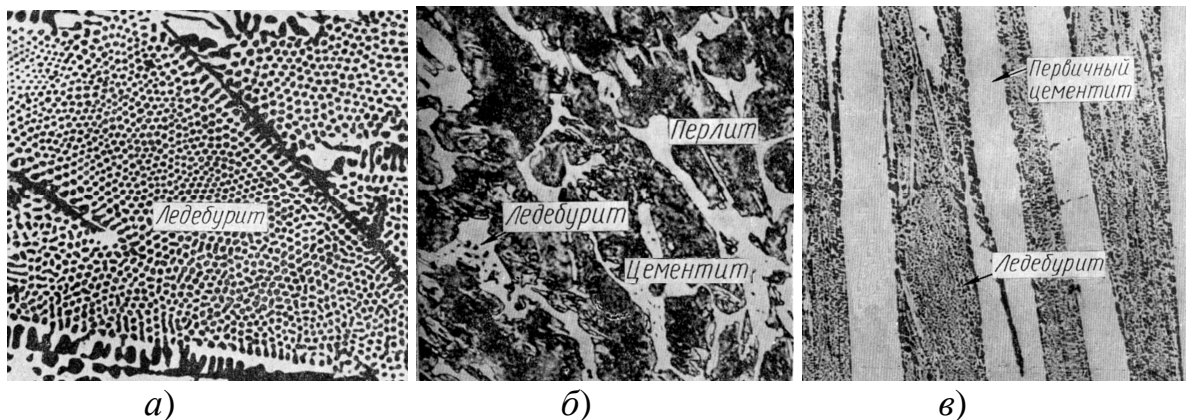


Рис. 19. Структуры белых чугунов:  
а – эвтектического; б – доэвтектического; в - заэвтектического

### Серый чугун (ГОСТ 1412-85)

Такое название получил по виду излома, который имеет серый цвет. В структуре серого чугуна имеется графит пластинчатой или вермикулярной формы (рис. 20).

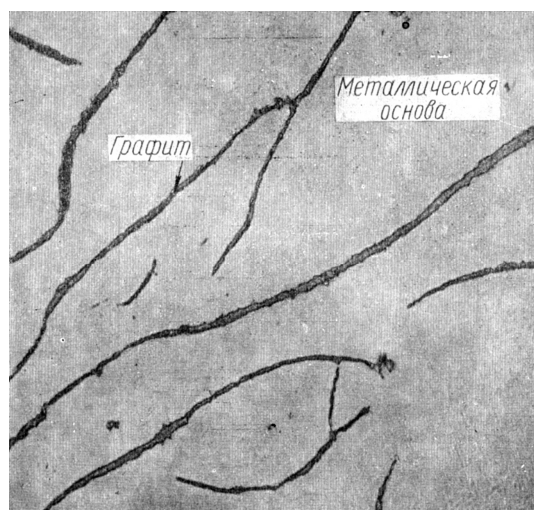


Рис. 20. Серый нетравленный чугун с графитом пластинчатой формы

Серые чугуны обладают высокими литейными свойствами, хорошо работают на сжатие и трение, почти нечувствительны к надрезам, так как пронизаны графитными чешуйками с острыми краями. При обработке резанием получается ломкая стружка, условия резания - оптимальные.

Графит в чугуне служит естественной смазкой и впитывает хорошо нанесенную смазку, поэтому детали пар трения работают с низким коэффициентом трения и мало изнашиваются.

Применяется обычно доэвтектический серый чугун с содержанием углерода 2,8-3,5% и кремния 1,2-2,5%. Из него изготавливают большое количество деталей для железнодорожного транспорта: скользуны, тормозные колодки, диски, детали пневмосистемы, блоки цилиндров, направляющие гидравлических гасителей колебаний и т.д.

В микроструктуре чугуна следует различать металлическую основу и графитные включения. По строению металлической основы он может быть ферритным, феррито-перлитным и перлитным. Чем больше в металлической основе чугуна перлита, тем больше его твердость, прочность и износостойкость, но меньше пластичность. Структуры серых чугунов показаны на рис. 21.

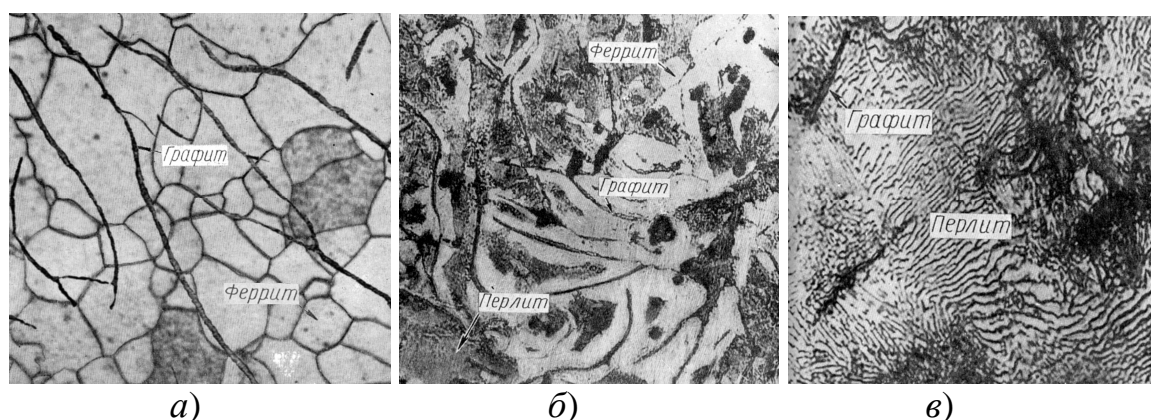


Рис. 21. Структуры серого чугуна:  
а – ферритного; б – феррито-перлитного; в – перлитного

Поскольку структура чугуна состоит из металлической основы и графита, то и свойства чугуна будут зависеть как от свойств металлической основы, так и от количества и характера графитных включений (табл. 6).

Графит по сравнению со сталью обладает низкими механическими свойствами, и поэтому графитные включения можно считать в первом приближении просто пустотами, трещинами. Отсюда следует, что чугун можно рассматривать как сталь, испещренную большим количеством пустот и трещин. Чем больший объем занимают пустоты, тем ниже свойства чугуна. При одинаковом объеме пустот (т.е. количестве графита) свойства чугуна будут зависеть от их формы и расположения.

## Механические свойства чугунов

Название чугуна	Механические свойства		
	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	НВ, МПа
Серые чугуны: ферритные	120-150	до 0,5	143-229
	перлитные	до 0,2	170-241
Модифицированные перлитные чугуны	280-440	до 0,5	187-269
Ковкие чугуны: ферритные	300-370	6-12	149-163
	перлитные	2-3	$\leq 201$
Высокопрочные чугуны: ферритные	380-420	12-17	140-200
	перлитные	2-4	200-369

Следовательно, чем больше в чугуне графита, тем ниже его механические свойства, чем грубее включения графита, тем больше они разобщают металлическую основу, тем хуже свойства чугуна.

Для измельчения графитовых включений и повышения механических свойств серого чугуна, его модифицируют.

Модифицированные серые чугуны начали применять с 1942 г. Обычно содержание углерода в них до 3%, а кремний вводится в два приема: в самом расплаве чугуна его поддерживается около 1,2%, а в ковш за 10-15 мин перед разливкой добавляется еще примерно 0,4% в виде FeSi, SiCa, их смесей.

Кремний и кальций взаимодействуют с кислородом, растворенным в чугуне, и дают мельчайшие твердые частицы  $\text{SiO}_2$  и  $\text{CaO}$ , которые служат центрами принудительной кристаллизации графита. В результате их огромного количества графит получается более мелкочешуйчатый, что положительно сказывается на увеличении прочности чугуна (рис. 22).

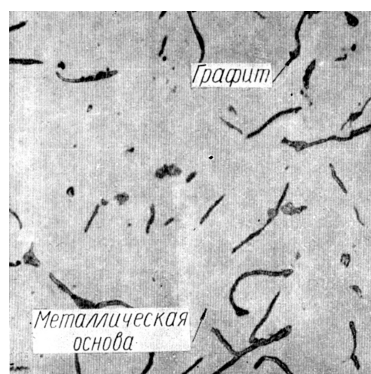


Рис. 22. Нетравленный модифицированный серый чугун

Применяют модифицированный чугун для ответственного литья деталей топок и двигателей внутреннего сгорания, например, изготавливают компрессионные и маслосъемные кольца дизелей.

Серый чугун маркируется буквами СЧ (серый чугун) и двумя цифрами, которые показывают минимальное значение предела прочности чугуна на растяжение. Например, у чугуна СЧ25  $\sigma_{\sigma} = 245$  МПа (25 кгс/мм<sup>2</sup>).

### Ковкий чугун (ГОСТ 1215-79)

Ковкий чугун отличается от серого формой графита: в серых чугунах графит в виде тонких чешуек, а в ковких – в виде хлопьев, которые меньше подрезают металлическую основу (рис. 23). Поэтому прочность ковкого чугуна в 2,5-3 раза больше, чем у серого, а его пластичность может достигать 12% (см. табл. 6).

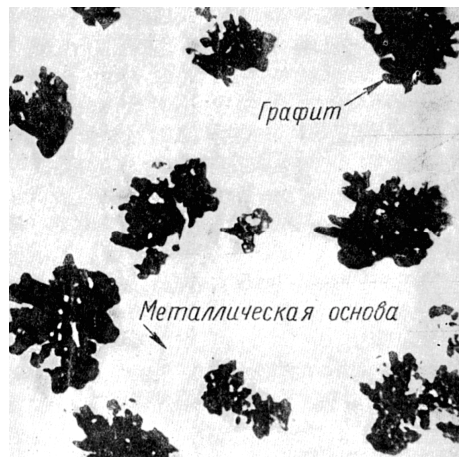


Рис. 23. Нетравленный ковкий чугун с графитом хлопьевидной формы

Производство деталей из ковкого чугуна делится на две стадии:

1) из белого доэвтектического чугуна получают отливки с толщиной стенки не более 50 мм. При большой толщине внутри стенки получается серый чугун по причине малой скорости охлаждения;

2) отжиг при температуре 900-1000 °С в течение 2-4 суток и до 1-1,5 недель с целью графитизации Fe<sub>3</sub>C в твердом состоянии. В зависимости от степени графитизации количество связанного углерода остается не более 0,8% и можно получить ферритный, феррито-перлитный и перлитный ковкие чугуны.

Ковкий чугун маркируется следующим образом: КЧ означает ковкий чугун. Затем ставят число, показывающее предел прочности, кгс/мм<sup>2</sup>, и число, показывающее относительное удлинение, %. Например, КЧ30-6; КЧ37-12.



Применяется ковкий чугун на железнодорожном транспорте как дешёвый заменитель стали: муфты, оголовки соединительных рукавов воздушной тормозной магистрали и т.д.

### Высокопрочный чугун (ГОСТ 7293-85)

Отличительной особенностью этих чугунов является шаровидная форма графита, которая получена была впервые в 1949 г. путём использования довольно сложной технологии:

- в доэвтектическом белом чугуне первоначальное содержание кремния должно составлять в пределах 1-1,2%.
- перед разливкой чугун подвергается двойной обработке: рафинированию металлическим магнием (0,1%), а затем модифицированию FeSi или SiCa, но двойной дозой (0,8%).
- при кристаллизации обеспечивается достаточно высокая скорость охлаждения для получения около 0,6% связанного углерода, т.е. чисто перлитной металлической основы;
- для смягчения выполняется отжиг из расчета 3-4 ч на 100 мм толщины стенки отливки при температуре 800-850 °С.

В результате применения такой технологии производства графит получается шаровидной формы и каждая его частица заблокирована мягким ферритом (рис. 24). Это в свою очередь резко повышает прочность чугуна (см. табл. 6).

С самого начала этот чугун предназначался для сверхответственного литья. Это назначение он сохранил и по настоящее время: на железнодорожном транспорте этот чугун применяется для изготовления литых сплошных или секционных коленчатых валов ДВС.

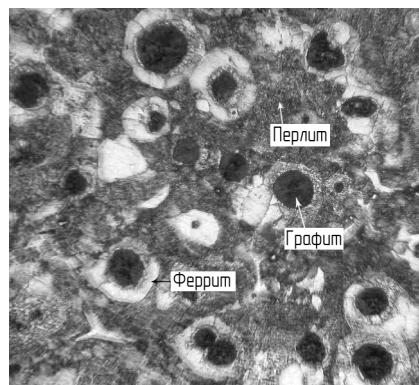


Рис. 24. Высокопрочный перлитный чугун

Высокопрочный чугун (ВЧ) также подразделяется на отдельные марки в зависимости от механических свойств. Обозначается подобно серому чугуну.

## Контрольные вопросы

1. Чем отличается чугун от стали по технологическим свойствам?
2. Какая структурная составляющая характерна для белого чугуна?
3. Почему белый чугун называется "белым"?
4. Какая структурная составляющая характерна для серого, модифицированного, ковкого и высокопрочного чугунов?
5. В чем сущность рафинирования высокопрочных чугунов?
6. В чем сущность модифицирования чугунов?
7. Почему первоначальное высокое содержание кремния в чугуне не приводит к получению мелких чешуек графита?
8. По какой закономерности Н.С.Курнакова зависит изменение твердости у белых чугунов при изменении содержания в них углерода?
9. Можно ли ковать ковкий чугун?
10. Почему ковкий чугун назван "ковким"?
11. Влияет ли скорость охлаждения в момент кристаллизации (песчаная или металлическая форма) на форму графитных выделений?
12. Чем отличаются формы графитных частиц, полученных при первичной кристаллизации чугуна и при отжиге?
13. Для чего необходим в высокопрочном чугуне блокирующий феррит вокруг графитных выделений?
14. Почему концентраторы напряжений: подрезы, отверстия и т.д., - практически не сказываются на работоспособности деталей из серого или модифицированного чугуна, а в то же время очень опасны в деталях из ковкого или высокопрочного чугунов?
15. Почему детали из белого чугуна имеют высокий коэффициент трения при работе в паре со сталью, а из всех остальных чугунов - сравнительно низкий и стабильный?
16. Почему чугуны успешно конкурируют со сталью при изготовлении литых деталей, хотя прочность последних обычно выше?

### 3.5 Лабораторная работа ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТАСТАБИЛЬНЫХ СТРУКТУР СТАЛЕЙ

*Цель работы* - изучение условий получения, особенностей микроструктуры и свойств метастабильных состояний сталей.

#### Порядок выполнения работы

Бригада из трех-четырех студентов получает микроскоп и коллекцию шлифов. При их изучении обращают внимание на характерные особенности структуры, зарисовывают в бланке отчета общепринятые схемы услов-

ных обозначений метастабильных структур и приводят ответы на поставленные вопросы. Условия получения метастабильных структур студенты должны взять из материала лекций и данной работы, а также из рекомендуемой литературы.

В конце занятия каждая из бригад студентов должна изучить микроструктуры двух контрольных шлифов, определить вероятные условия получения стали с такой структурой и ожидаемые ее свойства.

### **Теоретическая часть работы**

Метастабильной (ложноустойчивой) называют такую структуру стали, которая при температуре окружающей среды может сохраняться довольно долго (десятки и сотни лет), а при нагреве ниже  $A_{c1}$  быстро разлагается, что приводит к получению более стабильных структур с иными свойствами. Метастабильные структуры у стали могут быть получены различными путями: быстрым охлаждением стали, нагретой до аустенитного состояния, т.е. закалкой, наклепом, радиационным повреждением и т.д. Общим признаком метастабильных структур является повышенный уровень внутренней энергии, реализованный в виде особой структуры, нехарактерной для стали в стабильном состоянии. При нагревании дислокации и атомы приобретают подвижность, что позволяет им занять более устойчивое положение, т.е. создать стабильную структуру с меньшим энергетическим уровнем. Явления ползучести приводят при нагреве к релаксации внутренних напряжений. На практике метастабильные структуры чаще всего создаются преднамеренно различными технологическими способами, так как чем более выражено метастабильное состояние стали, тем она обычно обладает большей твердостью и прочностью, но пониженной пластичностью. На предприятиях железнодорожного транспорта для этой цели наиболее распространена закалка, а для регулирования уровня свойств – отпуск.

Исходные стабильные структуры стали: феррит и перлит в доэвтектоидной и перлит с незначительным количеством цементита вторичного в заэвтектоидной, - обладают сравнительно небольшой твердостью (см. лабораторную работу «Стабильные и некоторые особые структуры стали»).

Причиной этого является то, что углерод практически нерастворим в феррите, а присутствующий цементит из-за его небольшого количества не может обеспечить высокую твердость стали. Для обеспечения стали большой твердости, необходимо сначала растворить углерод в аустените, т.е. нагреть сталь до аустенитного состояния, а затем охлаждением со скоростью, более критической, зафиксировать пересыщенный твердый раствор, т.е. мартенсит. Эта структура является наиболее метастабильной у стали. Она обладает наибольшей твердостью, износостойкостью и т.д.

### Закалка стали

Температура нагрева стали при закалке назначается по диаграмме Fe-Fe<sub>3</sub>C (рис. 25).

Для доэвтектоидной стали характерна полная закалка при нагреве до температуры, °С:

$$t = A_{c3} + (20 \div 50).$$

С увеличением температуры нагрева под закалку ( $t_1$ ) и времени выдержки происходит образование крупногольчатого мартенсита, что приводит к повышению внутренних напряжений, а следовательно, и хрупкости. Также могут образовываться микротрещины, что является неисправимым браком. При недостаточной температуре нагрева ( $t_2$ ) в структуре останется феррит, который не успеет раствориться в аустените, в следствие чего твёрдость стали снизится.

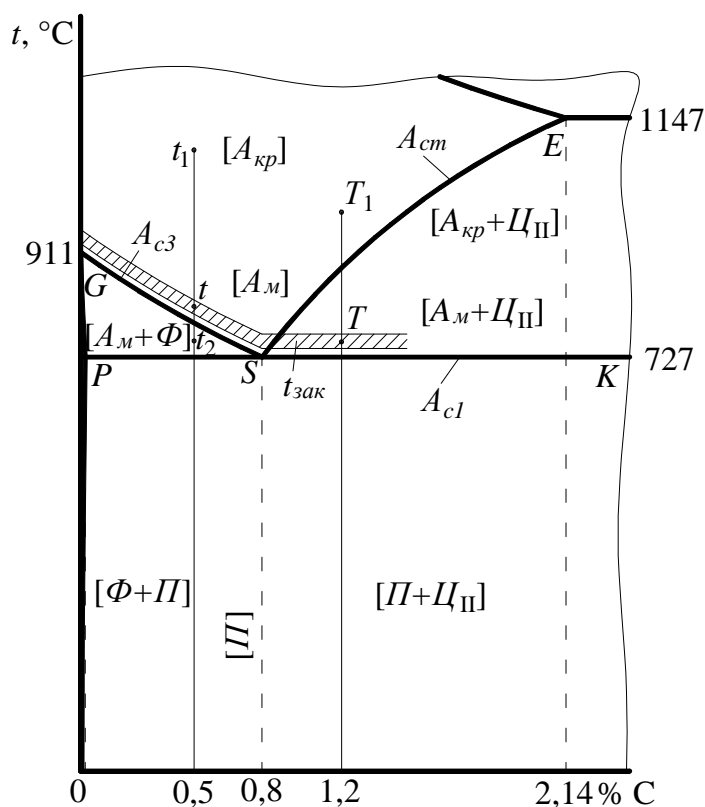


Рис. 25. Интервал оптимальных температур нагрева при закалке углеродистых сталей

Для заэвтектоидной стали желательно сохранить цементит вторичный, имеющий твердость 8000-1000 МПа по Бринеллю, поэтому используют закалку неполную при нагреве до температуры, °С:

$$T = A_{c1} + (20 \div 50).$$

При нагреве до более высокой температуры ( $T_1$ ) помимо образования крупноигльчатого мартенсита в заэвтектоидной стали происходит утрата карбидной фазы.

Основной закалочной структурой будет мартенсит мелкоигльчатый, либо мартенсит с зернами цементита соответственно для до- и заэвтектоидных сталей. Микроструктура мартенсита представлена на рис. 26.



Рис. 26. Мартенсит (x1000)

В структуре заэвтектоидной стали после нормальной неполной закалки наблюдаются кристаллики цементита вторичного и более светлые участки с остаточным аустенитом и чем выше температура закалки, тем его будет больше (от 3-5 до 15-20%). Если скорость охлаждения при закалке будет ниже критической (охлаждение в масле вместо охлаждения в воде), то в структуре можно наблюдать темные гнезда менее метастабильной структуры - троостита закалки, что приведет к пропорциональному снижению твердости стали.

### **Отпуск стали**

После нормально выполненной закалки сталь приобретает структуру преимущественно мартенсита с твердостью от  $HV = 5800$  МПа до  $HV = 6300-6600$  МПа при изменении содержания углерода в ней от 0,38 до 1,4%. Кроме того, мартенсит будет иметь большие остаточные напряжения и низкую пластичность. Отпуском эти недостатки закаленной стали можно исправить и довести ее структуру и свойства до необходимых по техническим условиям. Основным процесс при отпуске – это выделение карбидной фазы из мартенсита.

Главное влияние на свойства стали оказывает температура отпуска. Различают три вида отпуска: низкий, средний и высокий.

*Низкий отпуск* проводят с нагревом до 150-240 °С. При этом снижаются внутренние напряжения, мартенсит закалки переводится в отпущенный мартенсит, повышается прочность и немного улучшается вязкость без

заметного снижения твёрдости. Закалённая сталь после низкого отпуска сохраняет твёрдость в пределах HRC 58-63, а следовательно, высокую износостойкость. Однако такое изделие (если оно не имеет вязкой сердцевины) не выдерживает значительных динамических нагрузок.

Низкий отпуск обычно назначается для изделий, у которых желательно сохранить максимальную твердость: детали подшипников качения, шестерни, режущий инструмент и т.д. Продолжительность отпуска обычно 1-2,5 ч.

*Средний отпуск* выполняют при 250-450 °С и применяют для деталей, обладающих большой упругостью: рессоры, пружины и т.д. При отпуске течение 1-1,5 ч наблюдается разложение пересыщенного мартенсита на две фазы:  $\alpha(C) + Fe_3C$  (троостит отпуска) (рис. 27).

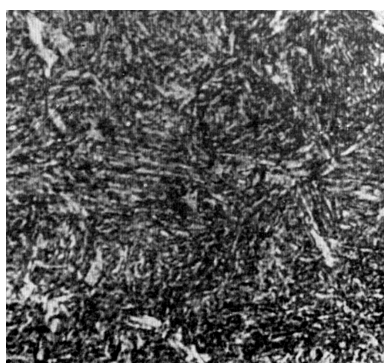


Рис. 27. Троостит отпуска (x1000)

Фаза  $\alpha(C)$  может содержать повышенное содержание углерода (до 0,1-0,3%), а фаза  $Fe_3C$  исключительно дисперсна, что приводит к некоторому снижению твердости стали и заметному увеличению ее пластичности (табл. 7). Температуру отпуска надо выбирать таким образом, чтобы не вызвать необратимой отпускной хрупкости.

Таблица 7

Свойства структурных составляющих после отпуска

Структура	Свойства стали:					
	дозвтектоидной (0,5% C)		эвтектоидной (0,8% C)		заэвтектоидной (1,2% C)	
	НВ, МПа	$\delta$ , %	НВ, МПа	$\delta$ , %	НВ, МПа	$\delta$ , %
Троостит	4000	5	5000	3	5500	2
Сорбит	2700	8	3200	5	3500	4

Охлаждение после отпуска при 400-450 °С рекомендуется проводить в воде, что способствует образованию на поверхности сжимающих остаточных напряжений, которые увеличивают предел выносливости деталей.

*Высокий отпуск* проводят при 450-650 °С. При его выполнении в течение 0,5-1 ч пересыщенный твердый раствор практически полностью разлагается с образованием смеси  $Fe_\alpha + Fe_3C$ , образуя структуру – сорбит отпуска (рис. 28), которая является уже почти стабильной структурой, но по свойствам значительно превышает свойства стали в исходном состоянии (см. табл. 7). Причиной этого является большая дисперсность и округлая форма фазы  $Fe_3C$ .

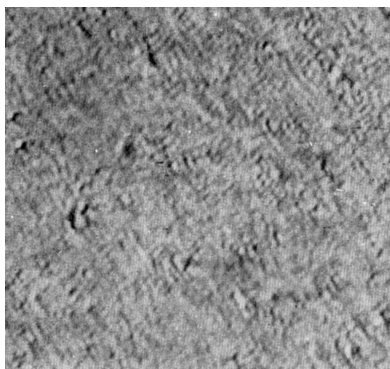


Рис. 28. Сорбит отпуска (x1000)

Операцию термического дробления структуры без изменения формы изделия (закалка + высокий отпуск) принято называть *улучшением* стали. для наиболее ответственных изделий. Назначается для деталей, работающих в условиях большой динамики (шатуны ДВС, оси, валы и т.д.). Однако износостойкость улучшенной стали вследствие её пониженной твёрдости не является высокой. Улучшение значительно повышает конструктивную прочность стали, уменьшая чувствительность к концентраторам напряжений, увеличивая работу пластической деформации при движении трещины (работу развития трещины) и снижая температуру верхнего и нижнего порога хладноломкости.

### **Контрольные вопросы**

1. В чем заключается физический смысл метастабильного состояния стали?
2. Какие метастабильные структуры можно получить при закалке?
3. Как влияет температура нагрева стали при закалке на структуру и свойства закаленной стали?
4. Как влияет скорость охлаждения при закалке стали на получаемые ею структуру и свойства?
5. Почему с повышением содержания углерода повышается твердость стали после закалки?

6. Почему малоуглеродистые стали ( $C < 0,23\%$ ) не способны приобретать высокую твердость после закалки?
7. Что представляет собой мартенсит - основная структура в закаленной стали?
8. Почему не рекомендуется перегревать сталь при закалке?
9. В чем физическая сущность закалки с точки зрения фазовых превращений?
10. Почему в принципе равномерный пересыщенный твердой раствор углерода в  $Fe_{\alpha}$ , т.е. мартенсит, под микроскопом имеет игольчатое строение?
11. Почему при низком отпуске наблюдается только уменьшение остаточных напряжений в закаленной стали?
12. Как назначается температура среднего отпуска для реальных деталей?
13. Как назначается температура высокого отпуска при улучшении стали в заготовках?
14. В чем заключается существенное различие между превращениями при низком и среднем отпуске?
15. В чем заключается существенное различие между превращениями при среднем и высоком отпуске?
16. Почему троостит закалки обычно имеет строение в виде гнезд сложной конфигурации, а троостит отпуска - равномерный по всему сечению образца?



## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П.. Материаловедение. М «Машиностроение» 1990.528 с.
2. Солнцев Ю.П. Материаловедение: учеб. для вузов/ Ю.П. Солнцев, Е.И. Пряхин; ред. Ю.П. Солнцев. - 4-е изд., перераб. и доп.. - СПб.: Химиздат, 2007. - 784 с.
3. Гуляев А.П. Металловедение. Учебник для вузов. 7-е изд., перераб. и доп. М.: Альянс, 2011 - 643 с.
4. Материаловедение: учебное пособие по лабораторным работам по дисциплине «Материаловедение» / Д.А. Жуков, Д.П. Кононов, Н.Ю. Шадрина, А.А. Соболев. – СПб.: ПГУПС, 2010. – 72 с.
5. Арзамасов Б.Н. ред. Конструкционные материалы. Справочник. М.: Машиностроение. 1990. - 688 с.
6. Амбарцумян С.М. и др. Промышленные алюминиевые сплавы. М.: Металлургия. 1984.
7. Бернштейн М.Л. и Рахштадт Л.Г. ред. Металловедение и термическая обработка стали. Справочник в 3-х томах. М.: Металлургия. 1991.
8. Горынин И.В., Чечулин Б.Б. Титан в машиностроении. М.: Машиностроение, 1990.400 с.
9. Журавлев В.Н., Николаева О.Н. Машиностроительные стали. Справочник. М.: Машиностроение, 1992.410 с.
10. Курдюмов А.В. и др. Производство отливок и сплавов цветных металлов. М.: МИСиС.1996.504 с.