

## ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА

### Изучение диаграммы состояния. Анализ структурного состава сплавов

---

**Цель работы:** 1. Ознакомиться с диаграммой состояния железо-углерод и изменением состава сплава при охлаждении. 2. Провести анализ изменения структурного состава и микроструктуры сплавов.

#### *Теоретическое введение*

##### *Компоненты железоуглеродистых сплавов*

**Железо.** Железо имеет три полиморфные модификации  $\alpha$ ,  $\gamma$  и  $\delta$ . Модификация  $\alpha$  существует при температурах ниже 911 °С, кристаллическая решетка  $\alpha$ -железа - объемно центрированный куб (ОЦК).  $\gamma$ -железо ( $Fe_\gamma$ ) существует при температуре 911 - 1392 °С, кристаллическая решетка - гранецентрированная кубическая (ГЦК). В интервале 1392 - 1539 °С существует  $\delta$ -железо с кристаллической решеткой объемно центрированного куба (ОЦК). Высокотемпературное  $Fe_\alpha$  называют  $Fe_\delta$ . Высокотемпературная модификация  $Fe_\alpha$  не представляет собой новой аллотропической формы.

При температуре ниже 768 °С железо ферромагнитно, а выше – парамагнитно. Точку 768 °С, соответствующую магнитному превращению, то есть переходу из ферромагнитного состояния в парамагнитное называют точкой Кюри. Модификация  $Fe_\gamma$  парамагнитна.

Железо со многими элементами образует растворы: с металлами – растворы замещения. С углеродом, азотом и водородом – растворы внедрения.

**Углерод.** В сплавах железа с углеродом углерод находится в состоянии твердого раствора с железом и в виде химического соединения – цементита ( $Fe_3C$ ), а также в свободном состоянии в виде графита (в серых чугунах).

**Цементит.** Цементит ( $Fe_3C$ ) – химическое соединение железа с углеродом (карбид железа), содержит 6,67 % углерода.

Кристаллическая решетка цементита ромбическая. Аллотропических превращений не испытывает. При низких температурах цементит слабо ферромагнитен, магнитные свойства теряет при температуре около 210 °С. Цементит имеет высокую твердость (более 800 НВ, легко царапает стекло), но чрезвычайно низкую, практически нулевую, пластичность.

Цементит способен образовывать твердые растворы замещения. Атомы углерода могут замещаться атомами неметаллов: например, азотом; атомы железа – металлами: марганцем, хромом, вольфрамом и другими. Такой твердый раствор на базе решетки цементита называется легированным цементитом.

Цементит, выделяющийся из жидкого сплава, принято называть *первичным*, из аустенита - *вторичным*, из феррита – *третичным*.

Если графит является стабильной фазой, то цементит – это метастабильная фаза. Цементит – соединение неустойчивое и при определенных условиях распадается с образованием свободного углерода в виде графита. Этот процесс имеет важное практическое значение при структурообразовании чугунов.

## **Фазы в системе "железо-углерод"**

*Фазой* называют однородную часть сплава (имеющую одни и те же строение, состав, агрегатное состояние), отделенную от других частей сплава поверхностью раздела (границей).

В системе *железо - углерод* различают следующие фазы: жидкий расплав, твердые растворы –  $\alpha$ -феррит,  $\delta$ -феррит и аустенит, а также цементит и графит.

**Феррит** - твердый раствор внедрения атомов углерода в  $\alpha$ -железо. При температуре 727 °С в феррите растворяется до 0,02 % С, при  $t = 0$  °С растворимость углерода - 0,002%. Феррит ферромагнетик, имеет твёрдость 80НВ, пластичность  $\delta = 40\%$ ,  $\sigma_{\text{в}} = 250$  МПа.

Под микроскопом феррит выглядит как светлые полиэдрические зерна. В сталях может существовать в виде сетки (разной толщины, в зависимости от содержания углерода), зерен (малоуглеродистые стали), пластин или игл (видманштетт).

**Аустенит** - твердый раствор внедрения атомов углерода в  $\gamma$ -железе, имеющий предельную растворимость углерода - 2,14%. Аустенит немагнитен, имеет твёрдость 160 - 200НВ при пластичности  $\delta = 50\%$ . Аустенит (А,  $\gamma$ ) – твердый раствор внедрения углерода в  $\gamma$ -железо (по имени английского ученого Р. Аустена). Углерод занимает место в центре гранецентрированной кубической ячейки. Предельная растворимость углерода в  $\gamma$ -железе 2,14 % при температуре 1147 °С (точка Е). Аустенит имеет твердость 180 НВ, пластичен (относительное удлинение –  $\delta = 40 \dots 50 \%$ ), парамагнитен. При растворении в аустените других элементов могут изменяться свойства и температурные границы существования. Под микроскопом выглядит как светлые полиэдрические зерна с двойниками.

**Графит**. Имеет гексагональную слоистую кристаллическую решетку. Графит мягок, обладает низкой прочностью.

## **Состав фаз**

**Фигуративная точка** – точка, характеризующая для данной системы ее температуру и состав.

**Конода** – горизонтальный отрезок, концы которого ограничены равновесными сосуществующими фазами и содержанием в них компонентов, линия, соединяющая две сопряженные точки.

В двухфазных областях в любой фигуративной точке можно определить количество фаз и их концентрацию, используя правило отрезков (рычага).

**Правило отрезков** устанавливает количественное соотношение фаз при заданной температуре, в любой точке диаграммы, когда в сплаве одновременно существуют две фазы.

Например, определим химический состав и количество фаз для сплава системы *железо-цементит* в точке *a*, находящейся в области *GSP* (рис. 7.1). В этой области структурные составляющие - феррит и аустенит. Проведем коноду через точку *a* до пересечения с линиями *GP* (точка *b*) и *GS* (точка *c*). Проекция точки *b* (*b'*) указывает химический состав феррита, а проекция точки *c* (*c'*) – состав аустенита. Массовое содержание аустенита

а феррита

$$m_{\Phi p} = \frac{ac}{bc} \cdot 100\%. \quad (7.2)$$

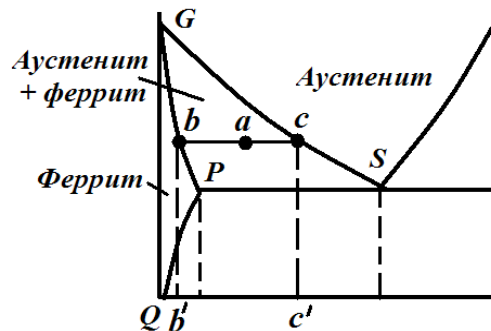


Рис. 5.1. Схема правила отрезков

В зависимости от температуры и содержания углерода сплавы железа с углеродом помимо фаз могут иметь следующие *двухфазные (гетерофазные) структурные составляющие*: перлит (П) и ледебурит (Л).

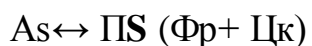
**Перлит** - эвтектоид, эвтектоидная смесь, механическая смесь феррита и цементита, полученная в результате распада аустенита при охлаждении сплавов ниже  $727^{\circ}\text{C}$ . назван перлитом потому, что после травления его поверхность приобретает характерный перламутровый отлив. При медленном охлаждении перлит присутствует во всех сплавах с концентрацией углерода от 0,02 до 6,67%. Под микроскопом перлит может выглядеть либо как пластины, либо как зерна - зернистый перлит. Его вид, также, как и механические свойства, зависит от скорости охлаждения сплава и вида его термической обработки.

Пластинчатый перлит состоит из перемежающихся пластин феррита и цементита, а зернистый содержит цементит в виде глобулей (зернышек) в ферритной основе (матрице).

**Ледебурит** – эвтектика, *эвтектическая* смесь, механическая смесь аустенита и цементита, выделяющаяся из жидкости при охлаждении сплавов ниже 1147° С. Принципиальное отличие эвтектической составляющей от эвтектоидной заключается в том, что первая выделяется из жидкости, а вторая из твердого раствора, в случае железоуглеродистых сплавов - из аустенита. Название данная структурная составляющая получила в честь имени немецкого ученого-металлурга Ледебура.

**Эвтектика** (греч. – легко плавящийся) – структурная составляющая сплава, представляющая собой механическую смесь фаз, образующуюся при одновременной кристаллизации двух (или более) фаз из расплава.

По линии **PSK** при  $727^{\circ}\text{C}$  происходит *эвтектоидное* превращение (эвтектоидная реакция) - перекристаллизация аустенита в эвтектоид перлит и наоборот:



В отличие от эвтектики, образующейся из жидкости, эвтектоид возникает из твердых фаз.

**Эвтектоид** – структурная составляющая сплава, представляющая собой механическую смесь фаз, образующуюся при одновременной вторичной кристаллизации двух (или более) фаз из твердого раствора.

Сплавы железа с углеродом, содержащие до 0,02% С, называют техническим железом.

Сплавы железа с углеродом при содержании углерода от 0,02 до 2,14% носят название сталей (от 0,02 до 0,8% – доэвтектоидные стали, от 0,8 до 2,14 % – заэвтектоидные стали).

Сплавы железа с углеродом, содержащие от 2,14 до 6,67 % С называются чугунами (от 2,14 до 4,3 % С – доэвтектические, от 4,3 до 6,67 % С – заэвтектические чугуны).

### **Диаграмма состояния железо-углеродистых сплавов**

Диаграмма показывает фазовый состав и структуру сплавов с концентрацией от чистого железа до цементита (100 %  $\text{Fe}_3\text{C}$ ). Диаграмму состояния железо – цементит изображают только до 6,67% С, так как все сплавы с большим содержанием углерода, вследствие своей хрупкости не имеют практического применения.

Поскольку углерод в сплавах с железом встречается в виде цементита и графита, существуют две диаграммы состояния, описывающие условия равновесия фаз в системах железо – цементит и железо – графит. Первая диаграмма ( $\text{Fe} - \text{Fe}_3\text{C}$ ) называется цементитной (метастабильная), вторая ( $\text{Fe} - \text{C}$ ) – графитной (стабильная). Диаграммы отличаются незначительными разностями температур первичной и вторичной кристаллизации. Поэтому оба варианта диаграммы приводятся вместе в одной системе координат: температура – содержание углерода. Диаграмму системы «железо-цементит» называют метастабильной и показывают сплошными линиями; диаграмму «железо-графит» называют стабильной и показывают пунктирными линиями (рис. 5.2).

Буквенное обозначение узловых точек в диаграмме является общепринятым как в России, так и за рубежом. Характерные точки диаграммы отмечены буквами латинского алфавита в соответствии с международным обозначением.

Каждая точка на диаграмме характеризуется строго определенным составом при соответствующей температуре (табл. 5.1).

Линии диаграммы (табл. 5.2): *ABCB*D (линия ликвидус – место точек начала кристаллизации) и *ANJECF* (линия солидус – место точек конца кристаллизации) характеризуют начало и конец первичной кристаллизации, происходящей при затвердевании жидкой фазы. Линии *ES* и *PQ* показывают предельную растворимость углерода соответственно в аустените и феррите. Особенностью железоуглеродистых сплавов является то, что превращения в них происходят не только при кристаллизации жидкого сплава, но и в твердом состоянии вследствие полиморфных переходов модификаций железа при изменении температуры.





Таблица 5.1

## Критические точки диаграммы состояния системы железо -углерод

Обозначение точки	t, °C	C, %	Значение точки
A	1539	0	Плавление (кристаллизация) чистого железа
N	1392	0	Полиморфное превращение $\delta \leftrightarrow \gamma$ в чистом железе
G	911	0	Полиморфное превращение $\alpha \leftrightarrow \gamma$ в чистом железе
H	1499	0,1	$\delta$ - твердый раствор, предельно насыщенный углеродом. Участвует в перитектическом превращении
J(I)	1499	0,16	Аустенит, возникающий в результате перитектического превращения
B	1499	0,51	Жидкая фаза, участвующая в перитектическом превращении
D	1260	6,67	Предполагаемая температура плавления Fe <sub>3</sub> C
E	1147	2,14	Аустенит, предельно насыщенный углеродом
C	1147	4,3	Жидкая фаза, испытывающая эвтектическое превращение
F	1147	6,67	
P	727	0,02	Феррит, предельно насыщенный углеродом
S	727	0,8	Аустенит, испытывающий эвтектоидное превращение
K	727	6,67	
Q	20	0,006	Феррит, предельно насыщенный углеродом

Таблица 5.2

## Значение линий диаграммы состояния системы железо-углерод

Линии	Значение линии
AB	Ликвидус для $\delta$ - твердого раствора
АН	Солидус для $\delta$ - твердого раствора
BC	Ликвидус для аустенита
J(I)E	Солидус для аустенита
CD	Ликвидус для цементита (первичного)
HJB	Перитектическое превращение: $\delta_k + L_E \rightarrow \gamma_3$
ECF	Эвтектическое превращение: $L_c \rightarrow (\gamma_E + Fe_3C)$
PSK ( $A_1$ )	Эвтектоидное превращение: $\gamma_s \rightarrow (\alpha_p + Fe_3C)$
HN	Начало полиморфного превращения: $\delta \rightarrow \gamma$ в сплавах при охлаждении
JN ( $A_4$ )	Конец полиморфного превращения $\delta \rightarrow \gamma$ сплавах при охлаждении
ES ( $A_{cm}$ )	Линия предельной растворимости углерода в $\gamma$ -Fe. Начало выделения цементита (вторичного) из аустенита при охлаждении
GS ( $A_3$ )	Начало аллотропического превращения $\gamma \rightarrow \alpha$ а в сплавах при охлаждении Начало выделения феррита из аустенита при охлаждении
GP	Линия предельной растворимости углерода в $\alpha$ -Fe
PQ	Начало выделения цементита (третичного) из феррита при охлаждении

МО (А <sub>2</sub> )	Переход из ферромагнитного в парамагнитное состояние (768°С), на диаграмме состояния указывается редко
----------------------	--

Систему образуют *четыре однофазные области*:

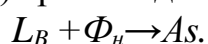
- жидкого раствора углерода в железе (**Ж**)/(L) - выше линии *ABCD*,
- аустенита (**А**) область *JESGN*
- феррита (**Ф**) (*ANH* и *GPQ*)
- цементита (**Ц**).

*Двухфазные* области диаграммы:

- AHB* - в равновесии находится жидкий расплав и кристаллы  $\delta$ -феррита,
- NHJ* - в равновесии кристаллы  $\delta$ -феррита и аустенита,
- JECB* - в равновесии жидкий расплав и кристаллы аустенита,
- CDF* - в равновесии жидкий расплав и кристаллы цементита,
- SECFK* - в равновесии кристаллы аустенита и цементита,
- GSP* – в равновесии кристаллы аустенита и  $\alpha$ -феррита,
- QPSKL* - в равновесии кристаллы  $\alpha$ -феррита и цементита

*Трехфазным равновесным состояниям* сплавов отвечают горизонтальные линии на диаграмме состояния. Три горизонтальные линии *HJB*, *ECF* и *PSK* указывают на протекание трех превращений при постоянной температуре.

При 1499 °С (горизонталь *HJB*) происходит *перитектическая* реакция



В результате реакции образуется аустенит.

При 1147°С по линии *ECF* происходит *эвтектическое* превращение (эвтектическая реакция): из жидкости состава точки **С** одновременно выделяются кристаллы аустенита состава **Е** и цементита состава **Ф**, которые в совокупности образуют эвтектику, называемую ледебуритом.

При 727 °С (горизонталь *PSK*) протекает эвтектоидная реакция  $As \rightarrow \Phi_p + Ц$  (в отличие от эвтектики, образующейся из жидкости, эвтектоид возникает из твердых фаз). Продукт превращения – эвтектоидная смесь феррита и цементита, называемая перлитом. Перлит чаще имеет пластинчатое строение, т.е. состоит из чередующихся пластинок феррита и цементита.

### ***Микроструктура железоуглеродистых сплавов***

*При классификации железоуглеродистых сплавов по структуре* учитывают структуру в отожженном (равновесном) состоянии. Углеродистые стали разделяют на три класса - доэвтектоидные (имеющие перлитно-ферритную структуру), эвтектоидные (структура - перлит), заэвтектоидные (имеющие перлитно-цементитную структуру). Схема зарисовки внешнего вида фаз, присутствующих в железо-углеродистых сплавах, приведена на рис. 5.3.

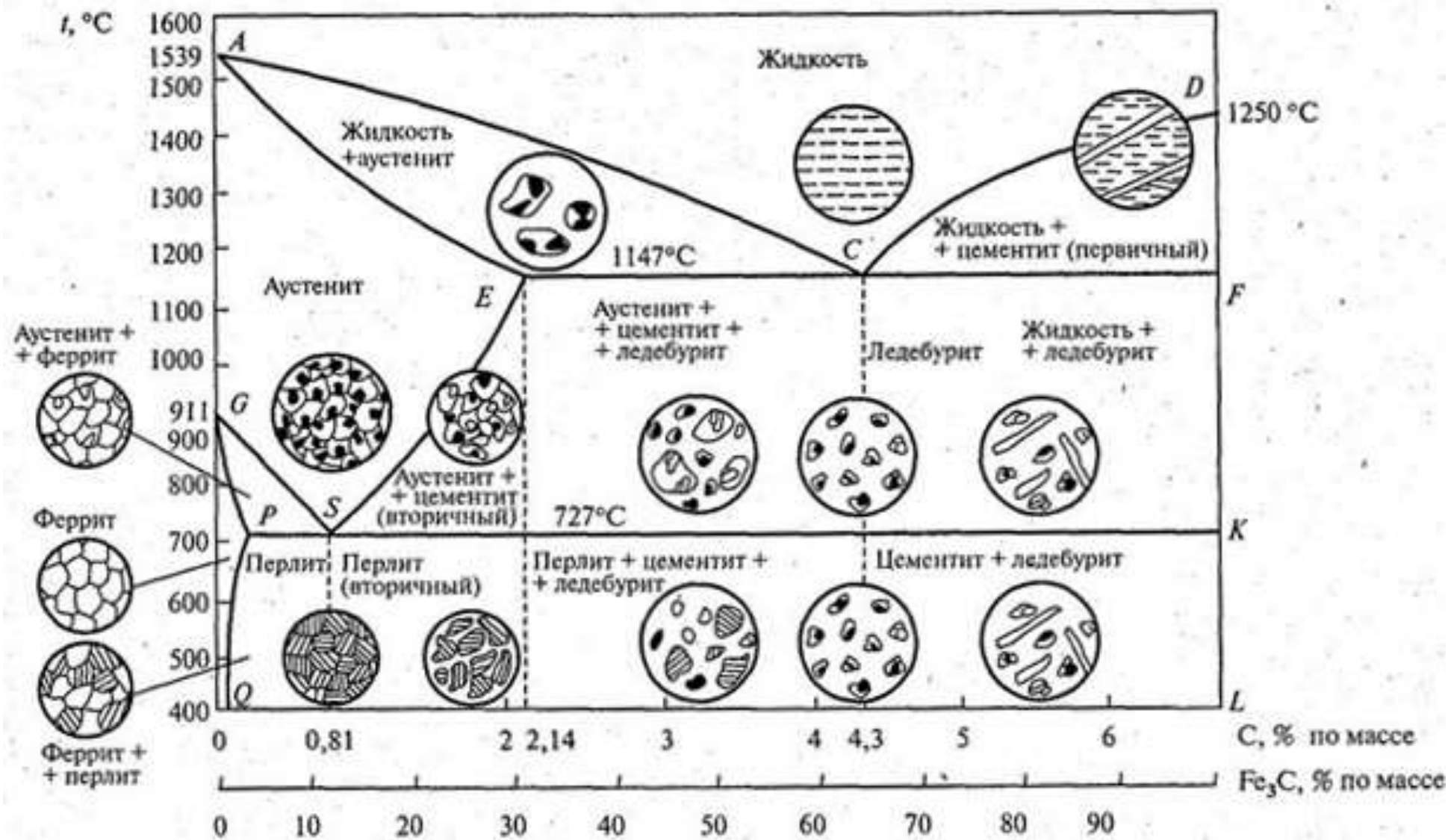


Рис. 5.3. Микроструктура сплавов



Чугун отличается от стали составом (более высоким содержанием углерода). В зависимости от того, в какой форме присутствует углерод в этих сплавах, различают белые, серые, высокопрочные и ковкие чугуны.

Белыми называют чугуны, у которых весь углерод находится в связанном состоянии в виде цементита. Эти чугуны подразделяют на доэвтектические, эвтектические и заэвтектические. Структура белого доэвтектического чугуна состоит из ледебурита, перлита и вторичного цементита (рис. 5.3.).

Серыми называют чугуны, у которых весь углерод или часть его присутствует в свободном состоянии в форме графита. Термины: белый и серый чугуны связаны с видом излома, определяемым наличием либо светлых кристаллов цементита, или темных кристаллов графита.

В зависимости от формы графита различают обыкновенный серый чугун (графит пластинчатой формы), высокопрочный чугун (графит сферической формы) и ковкий чугун (графит хлопьевидной формы).

Высокопрочными называют чугуны, в которых графит имеет шаровидную форму. По структуре металлической основы высокопрочный чугун может быть ферритным (допускается до 20% перлита) или перлитным (допускается до 20% феррита).

Ковкими называют чугуны, в которых графит имеет хлопьевидную форму, структура - ферритная или феррито-перлитная.

### ***Выполнение работы***

1. По критическим точкам (табл. 5.1) в масштабе изобразить диаграмму состояния (температура - содержание углерода - это координаты точек).

2. На полученном рисунке провести вертикальную линию, соответствующую контрольному сплаву (по содержанию углерода) (варианты индивидуальных заданий – в табл. 5.4.). В точках пересечения вертикальной линии с линиями диаграммы состояния определяем температуры фазовых превращений и превращений при постоянной температуре в сплаве (температуры точек 1, 2, ...  $T_1$ ,  $T_2$ , ...).

3. Для контрольного сплава построить кривую охлаждения в координатах время охлаждения (ось X) - температура (ось Y) превращений, происходящих при охлаждении контрольного (рис. 5.3.). При температурах, соответствующих линиям трехфазных равновесных состояний на кривой охлаждения, будут горизонтальные участки (см. рис.5.1., слева).

4. Определите, к какому виду сплавов относится данный сплав по содержанию углерода? Запишите его название в подрисуночной надписи к кривой охлаждения.

5. Определите, какие фазы и структурные составляющие образуются в данном сплаве? Дайте им определения.

6. Какие двухфазные области и в каких диапазонах температур имеются у данного контрольного сплава? Определите в этих областях химический состав фаз и концентрации фаз контрольного сплава используя правило отрезков. Для

этого выберите на линии контрольного сплава, проходящей через двухфазную область, точку, лежащую посередине этой области (точка  $O$  на рис. 5.3.).

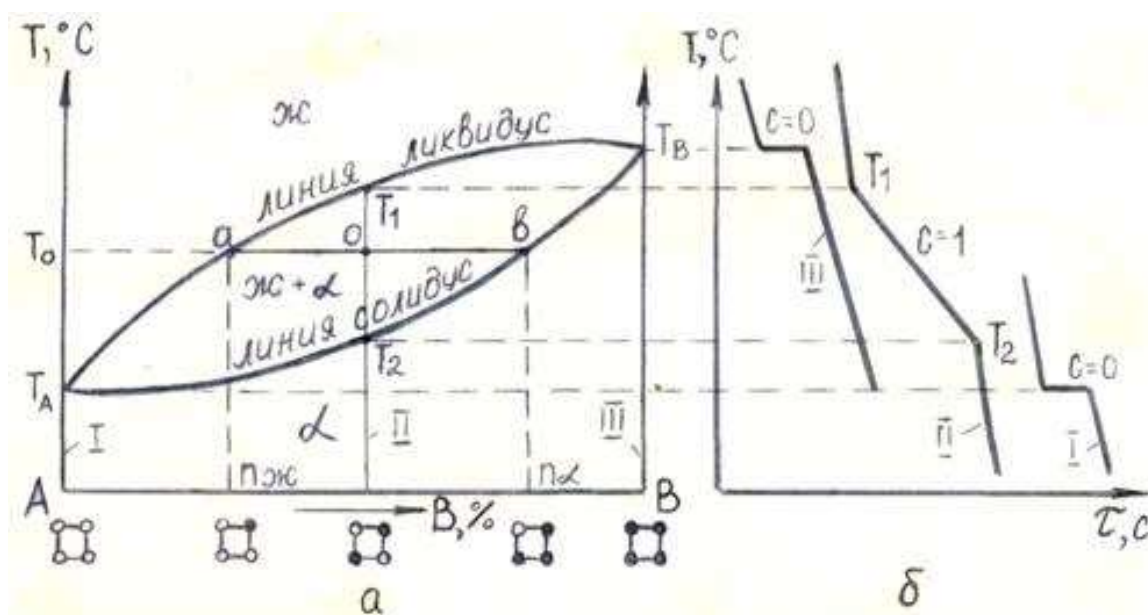



Рис. 5.3. Диаграмма состояния (а) и кривые охлаждения (б) сплавов системы с неограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии

7. Проведите анализ изменения структурного состава сплавов в виде таблицы (табл. 5.3).

8. В графе 4 привести рисунок микроструктуры контрольного сплава (см. рис. 5.2.). Обозначить названия структурных составляющих.

Таблица 5.3

#### Анализ структурного состава сплава

Критические температуры (температуры начала, конца кристаллизации, фазовых превращений)	Фазы и фазовые превращения	Формирование структур в сплавах. Процессы, происходящие в сплавах при охлаждении	Микроструктура контрольного сплава
1	2	3	4
$T=>.....^{\circ}\text{C}$	Жидкая фаза $L$	Выше температуры $.....^{\circ}\text{C}$ сплав находится в жидком состоянии	 жидкость
$T_1=.....^{\circ}\text{C}$	$L \rightarrow \Pi_1$	В точке 1 начинается первичная кристаллизация: из жидкого расплава	

Критические температуры (температуры начала, конца кристаллизации, фазовых превращений)	Фазы и фазовые превращения	Формирование структур в сплавах. Процессы, происходящие в сплавах при охлаждении	Микроструктура контрольного сплава
1	2	3	4
		выделяется ..... (название фазы)	
$T_2=1147^{\circ}\text{C}$		При температуре $T_2=1147^{\circ}\text{C}$ заканчивается кристаллизация металла. Сплав находится в твердом состоянии.	
$T_2=1147^{\circ}\text{C}$		В сплаве происходит <i>эвтектическое</i> превращение	
$T_2=1147^{\circ}\text{C}$			
$T_3=727^{\circ}\text{C}$			
$T_3=727^{\circ}\text{C}$			
$T_3<727^{\circ}\text{C}$		При дальнейшем охлаждении выделяются ..... (названия фаз). <i>Конечная структура заэвтектоидной стали перлито-цементитная (пример).</i>	 <p><i>перлито-цементитная структура</i></p>

Таблица 7.4

Индивидуальные задания – контрольные сплавы

№ варианта	содержание углерода, %	№ варианта	содержание углерода, %
1	0,03	11	3,33
2	1,00	12	4,13
3	2,30	13	0,06
4	4,65	14	1,60
5	0,04	15	3,65
6	1,20	16	5,80
7	2,75	17	0,70

8	5,42	18	4,10
9	0,05	19	3,27
10	1,40	20	6,3

### ***Контрольные вопросы***

1. Дайте определения понятиям «сплав», «компонент», «фаза».
2. Какой сплав называется «чугуном»? Какие бывают чугуны по форме углерода в них?
3. В какой форме присутствует в чугуне графит? Какие бывают чугуны с разной формой графита?
4. Какой сплав называется «сталью»?
5. Какие компоненты присутствуют в железоуглеродистых сплавах?
6. Какие фазы присутствуют в железоуглеродистых сплавах?
7. Как называется фаза, представляющая собой твердый раствор углерода в  $\alpha$ -Fe, по свойствам близкий к железу?
8. Что собой представляет ледебурит? Аустенит? Цементит?
9. Что такое эвтектика? В чем отличие эвтектики от эвтектоида?
10. Какую структуру имеют углеродистые стали?
11. К каких координатах строится диаграмма состояния сплавов?
12. Какой смысл у линий на диаграмме состояния?
13. Как определить состав фаз с использованием диаграммы состояния?
14. Что показывают горизонтальные линии на диаграмме состояния железоуглеродистых сплавов?