

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.

Еще материалы <https://helpiks.org/2-17260.html>

Теоретическое введение

Компоненты железоуглеродистых сплавов

Железо. Железо имеет три полиморфные модификации α , γ и δ . Модификация α существует при температурах ниже $911\text{ }^{\circ}\text{C}$, кристаллическая решетка α -железа - объемно центрированный куб (ОЦК). γ -железо (Fe_{γ}) существует при температуре $911 - 1392\text{ }^{\circ}\text{C}$, кристаллическая решетка - гранецентрированная кубическая (ГЦК). В интервале $1392 - 1539\text{ }^{\circ}\text{C}$ существует δ -железо с кристаллической решеткой объемно центрированного куба (ОЦК). Высокотемпературное Fe_{α} называют Fe_{δ} . Высокотемпературная модификация Fe_{α} не представляет собой новой аллотропической формы.

При температуре ниже $768\text{ }^{\circ}\text{C}$ железо ферромагнитно, а выше – парамагнитно. Точку $768\text{ }^{\circ}\text{C}$, соответствующую магнитному превращению, то есть переходу из ферромагнитного состояния в парамагнитное называют точкой Кюри. Модификация Fe_{γ} 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 $210\text{ }^{\circ}\text{C}$. Цементит имеет высокую твердость (более 800 HB , 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 – α -феррит, δ -феррит и аустенит, а также цементит и графит.

Феррит - твердый раствор внедрения атомов углерода в α -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 γ -железе, имеющий предельную растворимость углерода - 2,14%. Аустенит немагнитен, имеет твёрдость 160 - 200НВ при пластичности $\delta = 50\%$. Аустенит (А, γ) – твердый раствор внедрения углерода в γ -железо (по имени английского ученого Р. Аустена). Углерод занимает место в центре гранецентрированной кубической ячейки. Предельная растворимость углерода в γ -железе 2,14 % при температуре 1147 °С (точка E). 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

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

Конода - горизонтальный отрезок, концы которого ограничены равновесными сосуществующими фазами и содержанием в них компонентов.

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.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 со-

держание аустенита $m_A = \frac{ba}{bc} \times 100\%$, а феррита $m_F = \frac{ac}{bc} \times 100\%$.

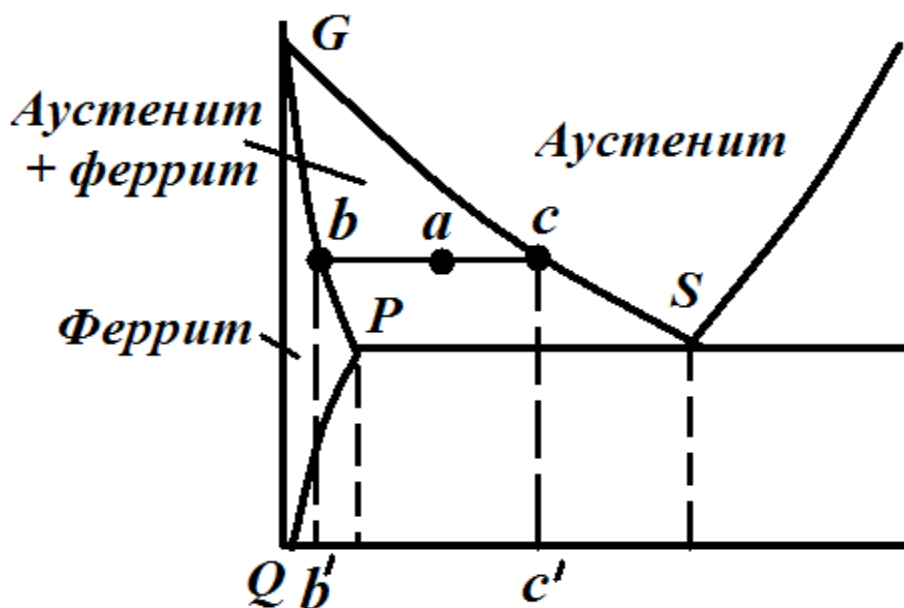


Рис.1. Схема правила отрезков

Структурные составляющие в системе "железо-углерод"

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).

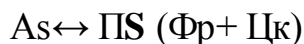
Перлит - эвтектоид, *эвтектоидная смесь*, механическая смесь феррита и цементита, полученная в результате распада аустенита при охлаждении сплавов ниже 727°C . назван перлитом потому, что после травления его поверхность приобретает характерный перламутровый отлив. При медленном охлаждении перлит присутствует 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°C . 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°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 твёрдого 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 % Fe₃C). 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 (Fe — Fe₃C) называется цементитной (метастабильная), вторая (Fe - 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.

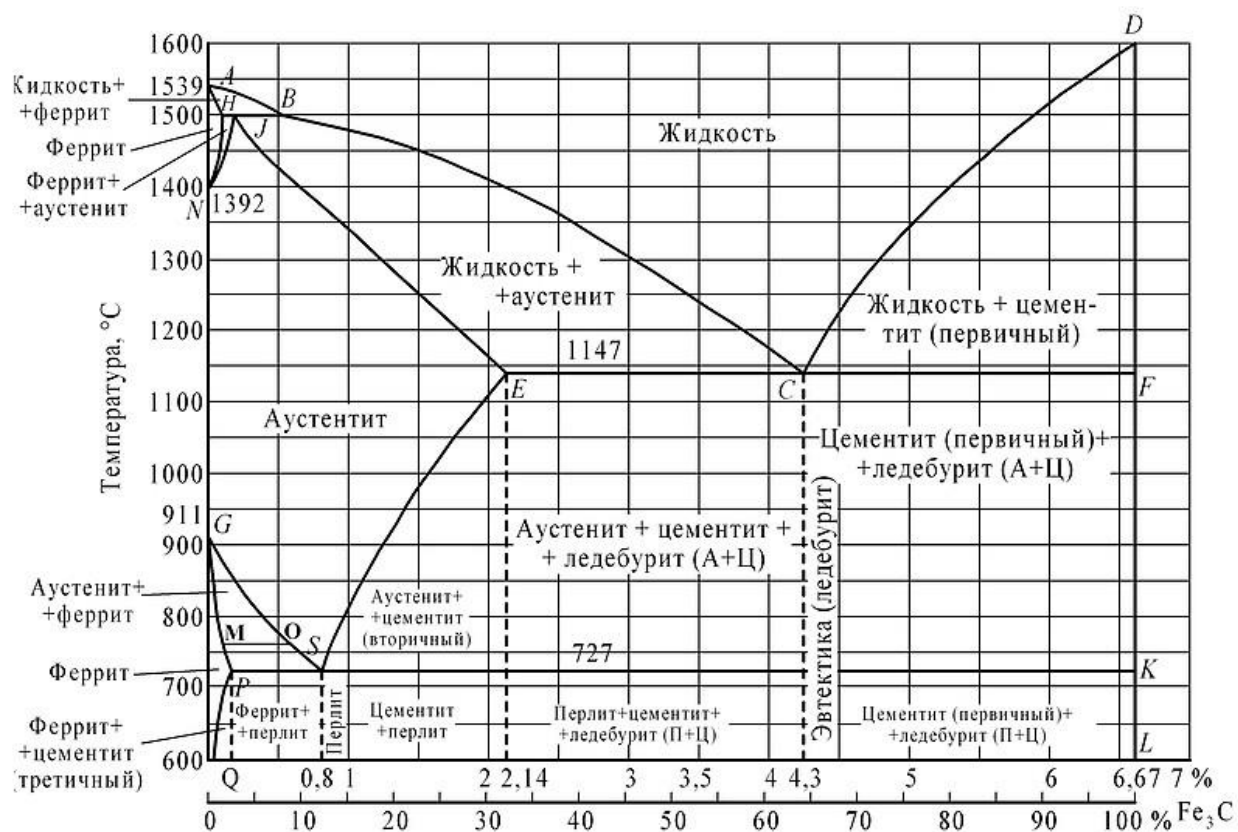


Рис. 2. Диаграмма состояния Fe – Fe₃C (Fe – C)

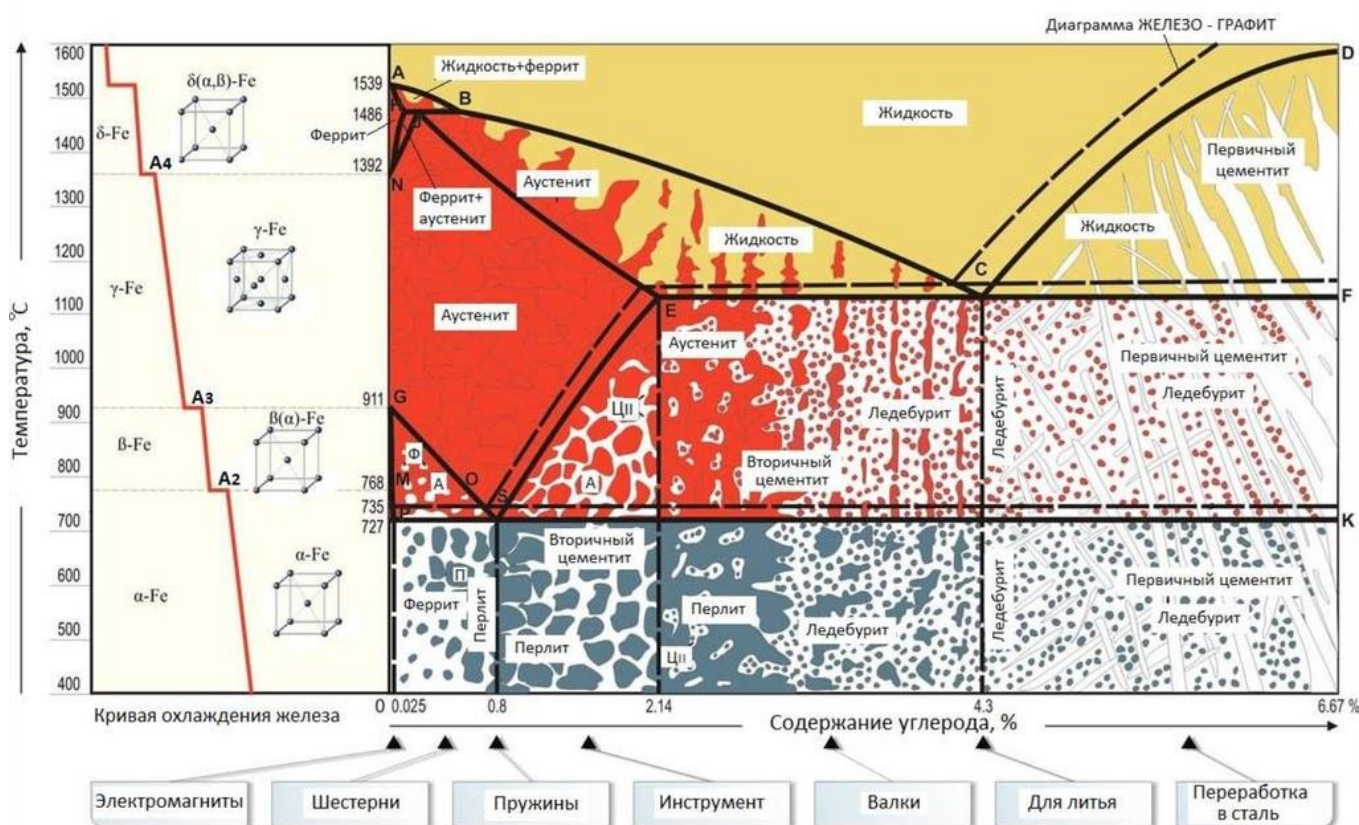


Рис. 3. Кривая охлаждения железа и диаграмма состояния Fe – C и области использования сплавов (или обрезать?)

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.1).

Таблица 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	δ - 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 ₃ 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

Линии диаграммы: *ABCD* (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. 2. Значение линий диаграммы состояния системы железо-углерод

Линии	Значение линии
AB	Ликвидус для δ - твердого раствора
АН	Солидус для δ - 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 $\delta \rightarrow \gamma$ в сплавах при охлаждении
ES (A_{cm})	Линия предельной растворимости углерода в γ -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 α -Fe
PQ	Начало выделения цементита (третичного) из феррита при охлаждении
MO (A_2)	Переход из ферромагнитного в парамагнитное состояние ($768^\circ C$), на д.с. 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 δ -феррита,
- *NHJ* - в равновесии кристаллы δ -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 α -феррита,

- *QPSKL* - в равновесии кристаллы α -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

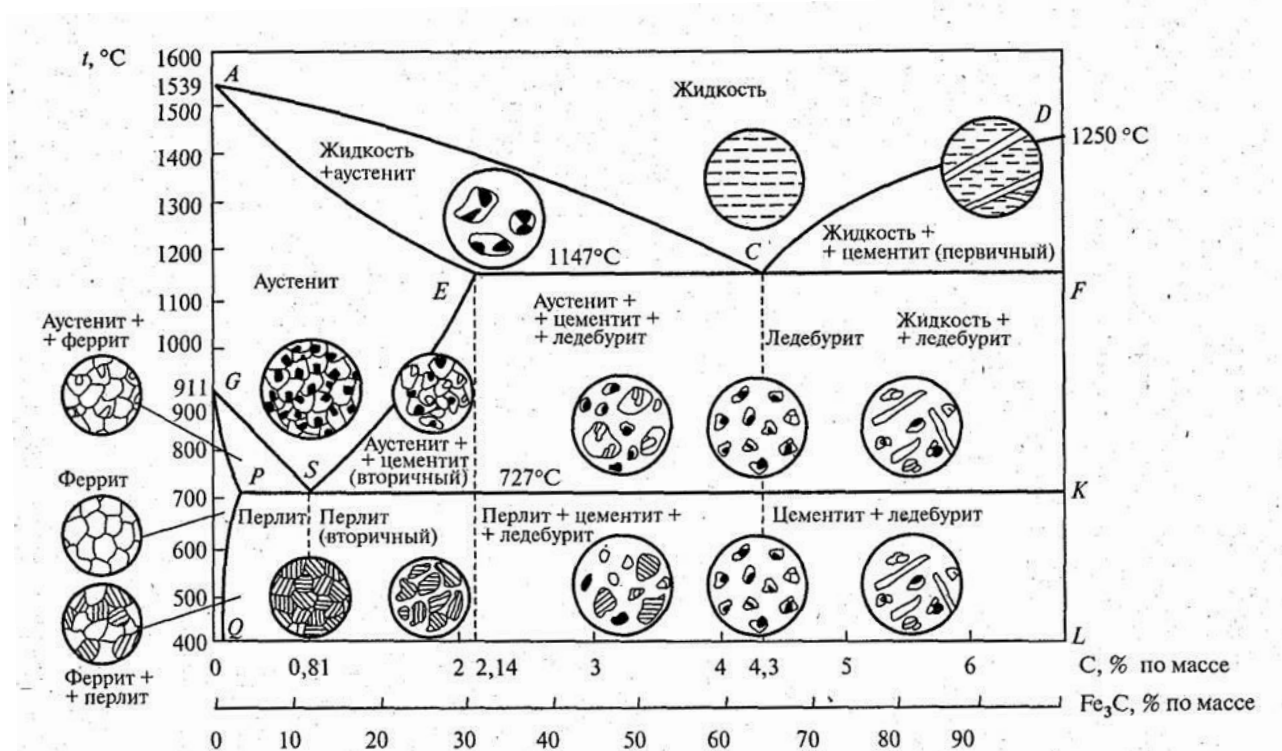


В результате реакции образуется аустенит.

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 **F**, которые в совокупности образуют эвтектику, называемую ледебуритом.

При 727 °С (горизонталь *PSK*) протекает эвтектоидная реакция $A \rightarrow \Phi_P + C$ (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 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). Микроструктура углеродистых сталей приведена на рис. 4.

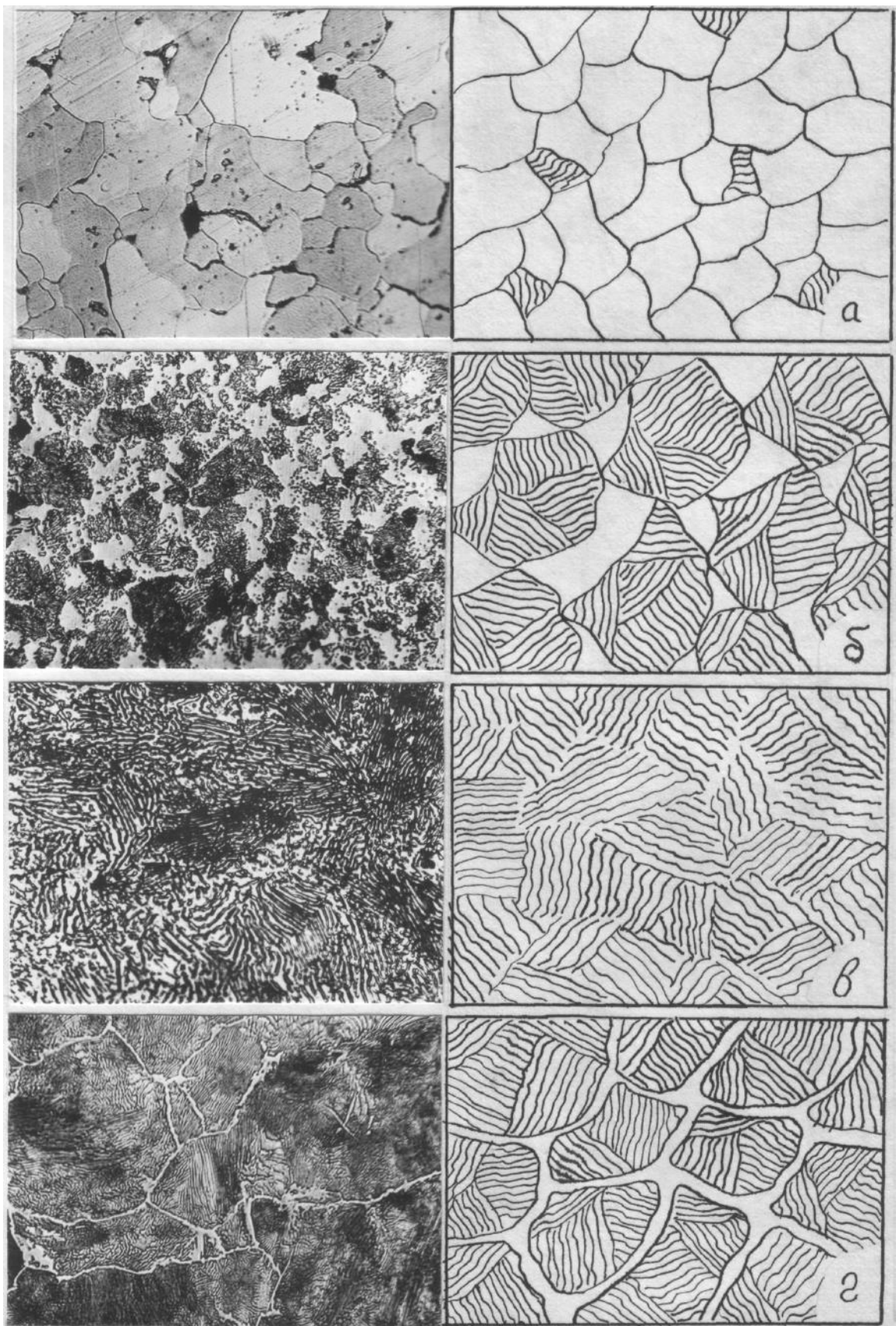


Рис. 4. Микроструктура углеродистой стали: а - доэвтектоидная сталь (0,1%С); б - доэвтектоидная сталь (0,6%С); в - эвтектоидная сталь (0,8%С); г - заэвтектоидная сталь (1,2%С)

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).

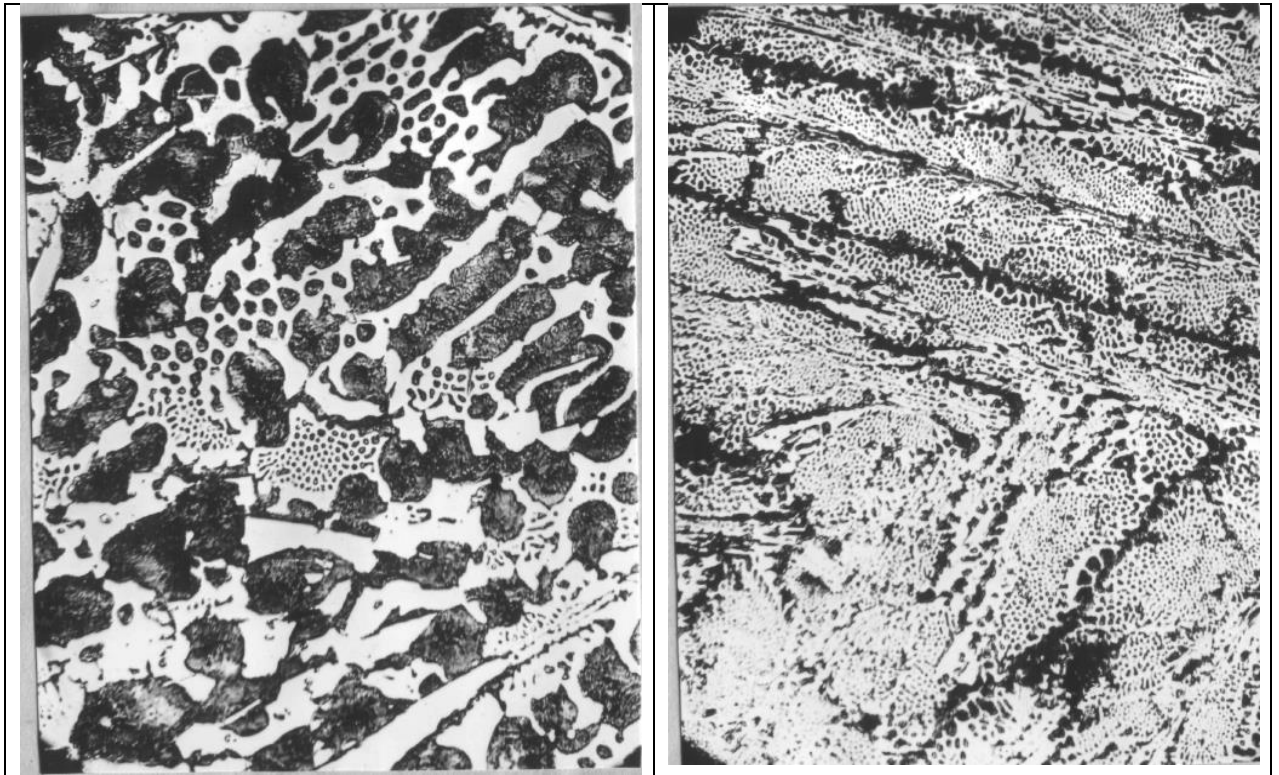


Рис. 5. Микроструктура белого чугуна: а – доэвтектический, б – эвтектический белый чугун

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).

На рис. 6 показана микроструктура обыкновенного серого чугуна на феррито-перлитной основе.

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) (рис. 7).

Ковкими называют чугуны, в которых графит имеет хлопьевидную форму, структура - ферритная или феррито-перлитная (рис. 8)



Рис. 6. Микроструктура серого чугуна на феррито-перлитной основе

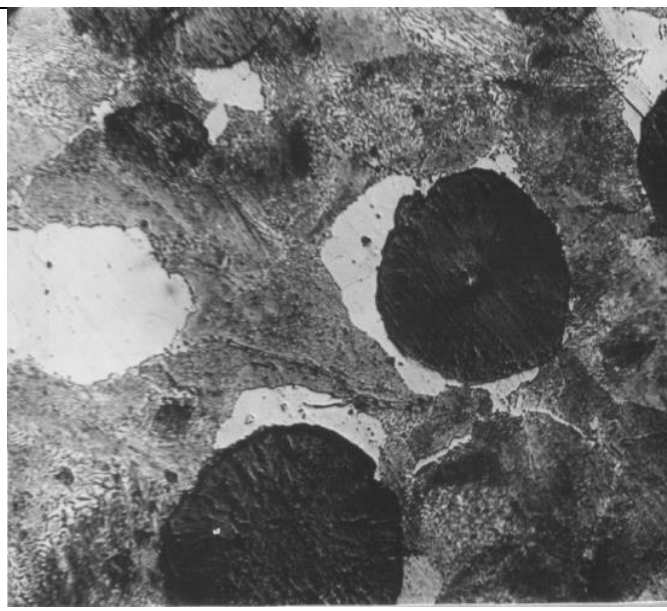


Рис. 7. Микроструктура высокопрочного чугуна на феррито-перлитной основе

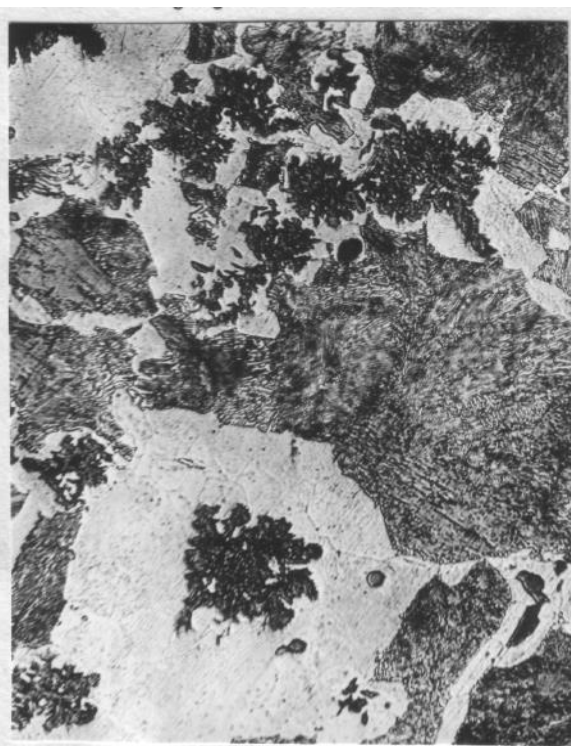
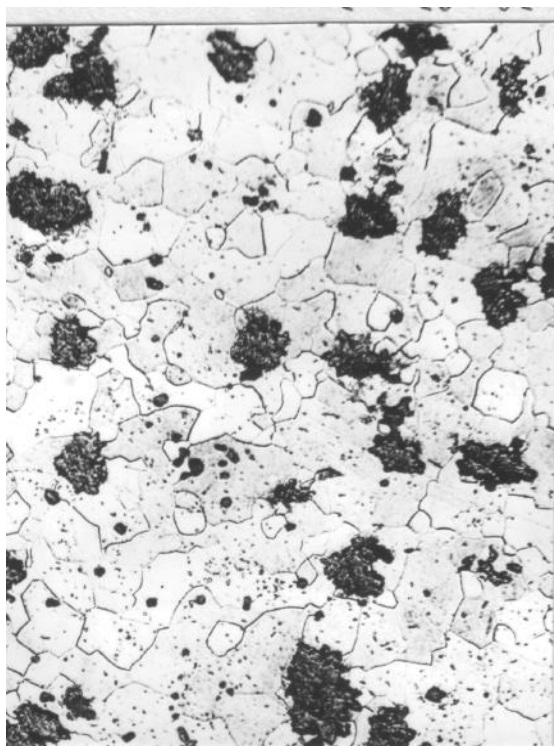


Рис. 8. Микроструктура ковкого чугуна: а – ферритная основа, б – ферритно-перлитная основа

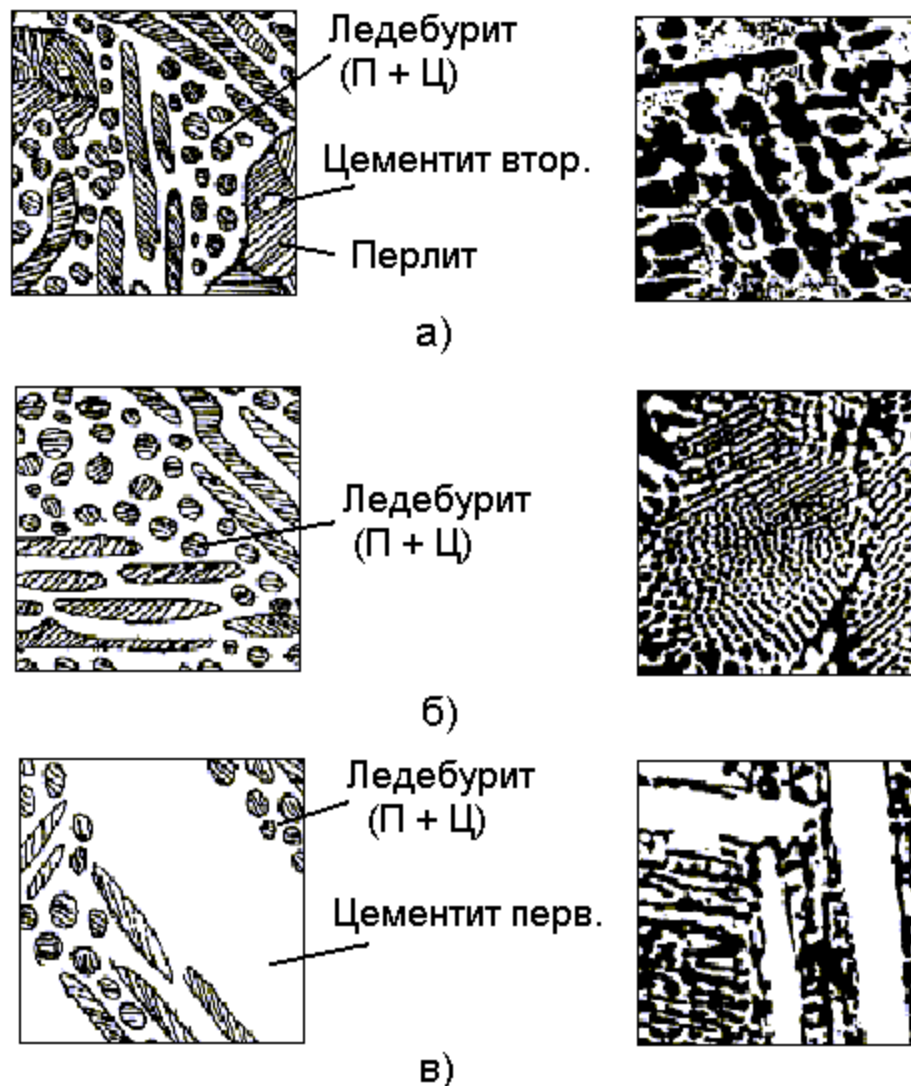
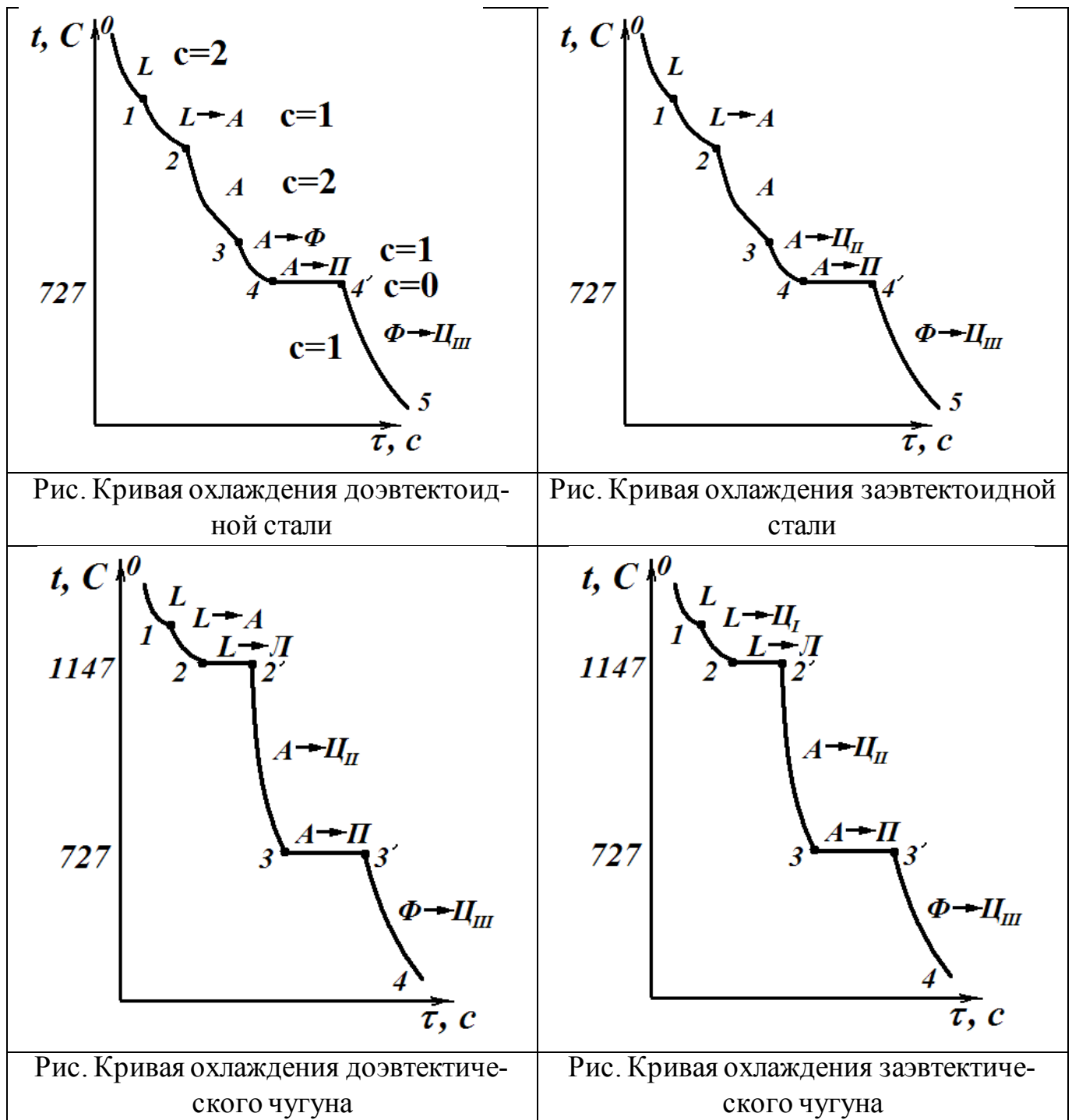


Рис. 2. Микроструктура белых чугунов (слева схематическое изображение):
а) доэвтектического; б) эвтектического; в) заэвтектического

Выполнение работы

1. По критическим точкам (табл.1) в масштабе изобразить диаграмму состояния (температура - содержание углерода - это координаты точек).
2. На полученном рисунке проводим вертикальную линию, соответствующую контрольному сплаву (по содержанию углерода). В местах пересечения с линиями диаграммы определяем температуры фазовых превращений и превращений при постоянной температуре в сплаве (температуры точек 1, 2, ... T_1, T_2, \dots).
3. Определите, к какому виду сплавов относится данный сплав по содержанию углерода?
4. Для контрольного сплава строим кривую охлаждения (примеры на рис.) в координатах время охлаждения (ось X) - температура (ось Y). Температура (ось Y) такая же, как и на диаграмме состояния (в масштабе). ось X -, безразмерная. Значения температур - Ваши, снятые для вашего сплава, при заданном содержании углерода



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.
7. Проведите анализ изменения структурного состава сплавов в виде таблицы (пример – в таблице 3)

Таблица 3. Анализ структурного состава сплава (пример)

Критические температуры (температуры начала, конца кристаллизации, фазовых превращений)	Фазы и фазовые превращения	Формирование структур в сплавах. Процессы, происходящие в сплавах при охлаждении
$T > \dots\dots\dots ^\circ\text{C}$	Жидкая фаза L	Выше температуры $\dots\dots\dots ^\circ\text{C}$ сплав находится в жидком состоянии
$T_1 = \dots\dots\dots ^\circ\text{C}$	$L \rightarrow \text{Ц}_\text{I}$	В точке 1 начинается кристаллизация заэвтекктических чугунов: из жидкого расплава выделяется первичный цементит
$T_2 = 1147^\circ\text{C}$		Выделяя высокоуглеродистую фазу цементит, расплав обедняется углеродом и при температуре 1147°C содержит 4,3%С. Конец кристаллизации.
$T_2 = 1147^\circ\text{C}$	Ледебурит (эвтектика)=аустенит+цементит $L = A + \text{Ц}_\text{I}$	Эвтекктическое превращение. При постоянной температуре расплав кристаллизуется с образованием ледебурита.
$T_2 = 1147^\circ\text{C}$	$A \rightarrow \text{Ц}_\text{II}$	Начало перекристаллизации. Из аустенита, входящего в ледебурит, выделяется избыточный углерод в виде вторичного цементита
$T_3 = 727^\circ\text{C}$		Конец перекристаллизации.
$T_3 = 727^\circ\text{C}$	Перлит (эвтектоид)=феррит+цементит $A \rightarrow P = (\Phi_\text{P} + \text{Ц}_\text{II})$	Эвтектоидная реакция. Аустенит, содержащий 0,8% С, превращается в перлит и образуется видоизмененный ледебурит
$T_3 < 727^\circ\text{C}$	$\Phi_\text{P} \rightarrow \text{Л}_\text{вид} + \text{Ц}_\text{I} + \text{Ц}_\text{II}$	При дальнейшем охлаждении из феррита, входящего в состав перлита видоизмененного ледебурита $\text{Л}_\text{вид}$, выделяется третичный цементит, наслаивающийся на цементит перлита. Конечная структура заэвтекктического чугуна $\text{Л}_\text{вид} + \text{Ц}_\text{I} + \text{Ц}_\text{II}$ носит название ледебуритно-цементитного чугуна

8. Изучить и зарисовать микроструктуры углеродистых сталей/чугунов. Обозначить названия структурных составляющих.

Таблица 3. 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