

# **ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ ЖЕЛЕЗО – УГЛЕРОД**

# КОМПОНЕНТЫ И ФАЗЫ В СИСТЕМЕ ЖЕЛЕЗО-УГЛЕРОД

Компонентами железоуглеродистых сплавов являются железо, углерод и цементит.

**1. Железо** – d-переходный металл серебристо-светлого цвета. Температура плавления – 1539 °С. Удельный вес равен 7,86 г/см<sup>3</sup>.

Наиболее существенной особенностью железа является его полиморфизм. В твердом состоянии железо может находиться в двух модификациях –  $\alpha$  и  $\gamma$ . Полиморфные превращения происходят при температурах 911 и 1392 °С. При температуре ниже 911 и выше 1392 °С существует  $Fe_{\alpha}$  (или  $\alpha$ -Fe) с объемноцентрированной кубической решеткой. В интервале температур 911...1392 °С устойчивым является  $Fe_{\gamma}$  (или  $\gamma$ -Fe) с гранецентрированной кубической решеткой. При превращении  $\alpha \rightarrow \gamma$  наблюдается уменьшение объема, так как решетка  $\gamma$ -Fe имеет более плотную упаковку атомов, чем решетка  $\alpha$ -Fe. При охлаждении во время превращения  $\gamma \rightarrow \alpha$  наблюдается увеличение объема. В интервале температур 1392...1539 °С 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, т.е. переходу из ферромагнитного состояния в парамагнитное, называют точкой Кюри. Модификация  $Fe_{\gamma}$  парамагнитна.

# КОМПОНЕНТЫ И ФАЗЫ В СИСТЕМЕ ЖЕЛЕЗО-УГЛЕРОД

Железо технической чистоты обладает невысокой твердостью (80 НВ) и прочностью (временное сопротивление –  $\sigma_{\text{в}} = 250$  МПа, предел текучести –  $\sigma_{\text{Т}} = 120$  МПа) и высокими характеристиками пластичности (относительное удлинение –  $\delta = 50$  %, а относительное сужение –  $\psi = 80$  %). Свойства могут изменяться в некоторых пределах в зависимости от величины зерна. Железо характеризуется высоким модулем упругости, наличие которого проявляется и в сплавах на его основе, обеспечивая высокую жесткость деталей из этих сплавов. Железо со многими элементами образует растворы: с металлами – растворы замещения, с углеродом, азотом и водородом – растворы внедрения.

Раствор замещения – это твердый раствор в которых атом одного компонента занимает место любого атома в кристаллической решетке другого компонента.

Твердые растворы внедрения образуются внедрением атомов растворенного компонента в поры [кристаллической решетки](#) растворителя

# КОМПОНЕНТЫ И ФАЗЫ В СИСТЕМЕ ЖЕЛЕЗО-УГЛЕРОД

2. **Углерод** относится к неметаллам. Обладает полиморфным превращением, в зависимости от условий образования существует в форме графита с гексагональной кристаллической решеткой (температура плавления – 3500 °С, плотность – 2,5 г/см<sup>3</sup>) или в форме алмаза со сложной кубической решеткой с координационным числом, равным четырем (температура плавления – 5000 °С). В сплавах железа с углеродом углерод находится в состоянии твердого раствора с железом и в виде химического соединения – цементита (Fe<sub>3</sub>C), а также в свободном состоянии в виде графита (в серых чугунах).

3. **Цементит** (Fe<sub>3</sub>C) – химическое соединение железа с углеродом (карбид железа), содержит 6,67 % углерода. Более точные исследования показали, что цементит может иметь переменную концентрацию углерода. Однако в дальнейшем, при разборе диаграммы состояния, сделаем допущение, что Fe<sub>3</sub>C имеет постоянный состав. Кристаллическая решетка цементита ромбическая, удельный вес 7,82 г/см<sup>3</sup> (очень близок к удельному весу железа). При высоких температурах цементит диссоциирует, поэтому температура его плавления неясна и проставляется ориентировочно – 1260 °С.

# КОМПОНЕНТЫ И ФАЗЫ В СИСТЕМЕ ЖЕЛЕЗО-УГЛЕРОД

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

В системе железо – углерод существуют следующие фазы: жидкая фаза, феррит, аустенит, цементит, графит.

# КОМПОНЕНТЫ И ФАЗЫ В СИСТЕМЕ ЖЕЛЕЗО-УГЛЕРОД

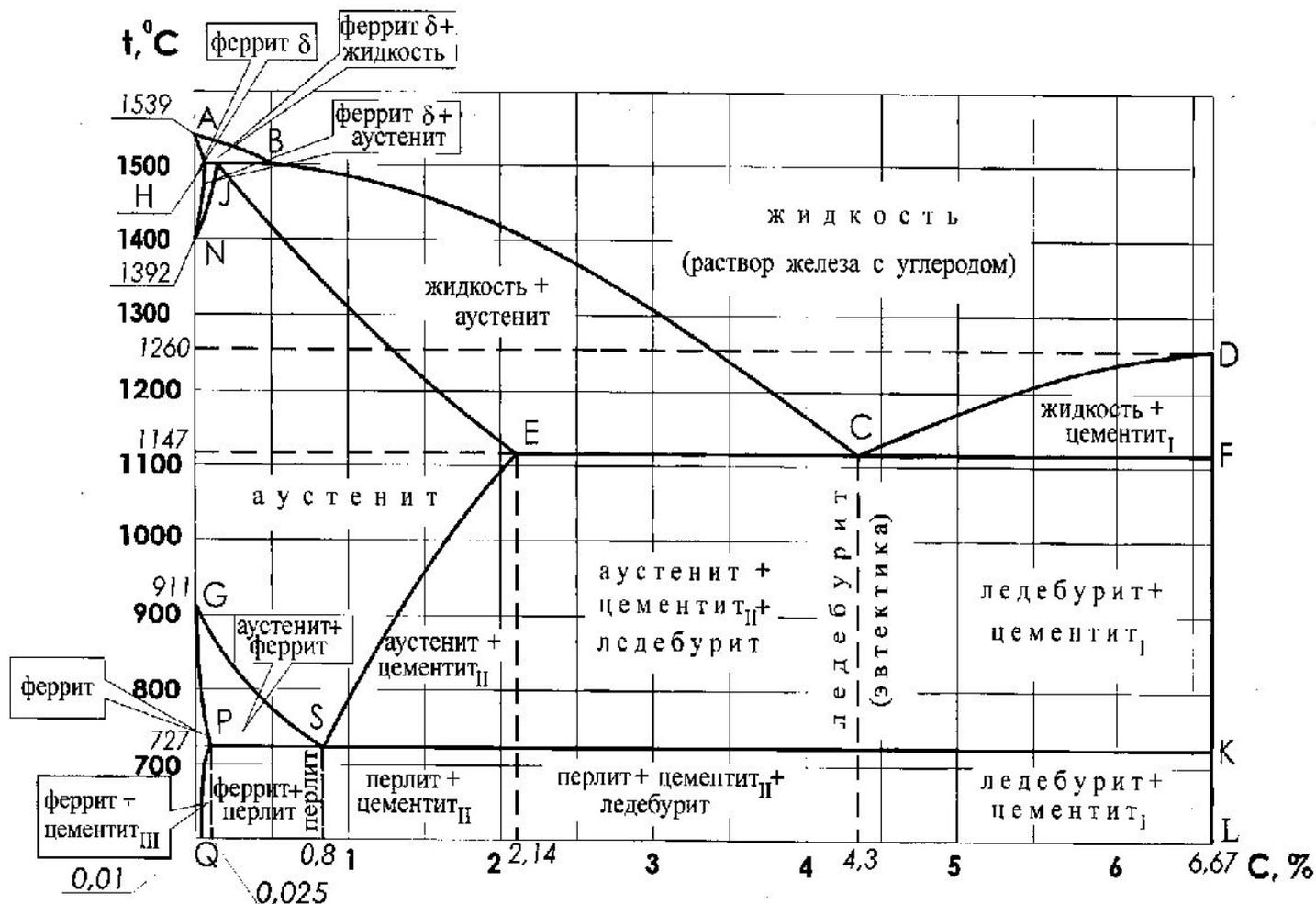
- 1. Жидкая фаза.** В жидком состоянии железо хорошо растворяет углерод в любых пропорциях с образованием однородной жидкой фазы.
- 2. Феррит ( $\Phi$ ,  $\alpha$ )** – твердый раствор внедрения углерода в  $\alpha$ -железе (от латинского слова ferrum – железо). Различают низкотемпературный феррит с предельной растворимостью углерода 0,02 % при температуре 727 °С (точка Р) и высокотемпературный  $\delta$ -феррит (в интервале температур 1392...1539 °С) с предельной растворимостью углерода 0,1 % при температуре 1499 °С (точка J). Свойства феррита близки к свойствам железа. Он мягок (твердость – 130 НВ, временное сопротивление –  $\sigma_{\text{в}} = 300$  МПа) и пластичен (относительное удлинение -  $\delta = 50$  %), магнитен до 768 °С.
- 3. Аустенит (А,  $\gamma$ )** – твердый раствор внедрения углерода в  $\gamma$ -железо (по имени английского ученого Р. Аустена). Углерод занимает место в центре гранцентрированной кубической ячейки. Предельная растворимость углерода в  $\gamma$ -железе 2,14 % при температуре 1147 °С (точка Е). Аустенит имеет твердость 200...250 НВ, пластичен (относительное удлинение –  $\delta = 40...50$  %), парамагнитен. При растворении в аустените других элементов могут изменяться свойства и температурные границы существования.

# КОМПОНЕНТЫ И ФАЗЫ В СИСТЕМЕ ЖЕЛЕЗО-УГЛЕРОД

- 4. Цементит** – характеристика дана выше. В железоуглеродистых сплавах присутствуют фазы – цементит первичный, цементит вторичный, цементит третичный. Химические и физические свойства этих фаз одинаковы. Влияние на механические свойства сплавов оказывает различие в размерах, количестве и расположении этих выделений. Цементит первичный выделяется из жидкой фазы в виде крупных пластинчатых кристаллов. Цементит вторичный выделяется из аустенита и располагается в виде сетки вокруг зерен аустенита (при охлаждении – вокруг зерен перлита). Цементит третичный выделяется из феррита и в виде мелких включений располагается у границ ферритных зерен.
- 5. Графит** – характеристика дана выше. 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 — Fe<sub>3</sub>C) называется цементитной (метастабильная), вторая (Fe – C) графитной (стабильная). Оба варианта диаграммы приводятся вместе в одной системе координат – температура – содержание углерода. Диаграмма состояния системы железо – углерод построена по результатам многочисленных исследований, проведенных учеными разных стран.

# КОМПОНЕНТЫ И ФАЗЫ В СИСТЕМЕ ЖЕЛЕЗО-УГЛЕРОД

Буквенное обозначение узловых точек в диаграмме является общепринятым как в России, так и за рубежом.



# КОМПОНЕНТЫ И ФАЗЫ В СИСТЕМЕ ЖЕЛЕЗО-УГЛЕРОД

Ликвидус по всей диаграмме проходит по линиям АВ, ВС, CD;

Солидус – по линиям АН, НJ, JE, ЕСF. Сплавы железа с углеродом обычно делят на стали и чугуны. Условной границей для такого деления является 2,14 % С (точка E).

Сплавы, содержащие углерода менее 2,14 %, относятся к сталям, более 2,14 % – к чугунам.

Температуры, при которых происходят фазовые и структурные превращения в сплавах системы железо – цементит, т.е. критические точки, обозначаются буквой А. В зависимости от того, при нагреве или при охлаждении определяется критическая точка, к букве А добавляется индекс с (от слова *chauffage* – нагрев) при нагреве и индекс r (от слова *refroidissement* – охлаждение) при охлаждении с оставлением цифры, характеризующей данное превращение.

Таким образом, например, нагрев доэвтектоидной стали выше соответствующей точки на линии CS обозначается как нагрев выше точки  $A_{C3}$ . При охлаждении же этой стали первое превращение должно быть обозначено как  $A_{r3}$ , второе (на линии PSK) – как  $A_{r1}$ .

# КОМПОНЕНТЫ И ФАЗЫ В СИСТЕМЕ ЖЕЛЕЗО-УГЛЕРОД

Узловые точки диаграммы состояния системы Fe — Fe<sub>3</sub>C

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, предельнонасыщенный 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

# КОМПОНЕНТЫ И ФАЗЫ В СИСТЕМЕ ЖЕЛЕЗО-УГЛЕРОД

Обозначение точки	t, °C	C, %	Значение точки
<i>D</i>	1260	6,67	Предполагаемая температура плавления Fe <sub>3</sub> C
<i>E</i>	1147	2,14	Аустенит, предельно насыщенный углеродом
<i>C</i>	1147	4,3	Жидкая фаза, испытывающая эвтектическое превращение
<i>F</i>	1147	6,67	–
<i>P</i>	727	0,02	Феррит, предельно насыщенный углеродом
<i>S</i>	727	0,8	Аустенит, испытывающий эвтектоидное превращение
<i>K</i>	727	6,67	–
<i>Q</i>	20	0,006	Феррит, предельно насыщенный углеродом

# КОМПОНЕНТЫ И ФАЗЫ В СИСТЕМЕ ЖЕЛЕЗО-УГЛЕРОД

Значение линий диаграммы состояния системы Fe — Fe<sub>3</sub>C

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: $\delta_H + L_B \rightarrow \gamma_J$
ECF	Эвтектическое превращение: $L_C \rightarrow (\gamma_E + Fe_3C)$
PSK (A <sub>1</sub> )	Эвтектоидное превращение: $\gamma_S \rightarrow (\alpha_P + Fe_3C)$
HN	Начало полиморфного превращения δ → γ в сплавах при охлаждении
ES (A <sub>cm</sub> )	Линия предельной растворимости углерода в γ-Fe. Начало выделения цементита (вторичного) из аустенита при охлаждении
GS (A <sub>3</sub> )	Начало аллотропического превращения γ → α 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 <sub>2</sub> )	Переход из ферромагнитного в парамагнитное состояние (768 °С, т. Кюри)

# ПЕРВИЧНАЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ СТАЛЕЙ

**Сплав 1** (0,05 % C). Кристаллизация начнется в точке  $\alpha$  и закончится в точке  $b$  с образованием  $\delta$ -твердого раствора. Углерод повышает температуру аллотропического превращения железа  $\delta \leftrightarrow \gamma$ . Эта перестройка решетки твердого раствора идет между точками  $c$  и  $d$ , когда одновременно существуют два разных твердых раствора (состав  $\delta$ -раствора изменяется по линии  $HN$ ,  $\gamma$ -раствора – по линии  $JN$ ). Ниже точки  $d$  сплав охлаждается в аустенитном состоянии.

**Сплав 2** (0,13 % C). Кристаллизация  $\delta$ -раствора начнется в точке  $e$  и закончится в точке  $k$ . При 1499 °C происходит перитектическое превращение:



От точки  $k$  до точки  $p$  идет перестройка решетки  $\delta \rightarrow \gamma$ , и, наконец, ниже точки  $p$  сплав охлаждается в аустенитном состоянии.

**Сплав 3** (0,25 % C). Кристаллизация  $\delta$ -раствора начинается в точке  $l$  и заканчивается в точке  $t$ . При 1499 °C также происходит перитектическое превращение, по окончании которого в избытке оказывается жидкая фаза. От точки  $t$  до точки  $s$  продолжается кристаллизация аустенита из жидкой фазы. Ниже точки  $s$  сплав охлаждается в аустенитном состоянии.

**Сплав 4** (0,6% C). Кристаллизация сплава начинается в точке  $g$  с образования аустенита и продолжается до точки  $h$ . Ниже этой точки сплав охлаждается в аустенитном состоянии.

Таким образом, первичная кристаллизация сталей заканчивается образованием  $\gamma$ -фазы, т. е. аустенита.

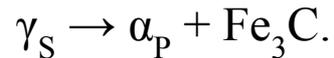
# ВТОРИЧНАЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ СТАЛЕЙ

После окончания первичной кристаллизации аустенит охлаждается без каких-либо изменений. Углерод в сплавах понижает температуру полиморфного превращения  $\gamma \rightarrow \alpha$ . В сплаве 5 это превращение начнется на линии  $GS$  в точке  $a$  и будет развиваться далее с понижением температуры до точки  $e$ . Так в сплаве появляется феррит. Концентрация углерода в уменьшающемся по количеству аустените будет изменяться по линии  $GS$  (к точке  $S$ ), а концентрация углерода в увеличивающемся по количеству феррите – по линии  $GP$  (к точке  $P$ ). Из приведенных ранее данных известно, что количество углерода в ферритной фазе весьма мало, поэтому выделение феррита должно вызывать заметное увеличение содержания углерода в аустените, что и происходит.

В точке  $e$  выделение феррита закончится, и сплав будет состоять из двух фаз –  $\alpha_p$  +  $\gamma_s$ .

# ВТОРИЧНАЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ СТАЛЕЙ

Аустенит с содержанием 0,8 % углерода на линии PSK претерпевает эвтектоидное превращение, состоящее в том, что одновременно выделяются две кристаллические фазы – феррит предельного насыщения (точка P) и цементит:



Возникающая при эвтектоидном распаде аустенита смесь феррита и цементита имеет тонкопластинчатое строение (чередующиеся пластинки  $\alpha$  и  $\text{Fe}_3\text{C}$ ) и называется перлитом – по радужной окраске поверхности шлифа после травления, имеющей сходство с перламутром.

Феррит, который выделился из аустенита в интервале температур от точки а до точки е, в эвтектоидном превращении не участвует. Во время эвтектоидного распада аустенита на линии PSK система состоит из трех фаз:  $\alpha_P$ ,  $\gamma_S$  и  $\text{Fe}_3\text{C}$ , поэтому по правилу фаз

$$C = K + 1 - \Phi = 2 + 1 - 3 = 0.$$

Устанавливаем, что число степеней свободы системы равно нулю. Следовательно, эвтектоидный распад аустенита происходит при постоянной температуре и при неизменной концентрации углерода во всех трех фазах.

Сразу после перлитного превращения система состоит из фаз  $\alpha$  и  $\text{Fe}_3\text{C}$ .

# ВТОРИЧНАЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ СТАЛЕЙ

Структурные составляющие – феррит+перлит,  
т. е.  $\alpha + (\alpha + \text{Fe}_3\text{C})$ .

Но 95,8 % феррита делится на избыточный феррит, выделившийся в интервале ае из аустенита (64,1 %) и феррит в составе перлита (95,8 %-64,1 %=31,7 %) Цементит же весь находится в составе перлита, т.о. получается: 64,1 %  $\alpha + (31,7 \% \alpha + + 4,2 \% \text{Fe}_3\text{C})$ . Количество перлита (35,9 %) соответствует количеству аустенита перед эвтектоидным превращением.

При дальнейшем охлаждении сплава, состоящего из феррита и цементита, ферритная фаза должна обедняться углеродом (по линии PQ) с выделением цементита, называемого третичным. Это фазовое превращение дает столь незначительные изменения в структуре, составе и количестве фаз, что при рассмотрении превращений в среднеуглеродистых и высокоуглеродистых сталях и чугунах им можно пренебречь. Однако превращение с выделением третичного цементита имеет большое значение для мягких сортов сталей с низким содержанием углерода, так как выделения цементной фазы могут заметно ухудшать вязкость стали.

Таким образом, при комнатной температуре сталь взятого состава (0,3 % C) в точке f состоит из двух фаз: феррита и цементита, а структурные составляющие стали (после медленного охлаждения) будут представлены так: феррит+перлит, т. е.  $\alpha + (\alpha + \text{Fe}_3\text{C})$ .

При этом третичный цементит не учитывается.

# ВТОРИЧНАЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ СТАЛЕЙ

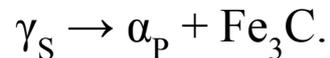
Точка S диаграммы (0,8 % C) называется эвтектоидной точкой, а вся линия PSK - линией эвтектоидного или перлитного превращения.

По отношению к эвтектоидной точке S стали делятся:

- на доэвтектоидные (содержащие до 0,8 % углерода);
- эвтектоидную (0,8 %);
- заэвтектоидные (содержащие углерода от 0,8 до 2,14 %).

Следовательно, доэвтектоидные стали при комнатной температуре после медленного охлаждения имеют одни и те же структурные составляющие: избыточный феррит + перлит, но в разных количествах в зависимости от содержания углерода.

Вторичная кристаллизация эвтектоидной стали (0,8 %) начинается сразу с эвтектоидного превращения:



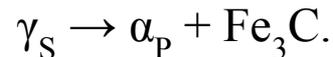
При комнатной температуре фазовый состав – 88,3 % феррита и 11,7 % цементита, структурная составляющая одна – перлит.

# ВТОРИЧНАЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ СТАЛЕЙ

Сплав 6 (1,2 % C). После завершения первичной кристаллизации сталь охлаждается в аустенитном состоянии. Исходя из положения линии ES, можно установить, что аустенит стали с 1,2 % C вплоть до точки 1 (на линии ES) оказывается ненасыщенным углеродом. По достижении температуры точки 1 аустенит становится предельно насыщенным углеродом, и так как растворимость углерода при охлаждении уменьшается (согласно линии ES), то, начиная с точки 1, из аустенита выделяется избыток углерода в виде  $Fe_3C$ , называемый вторичным (избыточным) цементитом  $(Fe_3C)_{II}$ .

Чуть выше линии PSK сплав будет состоять из двух фаз – аустенита и вторичного цементита. Таким образом, перед превращением сплав состоит из (93,2 %  $\gamma$  + 6,8 %  $(Fe_3C)_{II}$ ). Структурные и фазовые составляющие совпадают.

По достижении точки t аустенит содержит 0,8 % C (точка S) и претерпевает уже известное нам эвтектоидное превращение:



Вторичный цементит, выделившийся в интервале температур от точки 1 до точки m, в этом превращении не участвует.

# ВТОРИЧНАЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ СТАЛЕЙ

17,7 % – это общее количество цементита в сплаве, он включает в себя и 6,8 % избыточного  $(\text{Fe}_3\text{C})_{\text{II}}$ , выделившегося в интервале  $lm$ , и цементит перлита:

$$17,7\% - 6,8\% = 10,9\%$$

Таким образом, получаем

$$6,8\% (\text{Fe}_3\text{C})_{\text{II}} + (82,3\% \alpha + 10,9\% \text{Fe}_3\text{C}) \text{ перлит.}$$

При дальнейшем охлаждении вплоть до точки  $g$  фазовые и структурные составляющие стали не изменяются (не забывать о поправке, сделанной при разборе сплава 5 в связи с ходом линии PQ). Сплав состоит из двух фаз феррита и цементита, а структурные составляющие стали представлены так: цементит + перлит, т. е.  $(\text{Fe}_3\text{C})_{\text{II}} + (\alpha + \text{Fe}_3\text{C})$ .

Таким образом, заэвтектоидные стали при комнатной температуре после медленного охлаждения имеют одни и те же структурные составляющие: вторичный избыточный цементит + перлит, но в разных относительных количествах в зависимости от содержания углерода.