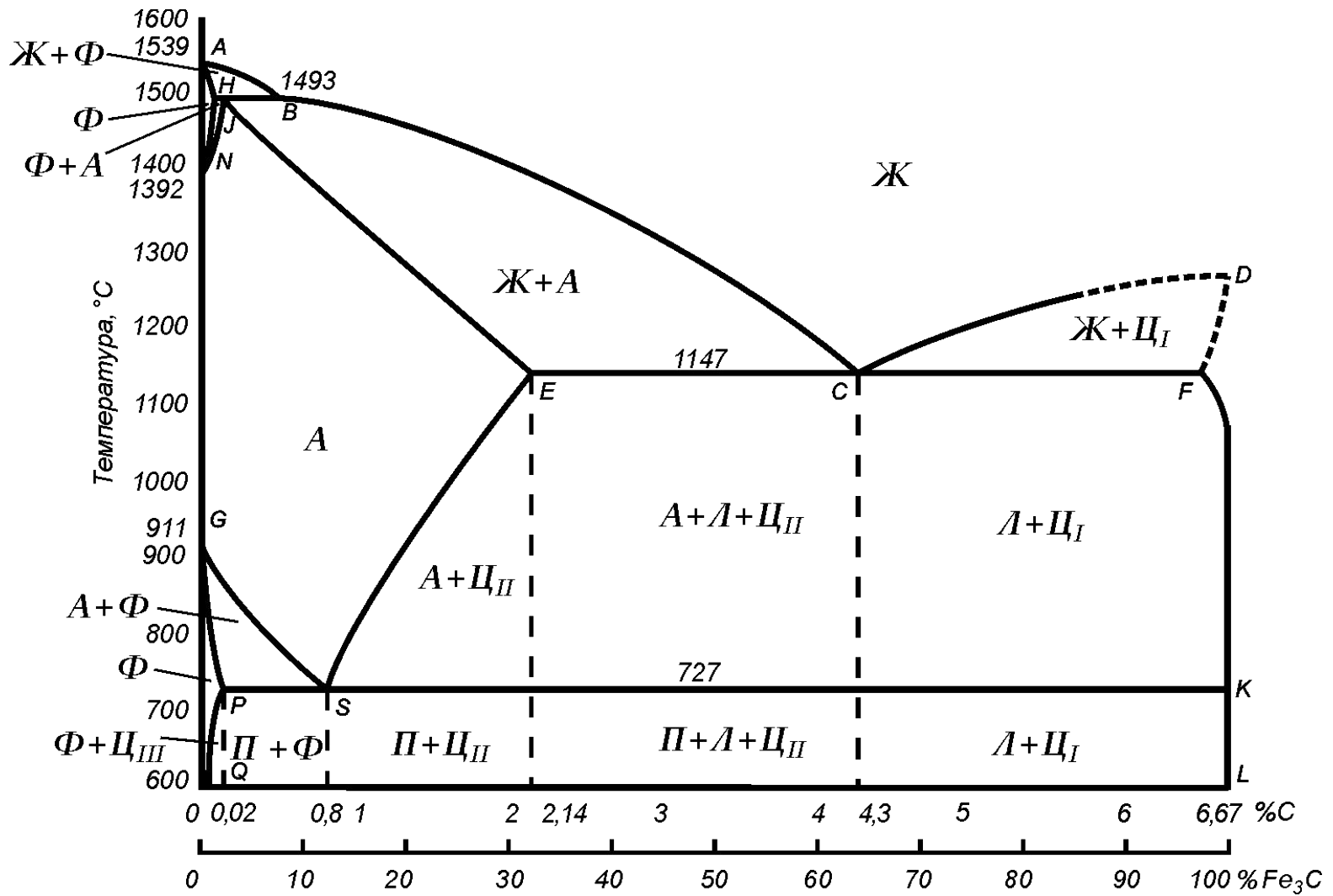




- ***Диаграмма состояния  
железо-цементит***



# Диаграмма состояния Fe–Fe<sub>3</sub>C



# Характеристика железа

**Fe** – ферромагнитный переходный полиморфный металл, серебристо-светлого цвета с порядковым номером 26.

Температура плавления чистого Fe 1539°C.

Плотность при комнатной температуре 7,68 г/см<sup>3</sup>.

Техническое Fe содержит не более 0,02 % С.

# Характеристика углерода

**Углерод** относится к неметаллам. Обладает полиморфным превращением, в зависимости от условий образования существует в форме графита с гексагональной кристаллической решеткой (температура плавления –  $3500^{\circ}\text{C}$ , плотность –  $2,5\text{ г/см}^3$ ) или в форме алмаза со сложной кубической решеткой (температура плавления –  $5000^{\circ}\text{C}$ ).

# Характеристика фазовых составляющих

- **Феррит (Ф)** - твердый раствор внедрения углерода в  $\alpha$ -железе. Растворимость углерода в  $\alpha$ -железе при комнатной температуре до 0,005%; наибольшая растворимость - 0,02% при 727°C. Феррит имеет незначительную твердость (НВ 80-100) и прочность ( $\sigma_v=250$  МПа), но высокую пластичность ( $\delta=50\%$ ;  $\phi=80\%$ ).

# Характеристика фазовых составляющих

- **Аустенит (А)** - твердый раствор внедрения углерода в  $\gamma$ -железе. В железоуглеродистых сплавах он может существовать только при высоких температурах. Предельная растворимость углерода в  $\gamma$ -железе 2,14% при температуре 1147°C и 0,8% - при 727°C. Аустенит имеет твердость НВ 160-200 и весьма пластичен ( $\delta=40-50\%$ ).

# Характеристика фазовых составляющих

- **Цементит (Ц)** - химическое соединение железа с углеродом (карбид железа  $\text{Fe}_3\text{C}$ ). В цементите содержится 6,67% углерода. Температура плавления цементита около  $1600^\circ\text{C}$ . Он очень тверд (НВ~800), хрупок и практически не обладает пластичностью.



# Характеристика фазовых составляющих

- **Графит** - это свободный углерод, мягок (НВ 3) и обладает низкой прочностью. С изменением формы графитовых включений меняются механические и технологические свойства сплава.

# Характеристика фазовых составляющих

- **Перлит (П)** - механическая смесь (эвтектоид, т. е. подобный эвтектике, но образующийся из твердой фазы) феррита и цементита, содержащая 0,8% углерода. При комнатной температуре зернистый перлит имеет предел прочности  $\sigma_{\text{в}}=800$  МПа; относительное удлинение  $\delta=15\%$ ; твердость НВ 160

# Характеристика фазовых составляющих

- **Ледебурит (Л)** - механическая смесь (эвтектика) аустенита и цементита, содержащая 4,3% углерода. Ледебурит образуется при затвердевании жидкого расплава при  $1147^{\circ}\text{C}$ . Ледебурит имеет твердость НВ 600-700 и большую хрупкость

- Сплавы с содержанием углерода до 2,14% называют **сталью**, а от 2,14 до 6,67% - **чугуном**.

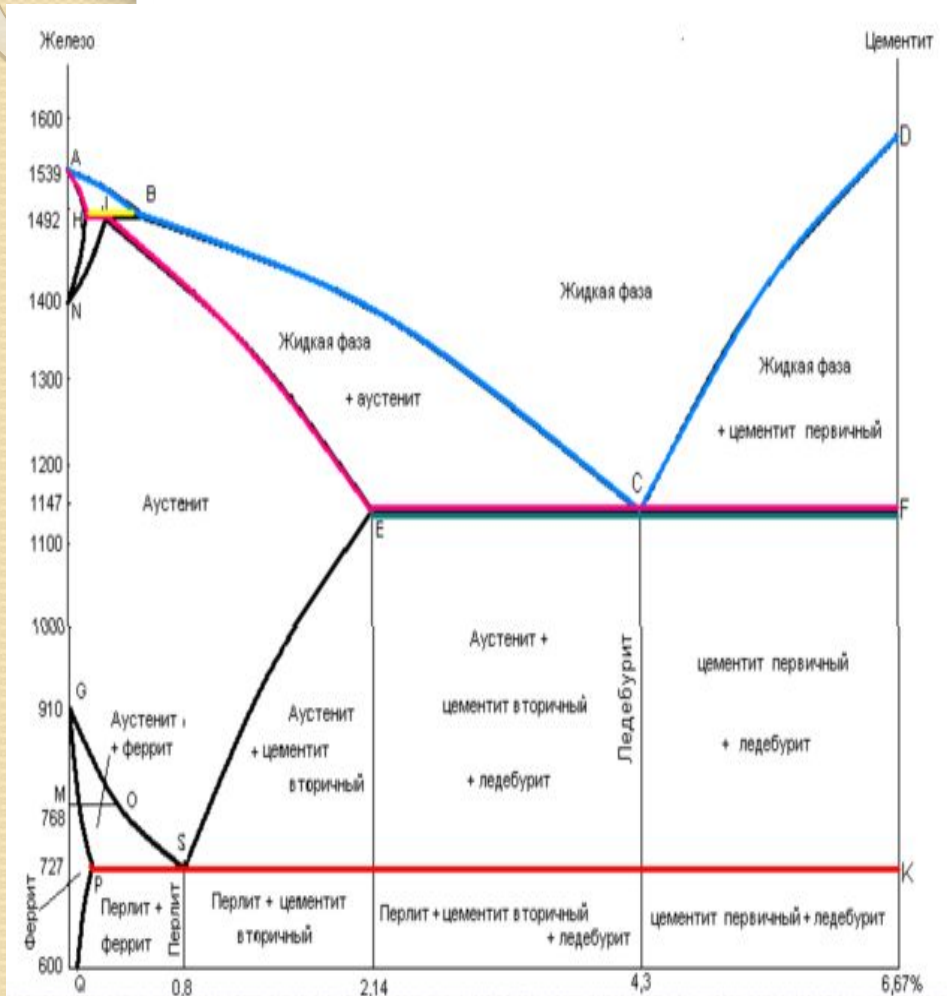
- В результате первичной кристаллизации во всех сплавах с содержанием углерода до 2,14%, т. е. в сталях, образуется однофазная структура - **аустенит**. В сплавах с содержанием углерода более 2,14%, т. е. в чугунах, при первичной кристаллизации образуется эвтектика **ледебурита**.

# Железоуглеродистые сплавы

В зависимости от содержания углерода железоуглеродистые сплавы делят на две группы:

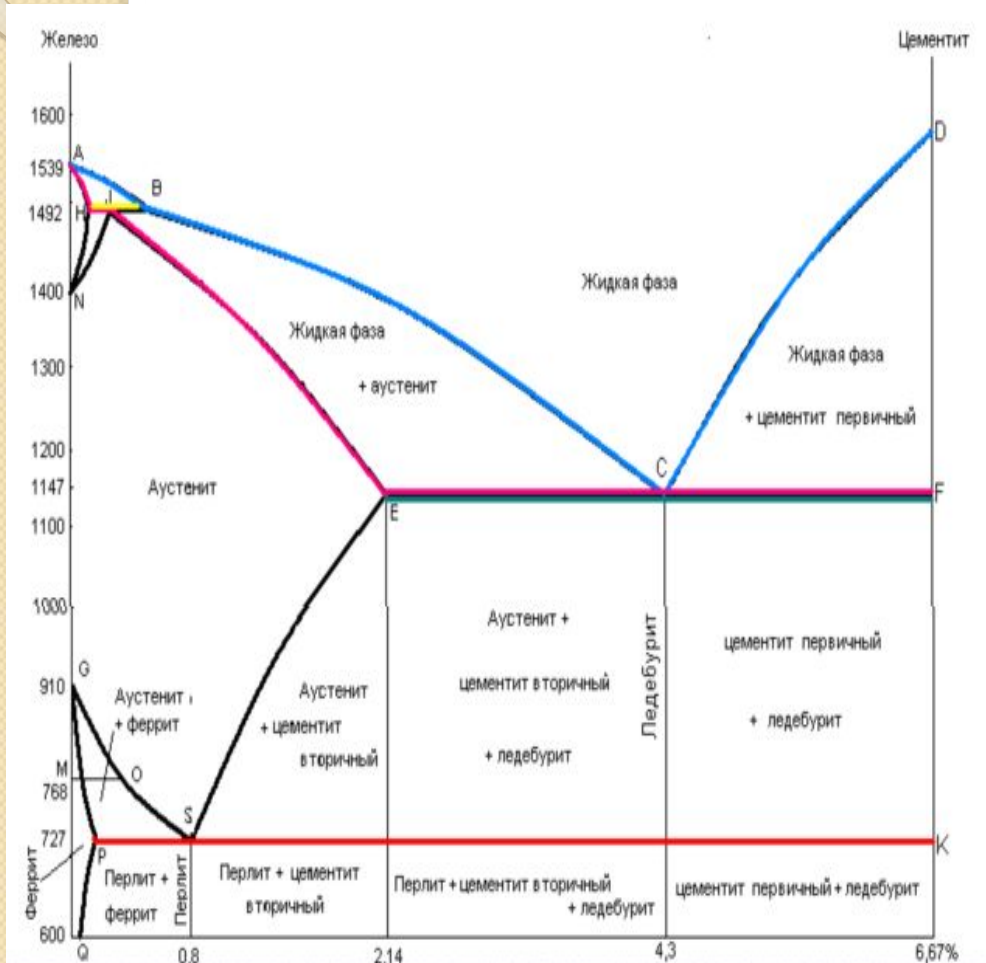
1. Стали: а) доэвтектоидные ( $0,8\% > C > 0,02\%$ );  
б) эвтектоидные ( $C \approx 0,8\%$ );  
в) заэвтектоидные ( $2,14\% > C > 0,8\%$ );
  
2. Чугуны: а) доэвтектические ( $4,3\% > C > 2,14\%$ );  
б) эвтектические ( $C \approx 2,14\%$ );  
в) заэвтектические ( $6,67\% > C > 4,3\%$ ).

# Характеристика линий диаграммы Fe–Fe<sub>3</sub>C



- **ACD** – линия ликвидус. Выше этой линии все сплавы находятся в жидком состоянии.
- **AECF** – линия солидус. Ниже этой линии все сплавы находятся в твердом состоянии.
- **AC** – из жидкого раствора выпадают кристаллы аустенита.
- **CD** – линия выделения первичного цементита.

# Характеристика линий диаграммы Fe–Fe<sub>3</sub>C



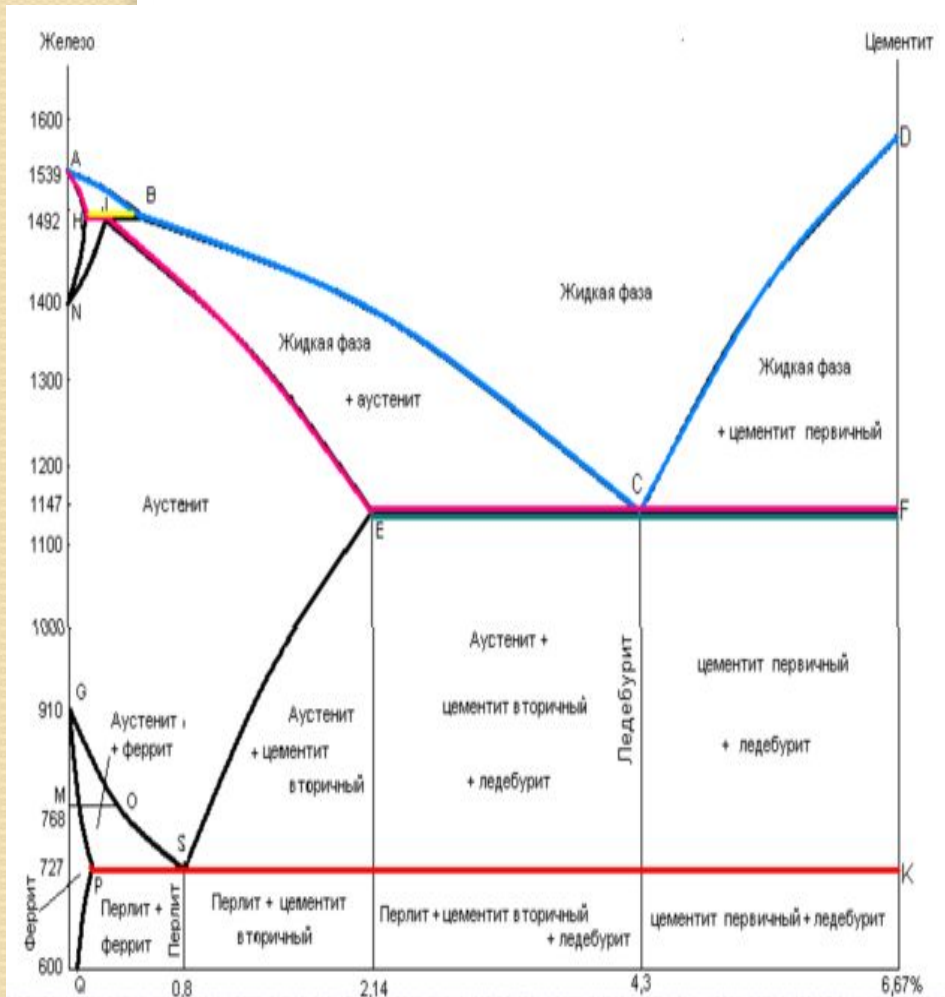
**AE** – заканчивается кристаллизация аустенита.

**ECF** – линия эвтектического превращения.

**PSK** – линия эвтектоидного превращения.



# Характеристика линий диаграммы Fe–Fe<sub>3</sub>C



GS – определяет температуру начала выделения феррита из аустенита (910-727 °C). GP – определяет температуру окончания выделения феррита из аустенита. ES – линия выделения вторичного цементита. PQ – линия выделения третичного цементита.

# Характеристика точек диаграммы Fe–Fe<sub>3</sub>C

**A** – точка плавления – кристаллизации чистого железа.  
Температура 1539 °С,

**C** – эвтектическая точка, температура 1147 °С, концентрация углерода – 4,3 % (содержание углерода в жидком растворе, находящемся в равновесии с аустенитом и цементитом при эвтектическом превращении).

**D** – точка, соответствующая температуре плавления цементита, ее положение на диаграмме не определено, так как цементит – термодинамически неустойчивая фаза и при плавлении разлагается на железо и графит.

# Характеристика точек диаграммы Fe–Fe<sub>3</sub>C

**E** – точка, отвечающая предельному содержанию углерода в аустените,

Является границей между сталями и чугунами

**G** – точка полиморфного превращения в чистом железе  $\alpha \leftrightarrow \gamma$  (911 °C),

соответствует для чистого железа критической точке  $A_3$ .

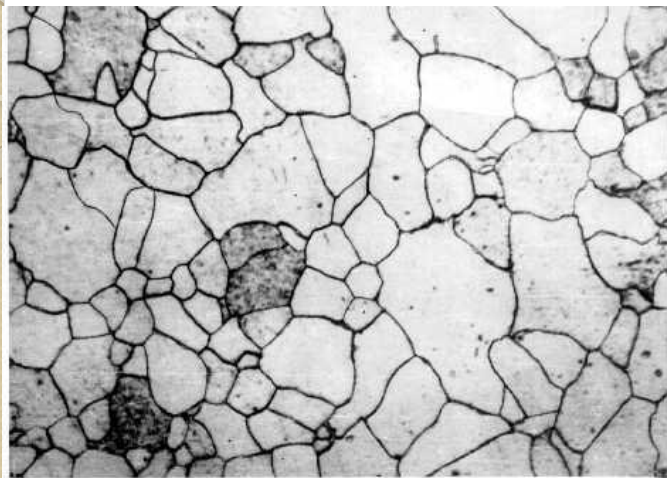
**P** – точка предельного содержания углерода в феррите, находящемся

в равновесии с цементитом и аустенитом при эвтектической температуре (727 °C), содержание углерода – 0,02 %.

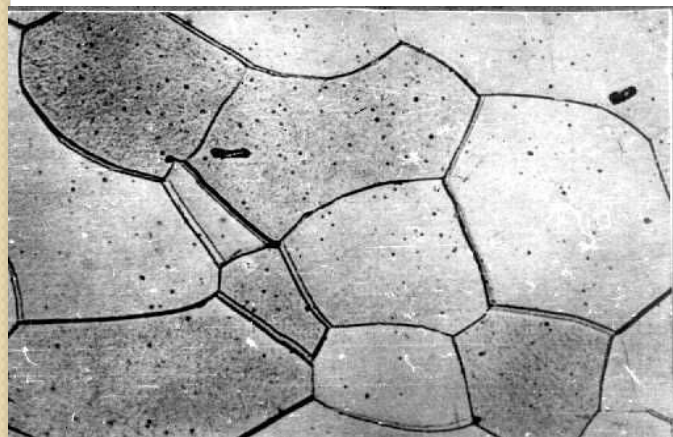
Эта точка определяет техническое железо в сталях.

**S** – эвтектоидная точка, температура 727 °C, концентрация углерода – 0,8 % (содержание углерода в твердом растворе, находящемся в равновесии с ферритом и цементитом при эвтектоидном превращении).

# Структура технического железа



100



300

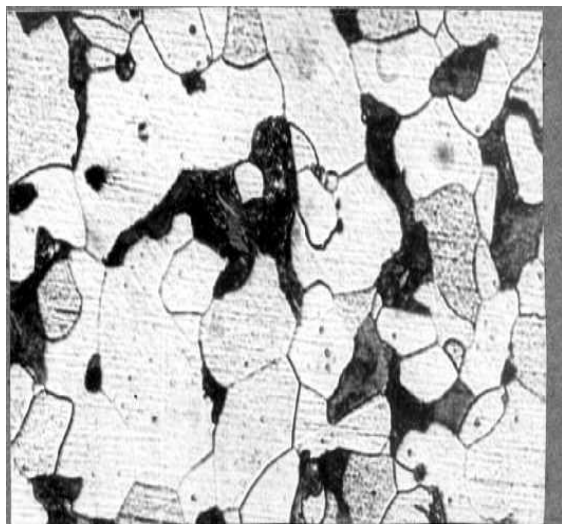
- Светлые полиэдры твердого раствора феррита (Ф) и выделения избыточного цементита (Ц) по границам зерен.
- Структурные составляющие:
- феррит и цементит третичный (Ф+Ц<sub>III</sub>).
- Фазы:
- феррит ( $\alpha$ -фаза) и цементит (карбид железа  $Fe_3C$ )

Твердость по Бринеллю 80-100  
НВ

## Доэвтектоидная сталь

- Увеличение содержания углерода сверх 0,025% вызывает образование перлита – двухфазной структуры, формирующейся при эвтектоидном превращении. Перлит состоит из двух фаз: феррита и цементита и имеет суммарное содержание углерода 0,8%.. Количество перлита в доэвтектоидных сталях возрастает с увеличением содержания углерода.

# Структура низкоуглеродистой доэвтектоидной стали (0,2% углерода)

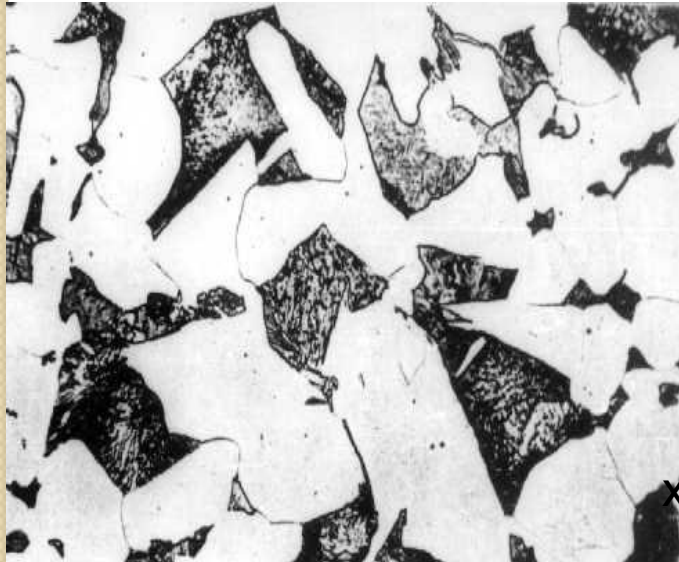


х 300

Твердость по Бринеллю  
110-120 НВ

- Светлые (белые) участки твердого раствора феррита (Ф) и темные – перлита (П) пластинчатого строения.
- Структурные составляющие:
- феррит и перлит (Ф+П).
- Фазы:
- феррит ( $\alpha$ -фаза) и цементит (карбид железа  $Fe_3C$ )

# Структура среднеуглеродистой доэвтектоидной стали марки 45 (0,45% углерода)

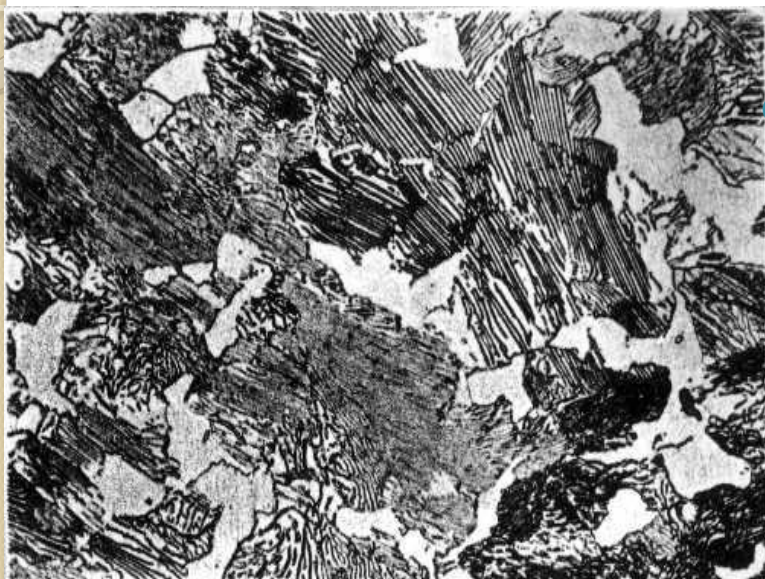


x 300

Твердость по Бринеллю  
140-160 НВ

- С ростом содержания углерода увеличивается количество темной перлитной структурной составляющей.
- Структурные составляющие:
- феррит и перлит (Ф+П).
- Фазы:
- феррит ( $\alpha$ -фаза) и цементит (карбид железа  $\text{Fe}_3\text{C}$ )

# Структура доэвтектоидной стали с 0,6% углерода



x300

Твердость по Бринеллю  
160-170 НВ

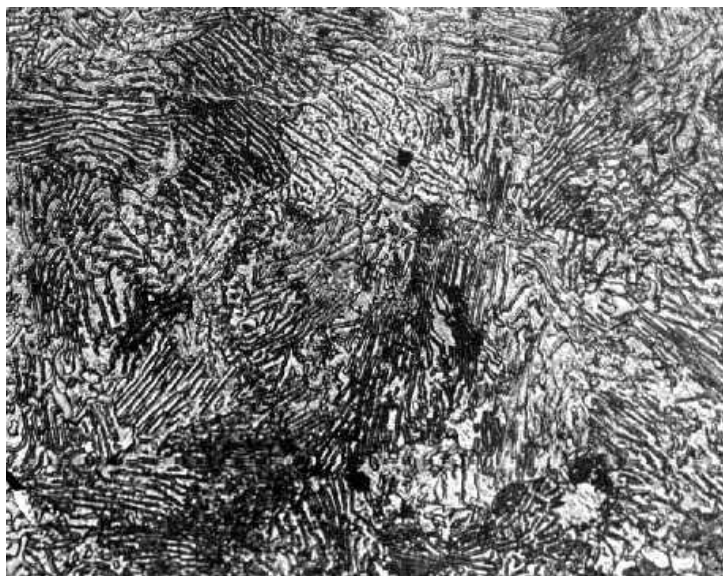
- Основная структурная составляющая – перлит с небольшими участками феррита. С ростом доли перлитной составляющей возрастает и общая твердость стали.
- Структурные составляющие:
- феррит и перлит (Ф+П).
- Фазы:
- феррит ( $\alpha$ -фаза) и цементит (карбид железа  $Fe_3C$ )



## Эвтектоидная сталь

● В стали, содержащей 0,8% углерода, получается чисто перлитная структура, поскольку этот состав является, согласно диаграмме равновесия, эвтектоидным.

# Структура эвтектоидной стали марки У8



X 300

Твердость по Бринеллю  
180-200 НВ

- Структура пластинчатого перлита (П). Тонкие пластины цементита (Ц) на светлом поле твердого раствора феррита (Ф).
- Структурные составляющие:
- перлит (П)
- Фазы:
- феррит ( $\alpha$ -фаза) и цементит (карбид железа  $Fe_3C$ ).

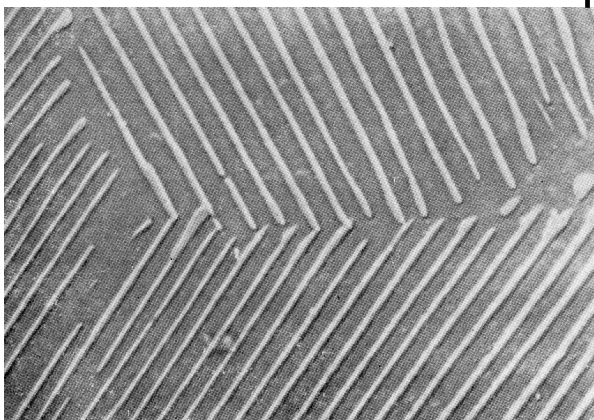
# Структура пластинчатого перлита при различном увеличении

а)



X  
1000

б)



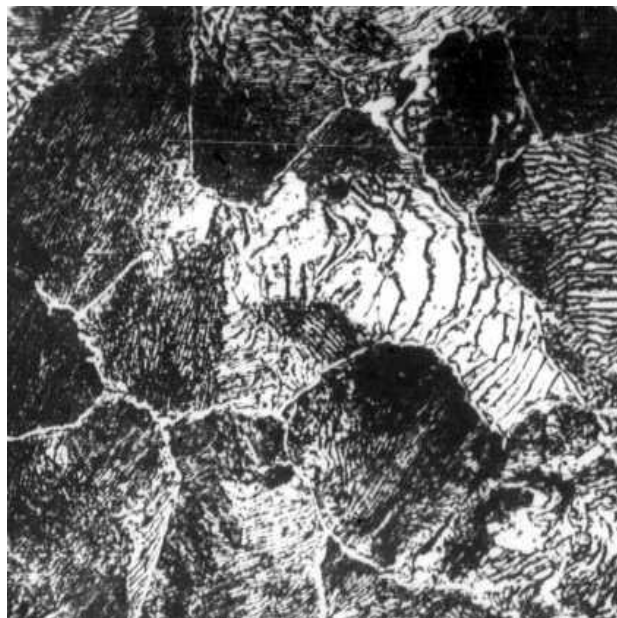
X  
5000

Хорошо видны  
чередующиеся пластинки  
феррита и цементита (а) и  
(б), а также место стыка  
бывших аустенитных зерен  
(б).

# Заэвтектоидная сталь

Заэвтектоидная сталь характеризуется избыточным содержанием цементита, который может выделяться по границам зерен перлита. **Цементитная** сетка является значительным дефектом заэвтектоидной стали, приводящим к снижению ее прочности и вязкости.

# Структура заэвтектоидной стали марки У12 (1,2% углерода)

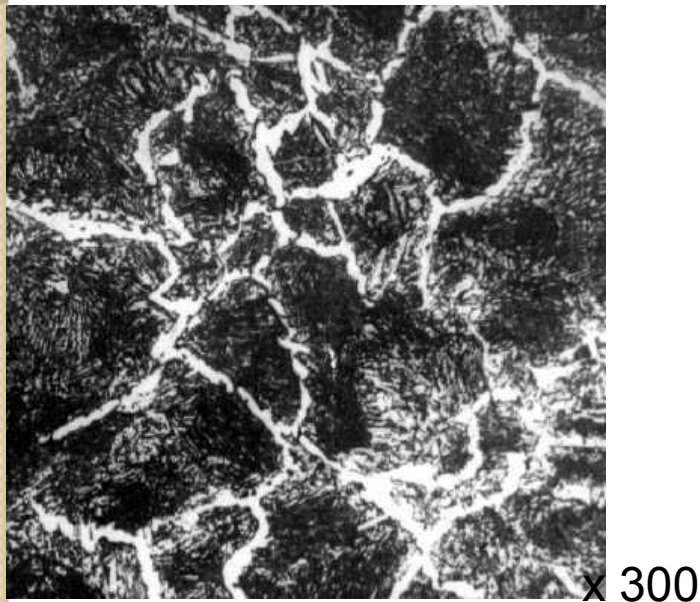


х 300

- Структура состоит из пластинчатого перлита (П), окруженного светлой сеткой избыточного цементита (Ц), выделившегося по границам бывшего аустенитного зерна.
- Структурные составляющие:
- перлит и цементит вторичный (П+Ц<sub>II</sub>).
- Фазы: феррит ( $\alpha$ -фаза) и цементит (карбид железа  $Fe_3C$ ).

Твердость по Бринеллю  
200-220 НВ

# Структура заэвтектоидной стали с 1,3% углерода



Твердость по Бринеллю  
200-220 НВ

- Структура отличается от предыдущей большей толщиной цементитной сетки.
- Структурные и фазовые составляющие те же, что и выше.

# Белый чугун

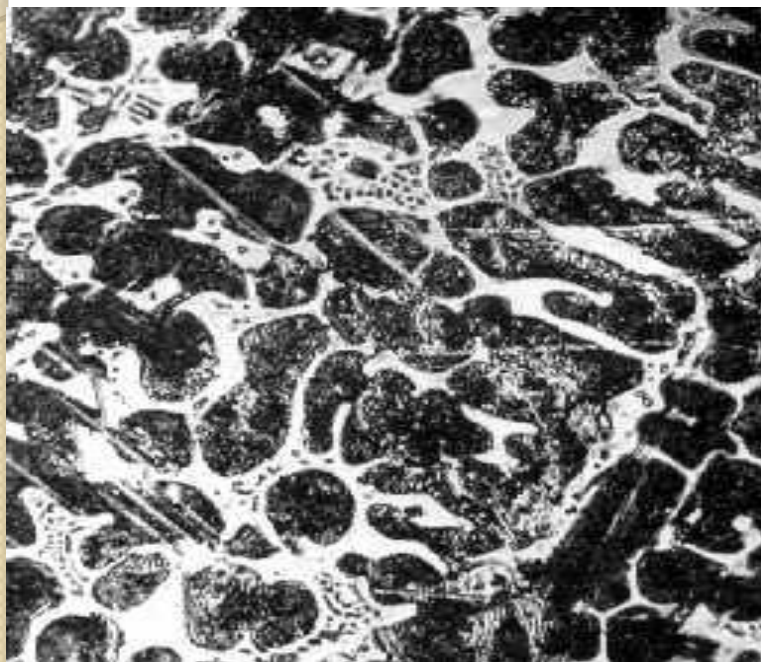
- Белые чугуны характеризуются тем, что весь углерод в них находится в связанном состоянии в форме карбида железа - цементита ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ). По химическому составу и структуре чугуны делят на доэвтектические, эвтектические и заэвтектические.

## Доэвтектический белый чугун

В структуре доэвтектического белого чугуна наряду с **аустенитом**, образованным при первичной кристаллизации, и вторичным цементитом присутствует хрупкая эвтектика – **ледебурит**, количество которой возрастает с увеличением содержания углерода.



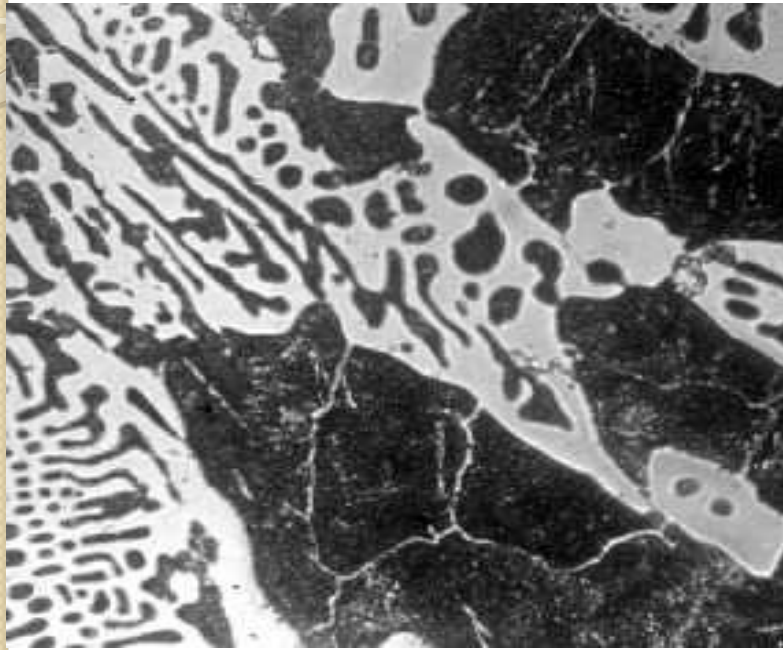
# Структура низкоуглеродистого доэвтектического белого чугуна с 3,3% углерода



- Темные участки распавшегося (на перлит) избыточного твердого раствора аустенита ( $A$ ) и пестрая эвтектика – распавшийся ледебурит – между ними. Внутри распавшегося аустенита видны светлые выделения вторичного цементита ( $C_{II}$ ).
- Структурные составляющие:  
аустенит распавшийся (перлит), ледебурит распавшийся и цементит вторичный ( $A_p + L_p + C_{II}$ ).
- Фазы: Феррит ( $\alpha$ -фаза) и цементит (карбид железа  $Fe_3C$ ). При температуре выше  $A_1$  фазы: аустенит ( $\gamma$ -фаза) и цементит.

х 300

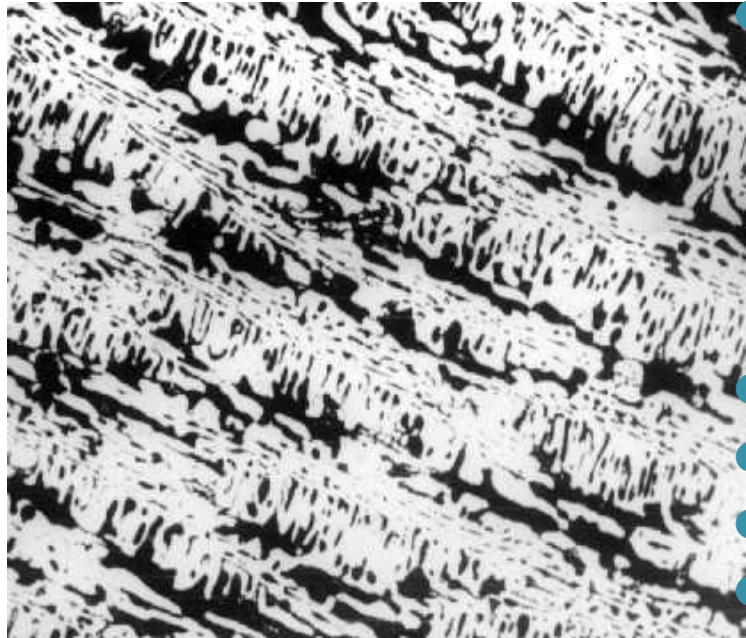
# Структура доэвтектического белого чугуна с 4,0% углерода



х 600

- Большое увеличение позволяет увидеть внутри распавшегося аустенита светлые выделения вторичного цементита ( $C_{II}$ ) в виде сетки по границам зерен.
- Структурные составляющие: аустенит распавшийся (перлит), ледебурит распавшийся и цементит вторичный ( $A_p + L_p + C_{II}$ ).
- Фазы: феррит ( $\alpha$ -фаза) и цементит (карбид железа  $Fe_3C$ ). При температуре выше  $A_1$  фазы – аустенит ( $\gamma$ -фаза) и цементит.

# Эвтектический чугун (4,3% углерода)



x 300

● Структура состоит из эвтектики (распавшегося ледебурита –  $L_p$ ), представляющей собой равномерно распределенные темные участки распавшегося твердого раствора аустенита (А) и светлые участки цементита (Ц).

● Структурные составляющие:

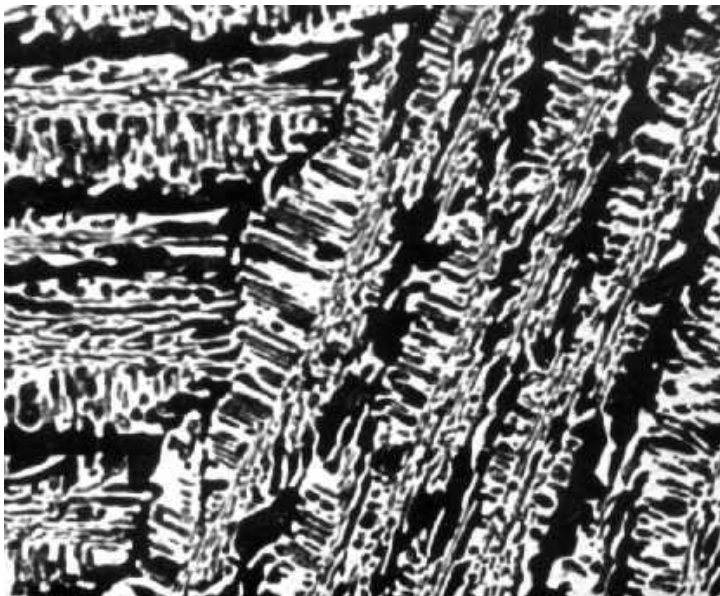
● эвтектика ( $L_p$ ).

● Фазы:

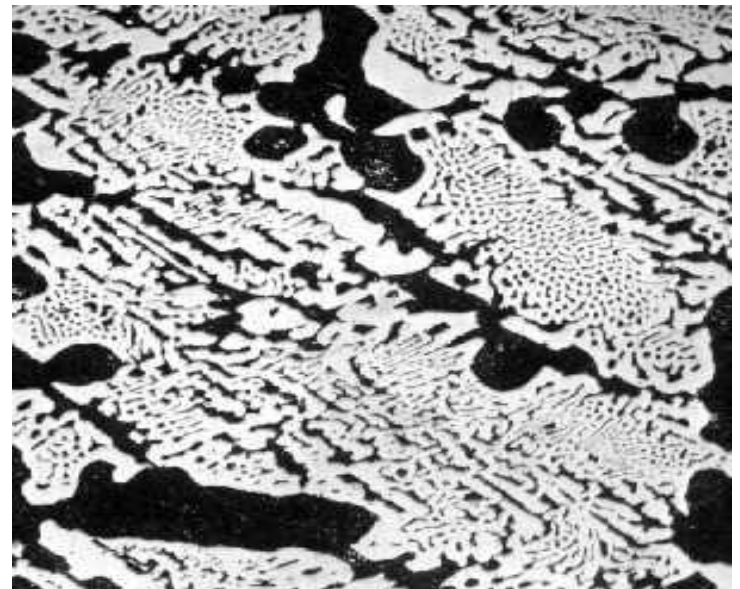
● феррит ( $\alpha$ -фаза) и цементит (карбид железа  $Fe_3C$ ). При температуре выше  $A_1$  - аустенит и цементит

Твердость по Бринеллю  
500-520 НВ

# Структура эвтектического чугуна (примеры строения ледебурита)



х 300

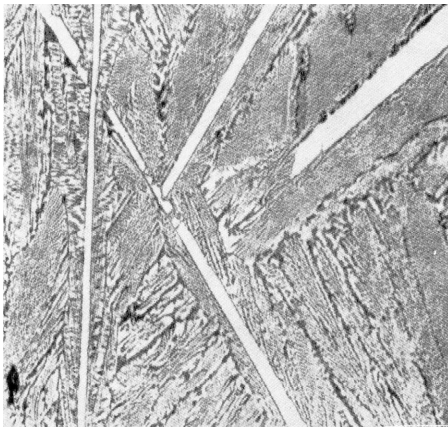


х 300

# Заэвтектический чугун

- Структура заэвтектического чугуна состоит из эвтектики (ледебурит) и первичного цементита, выделяющегося при кристаллизации из жидкости в виде крупных пластин.

# Заэвтектический чугун (5% углерода)



х 100

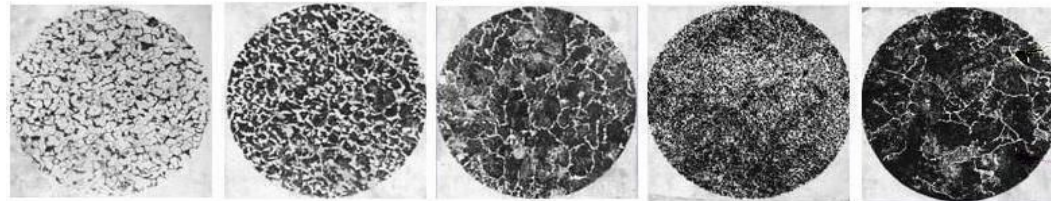
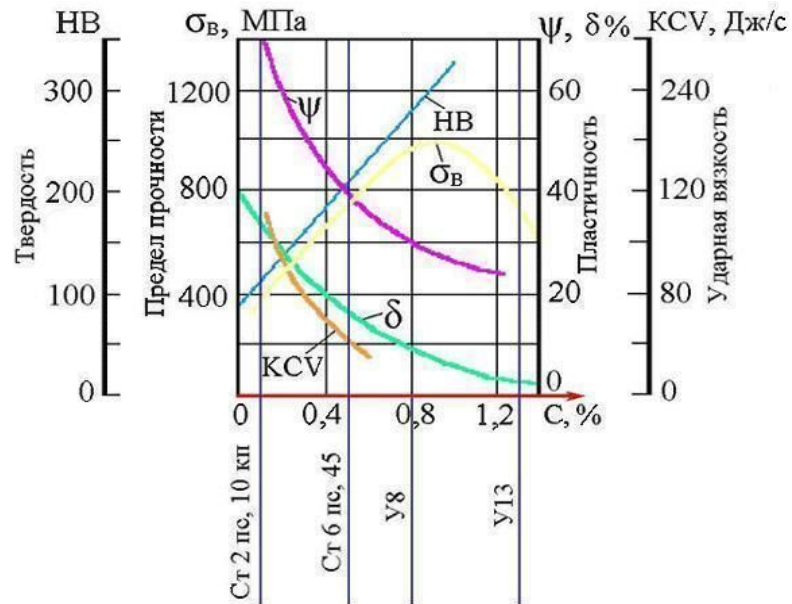


х 700


- Белые пластинки избыточного первичного цементита (C<sub>1</sub>) и пестрая эвтектика (ледебурит распавшийся – L<sub>p</sub>) между ними.
- Структурные составляющие:
- эвтектика (ледебурит распавшийся) и цементит первичный (L<sub>p</sub> + C<sub>1</sub>).
- Фазы: феррит (α-фаза) и цементит (карбид железа Fe<sub>3</sub>C).

Твердость по Бринеллю  
630-650 НВ

# Изменение микроструктуры и свойств сталей с увеличением количества углерода



Изменение структуры при увеличении содержания углерода, а следовательно количества перлита и цементита в стали

- 
- **Практическое  
применение  
диаграммы**



# Обрабатываемость резанием.

- С увеличением прочности и твердости, то есть с повышением содержания углерода в стали, обрабатываемость ухудшается. Однако и стали с очень малым содержанием углерода, со структурой почти чистого феррита обрабатываются плохо, давая низкую чистоту поверхности.

# Штампуемость.

- Штампуемость ухудшается по мере повышения прочностных свойств стали, особенно предела текучести.

# Свариваемость.

- Чем шире температурный интервал кристаллизации, тем легче образуются горячие трещины. Интервал кристаллизации возрастает с увеличением содержания углерода. Поэтому с повышением содержания углерода свариваемость ухудшается.

# Литейные свойства стали.

- Литейные свойства стали ухудшаются при увеличении содержания углерода. Поэтому для литья используют обычно стали с содержанием углеродов до 0,4% С.

# Закрепление изученного материала

- **Вопрос 1**
- Укажите линию ликвидус
- 1) PSK
- 2) ACD
- 3) ECF
- 4) SE

# Закрепление изученного материала

- **Вопрос 2**
- Укажите линию солидус
- 1) ACD
- 2) AECSF
- 3) PSK
- 4) ECF

# Закрепление изученного материала

- **Вопрос 3**
- Укажите содержание углерода в цементите
- 1) 6,67 %
- 2) 4,3 %
- 3) 2,14%
- 4) 0,8%

# Закрепление изученного материала

- **Вопрос 4**
- Укажите содержание углерода в эвтектоиде
- 1) 6,67 %
- 2) 4,3 %
- 3) 2,14%
- 4) 0,8%



# Закрепление изученного материала

- **Вопрос 5**
- Укажите содержание углерода в эвтектике
- 1) 6,67 %
- 2) 4,3 %
- 3) 2,14%
- 4) 0,8%
-

# Закрепление изученного материала

- **Вопрос 6**
- Как называется структура, представляющая собой твердый раствор углерода
- в  $\alpha$ - железе?
- 1) перлит
- 2) цементит
- 3) феррит
- 4) аустенит

# Закрепление изученного материала

- **Вопрос 7**
- Как называется структура, представляющая собой твердый раствор углерода
  - в  $\gamma$ - железе?
  - 1) феррит
  - 2) цементит
  - 3) аустенит
  - 4) ледебурит
  -

# Закрепление изученного материала

- **Вопрос 8**
- Как называется структура представляющая собой карбид железа  $\text{Fe}_3\text{C}$ ?
- 1) феррит
- 2) аустенит
- 3) ледебурит
- 4) цементит

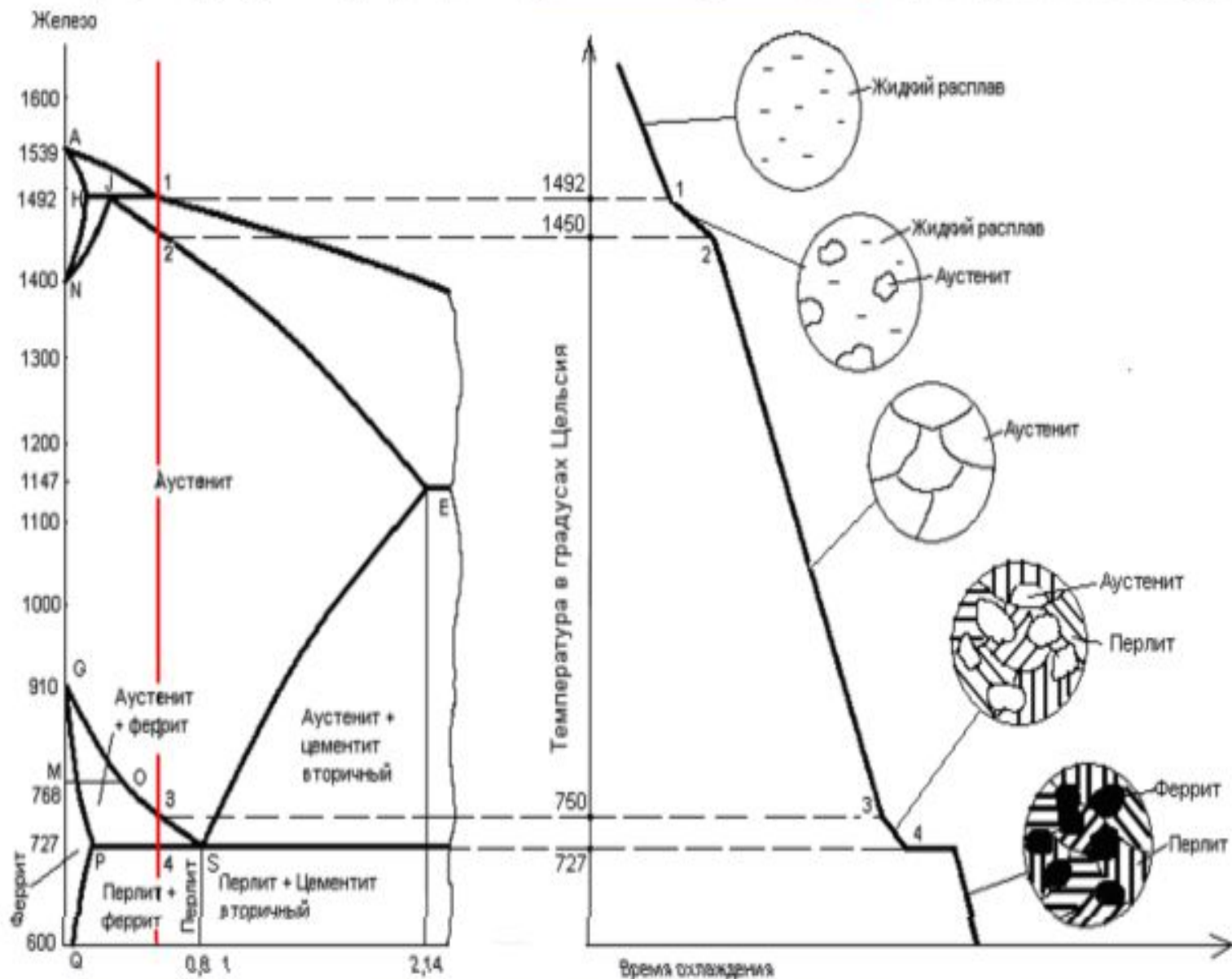
# Закрепление изученного материала

- Вопрос 9
- Как называется структура, представляющая собой механическую смесь феррита и цементита?
- 1) перлит
- 2)  $\delta$ -феррит
- 3) аустенит
- 4) ледебурит

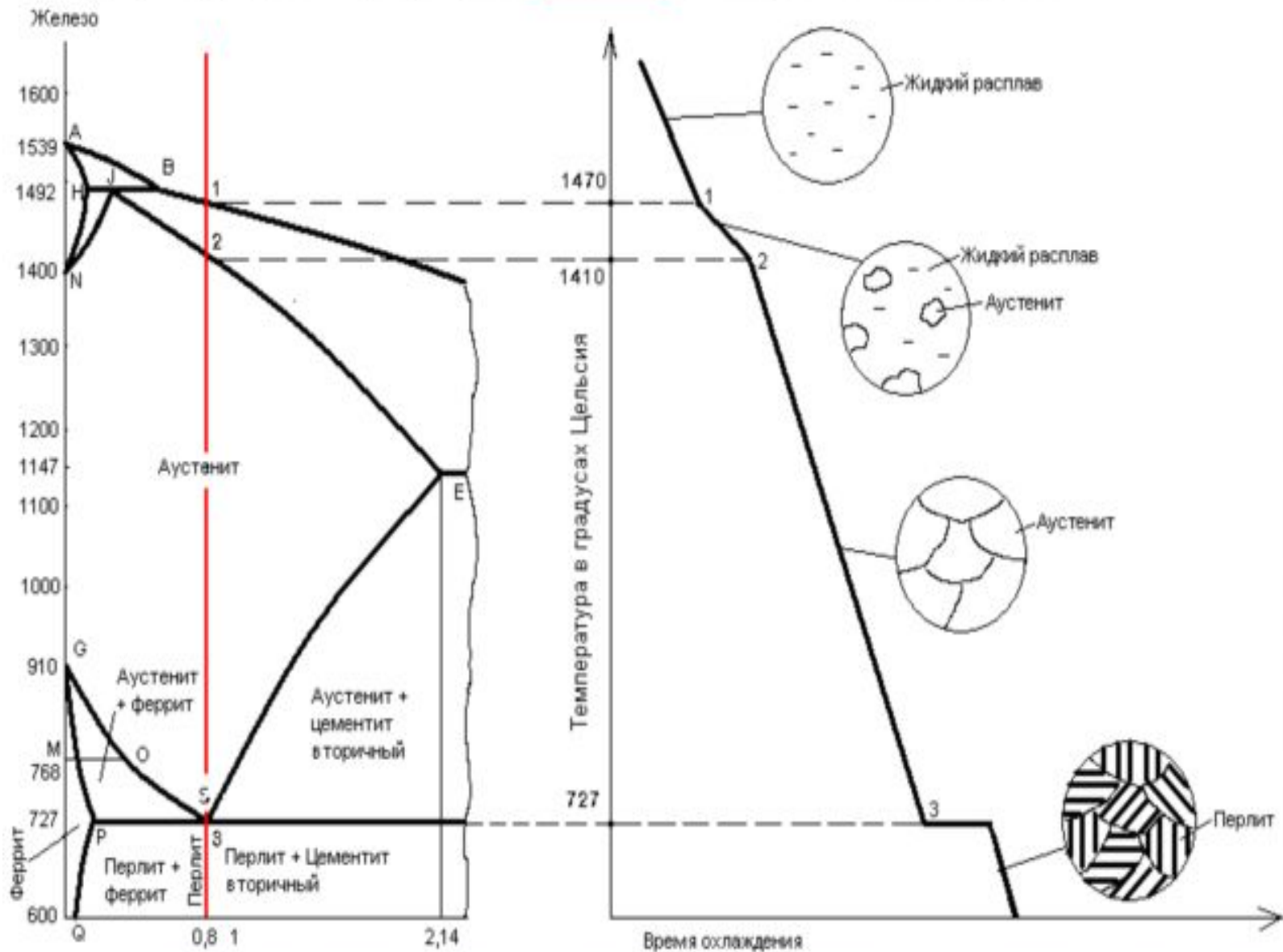
# Закрепление изученного материала

- Вопрос 10
- Как называется структура, представляющая собой механическую смесь аустенита и цементита?
- 1) перлит
- 2) феррит
- 3) ледебурит
- 4)  $\delta$ -феррит

61 Матрица структурных превращений доэвтектоидной стали при медленном охлаждении

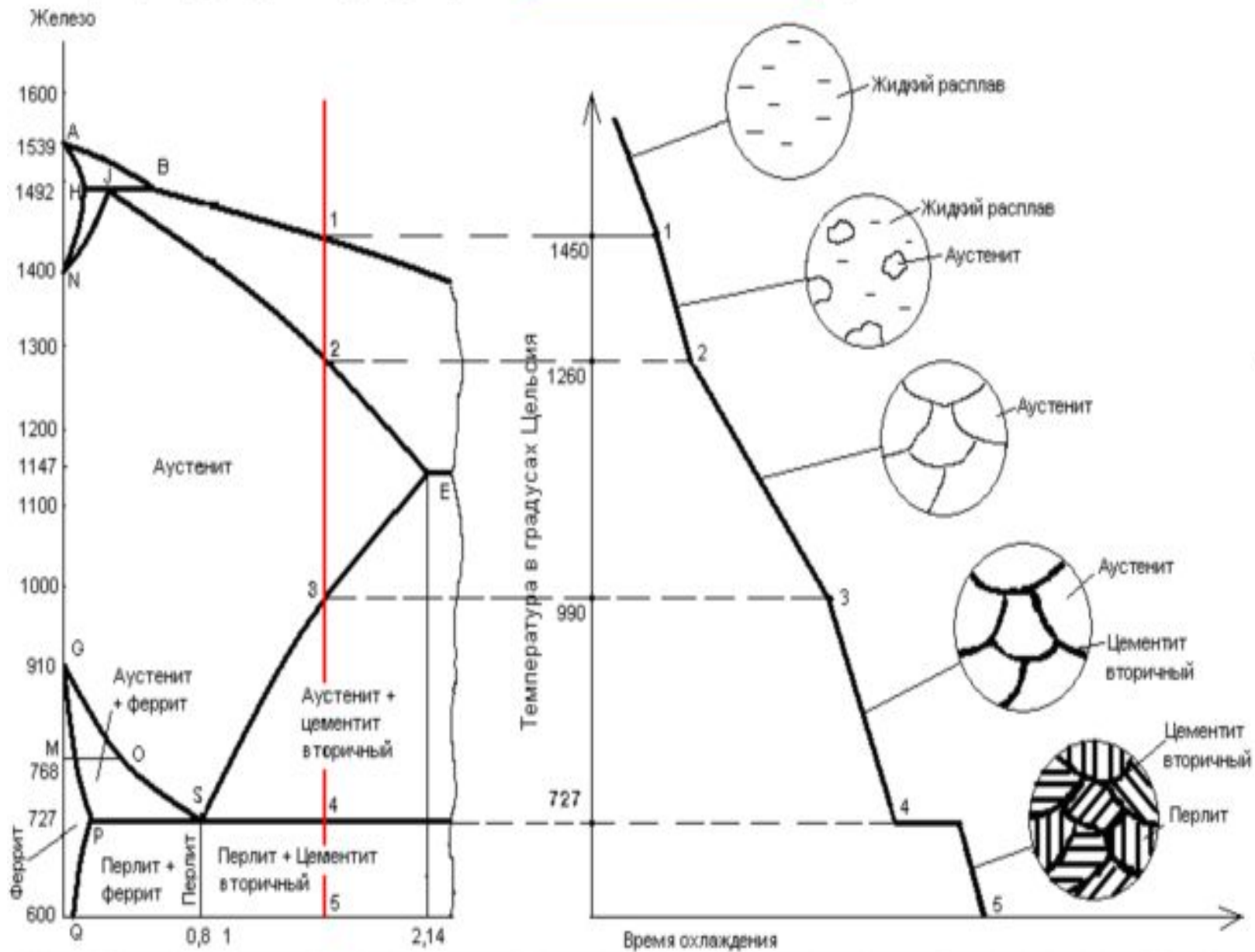


## 62 Матрица структурных превращений стали У8 при медленном охлаждении

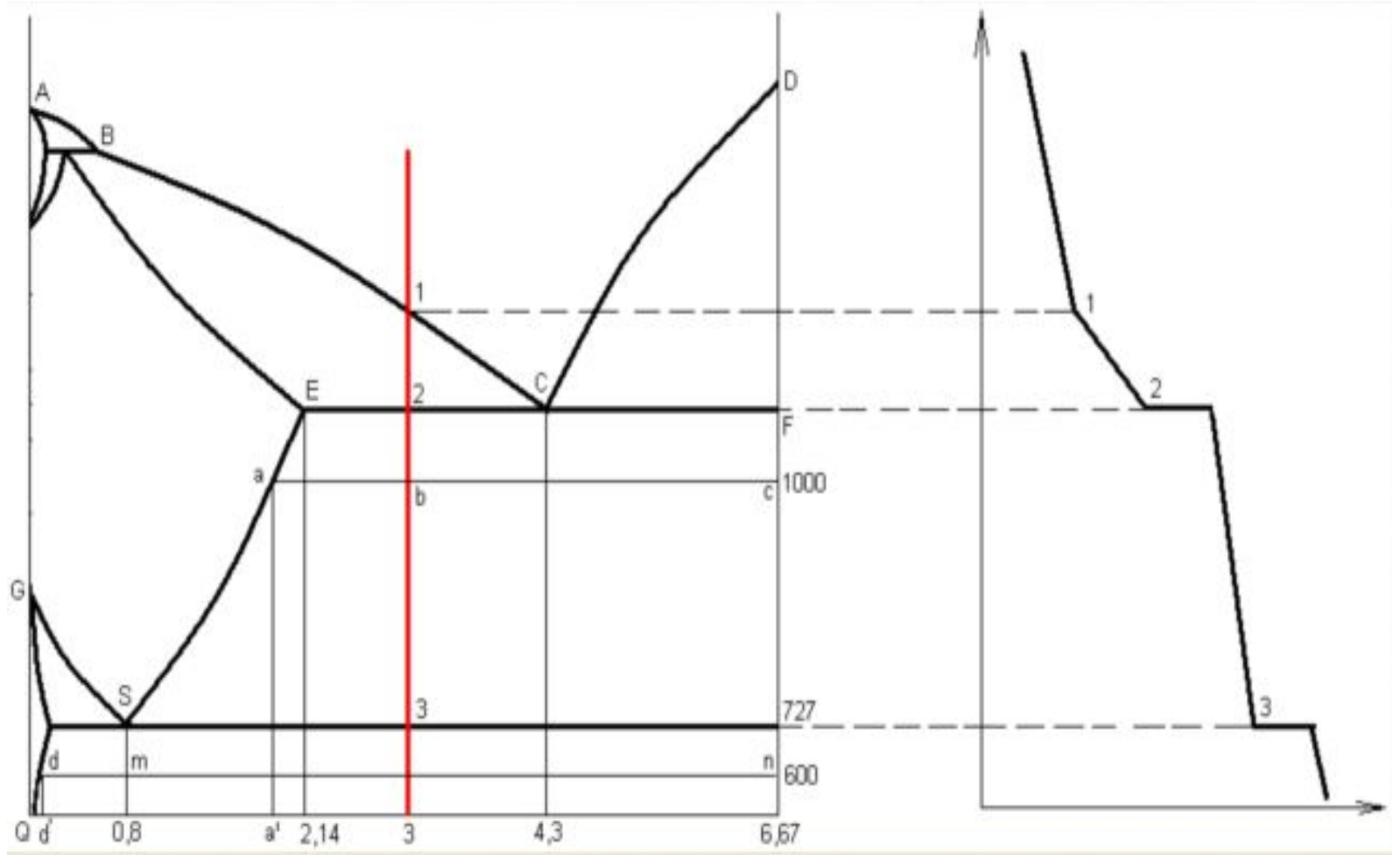




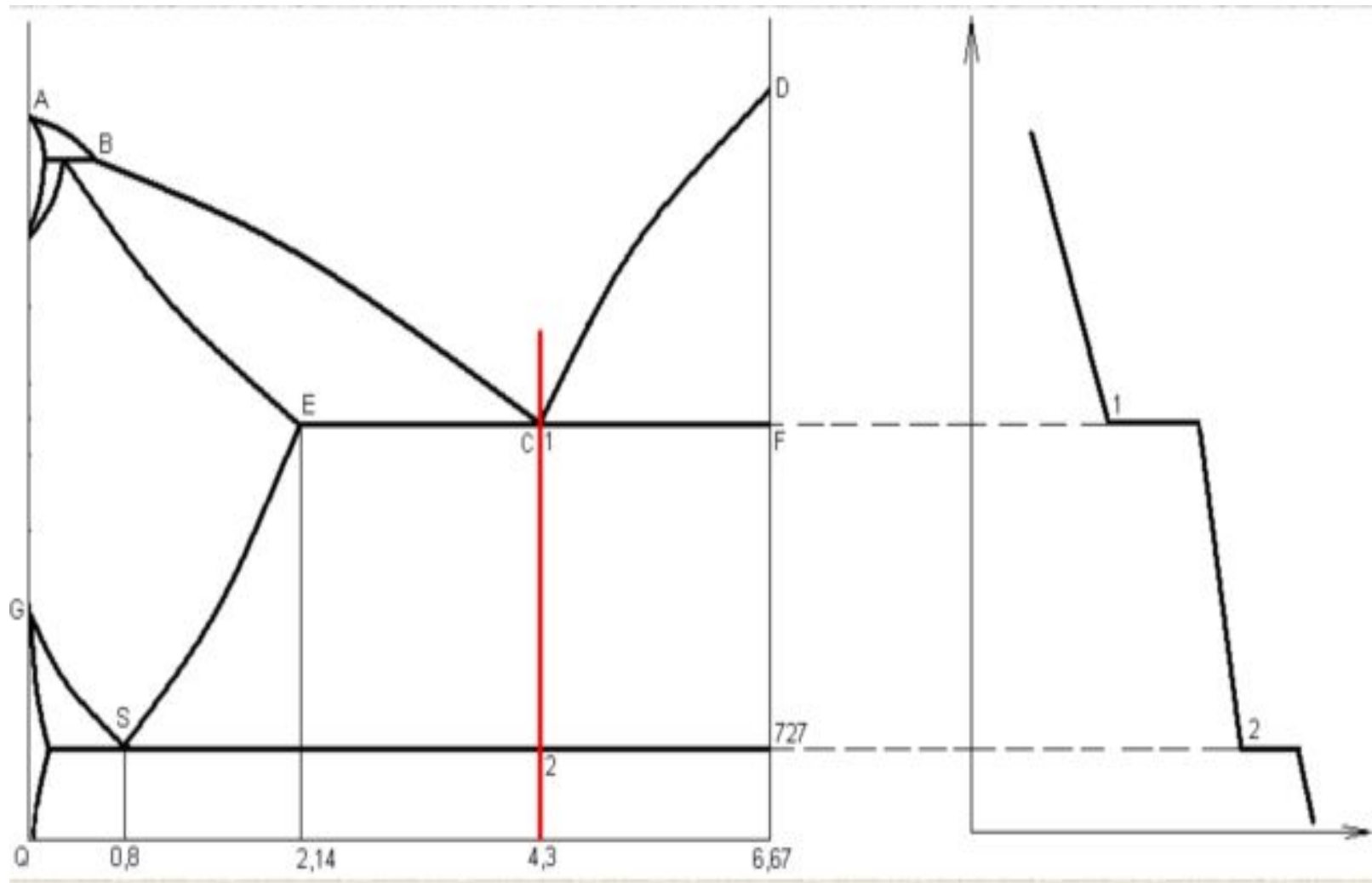
63 Матрица структурных превращений заэвтектоидной стали при медленном охлаждении



# Структурные превращения в доэвтектических чугунах



# Структурные превращения в эвтектических чугунах



# Структурные превращения в заэвтектических чугунах

