

Фазовая диаграмма «железо-углерод»

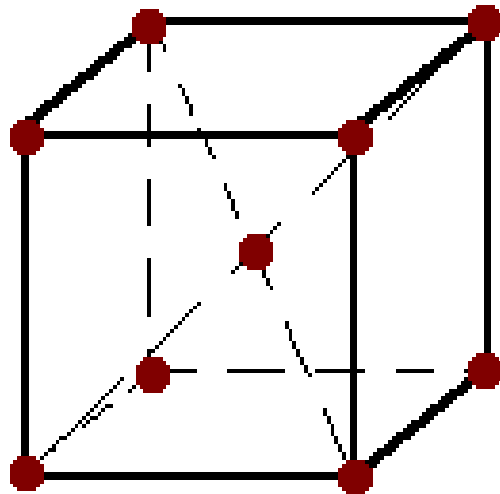
практическое занятие № 5

1. Компоненты и фазы

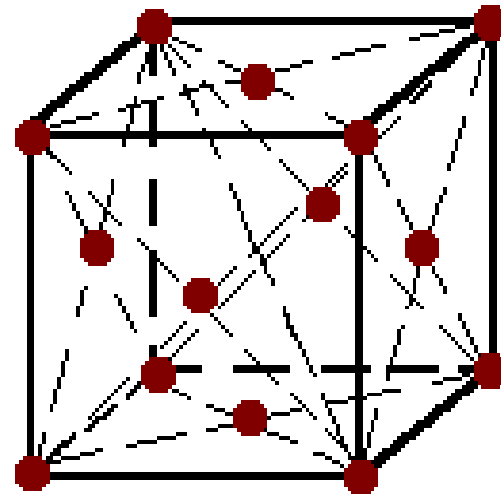
Железо – металл серебристо-белого цвета с температурой плавления 1539 °С. Атомный радиус железа - 0,127 нм.

Имеет две полиморфные модификации:

- **альфа-железо** (или Fe_{α}) с **ОЦК-решёткой**, которая существует при T до 911 °С и выше 1392 °С (**δ-железо (Fe_{δ})**), период решётки 0,286 нм;
- **гамма-железо** (или Fe_{γ}) с **ГЦК-решёткой**, которая существует при T от 911 °С до 1392 °С, период решётки – 0,365 нм.



а



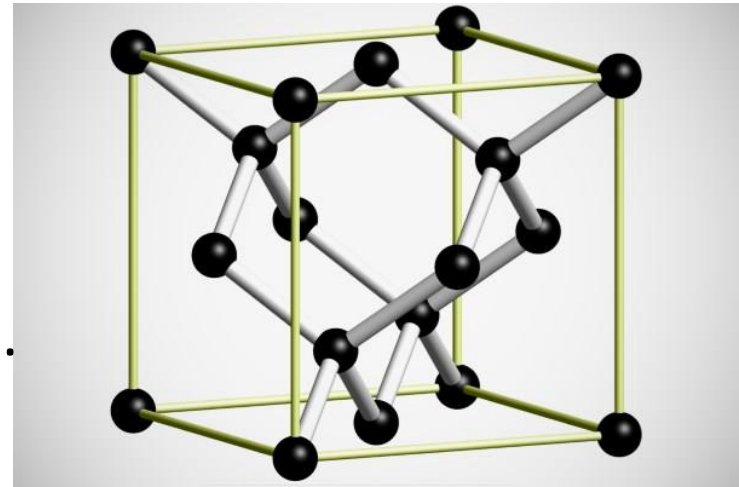
б

Рис. 1. Кристаллические решётки Fe_{α} (а) и Fe_{γ} (б).

При превращении $Fe_{\alpha} \rightarrow Fe_{\gamma}$ наблюдается уменьшение объёма, так как решётка Fe_{γ} имеет более плотную упаковку атомов, чем решётка Fe_{α} . При охлаждении во время превращения $Fe_{\gamma} \rightarrow Fe_{\alpha}$ наблюдается увеличение объёма. В интервале температур 1392-1539°C высокотемпературное Fe_{α} называют Fe_{δ} .

- **Углерод (C)** – неметалл, обычно существует в виде модификации графита, но может находиться и в виде метастабильной модификации алмаза.
- Графит - гексагональная кристаллическая решетка (плотность – $2,5 \text{ г/см}^3$).
- Алмаз – кубическая решётка с координационным числом 4 (температура плавления – 5000°C).

Рис. 2. Кубическая решётка алмаза.



- Атомный радиус углерода – $0,077 \text{ нм}$. При $T=3500^\circ\text{C}$ он, не плавясь, переходит в газовую фазу (возгоняется).

Между углеродом и железом возможны следующие виды взаимодействия:

- образование жидкого раствора;
- образование **твёрдых растворов внедрения** на основе Fe_{α} и Fe_{γ} ;
- образование химического соединения - **цементит** (Fe_3C).

Поэтому в системе Fe-C существуют следующие фазы:

- жидкий раствор;
- феррит (твёрдый раствор на основе Fe_{α});
- аустенит (твёрдый раствор на основе Fe_{γ});
- цементит (химическое соединение Fe_3C);
- графит.

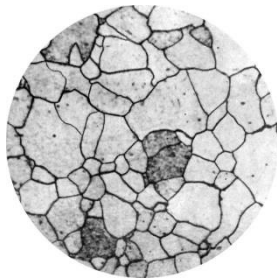
Феррит (Ф) – твёрдый раствор углерода в Fe_α (т.е. ОЦК-решётка) с предельной концентрацией - **0,02 масс.%**.

Атом углерода находится либо в центре грани куба, либо в дефектах кристаллической решётки (т.е. в вакансиях или на дислокациях).

Феррит - мягкий и пластичный:

- σ_B (предел прочности) - 250 МПа;
- $\delta=50\%$ (относительное удлинение $\delta=(l_k-l_0)/l_0*100\%$, где l_0 – длина образца до испытания, l_k – длина образца после растяжения и разрушения);
- имеет твёрдость 80 НВ (*твёрдость по Бринеллю*).

Ферритом также называют не только твёрдый раствор углерода в альфа-железе, но и любые твёрдые растворы на основе альфа-железа.



Феррит в оптическом микроскопе.

Аустенит (А) – твёрдый раствор углерода в гамма-железе с предельной концентрацией - **2,14 масс.%**.

Атом углерода находится в центре элементарной ячейки.

Аустенит пластичен, но прочнее феррита, его твёрдость составляет 160-200 НВ.

Аустенитом называют не только твёрдый раствор углерода в гамма-железе, но и любые твёрдые растворы на основе гамма-железа.

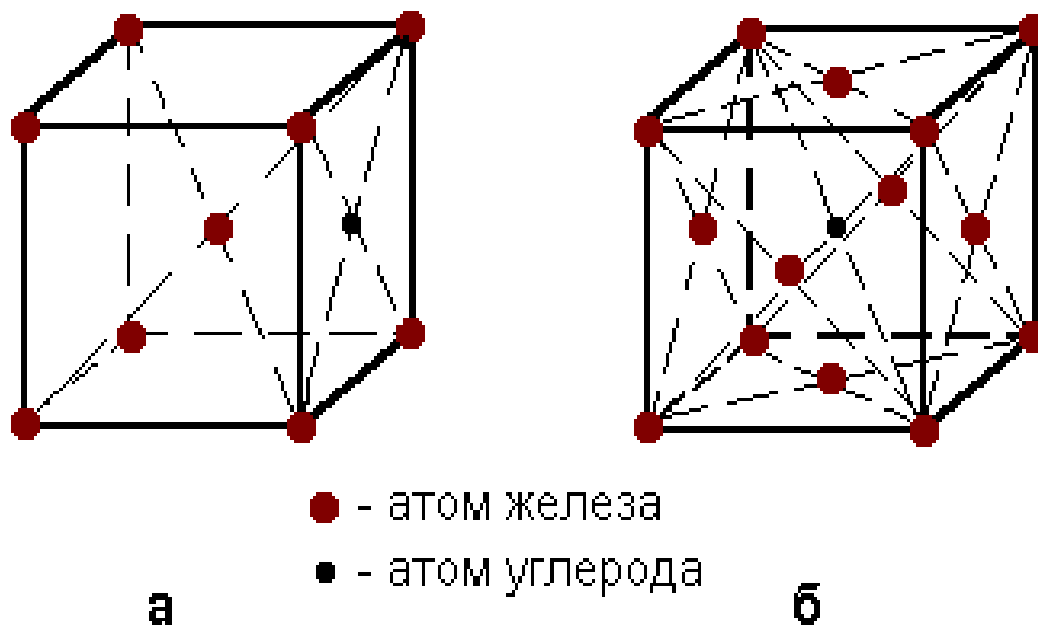


Рис. 3. Кристаллические решётки феррита (а) и аустенита (б).

Цементит (Ц) – химическое соединение железа с углеродом, карбид железа Fe_3C . Содержит **6,67-6,69 масс.%** углерода. Имеет орторомбическую решётку с плотной упаковкой атомов: ряды октаэдров, оси которых наклонены друг к другу.

Цементит является метастабильной фазой, при нагреве до 1200 °С распадается на железо и углерод. $T_{\text{плавления}}$ цементита **приблизительно** равна 1260 °С.

Твёрд и хрупок; его твёрдость составляет 800 НВ. Не способен пластически деформироваться (практически нулевая пластичность).

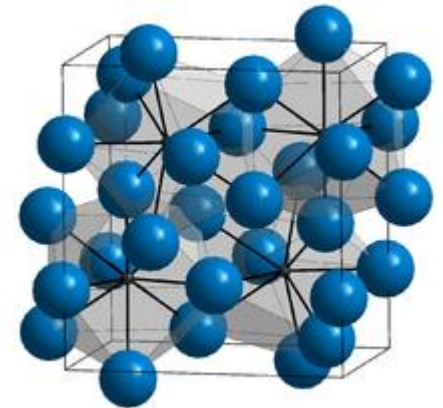


Рис. 4. Орторомбическая решётка цементита.

Графит (Г) имеет слоистую гексагональную решётку. Способность графита к расслаиванию связана с разрывом более слабых межслойных связей по плоскостям скольжения.

Мягкий, непрочный, химически стойкий, электропроводный.

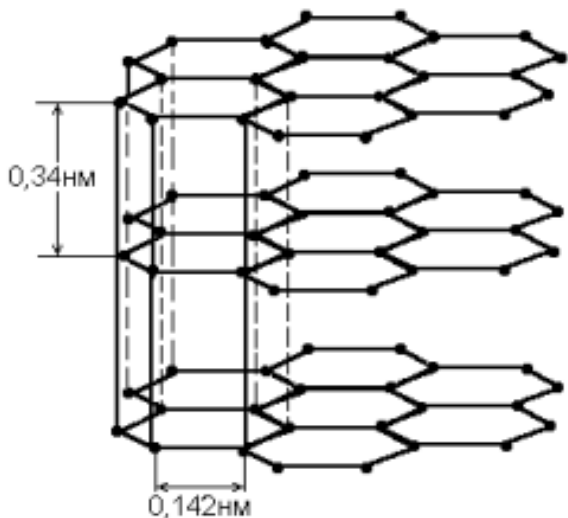


Рис. 5. Кристаллическая решётка графита.

Жидкая фаза (Ж). В жидком состоянии железо хорошо растворяет углерод в любых пропорциях с образованием однородной жидкой фазы.

2. Превращения в системе Fe-C

Диаграмма состояния «железо-углерод» - диаграмма с химическим соединением, т.к. железо с углеродом образуют химическое соединение при содержании углерода 6,69 масс.%.
 Сплавы железа с углеродом, содержащие более 6,69 масс.%C, не имеют практического применения.

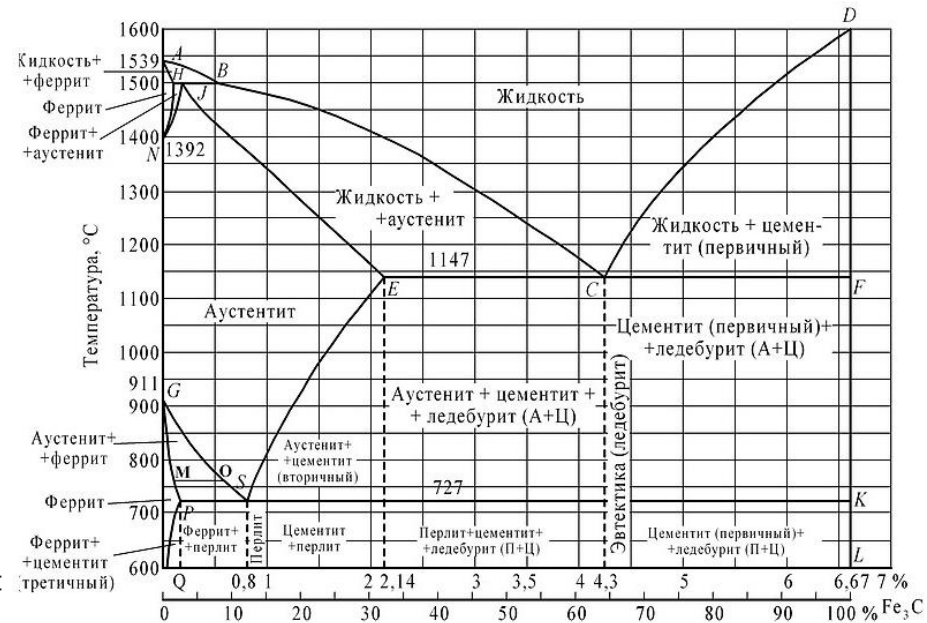
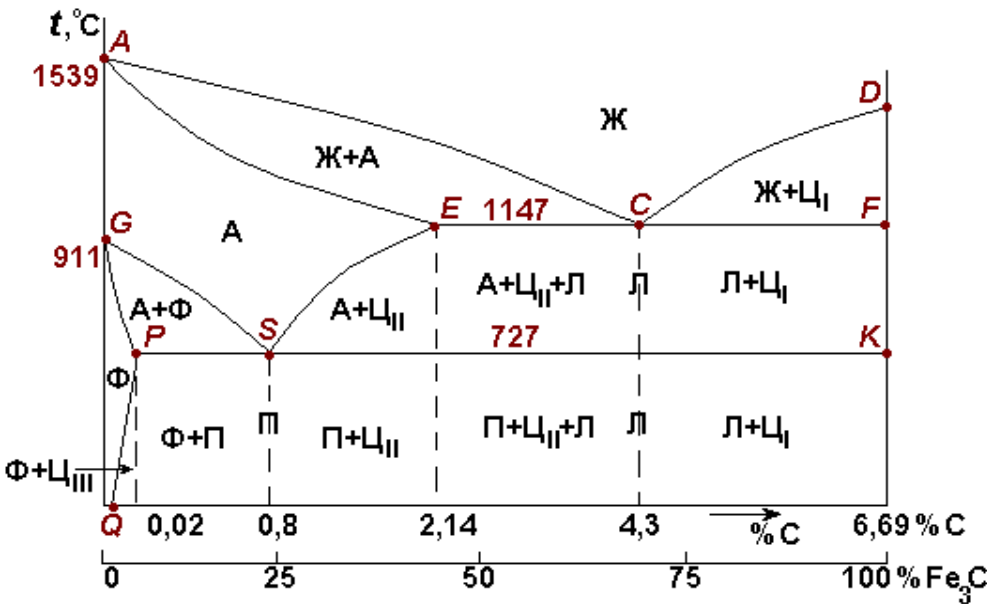
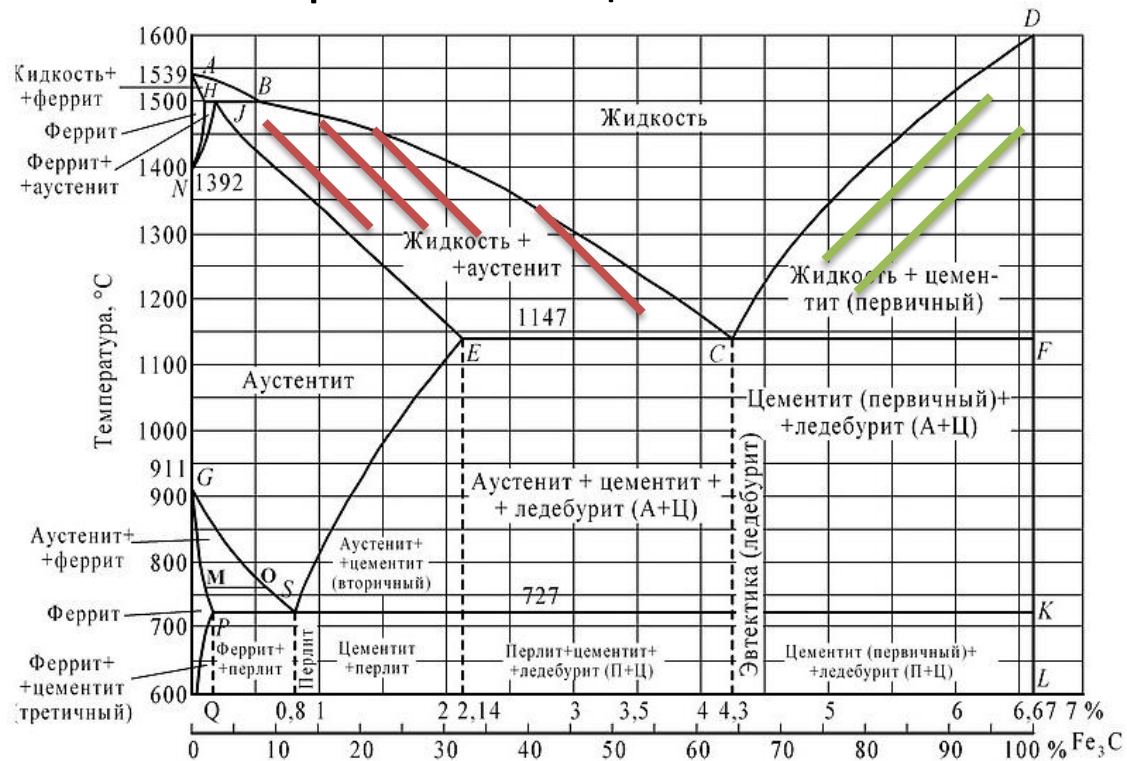


Рис. 6. Диаграммы состояния Fe-C.

На диаграмме железо-углерод линия ACD является **ликвидусом**, линия $AECF$ – **солидусом**. Первичная кристаллизация начинается на ACD и заканчивается на линии $AECF$.

При этом в сплавах, содержащих:

- менее 4,3 масс.% углерода, из жидкости выделяются кристаллы аустенита;
- более 4,3 масс.% С – кристаллы цементита.



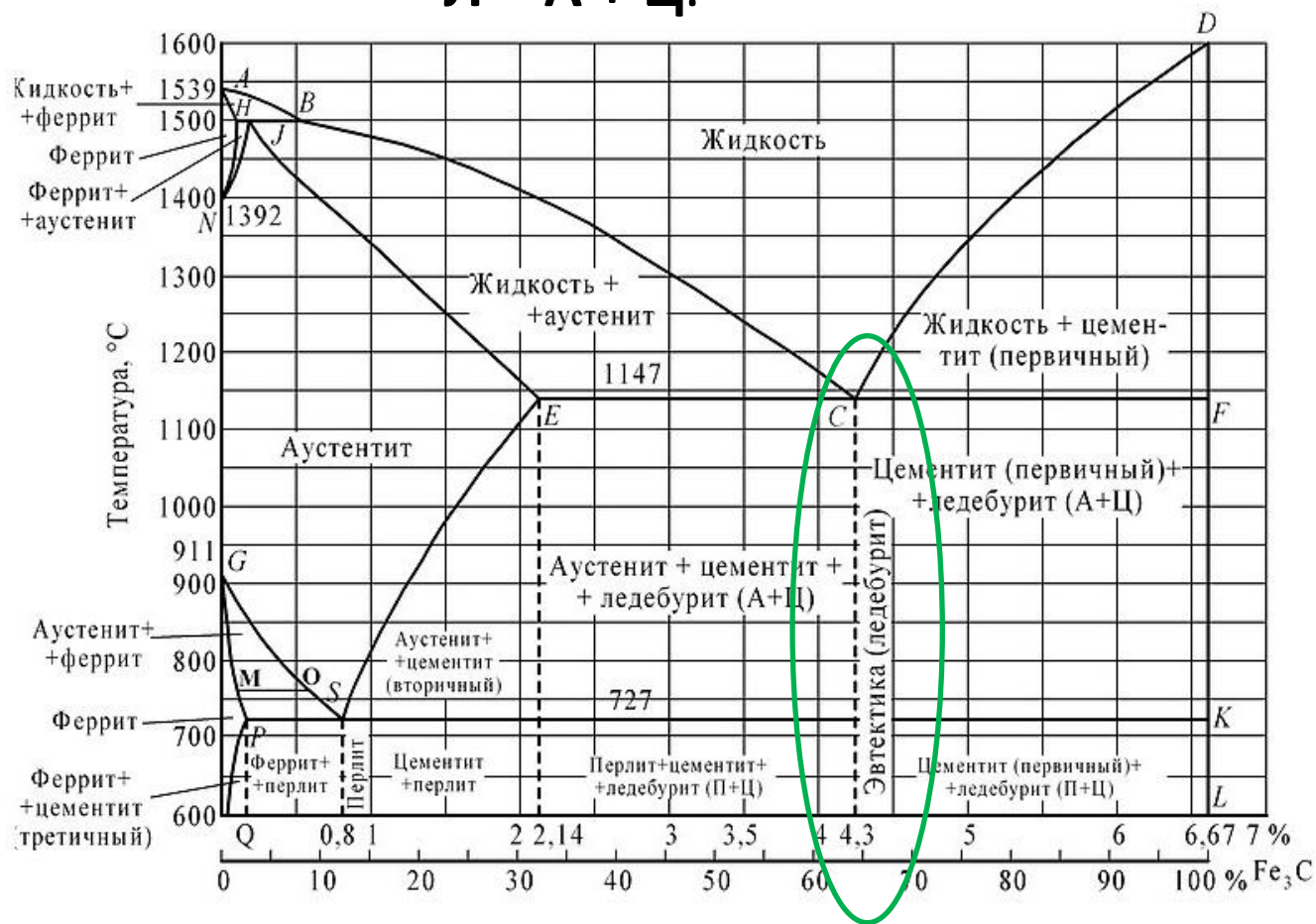
Эвтектика содержит 4,3 масс.% С, кристаллизуется в точке **С** при температуре 1147 °С и представляет собой **механическую смесь кристаллов аустенита и цементита**.

Эвтектика в железоуглеродистых сплавах – **ледебурит (Л)**.

Кратко можно записать:

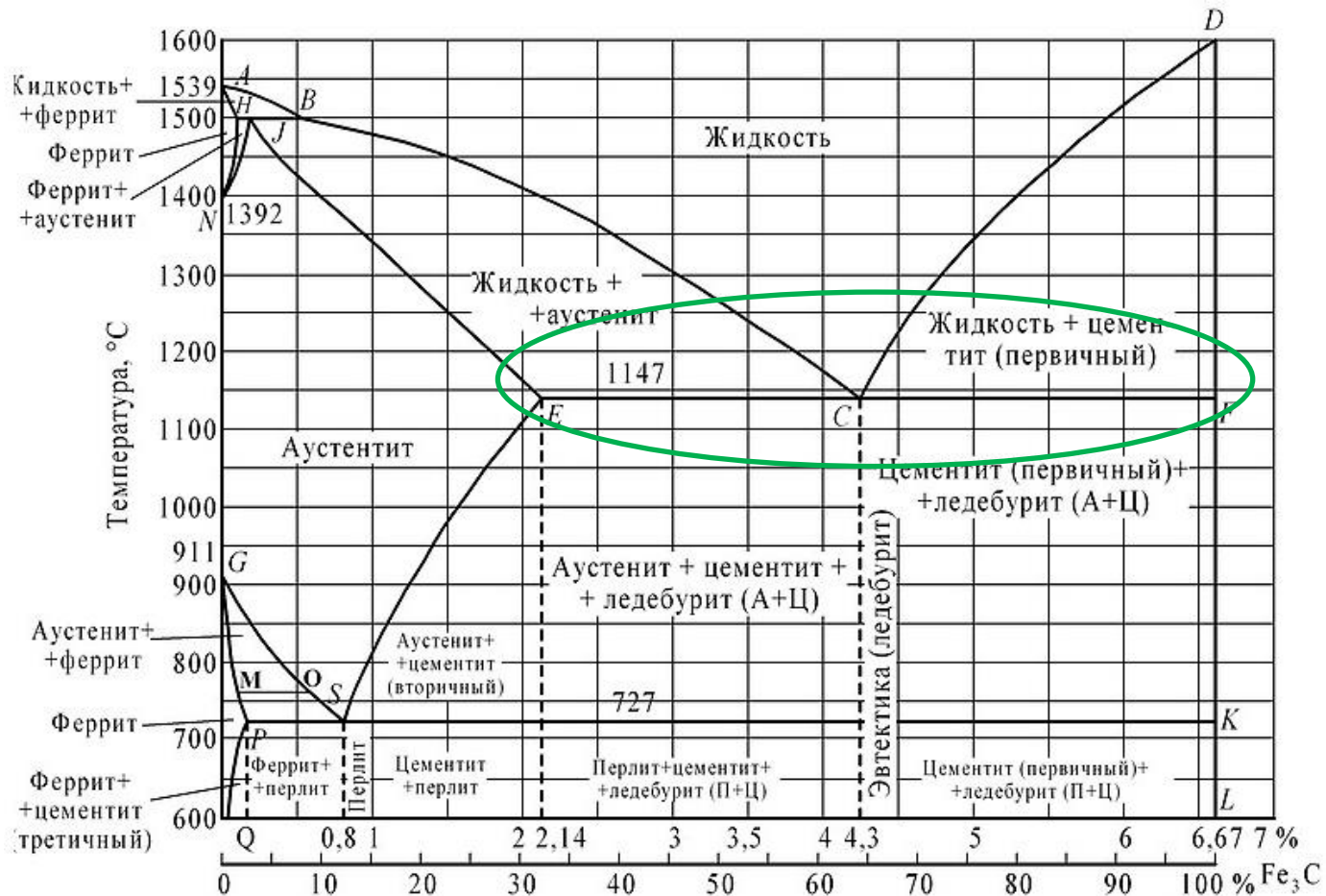


(1)



Кристаллизация всех сплавов, содержащих более 2,14 масс.% С, заканчивается образованием эвтектики.

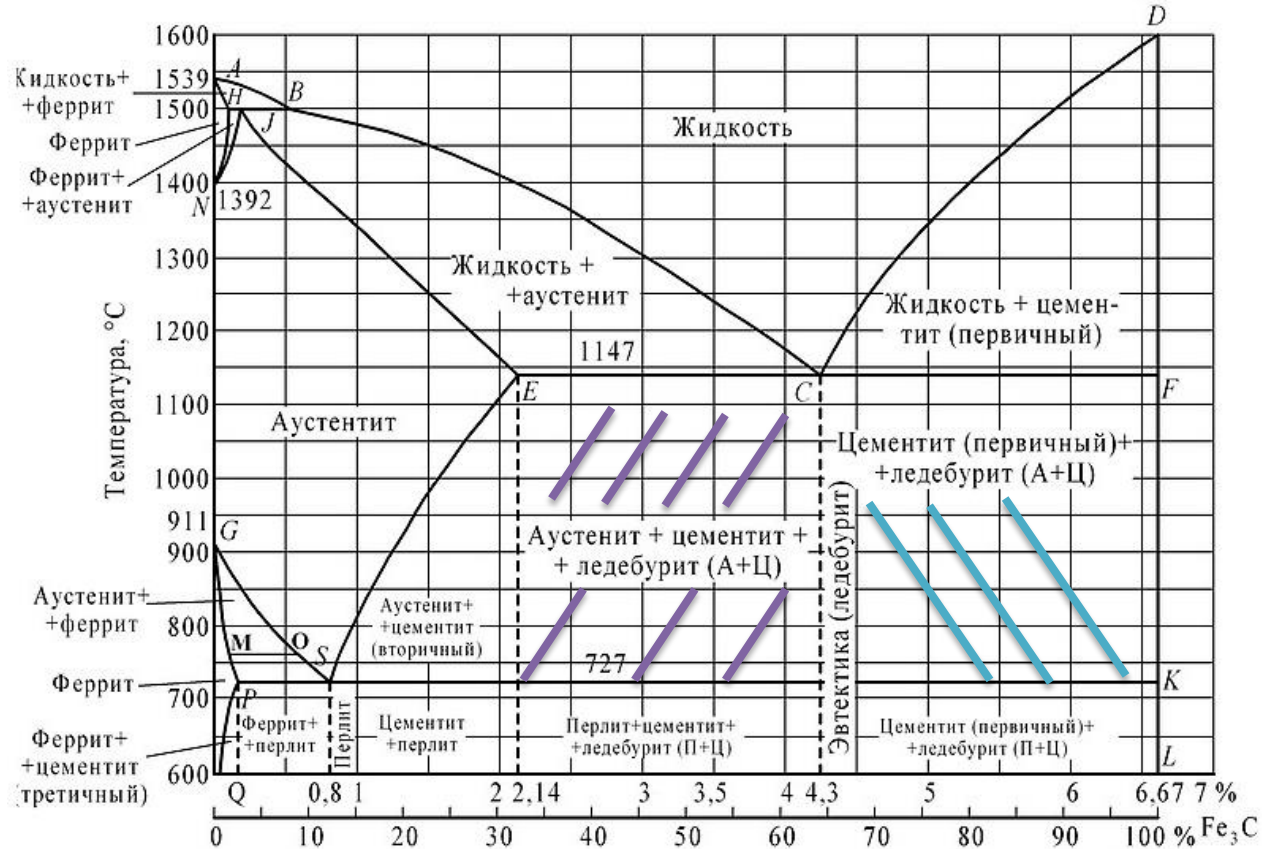
При достижении температуры 1147°C (линия *ECF*) происходит одновременное образование из жидкости кристаллов аустенита и цементита.



По окончании первичной кристаллизации структура сплавов следующая:

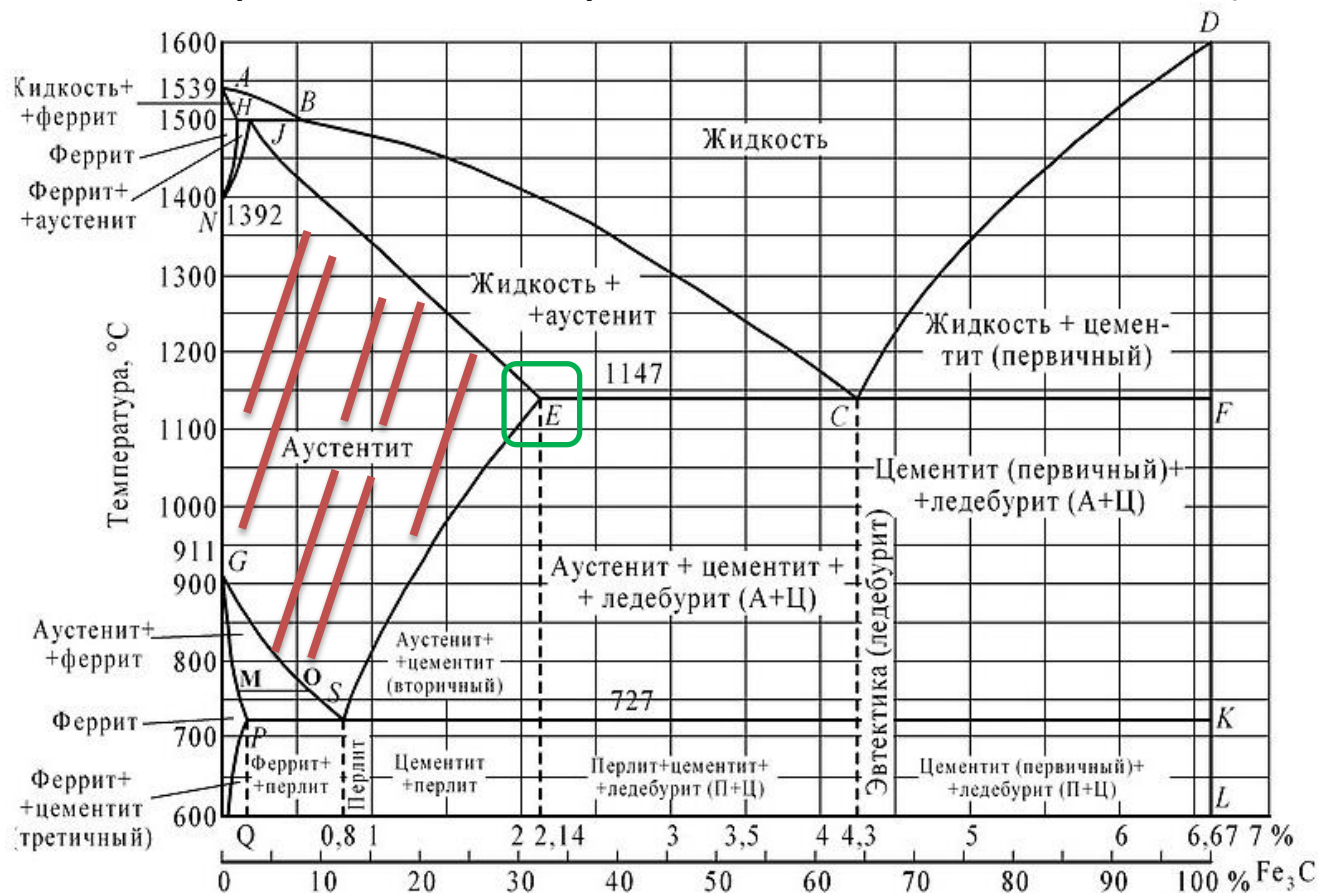
- **доэвтектических** (с содержанием углерода от 2,14 до 4,3 масс.%) – аустенит и ледебурит,

- **заэвтектических** (от 4,3 до 6,69 масс.% C) – ледебурит и цементит.



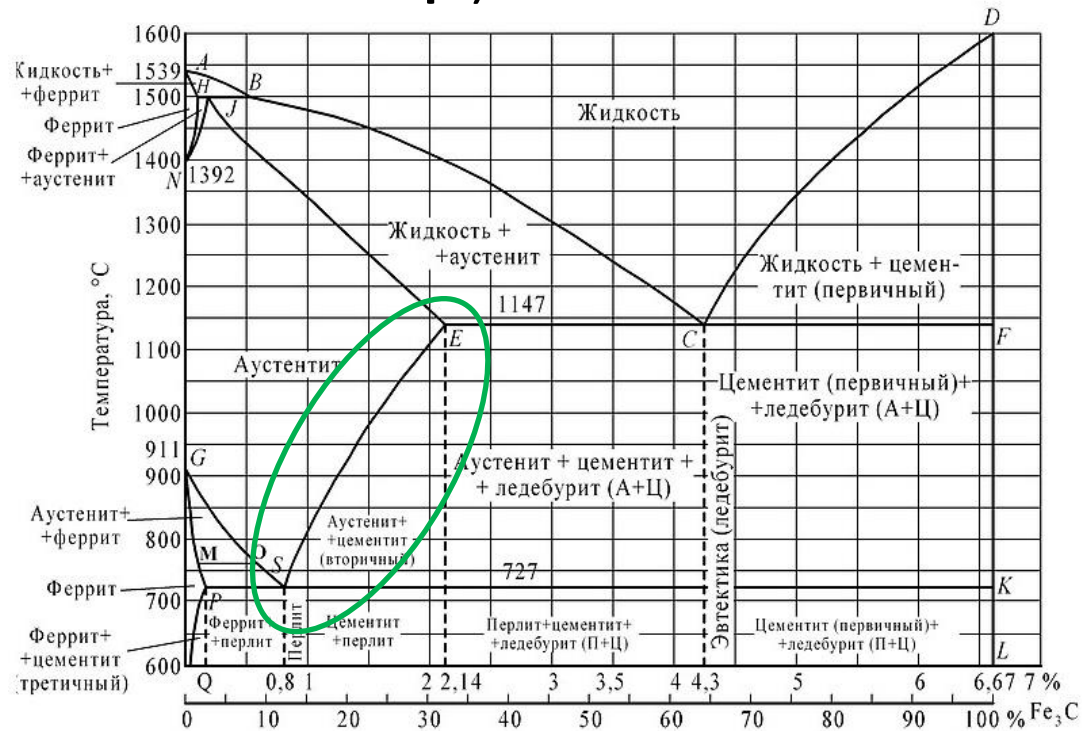
Сплавы, содержащие менее 2,14 масс.% С, по окончании первичной кристаллизации имеют однофазную структуру – аустенит. Вторичная кристаллизация (перекристаллизация в твёрдом состоянии) происходит из-за переменной растворимости углерода в аустените и феррите.

Предельное содержание С в аустените – 2,14 масс. % (точка *E*).

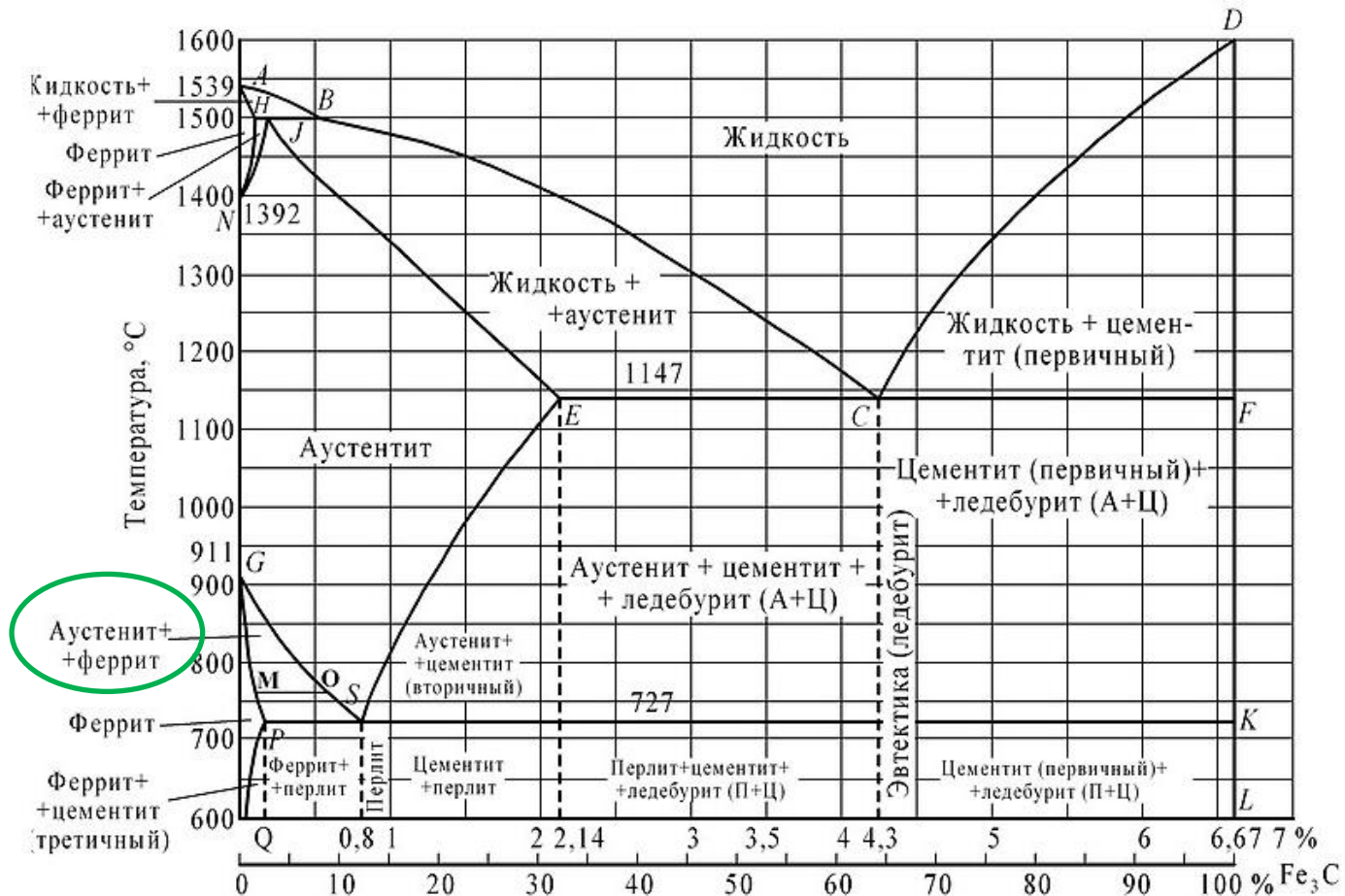


С понижением T растворимость C в Fe_γ -железе уменьшается в соответствии с линией предельной растворимости ES и к моменту достижения $T=727^\circ C$ (линия PSK) составляет $0,8$ масс.% C .

В сплавах ($> 0,8$ масс. % C) при охлаждении от 1147 до $727^\circ C$ происходит выделение C из аустенита. Активный атомарный C немедленно вступает во взаимодействие с железом, образуя цементит. В структуре сплава появляются кристаллы **вторичного** цементита (обозначают как $ЦII$).

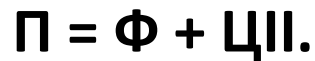


В сплавах с содержанием углерода меньше 0,8 масс. % в процессе охлаждения от линии *GS* до линии *PSK* происходит зарождение и рост кристаллов феррита, поэтому содержание углерода в аустените увеличивается и к моменту достижения $T=727\text{ }^{\circ}\text{C}$ составляет также 0,8 масс. %С.

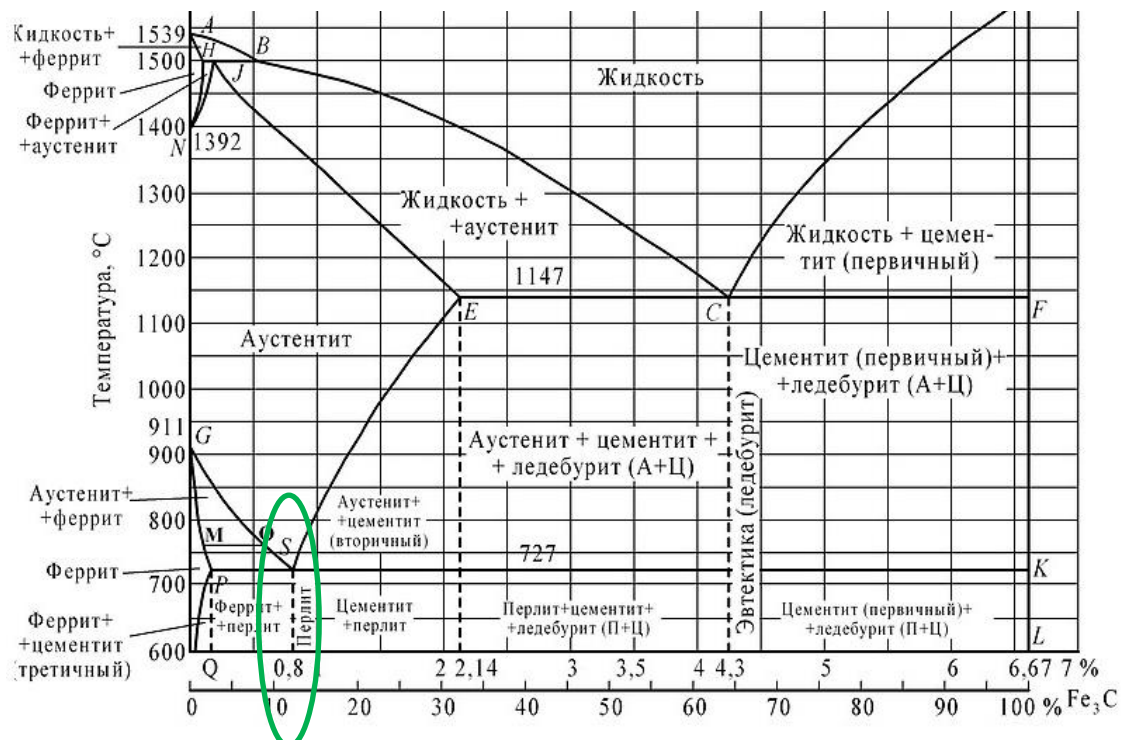


При 727 °С (линия *PSK*) во всех сплавах происходит *эвтектоидное превращение*: аустенит, содержащий 0,8 масс.% С, распадается с образованием механической смеси кристаллов феррита и цементита.

В железоуглеродистых сплавах эвтектоид носит собственное имя – *перлит*. Он представляет собой смесь двух равновесных при комнатной температуре фаз: феррита и цементита:

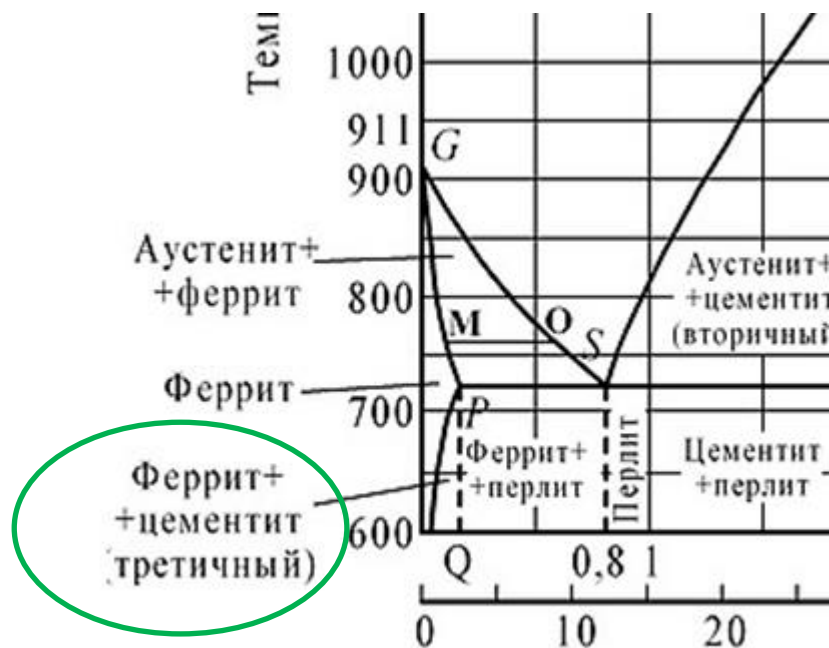


(2)



При дальнейшем охлаждении от 727 °С до комнатной температуры никаких превращений в железуглеродистых сплавах не происходит. Исключением являются сплавы с содержанием углерода **менее 0,02 масс. %**.

В этих сплавах, при охлаждении от 727 °С, происходит выделение избыточного углерода из феррита в соответствии с кривой предельной растворимости *PQ*. Углерод образует с железом цементит, который называется в данном случае **третичным (ЦIII)**.



3. Классификация сплавов Fe-C

Все сплавы железа с углеродом делятся на две большие группы:

- стали;
- чугуны.

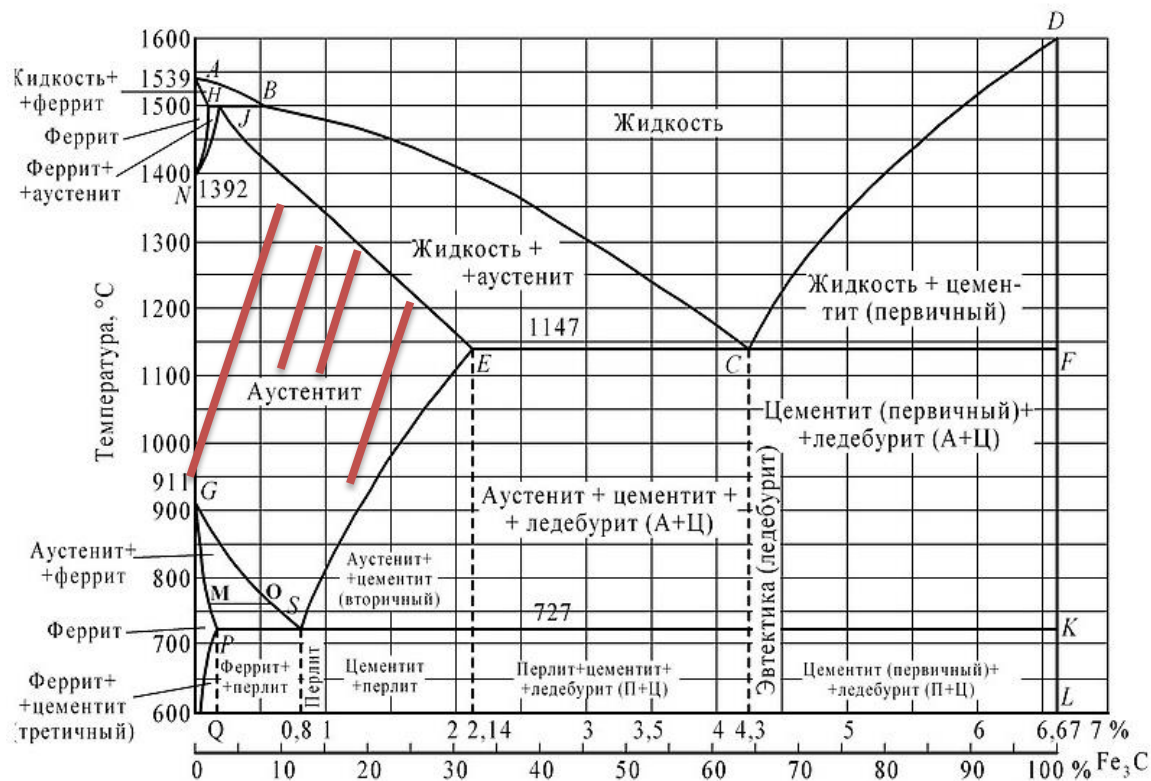
Граница между сталями и чугунами совпадает с предельной растворимостью углерода в аустените - 2,14 масс.% С.

Она разделяет две группы сплавов с различными структурными особенностями и, как следствие, с различной технологией изготовления изделий из них.

Стаями называются сплавы железа с углеродом, содержащие менее 2,14 масс.% углерода.

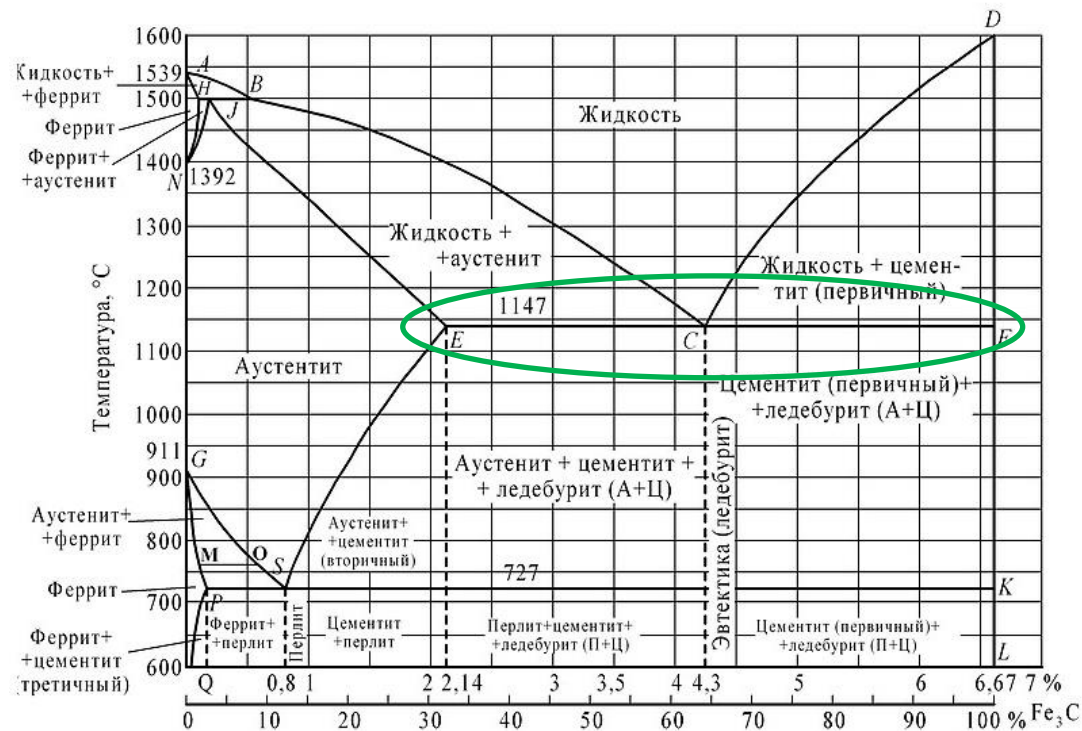
Любая углеродистая сталь при нагревании переходит в однофазное состояние - твёрдый раствор углерода в гамма-железе (область AESG на диаграмме).

В этом состоянии сталь достаточно пластична, её можно подвергнуть различным видам обработки давлением: прокатке, ковке и т.п.



Чугуны - это сплавы железа с углеродом, содержащие более 2,14 масс.% С. При нагреве чугуны всегда остаются двухфазными, до самого солидуса (линия ЕСF на диаграмме).

В структуре чугунов всегда имеется **ледебурит** – твёрдая и хрупкая структурная составляющая. Поэтому чугуны обработке давлением **не подвергаются**. Зато чугуны имеют хорошие литейные свойства, так как кристаллизуются при постоянной, сравнительно низкой температуре или в небольшом интервале температур.



4. Влияние легирующих элементов на превращения в сплавах «железо-углерод»

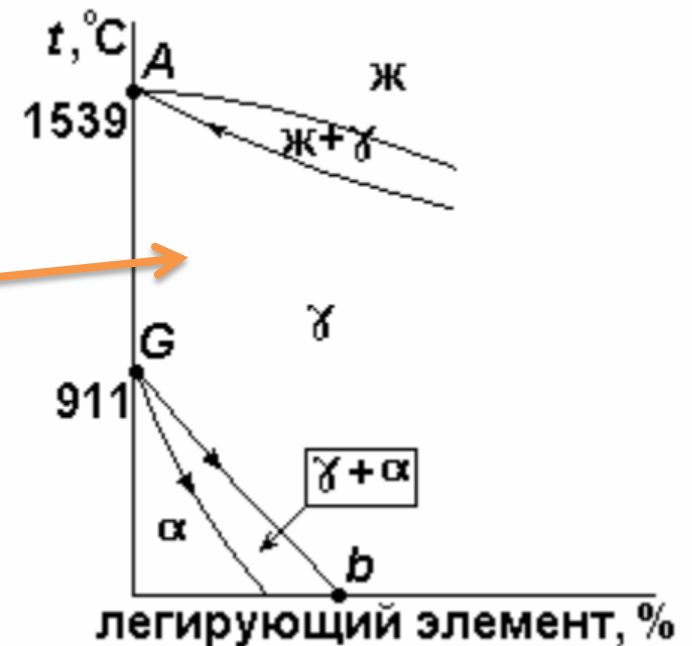
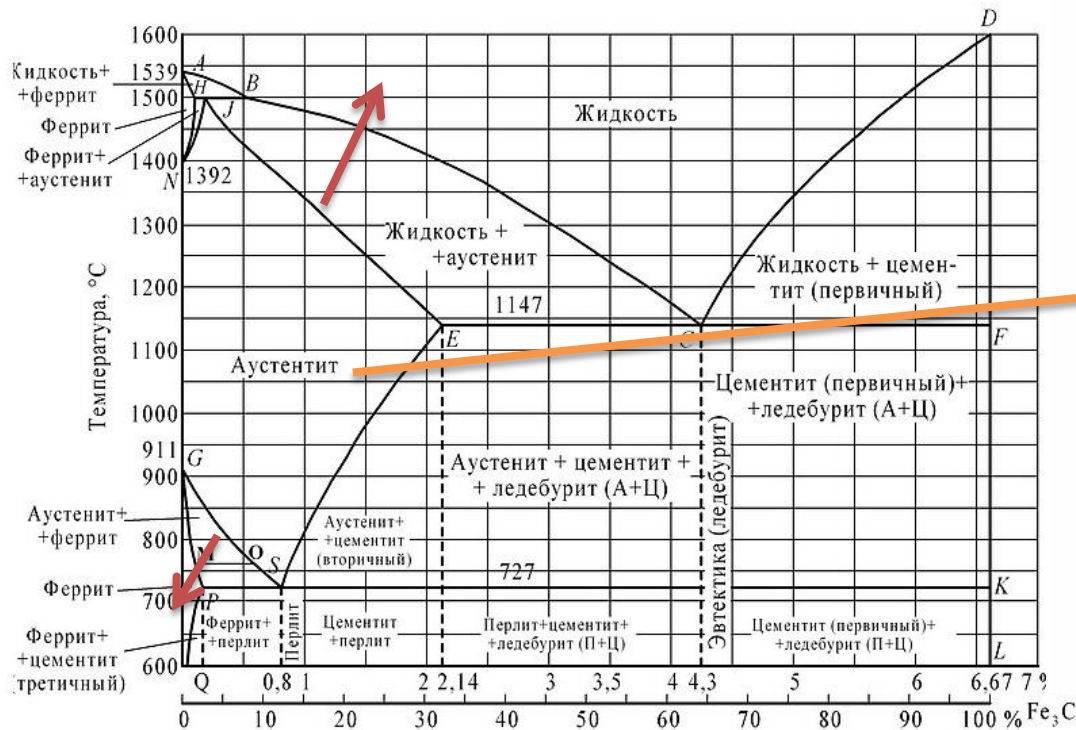
Элементы, специально добавленные в сплавы с целью получения требуемых эксплуатационных свойств, называются *легирующими элементами*, а стали или чугуны с такими добавками – *легированными*.

Легирующие элементы, вступая во взаимодействие с исходными компонентами, могут значительно изменять вид диаграммы Fe–C. Их подразделяют на две группы:

- 1) элементы, расширяющие область существования аустенита;
- 2) элементы, расширяющие область существования феррита.

Элементы, расширяющие область существования аустенита, снижают температуру линии GS и повышают температуру линии AE (никель, марганец, кобальт).

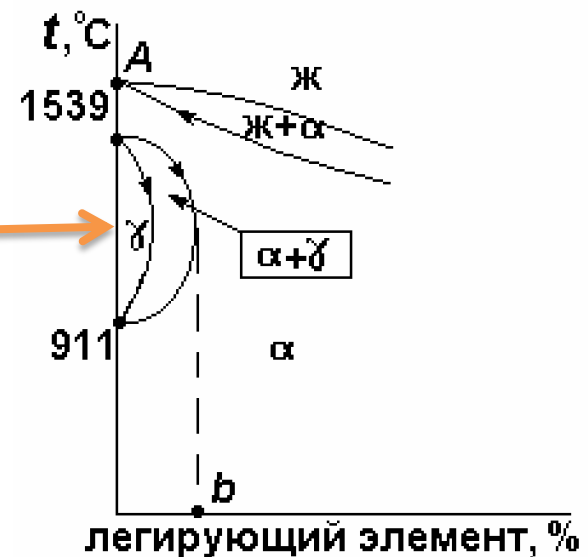
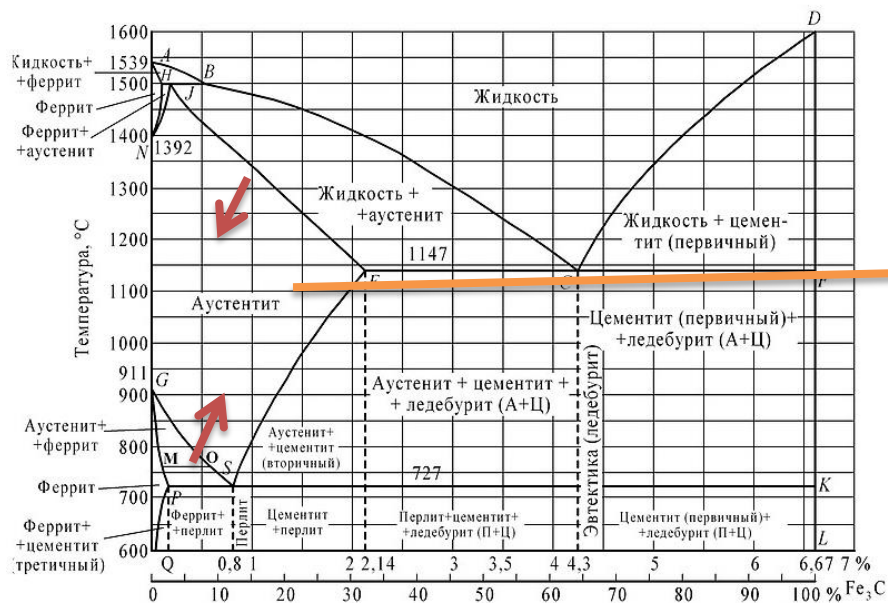
Они образуют неограниченные растворы с Fe_γ . В этих сплавах ГЦК-решетка становится устойчивой при комнатной температуре, сплав после охлаждения имеет структуру аустенита. Такие стали называются **аустенитными**.



Элементы, расширяющие область существования феррита, повышают температуру линии GS и понижают температуру линии AE . К этой группе относятся большинство легирующих элементов: Cr, Mo, W, V, Ti, Si и др.

Легирующий элемент неограниченно растворяется в Fe_{α} , начиная с некоторой концентрации b , причем этот твёрдый раствор устойчив при всех температурах, вплоть до солидуса.

Сплав после охлаждения имеет структуру феррита. Такие стали называются **ферритными**.



5. Расшифровка диаграммы Fe-C

Выполним анализ превращения в системе Fe-C при охлаждении и постоянной концентрации 0,6 масс.% C (линия I-I на рис. 7).

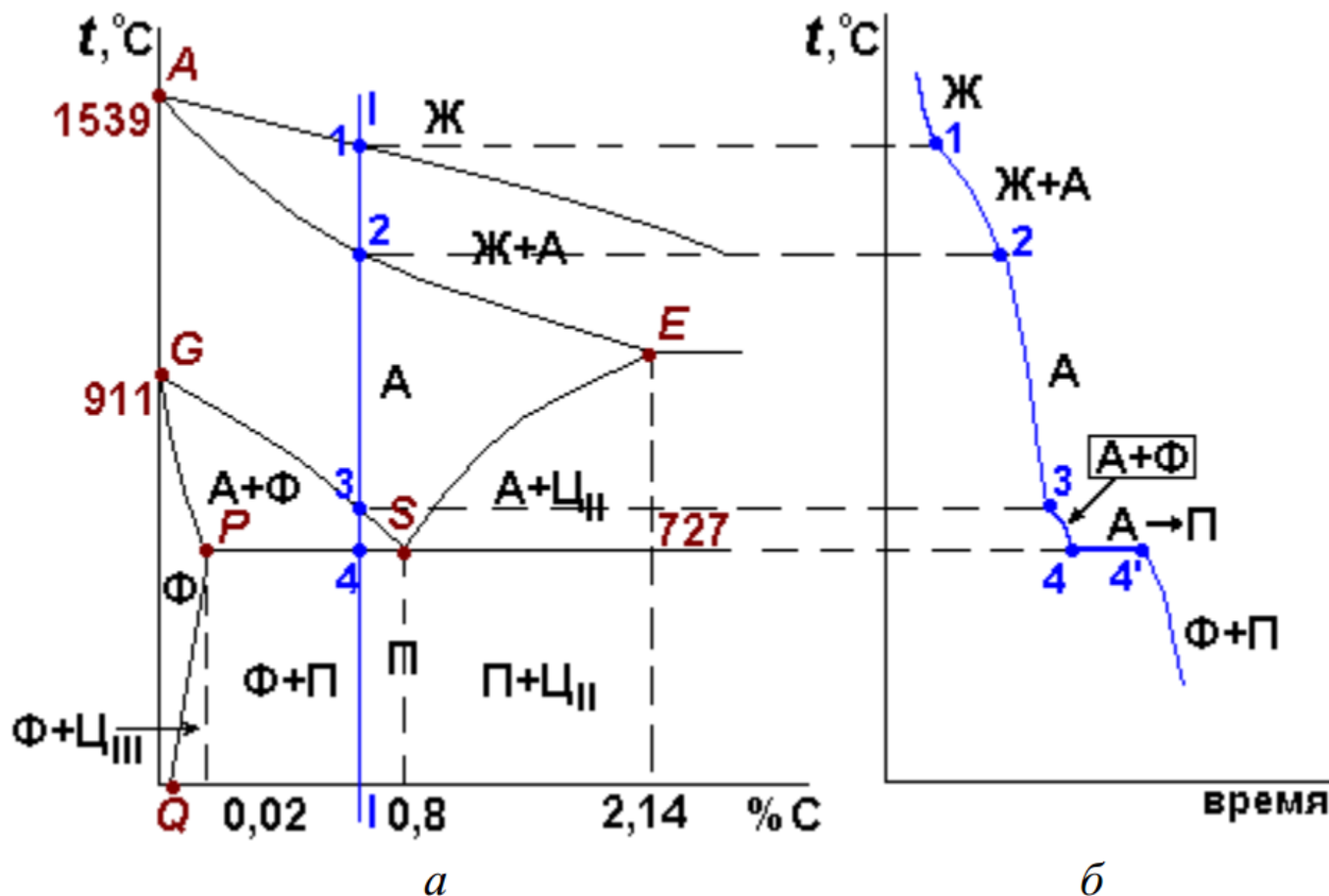
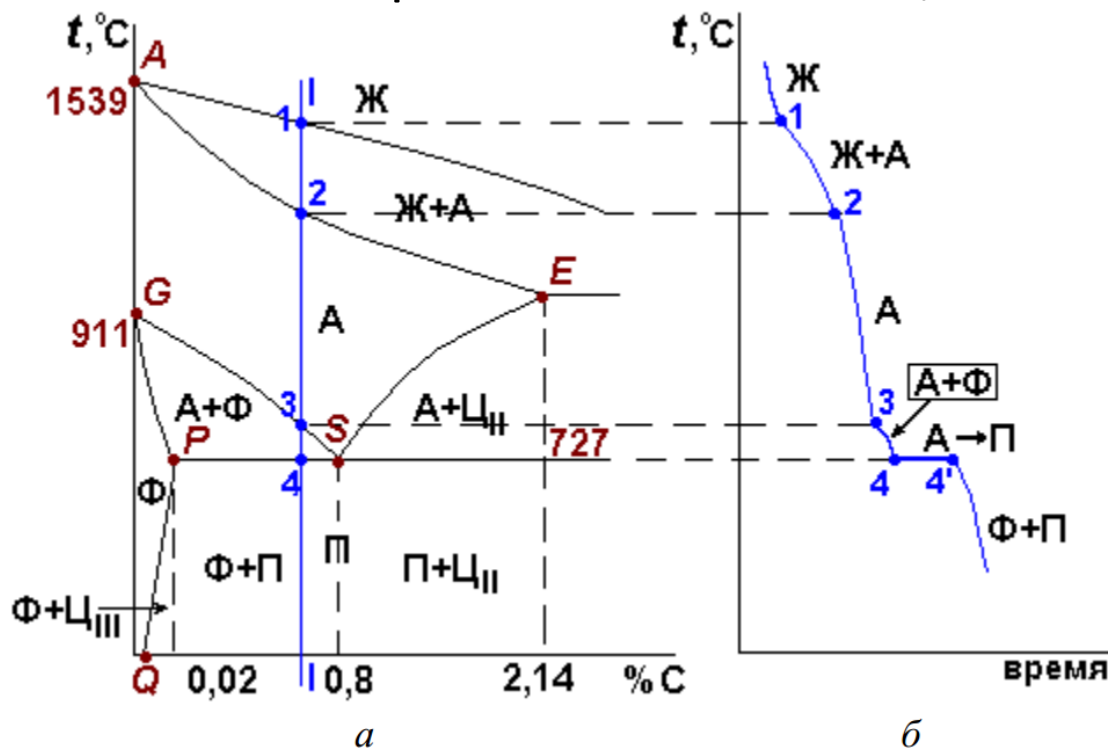


Рис. 7. Левая часть диаграммы Fe-C (а) и кривая охлаждения сплава I-I (б).

1. Начальное состояние – жидкая фаза.
2. Количество фазовых превращений – 4.
3. **Точка 1** - линия ликвидус, при достижении этой температуры начинается кристаллизация раствора Fe и C.
4. **Точка 1** → **точка 2** - из жидкости выделяются кристаллы аустенита.
5. **Точка 2** - линия солидус, произошла полная кристаллизация аустенита. Образовавшиеся кристаллы имеют 0,6 масс. % C в своём составе.

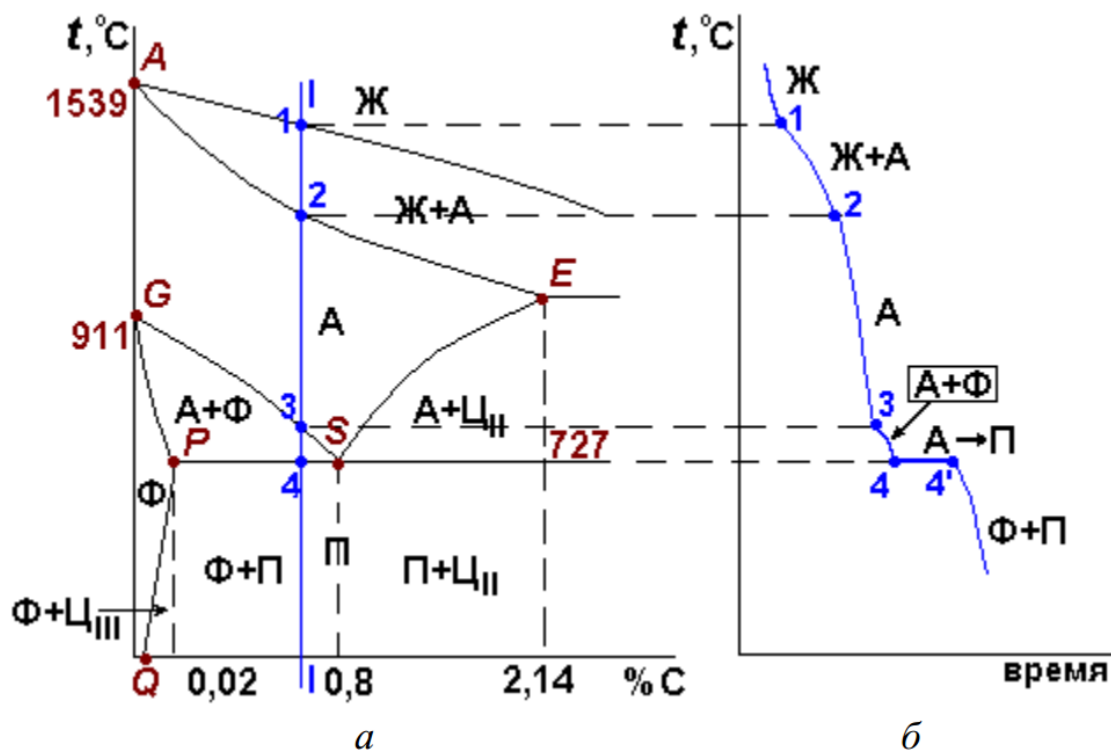


6. **Точка 2** → **точка 3** - охлаждение аустенитной стали. Без фазовых превращений.

7. **Точка 3** – начинается рост зёрен феррита в аустенитной стали в тех областях, где углерода оказалось меньше.

8. **Точка 3** → **точка 4** - охлаждение стали с повышением содержания углерода в аустените.

9. **Точка 4** – содержание углерода в аустените достигает 0,8 масс.% и происходит его переход в перлит: $\Pi = (\Phi + \text{ЦII})$.



10. **Точка 4** → фазовых превращений не происходит.

11. Конечное состояние - при комнатной температуре сталь состоит из **феррита и перлита = феррита и цементита (II)**.

