

## Отжиг 2 рода

**Отжиг сталей (отжиг 2-го рода) — это термическая обработка, при которой главными процессами являются аустенитизация с последующим перлитным превращением.**

Основой для изучения термической обработки стали является диаграмма железо—углерод.

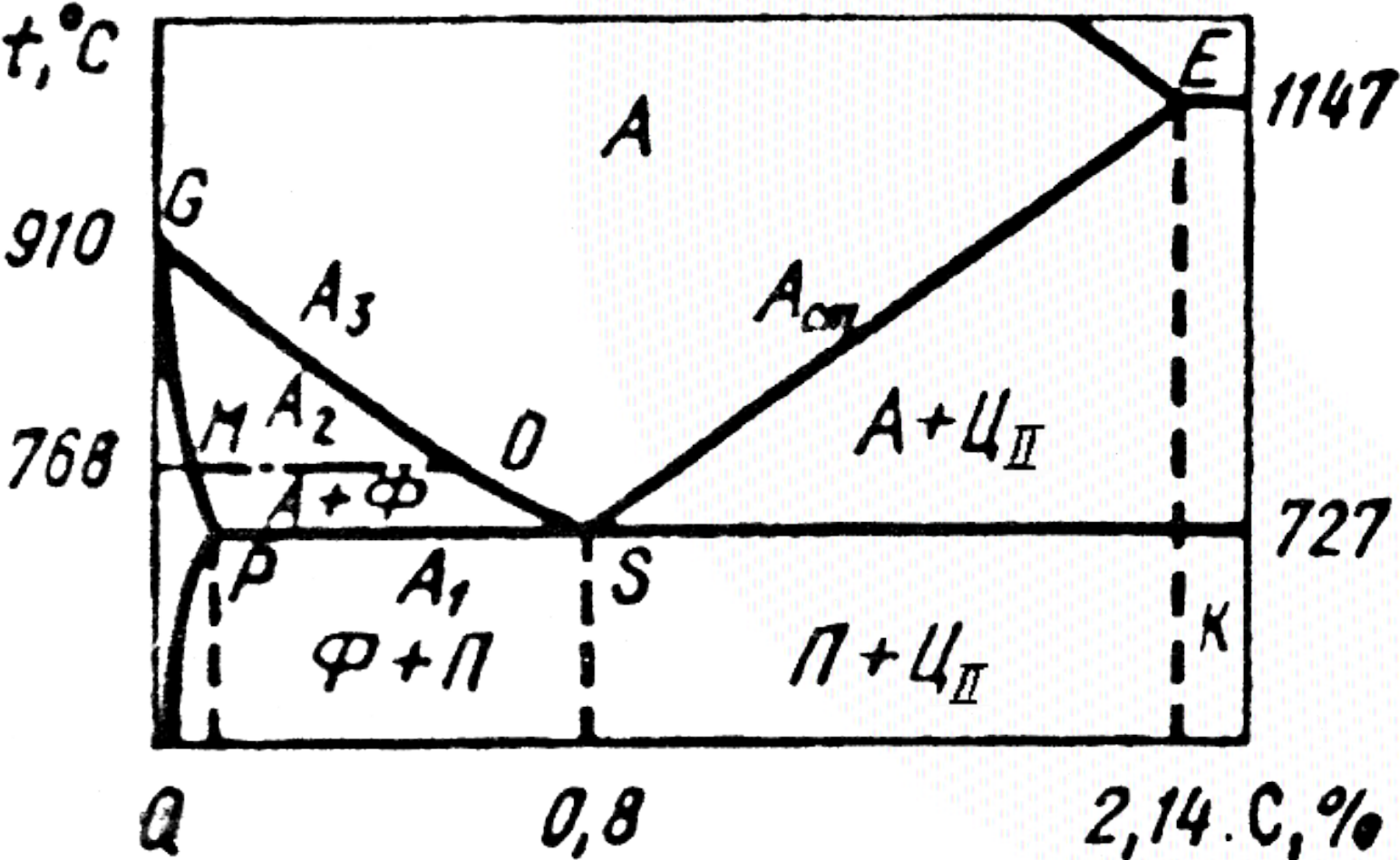
Верхней температурной границей при термической обработке является линия солидуса, поэтому процессы первичной кристаллизации и, следовательно, верхняя часть диаграммы для нас в данном случае не имеют большого значения.

Любая разновидность термической обработки состоит из комбинации четырех основных превращений, в основе которых лежат стремления системы к минимуму свободной энергии.

При рассмотрении разных видов термообработки железо-углеродистых сплавов (стали, чугуны) используются следующие условные обозначения критических точек этих сплавов



Обозначение критических точек стали



Критические точки  $A_1$  лежат на линии PSK ( $727^\circ\text{C}$ ) и соответствует превращению аустенит  $\rightarrow$  перлит.

Критические точки  $A_2$  находятся на линии MO ( $768^\circ\text{C}$ ).

Критические точки  $A_3$  лежат на линии GS, а критические точки  $A_{cm}$  — на линии SE. Верхняя критическая точка  $A_3$  лежит на линии  $GSE$  и соответствует началу выпадения или концу растворения феррита в доэвтектоидных сталях или цементита (вторичного) в заэвтектоидных сталях.

Вследствие теплового гистерезиса превращения при нагреве и охлаждении проходят при разных температурах. Поэтому для обозначения критических точек при нагреве и охлаждении используют дополнительные индексы: буквы «с» в случае нагрева и «r» в случае охлаждения. Например,  $A_{C1}$ ,  $A_{C3}$ ,  $A_{r1}$ ,  $A_{r3}$ .

Чтобы отличить критическую точку при нагреве от критической точки при охлаждении, рядом с буквой  $A$  ставят букву  $c$  в первом случае и  $r$  — во втором.





*аустенит* (А) — твердый раствор углерода в  $\gamma$ -железе  $\text{Fe}_\gamma(\text{C})$ ;  
*мартенсит* (М) — твердый раствор углерода в  $\alpha$ -железе  $\text{Fe}_\alpha(\text{C})$ ;  
*перлит* (П) — эвтектоидная смесь из одновременно образующихся феррита и карбида  $\text{Fe}_\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$  (ничтожно малой равновесной растворимостью углерода в феррите пренебрегаем).

***При термической обработке стали наблюдаются четыре основных превращения.***

I. Превращение перлита в аустенит, протекающее выше точки  $A_{c1}$   $\text{Fe}_\alpha + \text{Fe}_3\text{C} \rightarrow \text{Fe}_\gamma(\text{C})$  или  $\text{П} \rightarrow \text{А}$ .

II. Превращение аустенита в перлит, протекающее ниже  $A_r$ .  
 $\text{Fe}_\gamma(\text{C}) \rightarrow \text{Fe}_\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$  или  $\text{А} \rightarrow \text{П}$ .

III. Превращение аустенита в мартенсит:

$\text{Fe}_\gamma(\text{C}) \rightarrow \text{Fe}_\alpha^M(\text{C})$  или  $\text{А} \rightarrow \text{М}$ .

IV. Превращение мартенсита в перлит, точнее в феррито-карбидную смесь:

$\text{Fe}_\alpha(\text{C}) \rightarrow \text{Fe}_\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$  или  $\text{М} \rightarrow \text{П}$ .

Оно происходит при всех температурах, так как при всех температурах свободная энергия мартенсита больше свободной энергии перлита.

Превращение перлита в мартенсит невозможно, так как при всех температурах мартенсит обладает большей свободной энергией, чем перлит.

## Механизм основных превращений

### 1. Превращение перлита в аустенит (механизм аустенитизации)

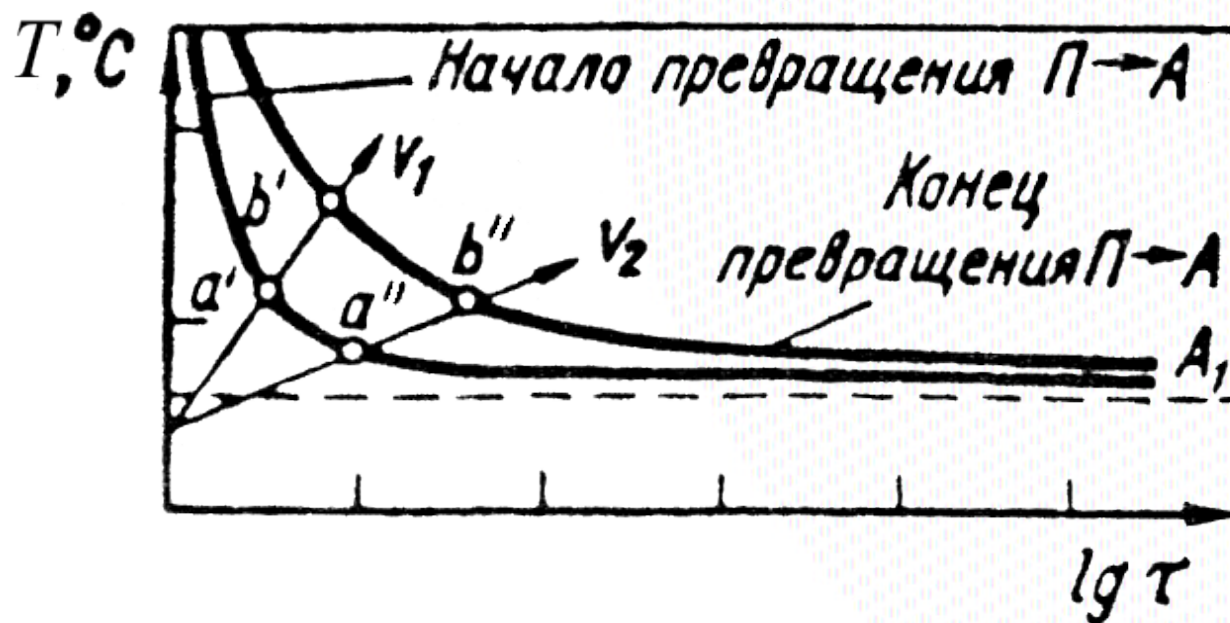
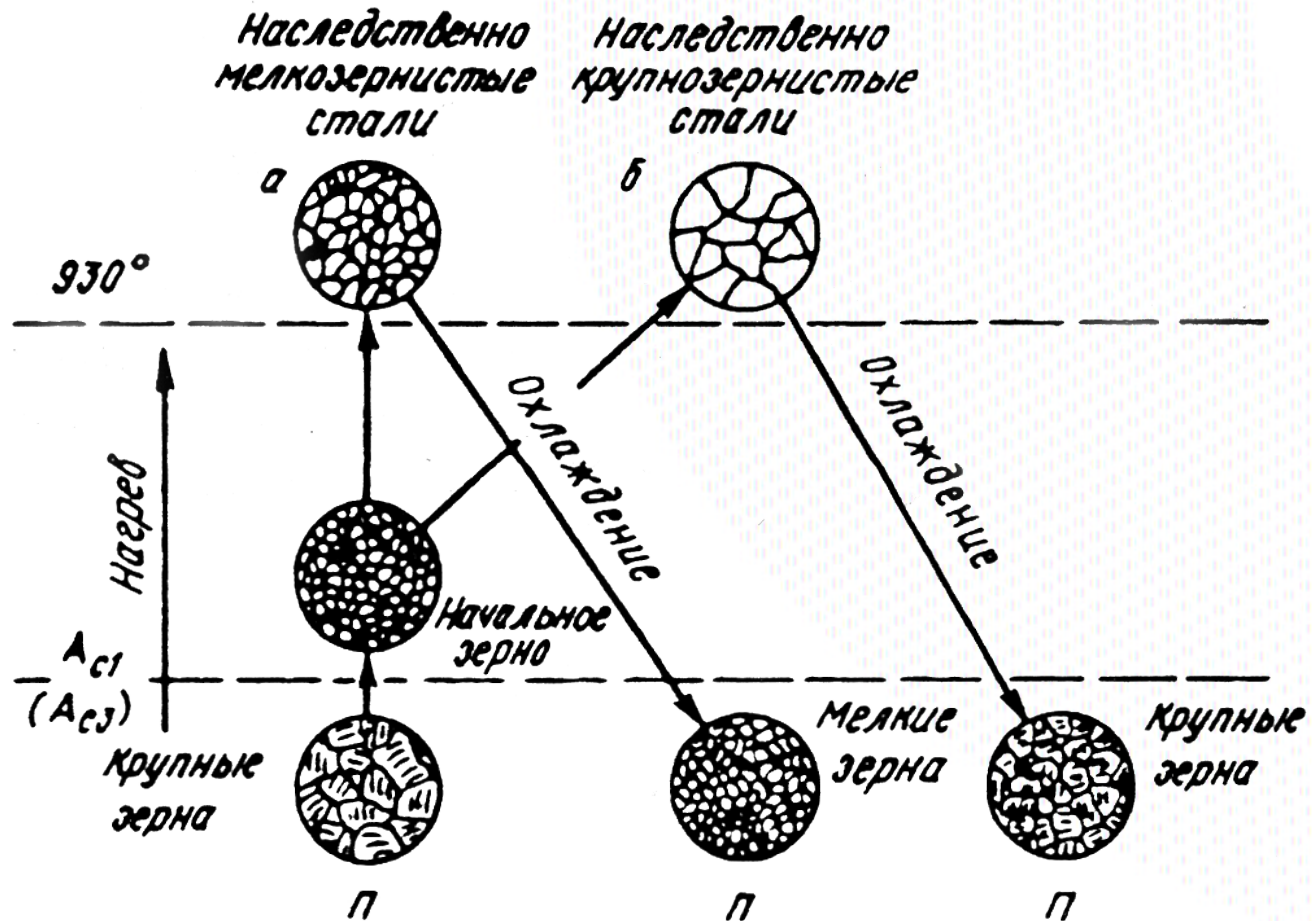


Диаграмма изотермического превращения перлита в аустенит эвтектоидной стали:  $a'$ ,  $a''$  — точки начала превращения со скоростями  $v_1$ ,  $v_2$ ;  $b'$ ,  $b''$  — точки конца превращения со скоростями  $v_1$ ,  $v_2$  ( $v_1 > v_2$ )

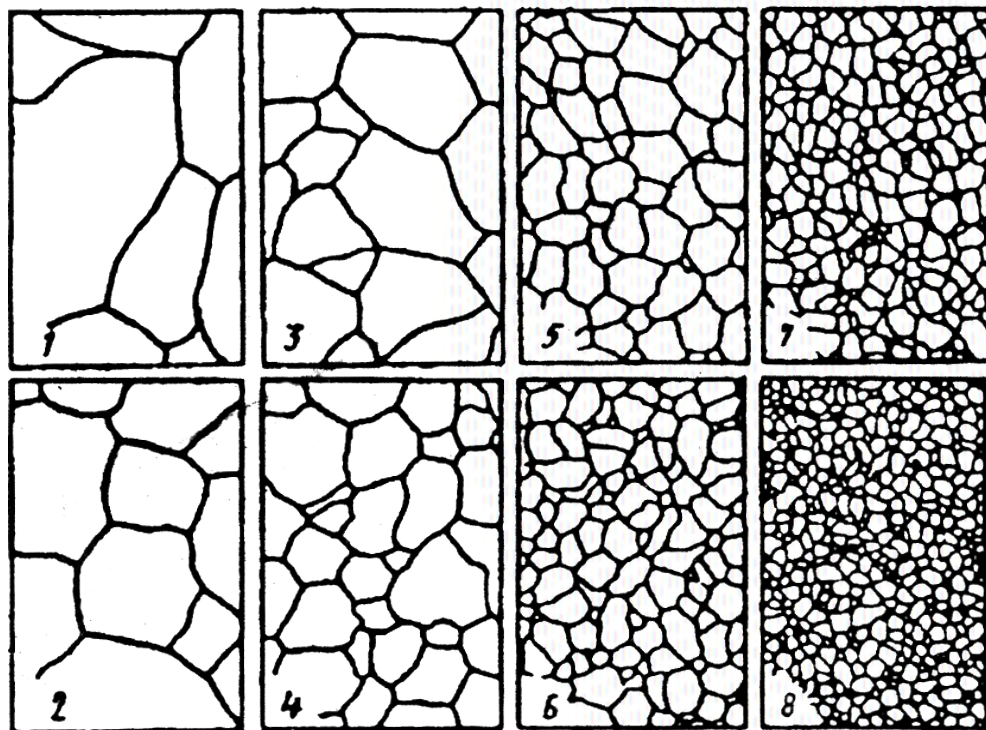


Схема изменения размера зерна в зависимости от температуры нагрева стали:

- а) наследственно мелкозернистые стали;
- б) наследственно крупнозернистые стали





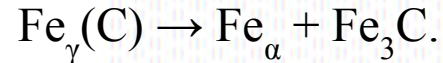


**Эталонная шкала баллов для оценки размера зерна стали**



## Перлитное превращение

Превращение аустенита в перлит заключается в распаде аустенита — твердого раствора углерода в железе, на почти чистое  $\alpha$ -железо и цементит:



При температуре равновесия  $A_1$  превращение аустенита в перлит невозможно, так как при этой температуре свободные энергии исходного аустенита и конечного перлита равны.

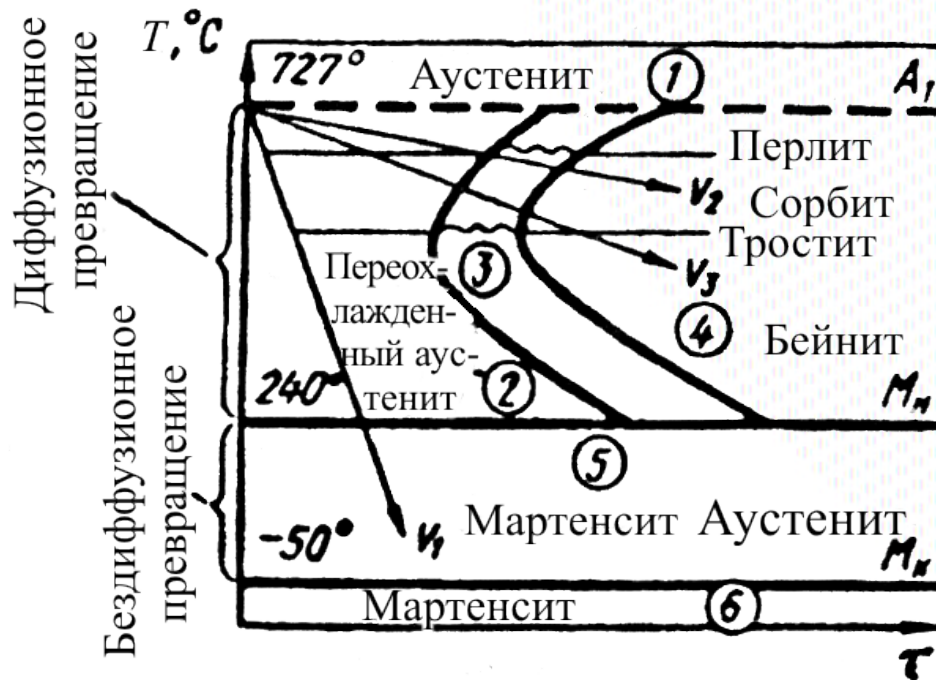


Диаграмма изотермического превращения аустенита эвтектоидной стали



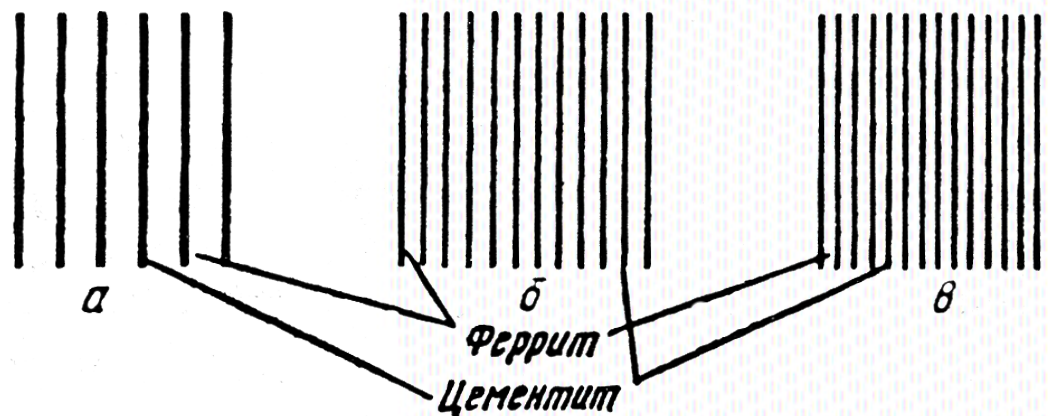


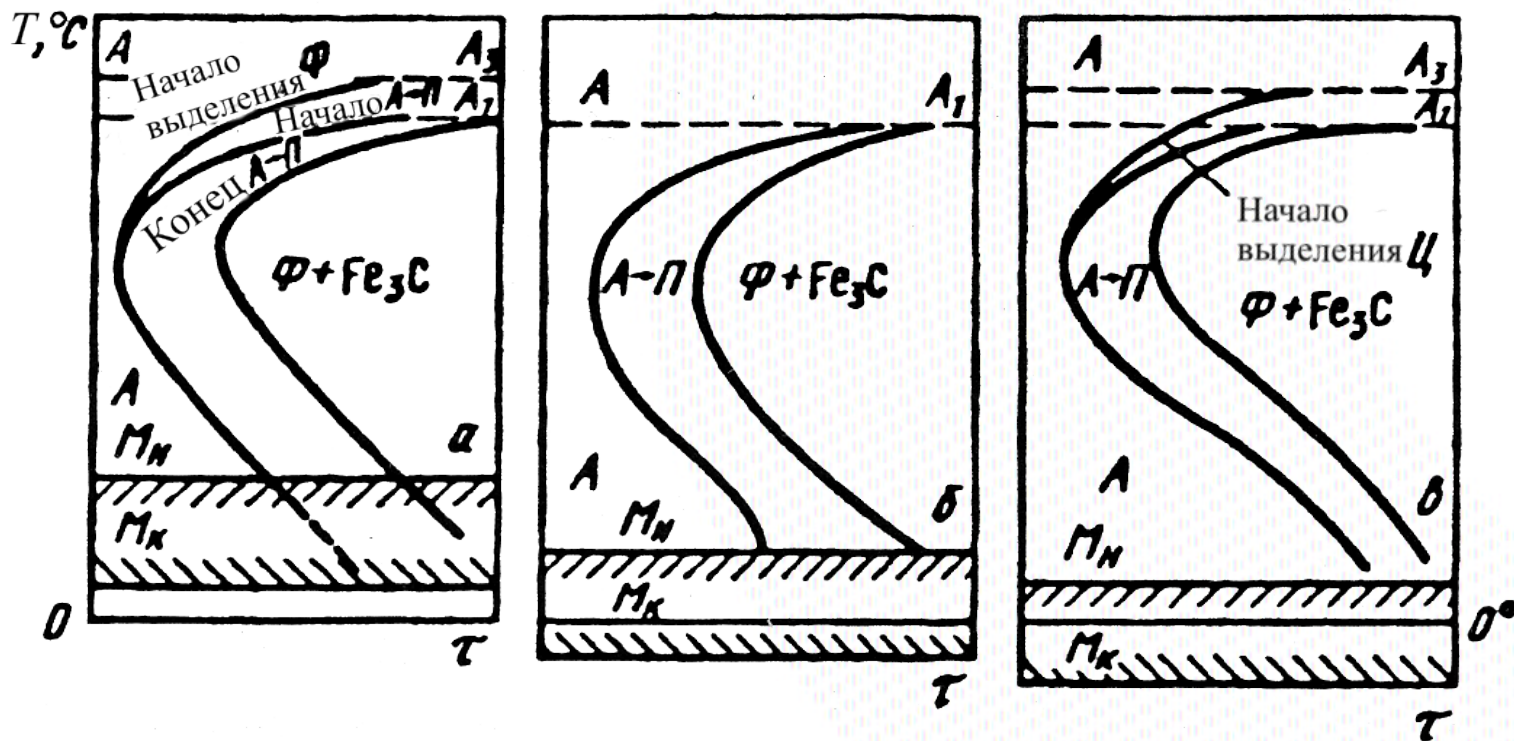
Схема феррито-цементитных структур:

а) перлит; б) сорбит; в) троостит

При температуре 600–650°C образуется сорбит, а при 550–600°C — троостит.

Перлит, сорбит, троостит являются структурами одной природы — механической смесью феррита и цементита и отличаются друг от друга лишь степенью дисперсности. С увеличением степени дисперсности пластин цементита растут твердость и прочность стали. Наибольшую пластичность имеют стали с сорбитной структурой. Троостит, образующийся при более низкой температуре превращения, характеризуется меньшей пластичностью. Перлит, сорбит и троостит называют *перлитными* структурами.





Схемы диаграммы изотермического превращения  
переохлажденного аустенита:

- а) доэвтектоидная сталь; б) эвтектоидная сталь; в)  
заэвтектоидная сталь



## ***Промежуточное превращение***

При температуре ниже  $550^{\circ}\text{C}$  самодиффузия атомов железа практически не происходит, а атомы углерода обладают достаточной подвижностью.

Механизм превращения состоит в том, что внутри аустенита происходит перераспределение атомов углерода и участки аустенита, обогащенные углеродом, превращаются в цементит.

Такая структура, состоящая из цементита и феррита, называется *бейнитом*. Особенностью является повышенное содержание углерода в феррите ( $0.1 \dots 0.2 \%$ ).

Дисперсность кристаллов феррита и цементита зависят от температуры превращения.

При температуре  $550^{\circ}\text{C}$ :  $\Delta_0 = 0,12 \cdot 10^{-3}$  мм – *верхний бейнит*.

Структура характеризуется недостаточной прочностью, при низких относительном удлинении ( $\delta$ ) и ударной вязкости ( $a_n$ ).

При температуре  $300^{\circ}\text{C}$ :  $\Delta_0 = 0,08 \cdot 10^{-3}$  мм – *нижний бейнит*. Структура характеризуется высокой прочностью в сочетании с пластичностью и вязкостью.





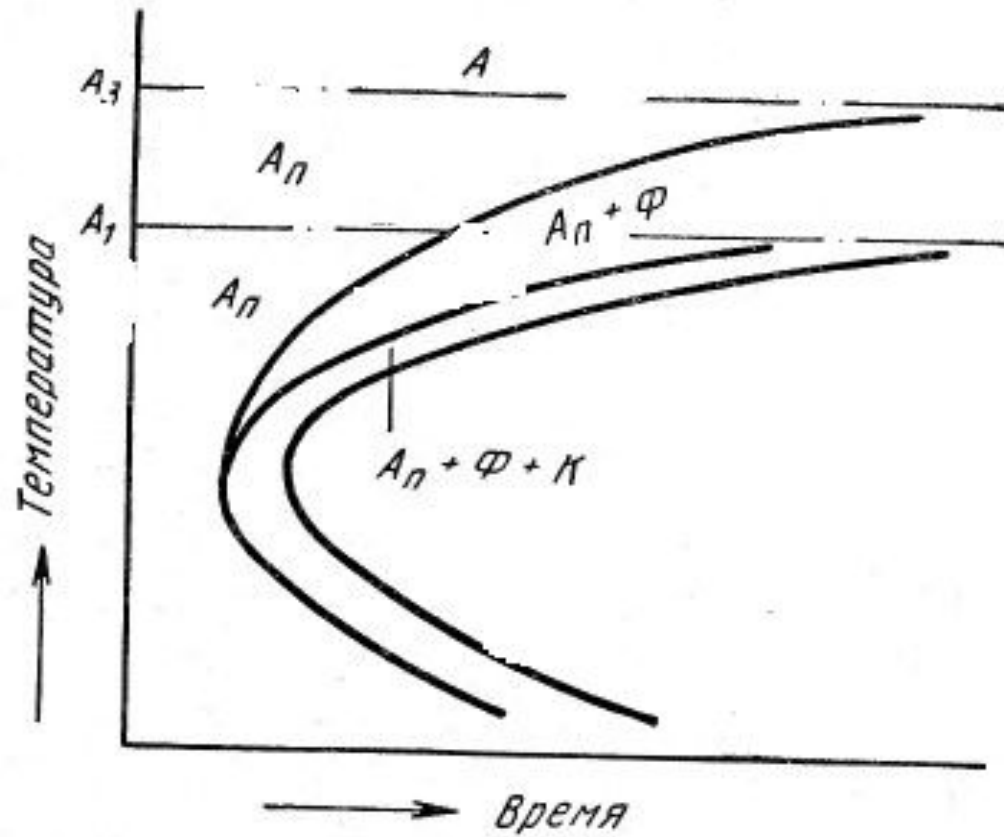


Диаграмма изотермического распада аустенита в доэвтектоидной стали (схема): А-устойчивый аустенит;  $A_{п}$  - - переохлажденный аустенит; Ф—феррит; К-карбид



Видманштеттов феррит образуется в интервале от  $A_3$  минус  $50^\circ\text{C}$  до  $600\text{—}550^\circ\text{C}$ . С увеличением содержания углерода в стали доля видманштеттова феррита в структуре уменьшается.

### *Влияние легирующих элементов на перлитное превращение*

Легирующие элементы оказывают чрезвычайно важное для практики влияние на кинетику распада аустенита. За исключением кобальта, все широко используемые легирующие элементы, растворенные в аустените (Cr, Ni, Mn, W, Mo, V и др.), замедляют перлитное превращение, сдвигая верхнюю часть С-кривой вправо.

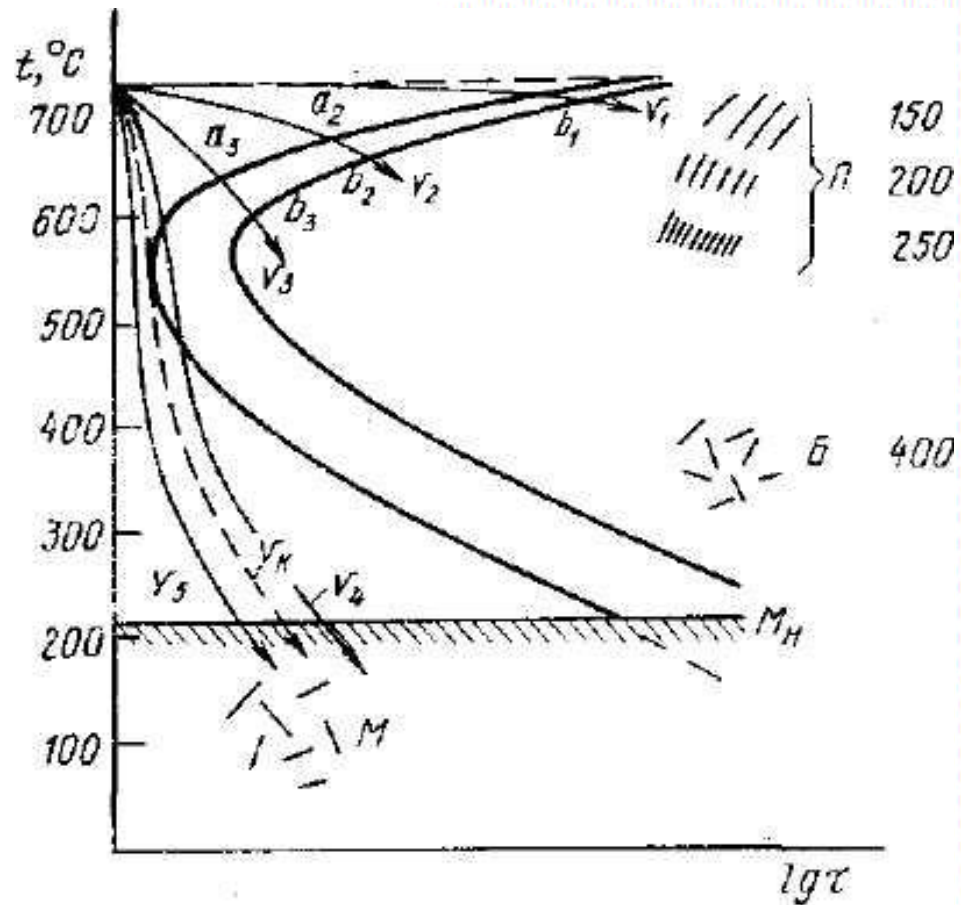
Легирующие элементы могут замедлять перлитное превращение по следующим причинам:

1) из-за образования специальных карбидов и необходимости диффузионного перераспределения в аустените легирующих элементов, атомы которых несравненно менее подвижны, чем атомы углерода;

2) из-за замедления диффузии углерода;

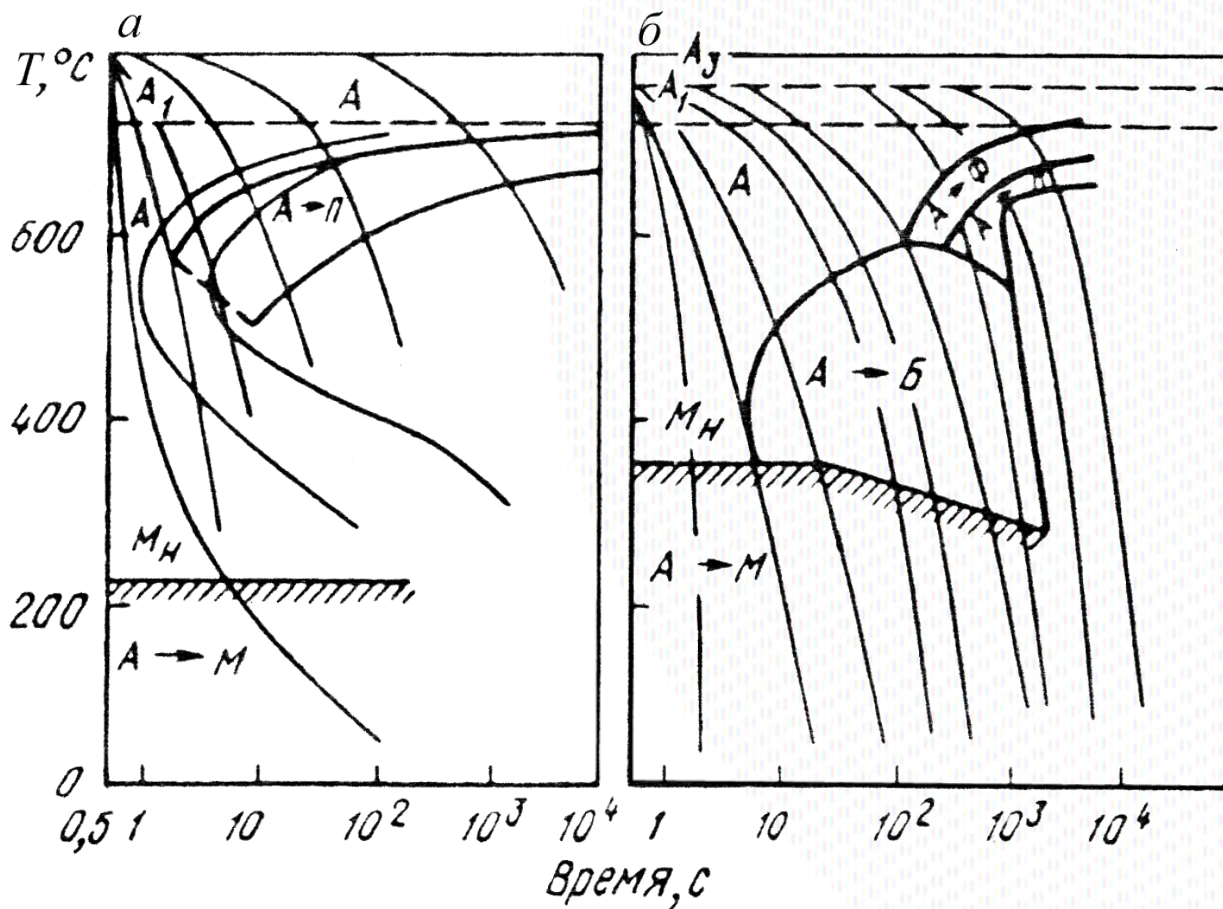
3) из-за уменьшения скорости полиморфного превращения.





Наложение на диаграмму изотермического распада аустенита кривых охлаждения

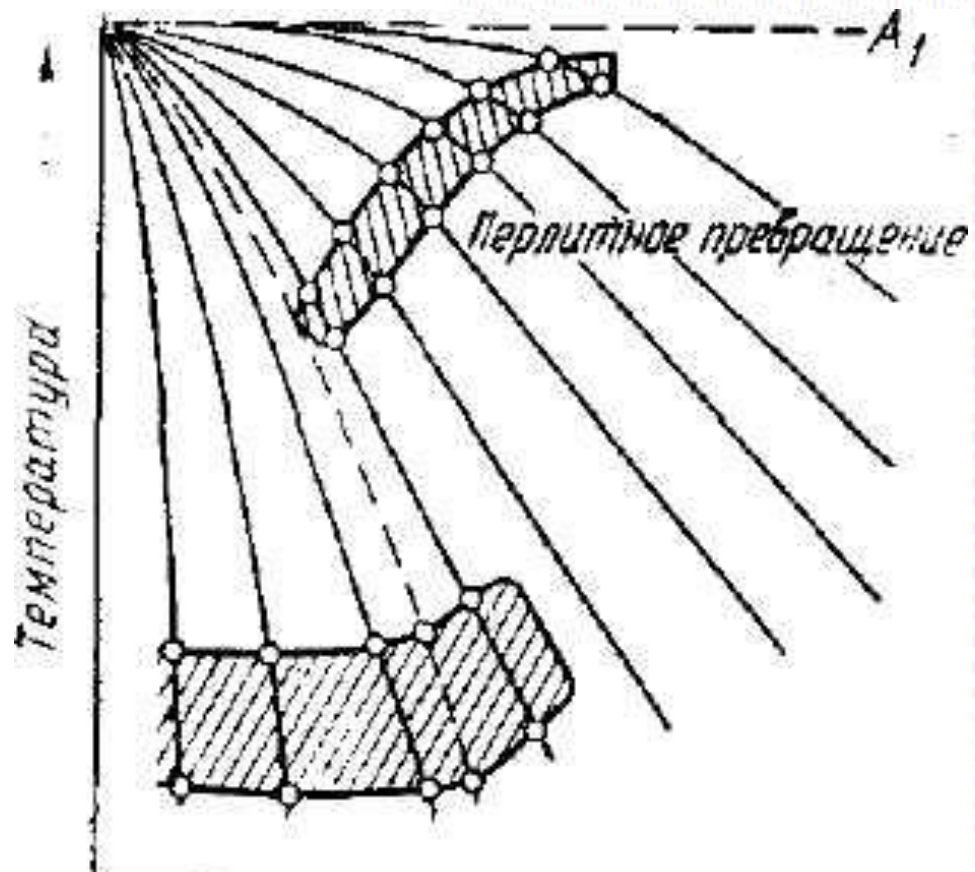




Термокинетические диаграммы превращения переохлажденного аустенита:

а) эвтектоидная сталь; б) доэвтектоидная легированная сталь, содержащая 0,39 % С, 1 % Сг, 0,15 % Мо. Тонкие линии на рис. а соответствуют диаграмме изотермического превращения переохлажденного аустенита





**Анизотермическая диаграмма превращения аустенита (схема)**



## Влияние скорости охлаждения на температуру и характер превращения аустенита

№	Скорость охлаждения, °C/с	Способ охлаждения	Температурный интервал распада аустенита, °C	Структура	Твердость, НВ
1	0,1	С печью	715-710	П крупнопластинчатый	170-180
2	1-2	На воздухе	680-670	П мелкопластинчатый	220-240
3	10-30	В струе воздуха	650-630	С(сорбит)	250-300
4	40-60	В горячей воде (~60°C)	600-570	Т(троостит)	350-400
5	100-150	В масле	650-500	Т	500-550
			220-80	М	
6	>300	В воде (~200°C)	220-80	М+А <sub>ост</sub>	600-650

