



# Матеріалознавство

«ПРЕВРАЩЕННЯ В СТАЛІ ПРИ НАГРЕВІ. ДІАГРАММА ІЗОТЕРМІЧЕСКОГО РАСПАДА АУСТЕНИТА»

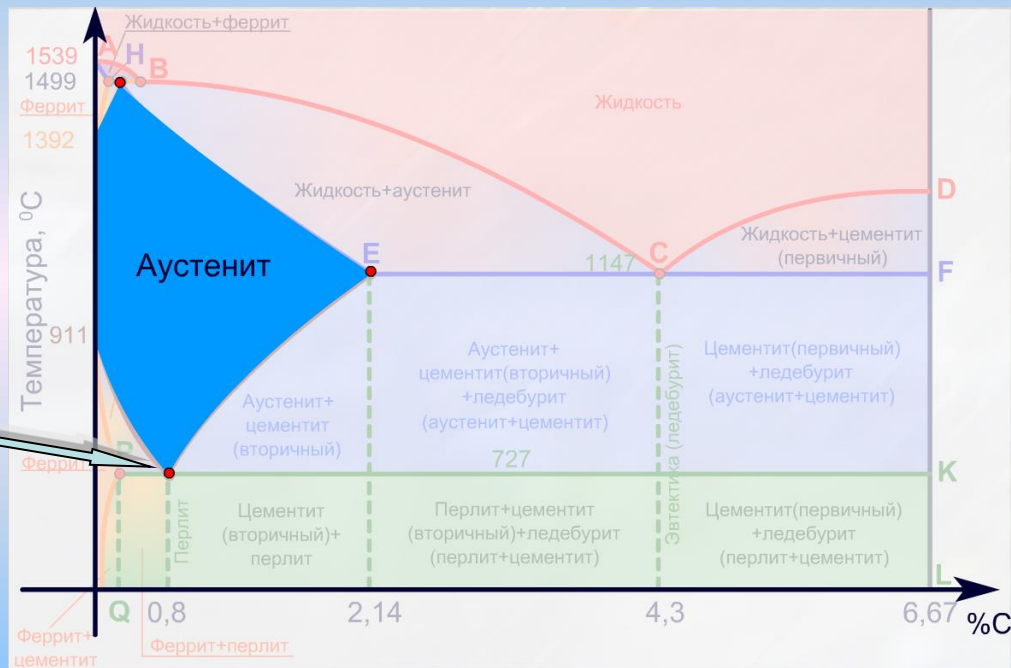
# План

1. Превращения в стали при нагреве
2. Особенности перлитного превращения
3. Превращение аустенита в бейнит (промежуточное).
4. Мартенситное превращение
5. Изотермическое превращение аустенита в легированных сталях
6. Превращение аустенита при непрерывном охлаждении

# Преобразования в сталях при нагреве

Как следует из диаграммы состояния железо-цементит, при нагреве стали перлит превращается в аустенит при температуре критической точки  $A_{c1}$  (линия PSK, температура  $727\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

В действительности превращение перлита в аустенит не может происходить при  $727\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



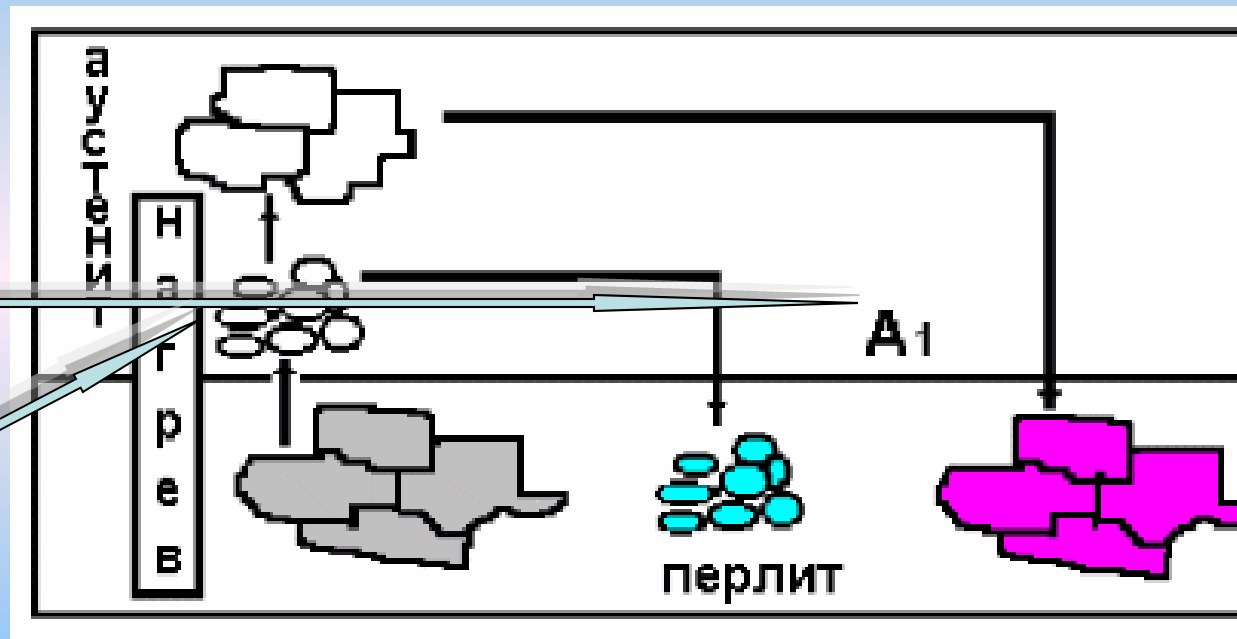
Для превращения перлита в аустенит температура нагрева должна быть обязательно немного выше равновесной температуры  $727\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Образующийся при нагреве аустенит химически неоднороден. Превращение  $\alpha \rightarrow \gamma$  протекает быстрее, чем растворение цементита. После растворения всего цементита превращение заканчивается.

# Превращения в стали при нагреве

На скорость превращения перлита в аустенит влияют такие факторы как дисперсность перлита, скорость нагрева, форма цементита (пластинчатая или зернистая) и др.

Зёрна аустенита, образующиеся при нагреве стали выше критической точки  $A_{c1}$ , получают мелкими (начальное зерно аустенита).

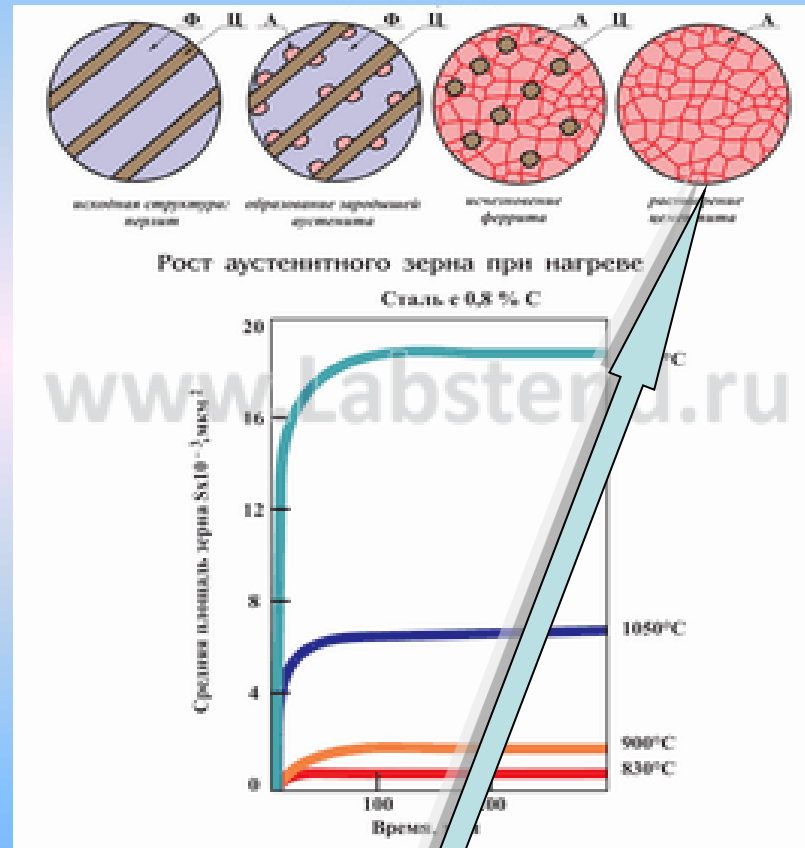


При дальнейшем повышении температуры нагрева или длительности выдержки при данной температуре происходит рост зерна аустенита.

# Преобразования в сталях при нагреве

В интервале межкритических температур  $A_1$ – $A_3$  в доэвтектоидной стали присутствуют феррит и аустенит, в заэвтектоидной – аустенит и цементит вторичный.

Нагрев выше линии GSE (геометрическое место точек  $A_{c3}$ ) приводит к тому, что происходит превращение феррита в аустенит (в доэвтектоидной стали), а цементит вторичный полностью растворяется в аустените (для заэвтектоидной стали).



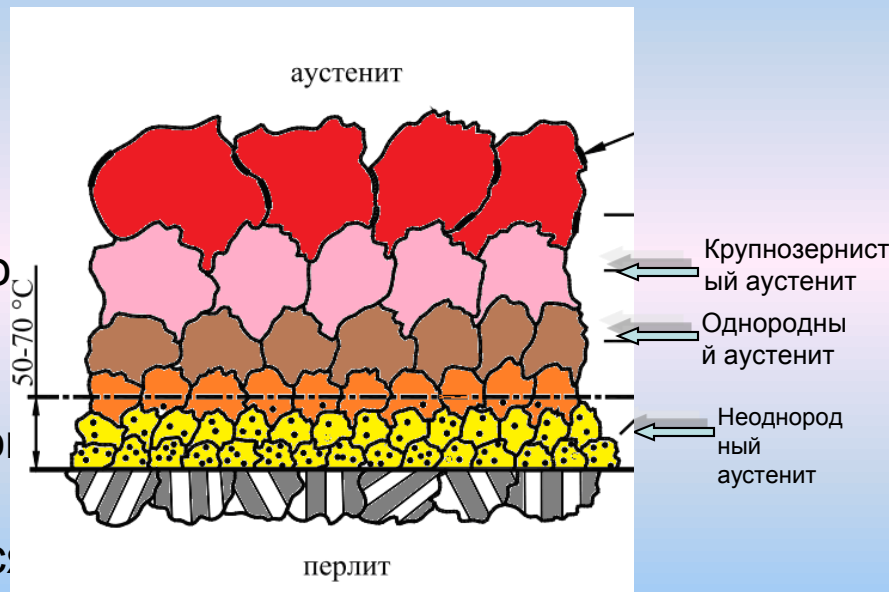
И таким образом присутствует одна структурная составляющая (или фаза) – аустенит.

# Преобразования в сталях при нагреве

Склонность к росту зерна с повышением температуры у сталей различна. Под наследственной зернистостью понимают склонность аустенитного зерна к росту при повышении температуры

По склонности к росту зерна различают стали наследственно мелкозернистые и наследственно крупнозернистые.

В наследственно мелкозернистой стали при нагреве до 950–1000 °С зерно увеличивается незначительно, но при более высокой температуре нагрева начинается существенное увеличение размера зерна.



Преобразование перлита  $\rightleftharpoons$  аустенит при нагреве эвтектоидной стали

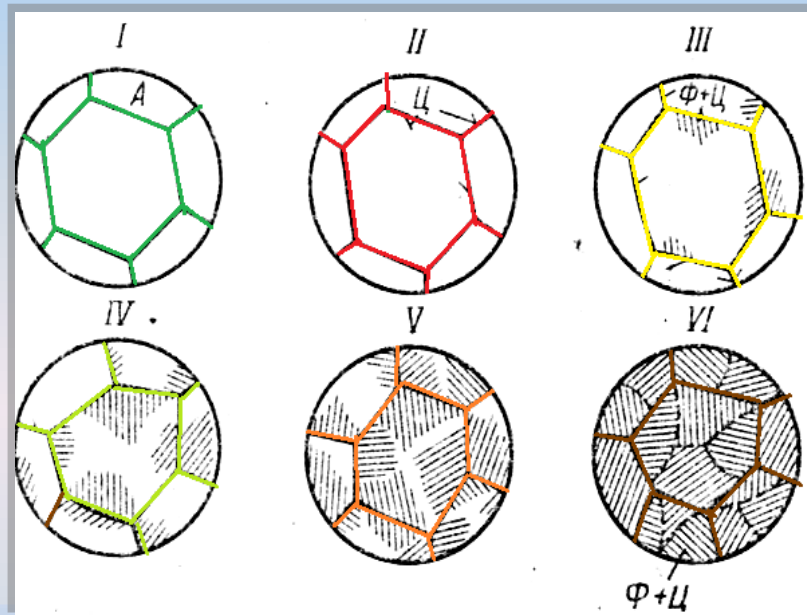
Наследственно мелкозернистыми являются стали, раскисленные в процессе плавки алюминием, образующим устойчивые дисперсные частицы  $AlN$ , которые, располагаясь по границам зерен, препятствуют росту зерна при нагреве.

В наследственно крупнозернистой стали уже при небольшом нагреве выше  $A_{c3}$  происходит очень сильный рост зерна. В заэвтектоидных сталях рост зерна аустенита может сдерживаться нерастворившимися карбидными частицами.

## ДИАГРАММА ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО РАСПАДА АУСТЕНИТА

Рассмотрим структурные превращения при охлаждении стали на примере эвтектоидной стали, у которой критические точки  $A_1$  и  $A_3$  совпадают.

При охлаждении аустенита ниже температуры  $727^\circ\text{C}$  происходит распад последнего на феррит, почти не содержащий углерода, и цементит, содержащий  $6,67\%$  углерода. Этот процесс сопровождается диффузионным перераспределением углерода.



Поэтому рядом с цементитными пластинами всегда образуются пластины феррита. Процесс роста пластин продолжается до столкновения перлитных зерен.

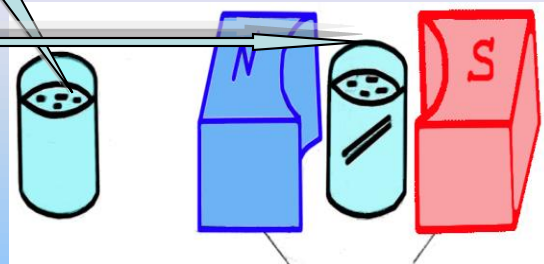
Перед распадом аустенита углерод диффундирует внутри аустенита и скапливается в определенных местах на границе зерна аустенита и образованием зародышей цементита. Рост зародышей цементита происходит за счет диффузии углерода из прилегающих областей аустенита, что приводит к обеднению углеродом и способствует превращению в феррит.

О характере структур, формирующихся в условиях изотермического распада аустенита, можно судить по диаграммам изотермического распада (С-образным диаграммам).

## ДИАГРАММА ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО РАСПАДА АУСТЕНИТА

Строят С-образную диаграмму с помощью прибора анизометра Акулова, работа которого основана на магнитном принципе

Образец размещают в печи, температура которой выше  $727^{\circ}\text{C}$ , затем переносят в изотермическую ванну, температура которой немного ниже  $727^{\circ}\text{C}$  (например,  $700^{\circ}\text{C}$ ), и выдерживают при этой температуре до полного распада аустенита.



Анизометр Акулова

Так как аустенит парамагнитный и магнитные свойства его не фиксируются, то как только начинается распад аустенита с образованием первых порций феррита, который является ферромагнетиком,

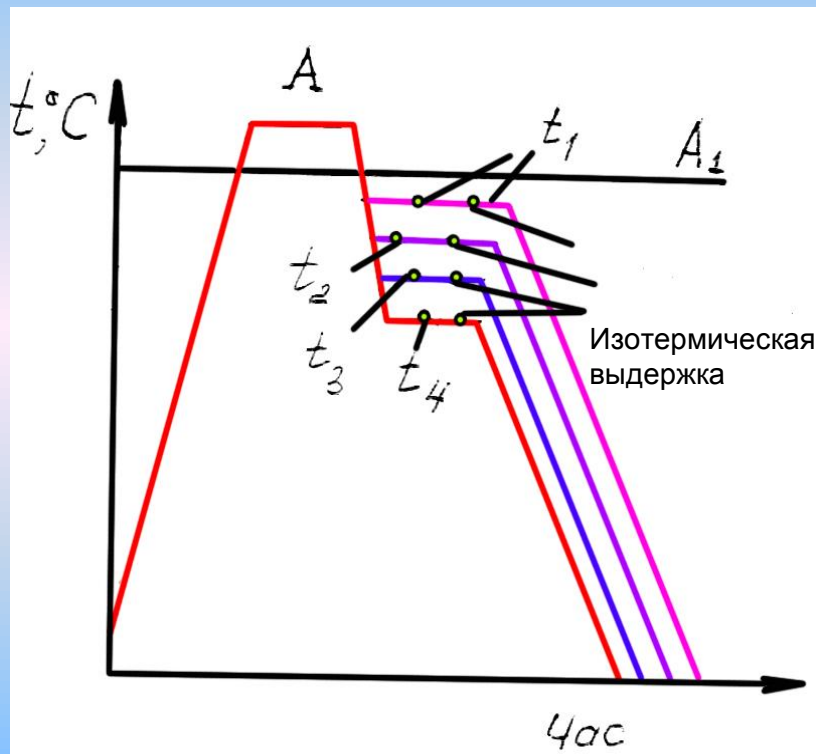
анизометр сразу же регистрирует это превращение



## ДИАГРАММА ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО РАСПАДА АУСТЕНИТА

изотермические выдержки проводят при температурах 700 °С, 600 °С, 550 °С, 400 °С и др. Приведены такие кинетические кривые распада аустенита при температурах 550 и 700 °С.

На основании экспериментальных данных строятся кинетические кривые распада аустенита при разных температурах изотермической выдержки в диапазоне температур 727–240 °.



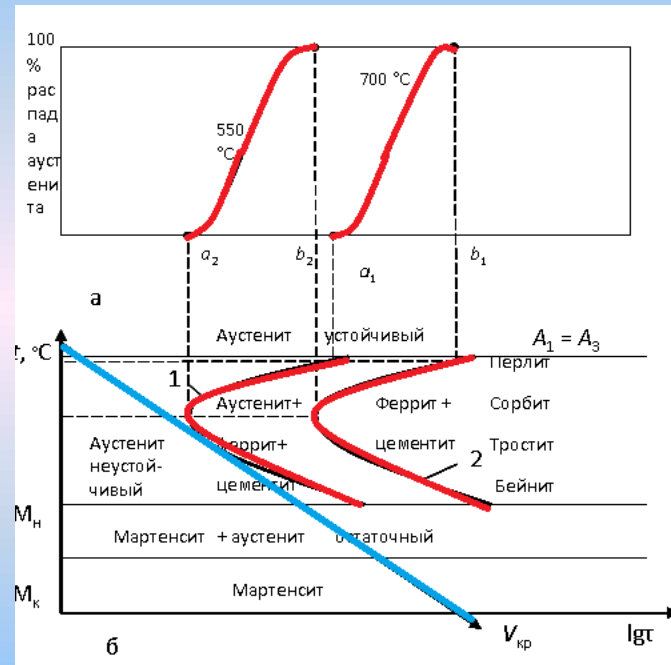
Если охладить аустенит ниже 727 °С, то его распад происходит не сразу, какое-то время он ещё существует и, в отличие от аустенита устойчивого или равновесного, существующего при температуре выше 727 °С, называется аустенитом неустойчивым.

Время до начала распада аустенита называется инкубационным периодом.

# ДИАГРАММА ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО РАСПАДА АУСТЕНИТА

На основе кинетических кривых распада аустенита строится диаграмма изотермического распада аустенита в координатах температура – lg времени

Кривые на диаграмме имеют вид буквы С, поэтому их называют С-образными кривыми. Кривая 1 характеризует начало распада аустенита на феррито-цементитную смесь. Область, лежащая левее кривой начала распада аустенита, определяет область инкубационного периода. Кривая 2 отвечает концу распада аустенита.



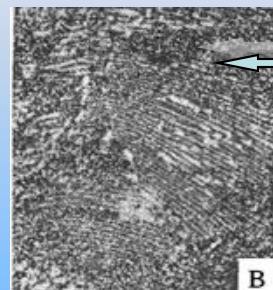
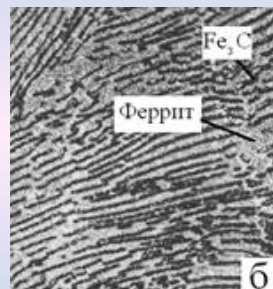
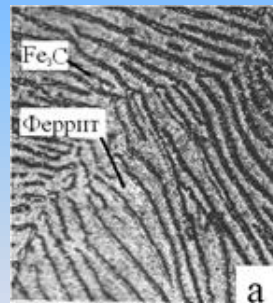
Перлитное превращение переохлажденного аустенита протекает при температуре  $Ar_1 - 500^{\circ}C$ . В процессе превращения происходит полиморфное превращение  $\gamma \rightarrow \alpha$  и диффузионное перераспределение углерода в аустените, что приводит к образованию феррито-цементитной структуры:  $A \rightarrow \Phi + Fe_3C$

Свойства и строение продуктов превращения аустенита зависят от температуры, при которой происходит распад.

## ПЕРЛИТНОЕ ПРЕВРАЩЕНИЕ

Свойства и строение продуктов превращения аустенита зависят от температуры, при которой происходит распад.

Выше изгиба С-кривых при распаде аустенита образуются структуры перлитного семейства, имеющие пластинчатое строение и отличающиеся дисперсностью (толщиной цементитных частиц и расстоянием между ними).



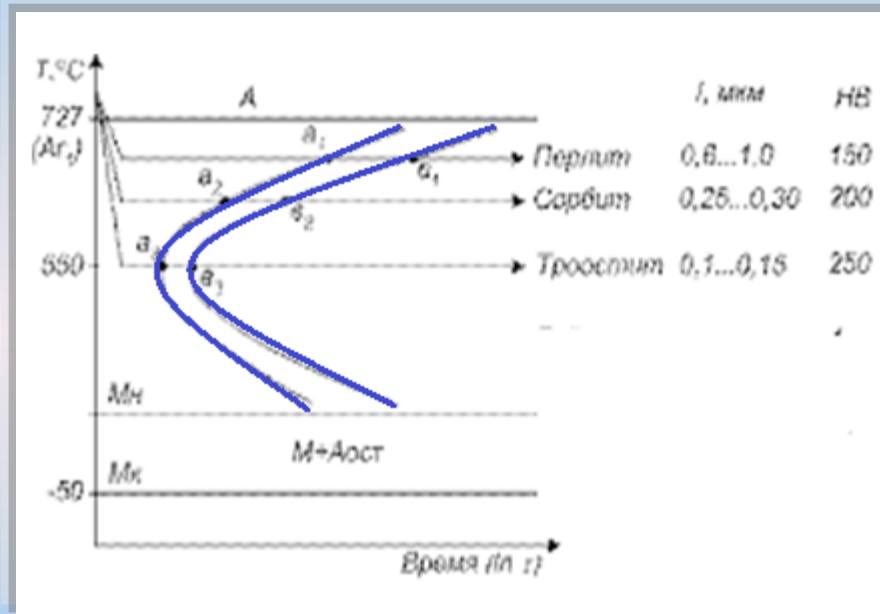
Перлит образуется при распаде аустенита при малых степенях переохлаждения (до температур около 700С). Твердость перлита НВ 180-250,  $l_0 = 0,6-1,0$  мкм. При переохлаждениях до 650С образуется мелкая феррито-карбидная смесь, которая называется сорбит. Твердость сорбита НВ 250-330,  $l_0 = 0,25-0,3$  мкм. При охлаждении аустенита до 550С образуется еще более мелкая феррито-карбидная смесь – троостит. Твердость троостита НВ 330-400,  $l_0 = 0,1-0,15$  мкм. Сорбит и троостит называют квазиэвтектоидами, а перлит – эвтектоидом.

С увеличением степени дисперсности структуры твёрдость и прочность возрастают, а пластичность и ударная вязкость уменьшаются.

# ПЕРЛИТНОЕ ПРЕВРАЩЕНИЕ

Процесс распада аустенита на феррито-цементитную смесь является диффузионным.

При перлитном превращении происходит перераспределение углерода: образуются пластинки феррита, содержащие 0,006 % углерода, и пластинки цементита, содержащие 6,67 % углерода.



Для образования цементита необходимо перемещение атомов углерода на расстояние, значительно превышающее межатомные, так как среднее содержание углерода в твердом растворе до превращения гораздо меньше, чем в цементите.

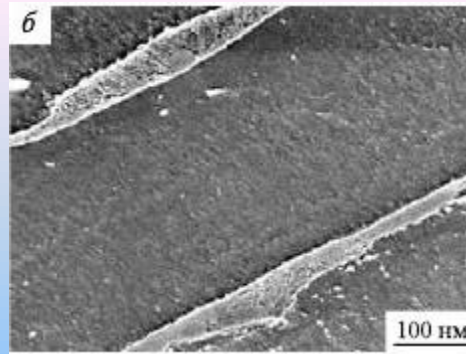
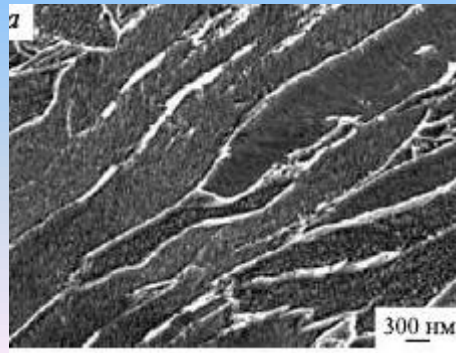
Ниже температуры, соответствующей минимальной устойчивости аустенита, происходит бейнитное превращение.

# БЕЙНИТНОЕ ПРЕВРАЩЕНИЕ

При изотермической выдержке в интервале температур от изгиба С-кривой (5500С) до точки МН образуется бейнит, а превращение называется бейнитным или промежуточным.

## Бейнит

представляет собой структуру, состоящую из  $\alpha$ -твердого раствора, претерпевшего мартенситное превращение и несколько пересыщенное углеродом, и частиц карбидов. Различают структуру верхнего и нижнего бейнита.



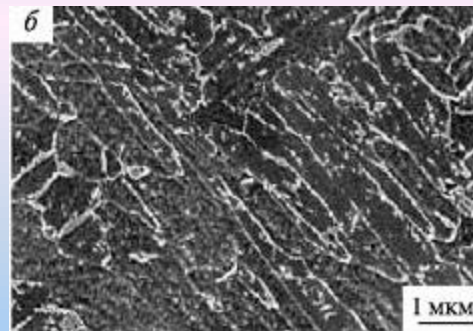
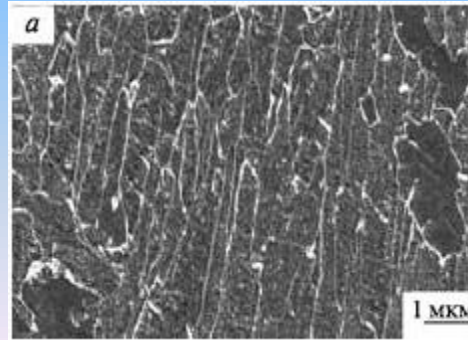
Микроструктура верхнего (а) и вырожденного верхнего бейнитита

Частицы карбидов выделяются не в виде пластинок, как в перлите, а в виде изолированных узких частиц. Верхний бейнит образуется в области температур 550-3500С, имеет «перистый» вид (типа резаной соломы).

## БЕЙНИТНОЕ ПРЕВРАЩЕНИЕ

Нижний бейнит образуется при температурах ниже  $350^{\circ}\text{C}$  и имеет игольчатое (пластинчатое) строение. Карбиды в нижнем бейните располагаются в пластинках  $\alpha$ -фазы.

Отличие механизмов образования верхнего и нижнего бейнита в том, что в области образования верхнего бейнита вначале происходит перераспределение углерода и выделение карбидов происходит из аустенита. При образовании нижнего бейнита более значительно пересыщение  $\alpha$ -фазы, поэтому карбиды выделяются из  $\alpha$ -фазы.



Микроструктура нижнего бейнита (а) и вырожденного бейнита (б)

Механические свойства бейнита. Верхний бейнит снижает пластичность стали по сравнению с сорбитом и трооститом. Твердость и прочность при этом практически не меняется. Это обусловлено выделением достаточно грубых карбидов по границам ферритных зерен.

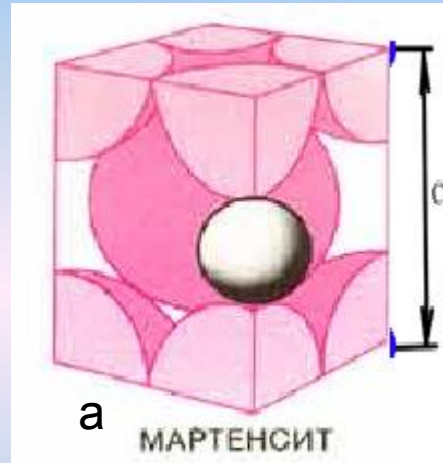
Нижний бейнит имеет более высокую твердость и прочность по сравнению с трооститом и сорбитом при сохранении высокой пластичности. Это связано с наличием внедренных атомов углерода и большей плотностью дислокаций в  $\alpha$ -фазе, а также с образованием включений дисперсных карбидов в  $\alpha$ -кристаллах



# МАРТЕНСИТНОЕ ПРЕВРАЩЕНИЕ

Мартенсит – это упорядоченный пересыщенный твердый раствор внедрения углерода в  $\alpha$ -железе. Если в равновесном состоянии растворимость углерода в  $\alpha$ -железе не превышает 0,002 %, то его содержание в мартенсите может достигать 2,14 %, т.е. как в исходном аустените.

Мартенсит имеет тетрагональную решетку, в которой один период “с” больше другого “а”. При увеличении содержания углерода высота тетрагональной призмы “с” увеличивается, а размеры ее основания уменьшаются. Атомы углерода занимают октаэдрические поры вдоль  $C/a > 1$



Мартенситное превращение происходит только в том случае, когда быстрым охлаждением аустенит переохлажден до низких температур, при которых диффузионные процессы становятся невозможными. Превращение носит бездиффузионный характер, не сопровождается перераспределением атомов углерода и железа в решетке аустенита.

Рост кристалла мартенсита продолжается, пока не нарушена когерентность его решетки и решетки аустенита.

# МАРТЕНСИТНОЕ ПРЕВРАЩЕНИЕ

Мартенсит разделяют на пластинчатый и реечный.

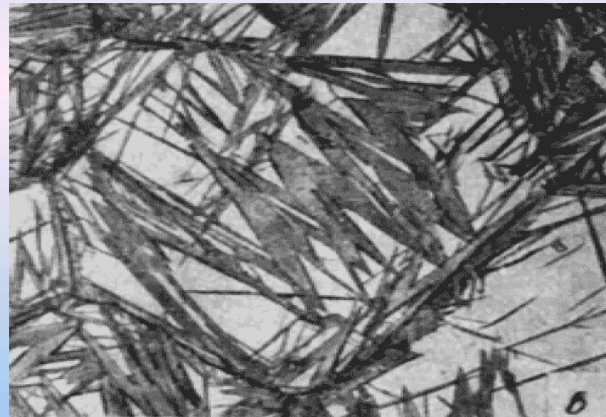
Мартенсит разделяют на пластинчатый и реечный.

Пластинчатый (чаще его называют игольчатым)

наблюдается в закаленных средне- и высокоуглеродистых сталях. Мартенситный кристалл имеет форму тонкой пластины, обычно на шлифе видно сечение пластин в виде игл. Размер пластин мартенсита зависит от размера зерен аустенита



Реечный



пластинчатый

При очень мелком зерне аустенита игольчатое строение неразлично под микроскопом при увеличениях 500-600 крат, такой мартенсит называют безструктурным.

Реечный мартенсит (называют иногда массивным)

наблюдается в закаленных низко- и среднеуглеродистых сталях. Кристаллы имеют вид реек (планок), вытянутых в одном направлении. Эти рейки объединяются в пакеты.

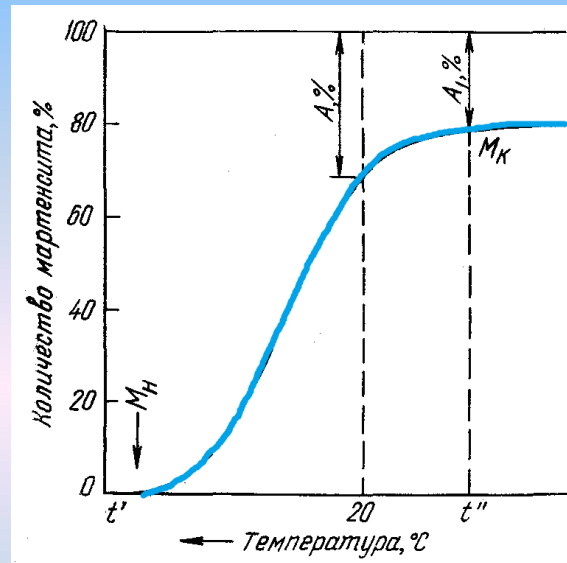
В одном зерне аустенита может быть несколько таких пакетов.



# МАРТЕНСИТНОЕ ПРЕВРАЩЕНИЕ

## Температура начала и конца мартенситного превращения.

Их зависимость от концентрации углерода. Количество образовавшегося мартенсита зависит от температуры, до которой охлажден образец — мартенситная кривая.



Мартенситная кривая

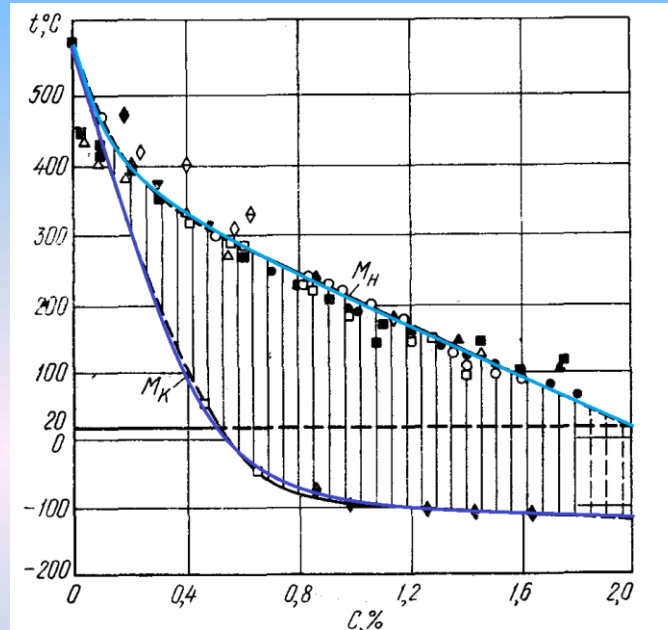
Чтобы мартенситное превращение развивалось, необходимо непрерывно охлаждать образец, в отличие от перлитного превращения, которое может проходить при постоянной температуре (в изотермических условиях). Количество мартенсита возрастает в результате образования все новых и новых кристаллов, а не в следствие роста уже возникших кристаллов.

Поэтому у мартенситного превращения есть еще одна точка —  $M_K$  температура окончания мартенситного превращения

# МАРТЕНСИТНОЕ ПРЕВРАЩЕНИЕ

Положение точек  $M_H$  и  $M_K$  не зависит от скорости охлаждения и обусловлено химическим составом аустенита.

Чем больше в аустените углерода, тем ниже температура этих точек. Все легирующие элементы, растворенные в аустените, за исключением кобальта и алюминия, понижают точки  $M_H$  и  $M_K$ .



Температура начала и конца мартенситного превращения в зависимости от содержания углерода

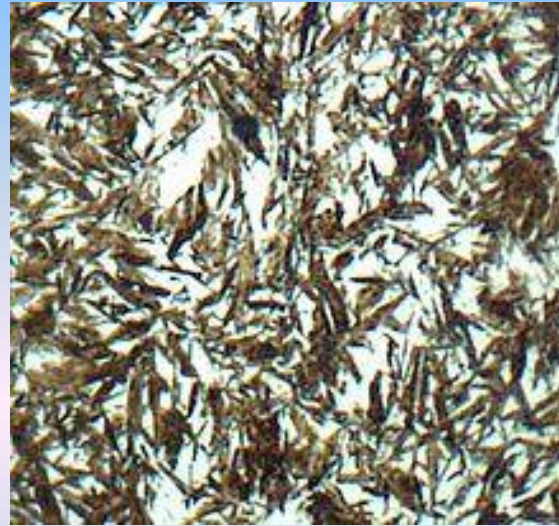
В закаленных сталях, имеющих точку  $M_K$  ниже  $200^\circ C$ , а именно в углеродистых сталях, содержащих более 0,4-0,5 % углерода, присутствует остаточный аустенит. Его количество тем больше, чем ниже температуры точек  $M_H$  и  $M_K$ , т.е. чем выше содержание в аустените углерода и легирующих элементов за исключением  $Co$  и  $Al$ .

Если задержать на некоторое время охлаждение при температуре ниже  $M_H$ , то непревращенный аустенит становится более устойчивым. При последующем охлаждении образуется меньше мартенсита. Явление стабилизации объясняют релаксацией напряжений, которые стимулируют мартенситное превращение.

# МАРТЕНСИТНОЕ ПРЕВРАЩЕНИЕ

## ОСОБЕННОСТИ МАРТЕНСИТНОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ:

1. Превращение бездиффузионное.
2. Превращение происходит без инкубационного периода.
3. Превращение происходит в диапазоне температур  $M_n$  и  $M_k$ .
4. Температура начала ( $M_n$ ) и конца ( $M_k$ ) мартенситного превращения зависит не от скорости охлаждения, а от химического состава стали.



Мартенсит

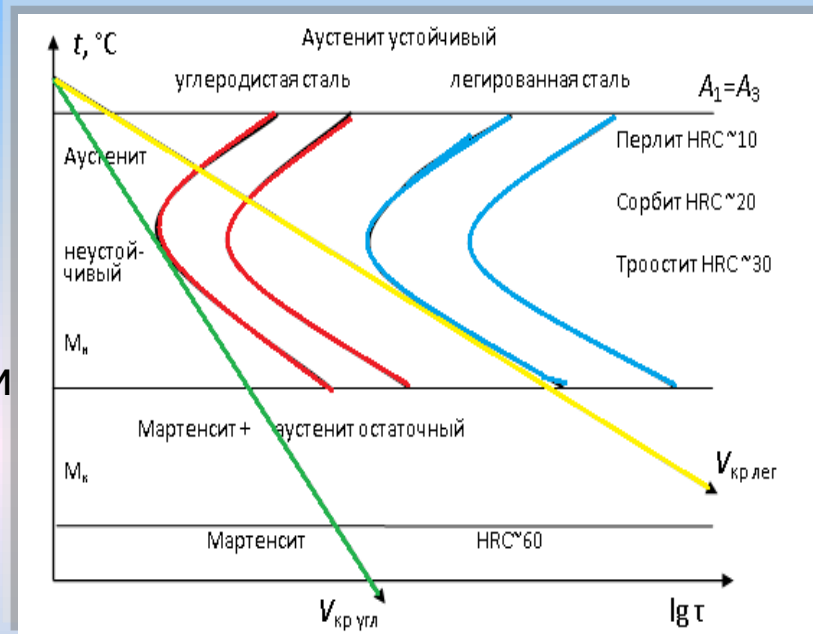
5. Мартенситное превращение отличается большой скоростью протекания, близкой к скорости звука в стали.
6. Большая скорость роста кристаллов мартенсита при относительно низких температурах объясняется тем, что превращение происходит из-за малой величины смещения атомов.
7. Кристаллы мартенсита имеют форму пластин. Их размеры определяются размером исходного зерна аустенита.

Характерным для мартенситного превращения является измельчение блочной структуры, повышение плотности дислокаций, что наряду с образованием пересыщенного углеродом твёрдого раствора обуславливает высокую твёрдость мартенсита (60 HRC).

# МАРТЕНСИТНОЕ ПРЕВРАЩЕНИЕ

## ОСОБЕННОСТИ МАРТЕНСИТНОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ

Все легирующие элементы (за исключением кобальта) увеличивают устойчивость переохлажденного аустенита в области перлитного и бейнитного превращений и сдвигают вправо в сторону большего времени выдержки кривые начала и конца распада.



В области температур бейнитного превращения возможна лишь диффузия углерода, и не возможна диффузия легирующих элементов. Поэтому при распаде аустенита образуется  $\alpha$ -раствор и цементит, имеющие то же содержание легирующих элементов, что и исходный аустенит.

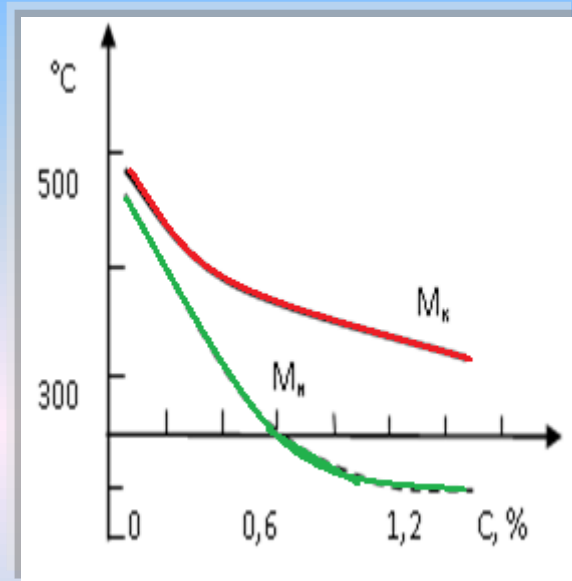
Замедление распада аустенита в перлитной зоне объясняется малой скоростью диффузии углерода в присутствии карбидообразующих легирующих элементов, а также уменьшением скорости полиморфного  $\gamma \rightarrow \alpha$  превращения.

Особенно повышается устойчивость переохлажденного аустенита при одновременном легировании Cr и Ni, Cr и Mo.

# МАРТЕНСИТНОЕ ПРЕВРАЩЕНИЕ

Легирующие элементы существенно влияют на температурный интервал мартенситного превращения.

Большинство легирующих элементов понижают мартенситные точки. В этом же направлении сказывается влияние углерода.



. Влияние содержания углерода на температуру начала (M<sub>n</sub>) и конца (M<sub>к</sub>) мартенситного превращения

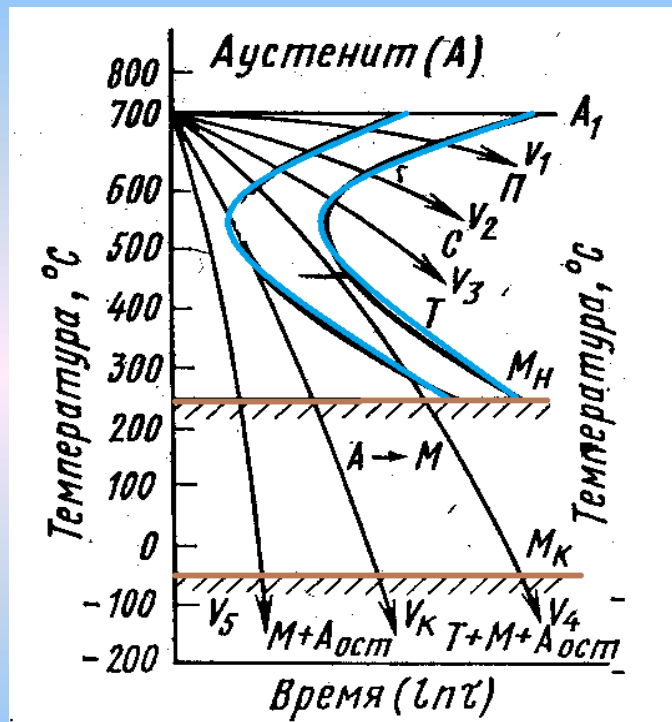
Рассмотрим температуры начала и конца мартенситного превращения в зависимости от содержания углерода.

Как видно из с увеличением количества углерода температуры начала и конца мартенситного превращения смещаются в область более низких температур.

## ПРЕВРАЩЕНИЕ АУСТЕНИТА ПРИ НЕПРЕРЫВНОМ ОХЛАЖДЕНИИ

Чем больше скорость охлаждения и ниже температура распада аустенита, тем дисперснее образующаяся ферритно-цементитная структура.

При небольшой скорости охлаждения  $V_1$  образуется перлит, при большей  $V_2$  – сорбит, при  $V_3$  – троостит. Бейнит при непрерывном охлаждении углеродистой стали обычно не образуется.



При достаточно больших скоростях охлаждения  $V_4$  образуется троостит и мартенсит, либо как при  $V_5$  диффузионный распад аустенита совсем становится невозможным, происходит мартенситное превращение.

Наложение кривых охлаждения на диаграмму изотермического распада аустенита

**При непрерывном охлаждении всегда в структуре стали наряду с мартенситом присутствует**

НА САМОСТОЯТЕЛЬНУЮ РАБОТУ ВЫНОСИТСЯ

1. Сравнить свойства структур с разной дисперсностью: аустенит, перлит, мартенсит, бейнит, сорбит, тростит.

# Литература

Гладкий И.П. Технология конструкционных материалов и материаловедение /И.П. Гладкий,В.И.Мощенок,В.П.Тарабанова - Х.:ХНАДУ,2014.-576с.

Лахтин Ю.М. Материаловедение: учебн. для машиностроительных вузов/Ю.М.Лахтин,В.П.Леонтьева.-М.:Машиностроение,1990.-528с.

<http://dl.khadi.kharkiv.edu/course/view>.    Логин: glushkova639





# Кафедра технології металів і матеріалознавства

E-mail [diana.borisovna@gmail.com](mailto:diana.borisovna@gmail.com)

**Автор: доц. Глушкова Д.Б.  
Lect7\_1M\_TKMIM\_GDB\_17.03.15**