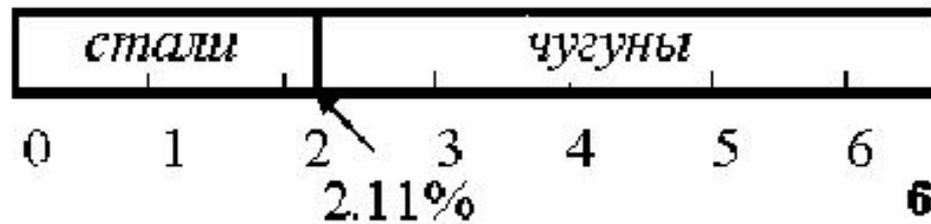
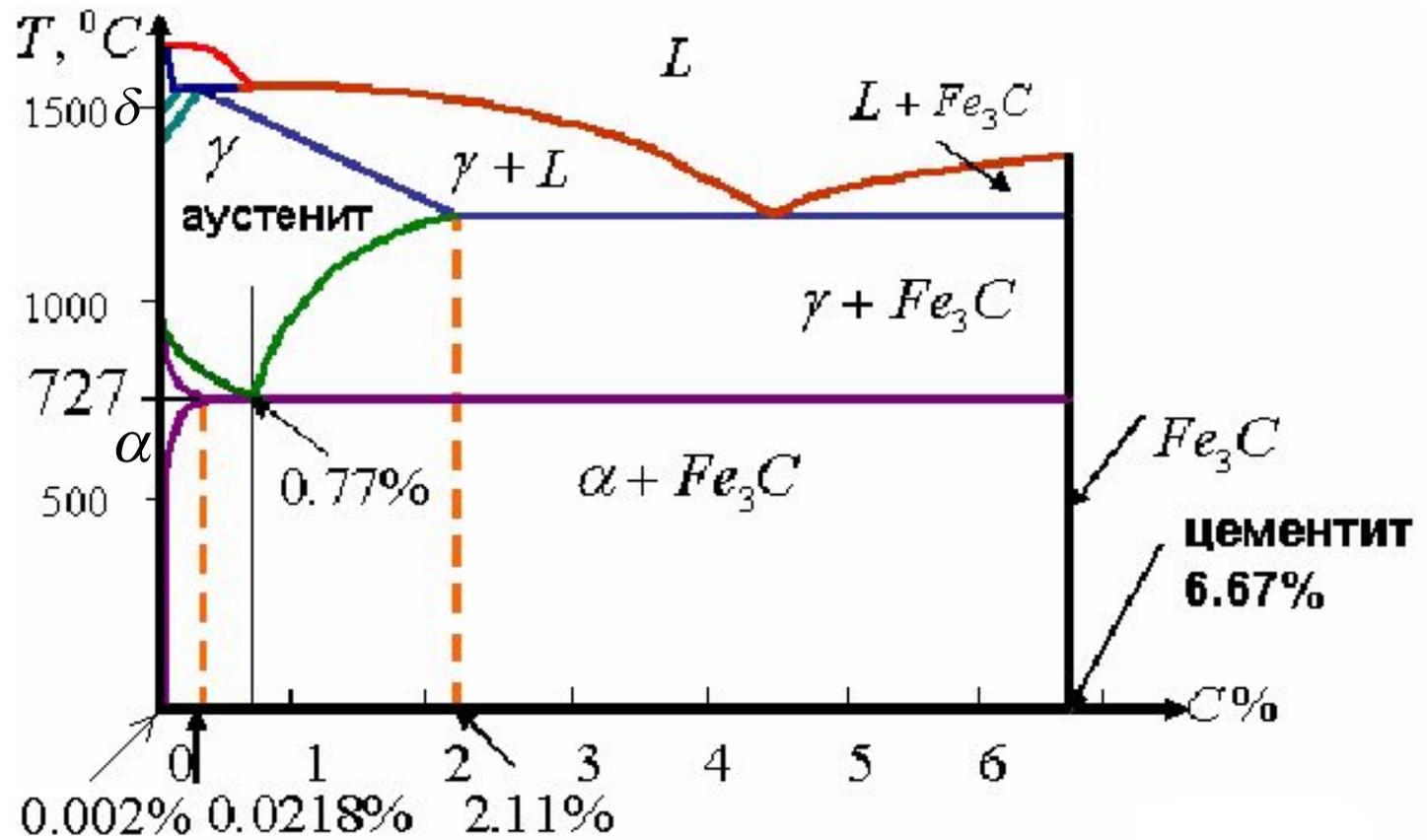


Фазовые диаграммы бинарных систем с полиморфными превращениями на примере фазовой диаграммы системы железо-цементит  $Fe - Fe_3C$ .

Это часть более общей фазовой диаграммы системы железо-углерод с содержанием углерода до 6,67%, которая соответствует сталям (до 2,11%) и чугунам (от 2,11 до 6,67% углерода).



**Фазовая диаграмма системы  $Fe-Fe_3C$  для сталей (до 2,11% C) включает одну перитектическую и одну эвтектоидную реакцию.**

**4 т/т фазы ( $\alpha$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  и  $Fe_3C$ ):**

1. Железо, содержащее малый %C, при охлаждении претерпевает 2 полиморфных превращения. Сразу после затвердевания образуется  $\delta$ -феррит, имеющий ОЦК решетку.

2. При дальнейшем охлаждении образуется ГЦК  $\gamma$ -аустенит.

3. Наконец, при еще более низких температурах – ОЦК  $\alpha$ -феррит.

Эти три фазы являются твердыми растворами внедрения на основе железа с межузельными атомами углерода.

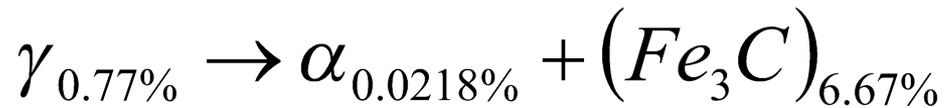
Межатомные поры в ГЦК аустените больше, и он имеет более высокую растворимость углерода - 2.11%. Растворимость углерода в ОЦК-решетках гораздо меньше: 0.09% в  $\alpha$ -феррите и 0.0218 в  $\delta$ -феррите. Твердые растворы относительно мягкие и пластичные, но более прочные, нежели чистое железо (благодаря упрочнению C).

**4. Четвертой фазой** является стехиометрическое соединение карбид железа  $Fe_3C$  (**цементит**). Он образуется, если содержание углерода в стали превосходит предел растворимости.  $Fe_3C$  всегда содержит **6.67%С**. Являясь весьма твердым (хотя и хрупким), **цементит входит в состав всех промышленных сталей.**

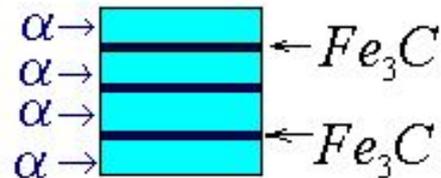
Сталь, содержащую менее 0,02% С, называют техническим железом. Мы более подробно рассмотрим три класса сплавов:

1. До-эвтектоидная сталь (содержат от 0,02 %С до 0.77%С ).
2. Эвтектоидная сталь (содержит точно 0.77%С )
3. За-эвтектоидная сталь (содержит от 0.77%С до 2,11 %С ).

**Эвтектоидная реакция** происходит при фиксированных параметрах: эвтектоидном составе 0.77%С и температуре 727°C: аустенит разлагается на  $\alpha$  -феррит и цементит:



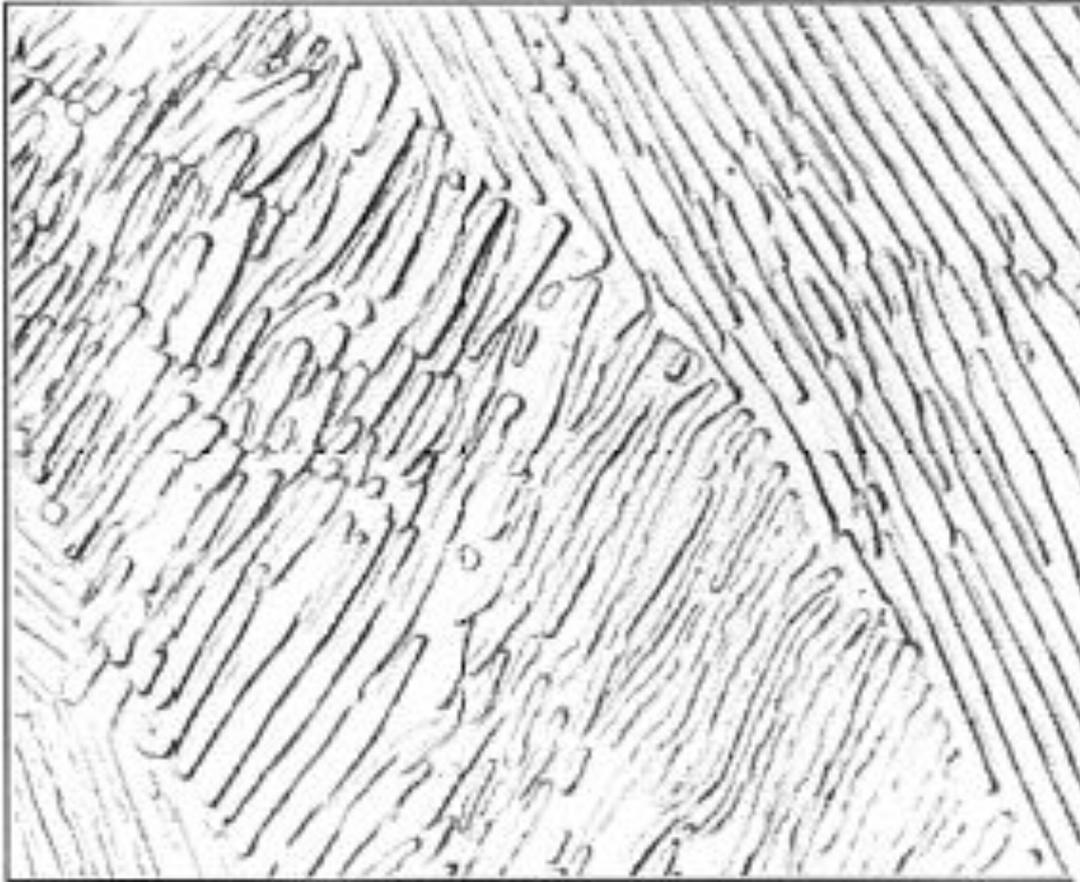
При этом большинство атомов **углерода** диффундирует из **аустенита** в **цементит**, а атомов **железа** - в  $\alpha$  -**феррит**. В результате образуется ламеллярная (пластинчатая) структура, называемая **перлитом**.



**Ламеллы** получаются очень тонкими, поскольку **железо** и **углерод** должны диффундировать через **твердотельный аустенит**. **Перлит** обеспечивает дисперсное упрочнение, поскольку **феррит** мягкий, а **цементит** твердый, хрупкий и мелкодисперсный.

**Перлит** -это ламеллярная структура, состоящая из двух фаз:

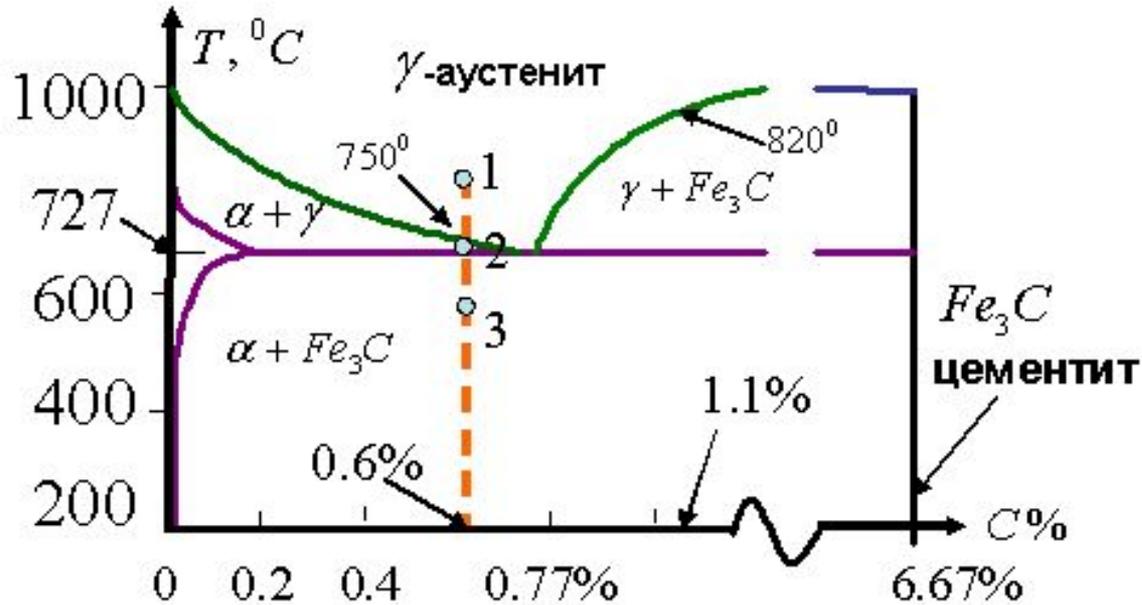
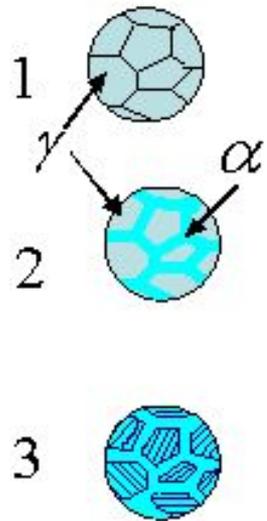
$\alpha$  -феррита и цементита  $Fe_3C$  , которая получается в результате эвтектоидной реакции в системе железо-углерод.



Микрофотография  
перлита при  
увеличении 2000.

*(From ASM Handbook,  
Vol. 7, (1972), ASM  
International, Materials  
Park, OH 44073.)*

# До-эвтектоидная сталь



Рассмотрим **до-эвтектоидную сталь**, содержащую **0.6%С**.

При  **$T > 750^{\circ}\text{C}$**  присутствует только **-аустенит (стадия 1)**.

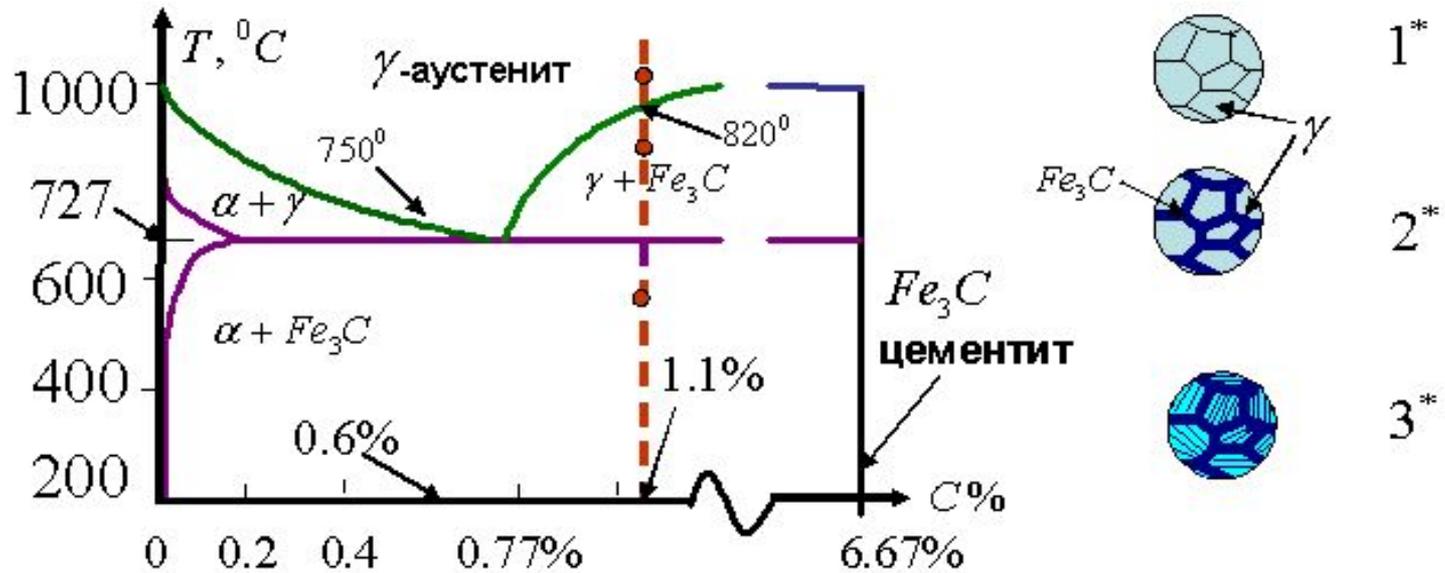
Начиная с  **$750^{\circ}\text{C}$**  на границах зерен аустенита начинает расти  **$\alpha$ -феррит**.

При эвтектоидной температуре  **$727^{\circ}\text{C}$**  остающийся **-аустенит (стадия 2)** имеет эвтектоидный состав **0.77%**.

Охлаждение ниже эвтектоидной температуры  **$727^{\circ}$**  ведет к превращению всего оставшегося  **$\gamma$ -аустенита в перлит** по эвтектоидной реакции (стадия 3).

Конечная структура является прочной благодаря выделениям **перлита** и пластичной благодаря  **$\alpha$ -ферритовой матрице**.

# За-эвтектоидная сталь



Рассмотрим **за-эвтектоидную сталь**, содержащую **1.1%С**.

Ниже **820°C** на границах зерен **-аустенита** образуется **цементит** (стадия 2\*).

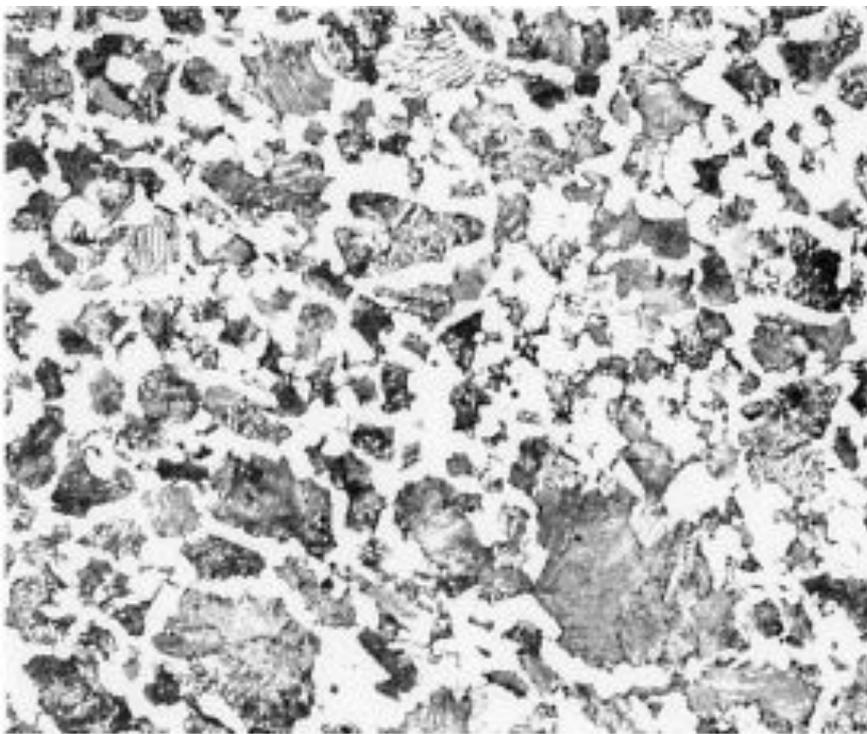
При достижении эвтектоидной температуры весь оставшийся **аустенит** превращается в перлит.

После охлаждения ниже эвтектоидной температуры формируется конечная структура: островки **перлита**, окруженные сетью **цементита**.

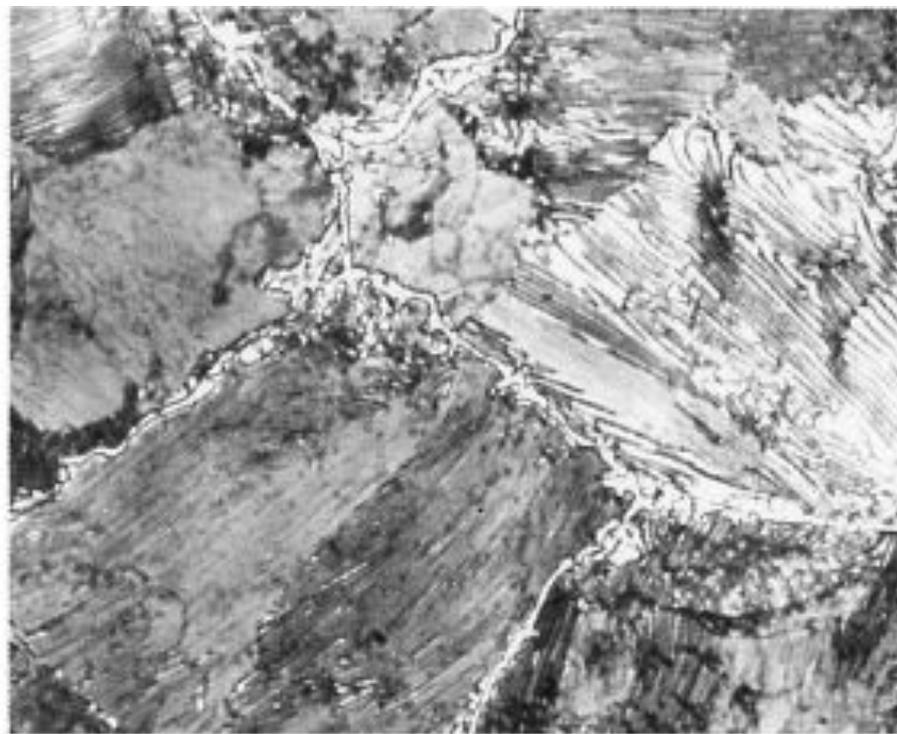
Хрупкий **цементит** окружает прочный **перлит**. Такая сталь является хрупкой, и ее надо улучшать тепловой обработкой.

Микрофотографии (а) до-эвтектоидной и (b) за-эвтектоидной стали при увеличении 400.

***(From ASM Handbook, Vol. 7, (1972), ASM International, Materials Park, OH 44073.)***



**(a)**



**(b)**

## Управление эвтектоидной реакцией

Дисперсное упрочнение в эвтектоидных сплавах может управляться:

1. **Количеством эвтектоида.** Изменяя состав сплава, мы изменяем количество жесткой фазы. При повышении содержания углерода возрастает количество **цементита** и **перлита**, и прочность возрастает. Максимум прочности соответствует содержанию углерода **0.77%**. При дальнейшем повышении содержания углерода прочность начинает падать.

	% C	0.2	0.4	0.6	0.8
<i>предел текучести, МПа</i>		295	353	372	376
<i>предел прочности, МПа</i>		394	519	626	616

2. **Изменением размеров зерна аустенита.** Перлит растет в виде колоний на границах зерен аустенита. Можно увеличить прочность, уменьшая размер зерен или увеличивая число колоний.

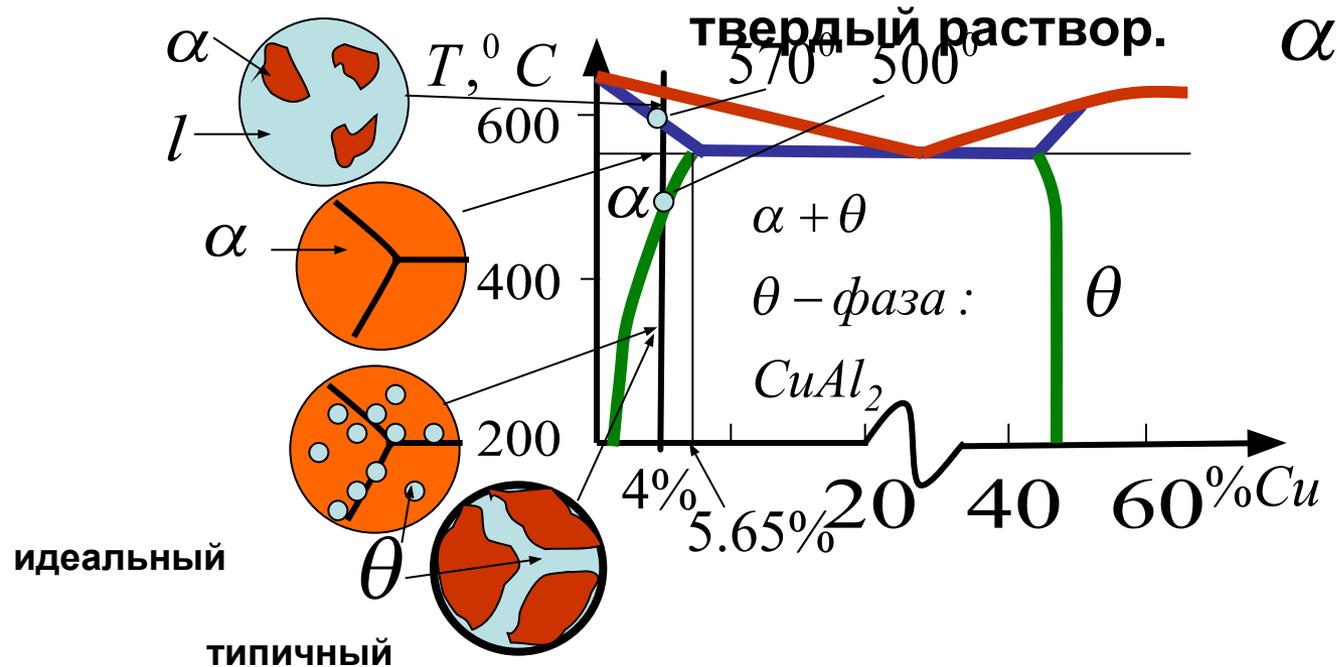
3. **Регулированием скорости охлаждения.** Увеличивая скорость охлаждения, мы уменьшаем расстояние, на которое атомы способны диффундировать. Следовательно, ламеллы будут тонкими и близко расположенными. Тонкопластинчатый перлит более прочен.

# Дисперсное упрочнение, вызванное фазовыми переходами в твердом состоянии и тепловой обработкой

## Сплавы, упрочняемые за пределами границы растворимости

Мы уже упоминали, что сплавы свинца с оловом (Pb-Sn), содержащие от 2% до 19% Sn, могут быть дисперсно-упрочненными выделениями второй фазы вследствие превышения порога растворимости олова в свинце. Другим примером дисперсно-упрочняемых сплавов является Al-Cu при  $< 5.65\% \text{Cu}$ .

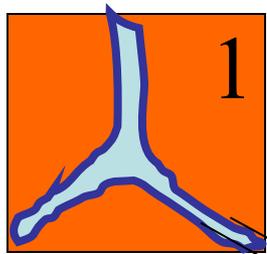
Рассмотрим сплав Al-4%Cu. В интервале температур 500-570°C это



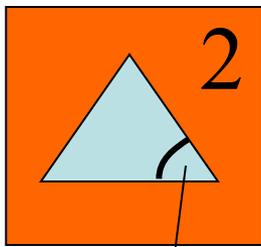
При охлаждении ниже **сольвуса** выделяется 2-ая  $\theta$  фаза – **интерметаллическое соединение**  $\text{CuAl}_2$ , твердое и хрупкое, дающее дисперсное упрочнение.

# Различные формы зерен выделений

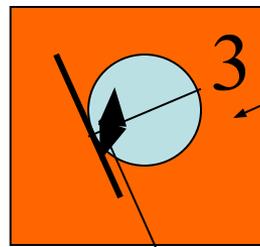
Форма зерен выделений зависит от соотношения энергии взаимодействия между различными зернами в матрице  $\gamma_M$  и межфазной энергии между матрицей и выделениями  $\gamma_P$ . Эти энергии определяют двугранный угол  $\theta$  между границами раздела матрица-выделение:



$$\theta = 0^\circ$$



$$\theta = 60^\circ$$

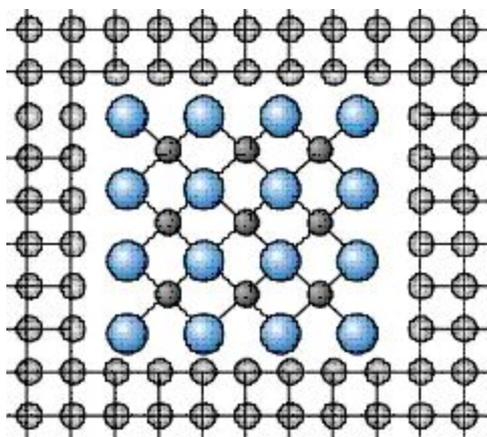


$$\theta = 180^\circ$$

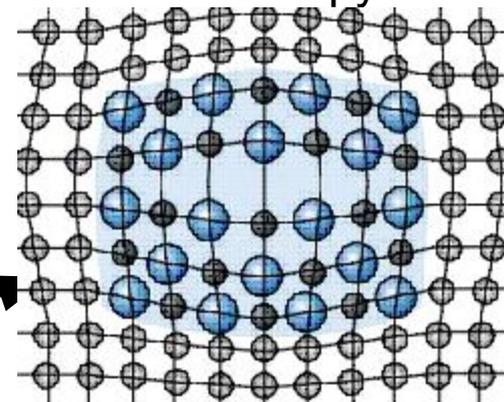
$$\gamma_M \ll \gamma_P$$

$$\cos \frac{\theta}{2} = \frac{\gamma_M}{2\gamma_P}$$

Предпочтительными являются округлые зерна **3**. Острые углы **2** приводят к образованию трещин, а тонкая пленка непрерывных выделений вокруг зерен матрицы **1** делает сплав слишком хрупким



**Некогерентные выделения** имеют другую кристаллическую структуру, чем у матрицы. Они могут блокировать скольжение дислокаций, если они лежат прямо на пути скольжения.



## Когерентные выделения

имеют такую же решетку, как у матрицы. Они создают широко распространенное искажение кристаллической решетки и блокируют дислокации, проходящие рядом.

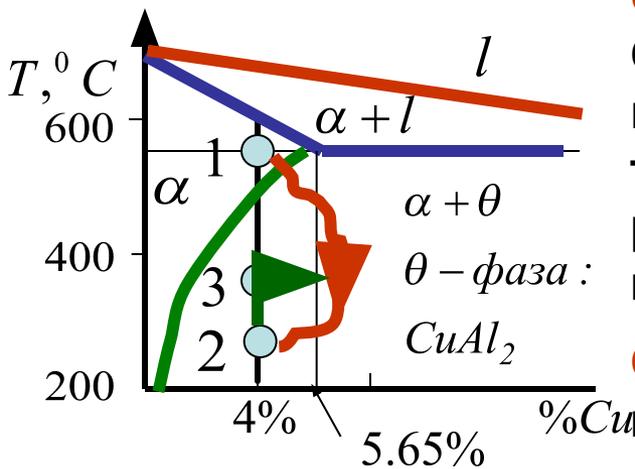
## Старение

Возможно несколько способов управления процессом выделения второй фазы с целью улучшения прочности сплава.

Один из таких способов основывается на **термообработке**; он известен как **упрочнение старением**.

**Упрочнение старением** обеспечивает однородное распределение мелких, твердых и когерентных выделений в мягкой и более пластичной матрице. Одним из примеров упрочняемого при старении сплава является **Al-4%Cu**.

### 3 стадии упрочнения старением.

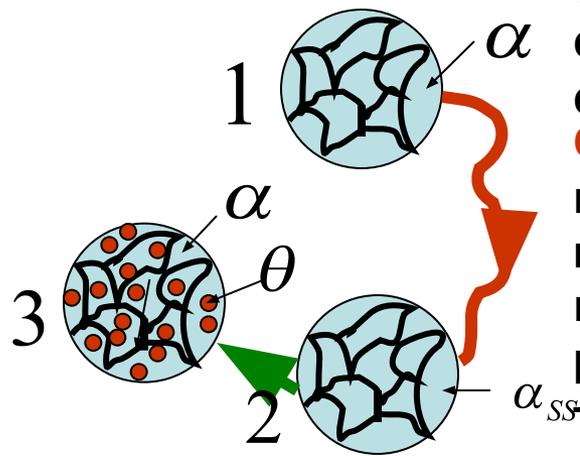


#### СТАДИЯ 1: термообработка твердого раствора.

Сплав нагревают выше **температуры сольвуса** и выдерживают в течение длительного времени, до тех пор, пока не образуется гомогенный твердый раствор  $\alpha$ . Во время этой стадии растворяются имевшиеся  $\theta$ -выделения.

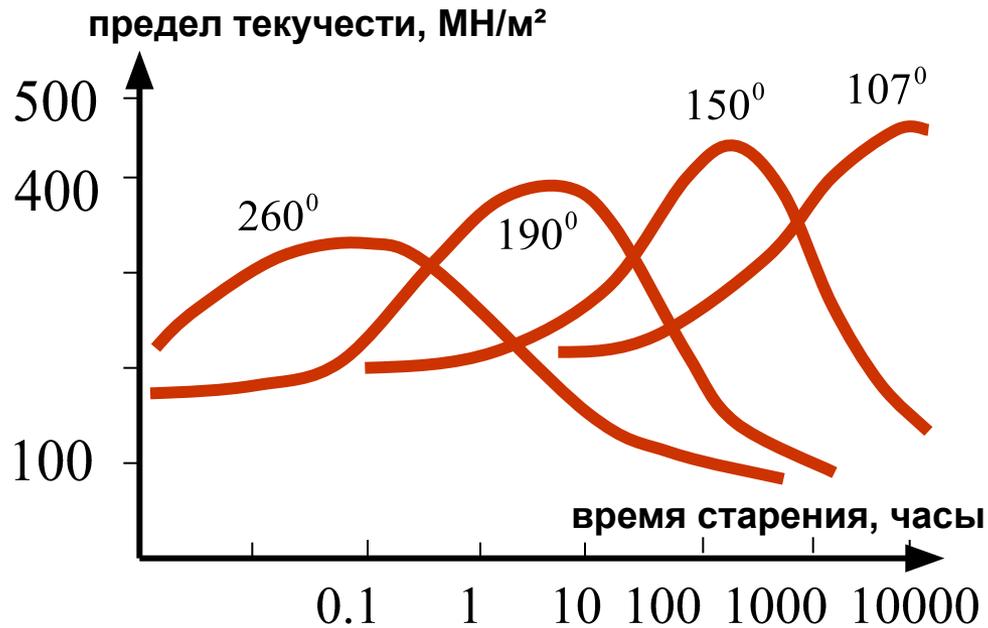
**СТАДИЯ 2: Закалка**, то есть быстрое охлаждение после 1 стадии. Атомы не успевают диффундировать внутрь и образовать зародыши новой фазы, поэтому  $\theta$ -выделения не образуются. После закалки образуется пересыщенный твердый раствор  $\alpha_{SS}$ . Он содержит избыток Cu и является неравновесной структурой.

**СТАДИЯ 3: собственно старение** (длительная выдержка при небольшом нагревании) происходит при нагревании ниже **температуры сольвуса**. Атомы могут диффундировать только на небольшое расстояние. Избыточные атомы Cu пересыщенного твердого раствора  $\alpha_{SS}$  диффундируют к местам нуклеации, и начинается рост выделения.



Если длительное время выдерживать сплав при температуре старения, появится равновесная структура  $\alpha + \theta$ . Однако, она часто является нежелательной, и наивысшая прочность достигается при прекращении старения еще до равновесия.

# Свойства упрочненных старением сплавов зависят от температуры и времени старения



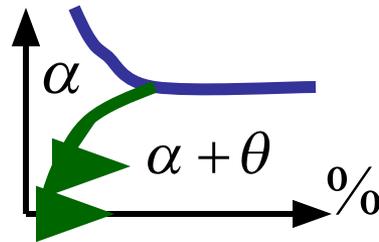
При более высокой температуре (**260°C на рисунке**) диффузия в сплаве **Al-4%Cu** происходит быстро и выделения формируются быстро. При такой температуре прочность достигает максимума при малом времени старения - **0,1 час**, однако ее значение меньше, чем при более низких температурах старения.

Вообще, более низкие температуры более выгодны:

1. Возрастает максимальная прочность;
2. Сплавы сохраняют прочность в течение более долгого времени;
3. Сплавы получаются более однородными.

## Требования для упрочнения старением:

1. На фазовой диаграмме должно быть уменьшение растворимости с понижением температуры: сплав должен иметь одну фазу выше сольвуса и две фазы ниже.



2. Сплав должен быть **закаливаемым** (т.е. он должен обладать способностью образовывать **пересыщенный твердый раствор**). Некоторые сплавы нельзя закалить так быстро, чтобы предотвратить образование выделений.

3. Должны формироваться именно когерентные выделения.

Среди широко известных стареющих сплавов можно выделить: нержавеющую сталь, сплавы на основе **Al**, **Ti**, **Ni**, **Cu**.