

Федеральное агентство по образованию  
Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Кузбасский государственный технический университет»

Драчев В.В.

## **МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

Рекомендовано в качестве учебного пособия  
учебно-методической комиссией специальности  
190701 «Организация перевозок и управление на транспорте  
(Автомобильный транспорт)»

Кемерово 2010

Рецензенты:

Петренко К.П. ст. преп. кафедры «Технология металлов»,  
проф. Воронов Ю.Е. председатель УМК специальности 190701  
«Организация перевозок и управление на транспорте  
(Автомобильный транспорт)»

**Драчев Вячеслав Владиславович.** Материаловедение : учеб. пособие  
[Электронный ресурс] : для студентов очной формы обучения  
специальностей 190701 «Организация перевозок и управление  
на транспорте (Автомобильный транспорт)» и 190702 «Организация и  
безопасность движения» / В.В. Драчев, – Электрон. дан. – Кемерово :  
ГУ КузГТУ, 2010. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM) ; зв. ; цв. ; 12 см.  
– Систем. требования : Pentium IV ; ОЗУ 8 Мб ; Windows 95; (CD-  
ROM-дисковод) ; мышь. - Загл. с экрана.

Материал, рассмотренный в электронном учебном издании,  
представляет сокращённый курс дисциплины «Материаловедение».

Рассмотрены темы:

1. Атомно-кристаллическое строение металлов, теория кристаллизации металлов;
2. Механические свойства металлов и сплавов;
3. Теория сплавов, диаграммы состояния двойных сплавов;
4. Диаграмма состояния железо-цементит, углеродистые стали;
5. Диаграмма состояния железо-графит, чугуны;
6. Теория термической обработки стали;
7. Технология термической обработки стали;
8. Химико-термическая обработка;
9. Легированные конструкционные стали;
10. Инструментальные стали и сплавы;
11. Цветные металлы и сплавы.

Учебное пособие может использоваться в качестве методического  
материала для подготовки к лабораторным работам и экзамену.

**АТОМНО-  
кристаллическое  
строение металлов,  
теория  
кристаллизации  
металлов**

# Кристаллическое строение вещества

Природные кристаллы : кварца-горного хрусталя (а) и топаза (б).



(а)



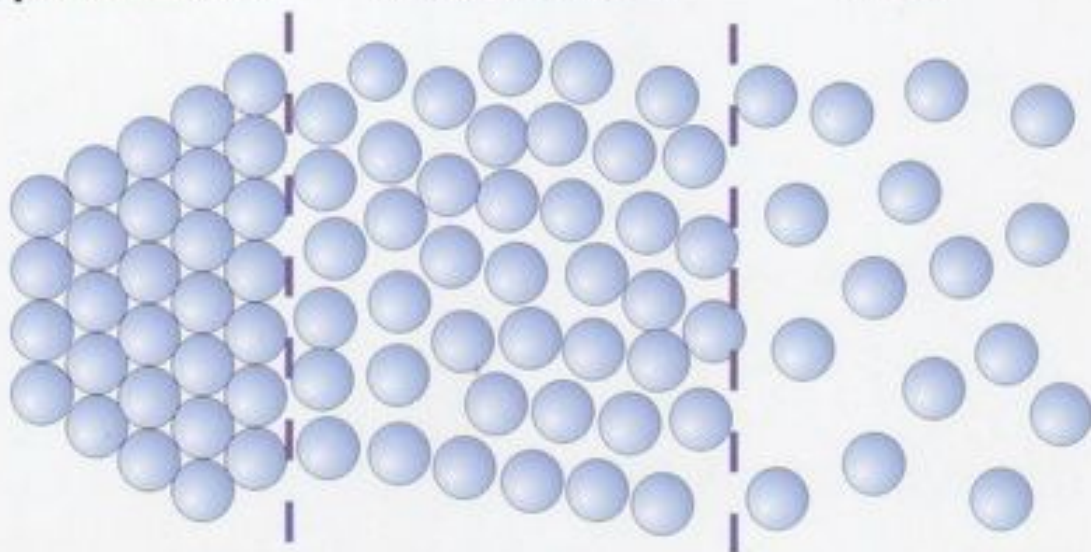
(б)

Схематическая модель расположения частиц в веществе

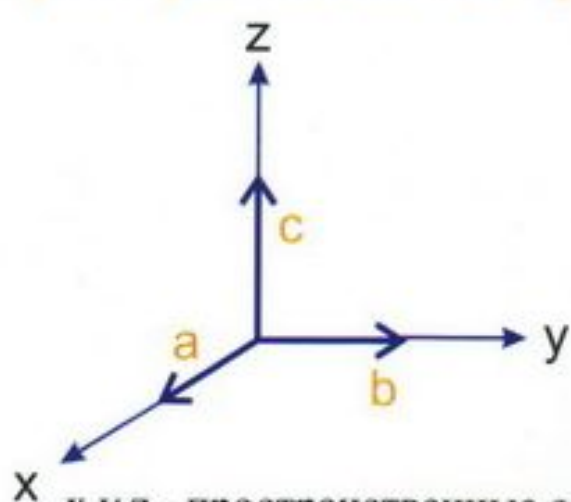
Кристалл

жидкость

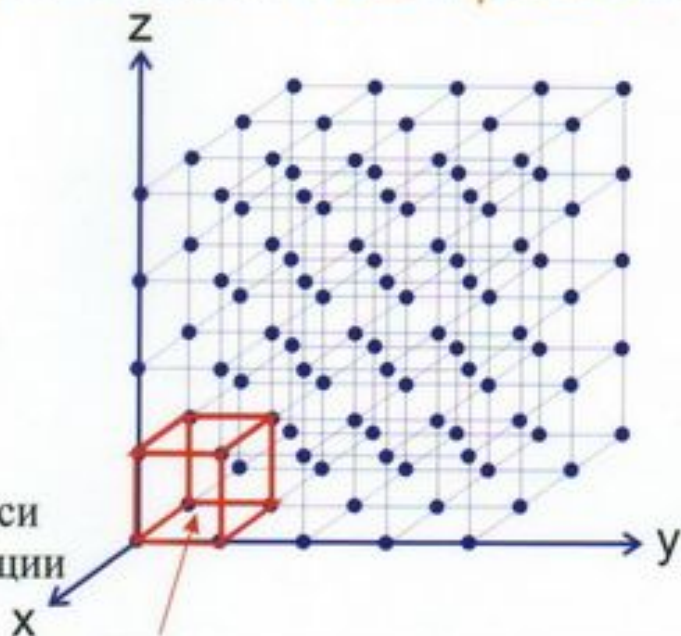
газ



# Пространственно-кристаллическая решетка

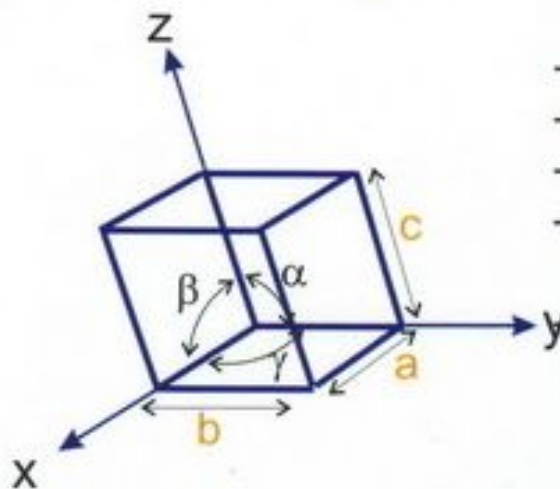


x, y, z - пространственные оси  
a, b, c - кратчайшие трансляции



элементарная кристаллическая ячейка

## Основные характеристики кристаллической решетки



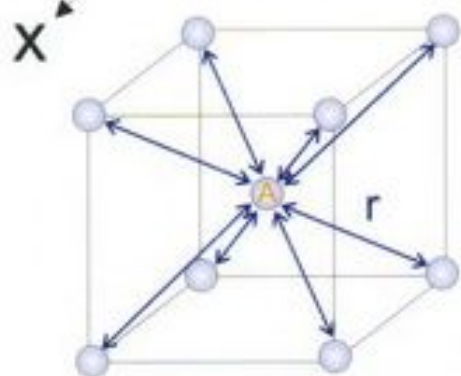
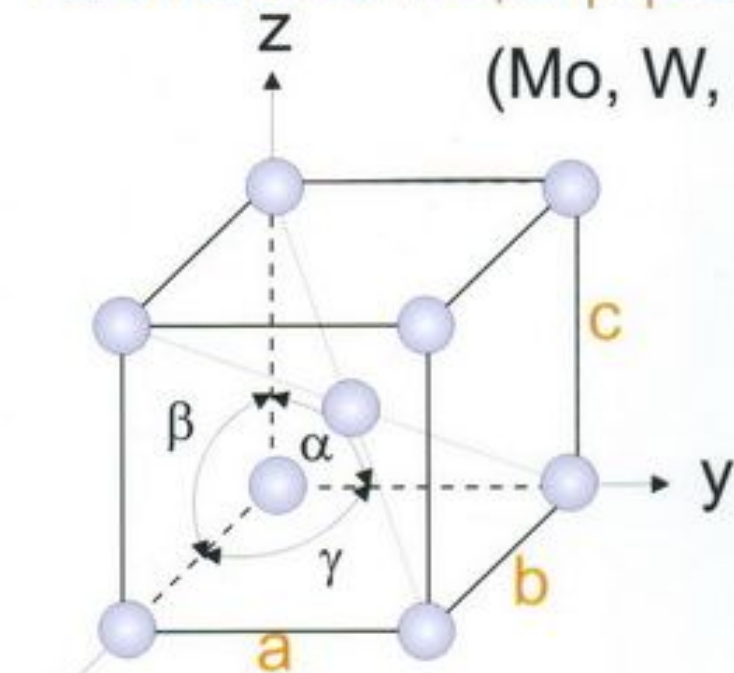
- углы между осями  $\alpha, \beta, \gamma$  ;
- периоды решетки  $a, b, c$  ;
- число атомов, приходящееся на ячейку  $n$  ;
- координационное число  $Z$ , равное числу ближайших равноудаленных атомов;
- коэффициент компактности  $K$ , равный доле объема ячейки, занятой атомами:

$$K = \frac{n \cdot 4/3 \pi R^3}{V_{\text{яч}}}$$



# Решетка объемноцентрированная кубическая (ОЦК)

(Mo, W, V, Fe<sub>α</sub>)



$r$  – наименьшее расстояние до соседних атомов.

## Характеристики решетки:

Углы между осями

$$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$

Период решетки

$$a = b = c$$

Число атомов на ячейку

$$n = 2$$

Координационное число

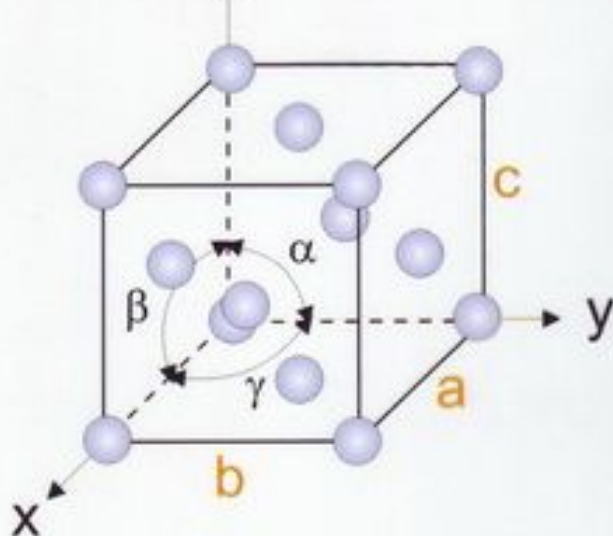
$$Z = 8$$

Коэффициент компактности

$$K = 0,68$$

# Решетка гранецентрированная кубическая (ГЦК)

Z (Al, Cu, Au, Ag, Fe<sub>γ</sub>)



$r$  – наименьшее расстояние до соседних атомов.



## Характеристики решетки:

Углы между осями

$$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$

Период решетки

$$a = b = c$$

Число атомов на ячейку

$$n = 4$$

Координационное число

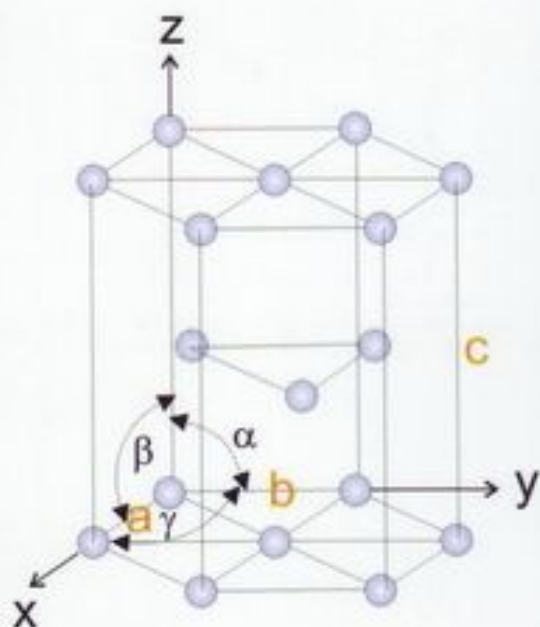
$$Z = 12$$

Коэффициент компактности

$$K = 0,74$$

# Решетка гексагональная плотноупакованная (ГП)

(Mg, Co<sub>α</sub>, Zn, Ti<sub>α</sub>, Cd)



## Характеристики решетки:

Углы между осями

$$\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$$

Период решетки

$$a = b \quad c/a = 1,633$$

Число атомов на ячейку

$$n = 6$$

Координационное число

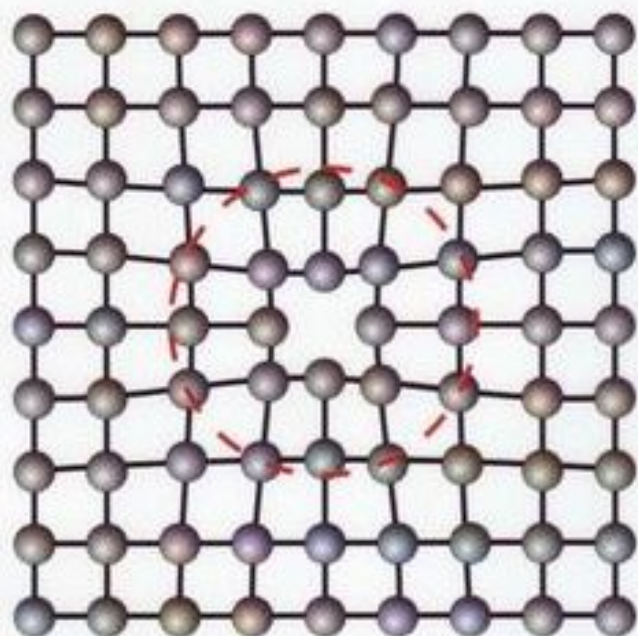
$$Z = 12$$

Коэффициент компактности

$$K = 0,74$$



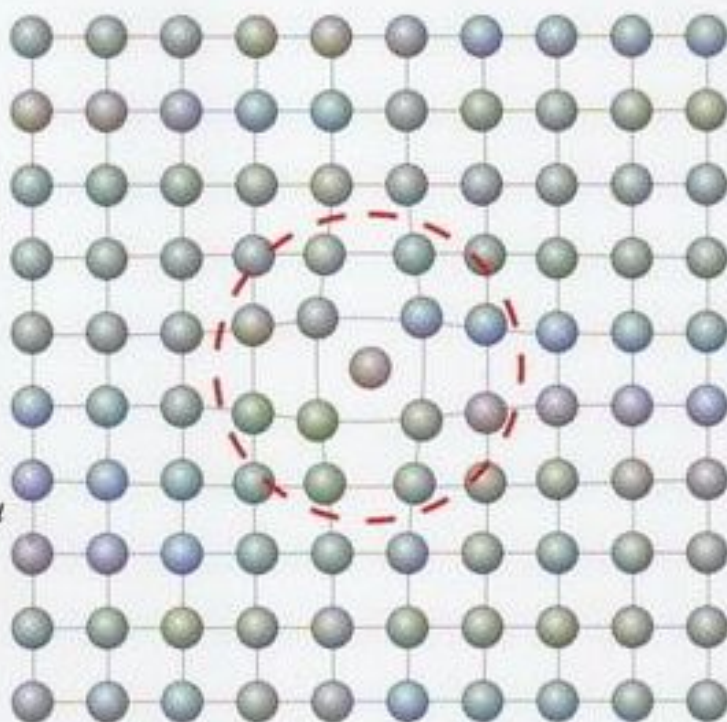
## Точечные дефекты



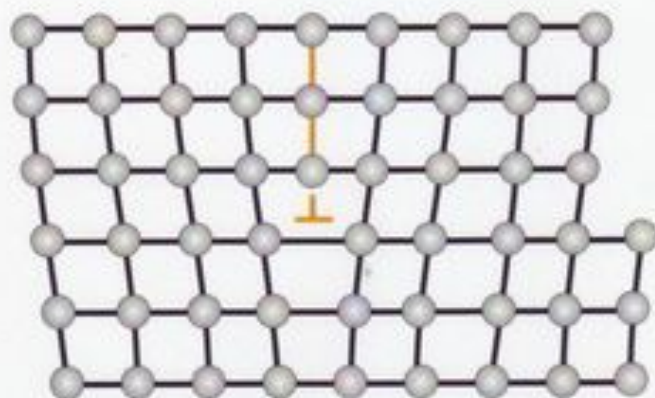
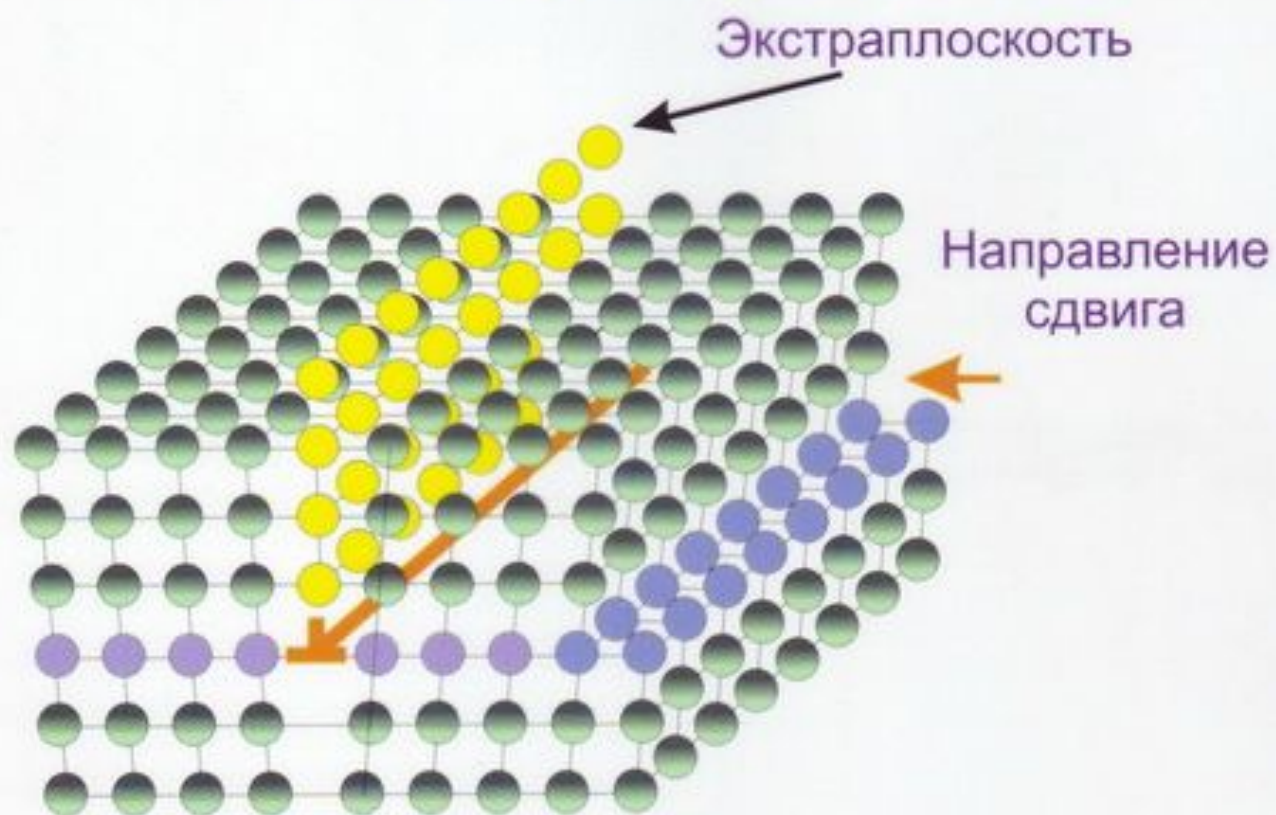
*Вакансия* - это узел кристаллической решетки незанятый атомом или ионом.

*Межузельный атом* - атом, расположенный в межатомной пространстве кристаллической решетки.

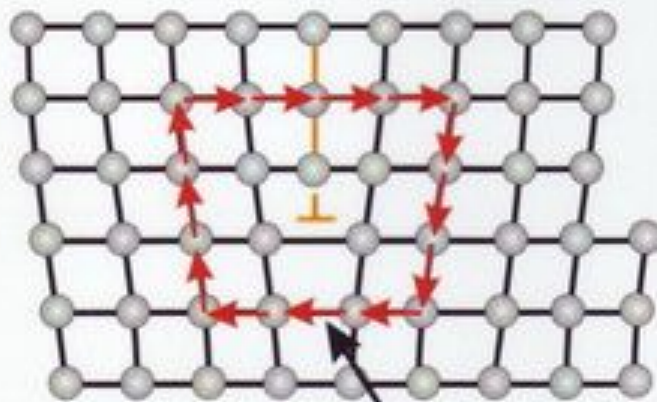
Образование вакансии или межузельного атома приводит к локальному искажению решетки кристалла.



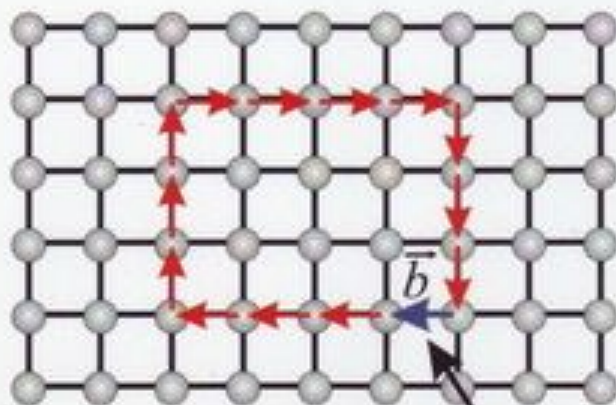
# Краевая дислокация



# Контур и вектор Бюргерса краевой дислокации



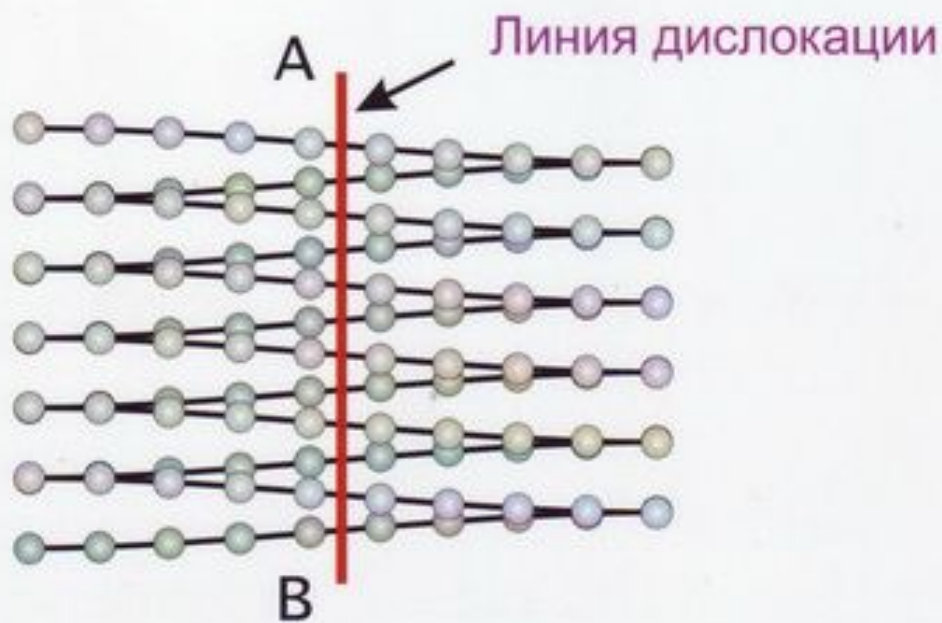
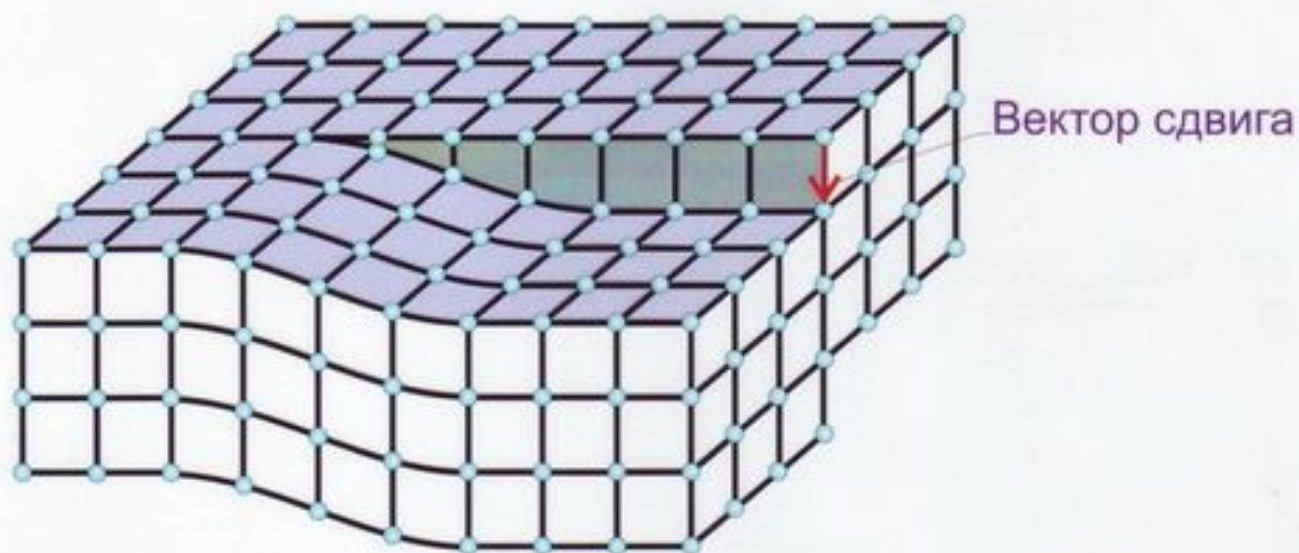
Контур Бюргерса



Вектор Бюргерса

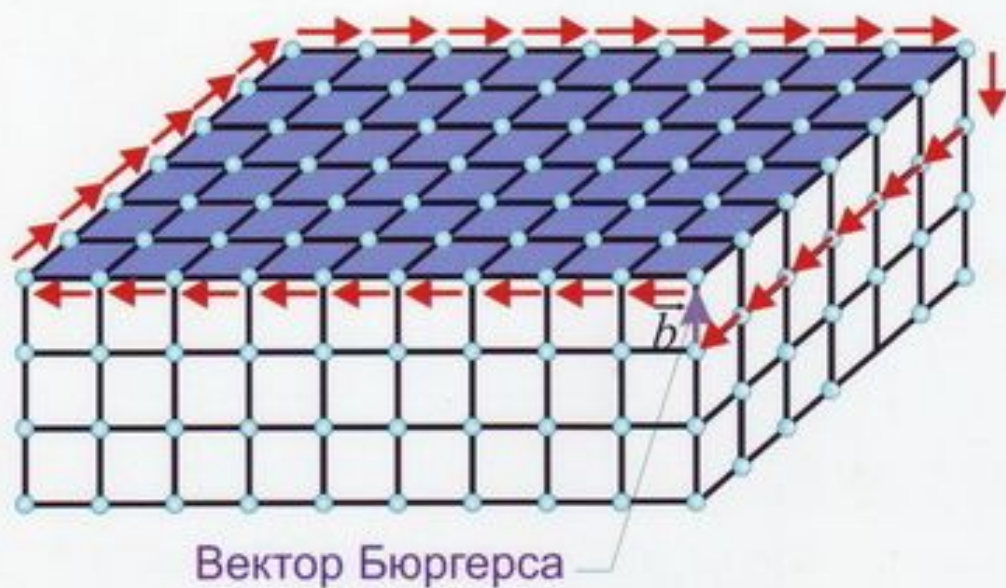
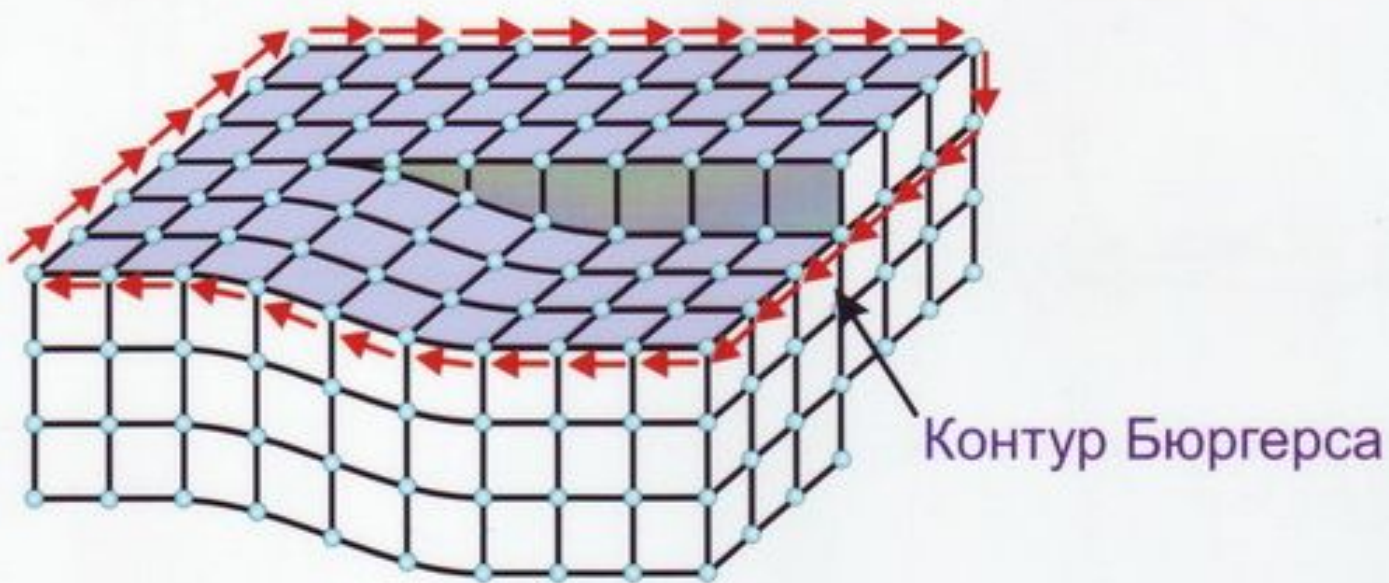


# Винтовая дислокация



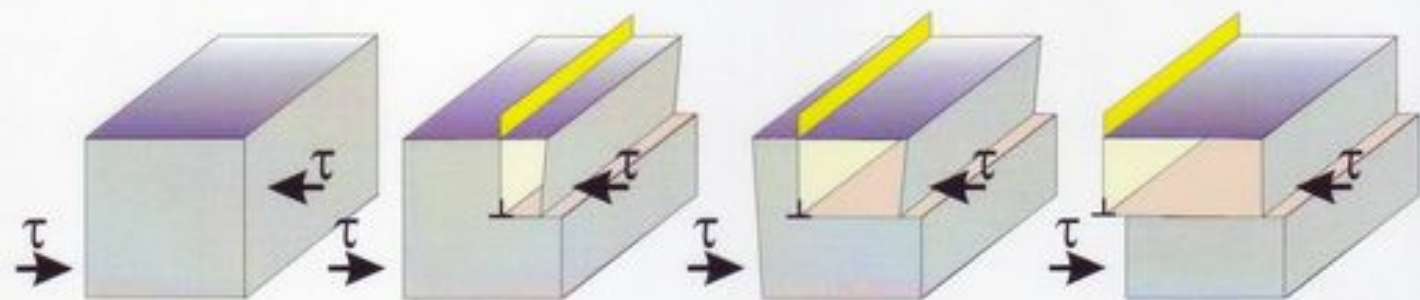


# Контур и вектор Бюргерса винтовой дислокации

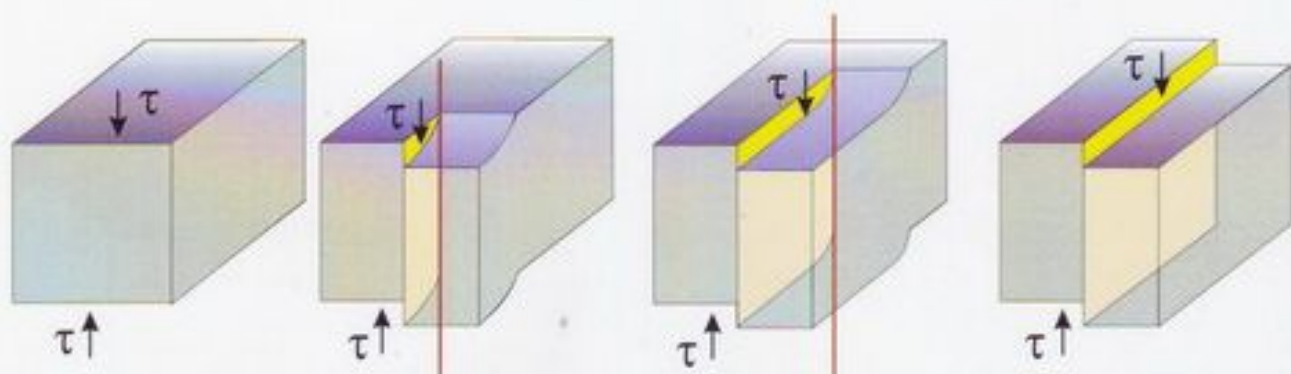


## Схемы скольжения дислокаций

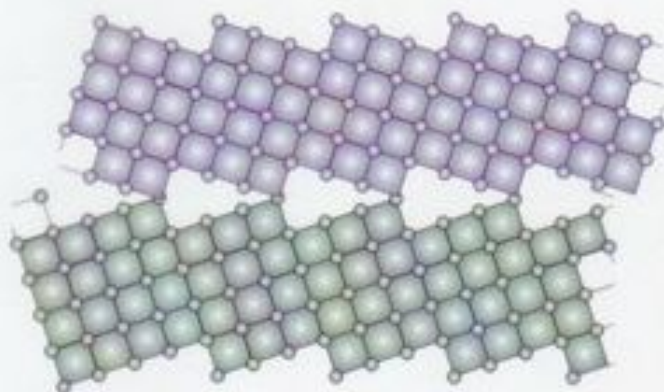
*Схема движения краевой дислокации*



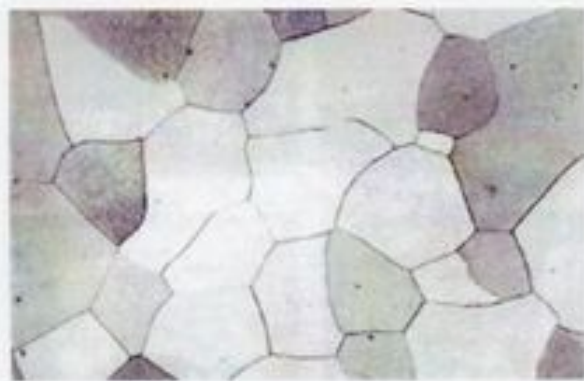
*Схема движения винтовой дислокации*



# Границы зерен и субзерен



x 10000



x 250

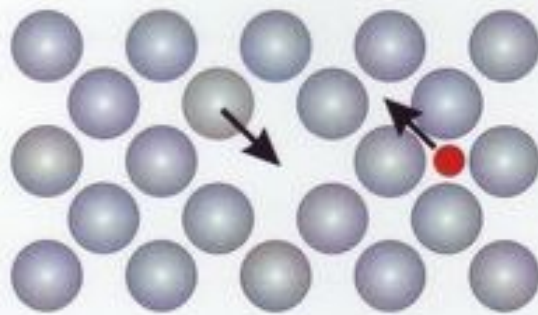
Малоугловые и большеугловые границы в Fe<sub>α</sub>



## Диффузия в металлах

Под диффузией понимают перемещение атомов в кристаллическом теле на расстояния, превышающие средние межатомные для данного вещества

Диффузия может осуществляться по **вакансионному** и **межузельному** механизмам.



Диффузия сопровождается массопереносом.

Поток диффундирующего вещества  $\bar{Q}$  подчиняется закону Фика:

$$\bar{Q} = -D \nabla C$$

где  $D$  - коэффициент диффузии

$\nabla C$  - градиент концентрации вещества

$$D = D_0 e^{-U/RT}$$

$U$  - энергия активации.



# Самопроизвольная кристаллизация

Изменение свободной энергии металла



Кривые охлаждения при кристаллизации

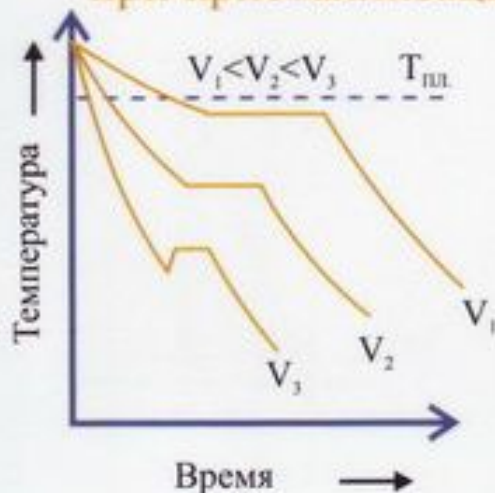
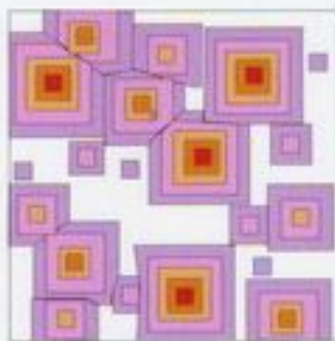


Схема процесса кристаллизации

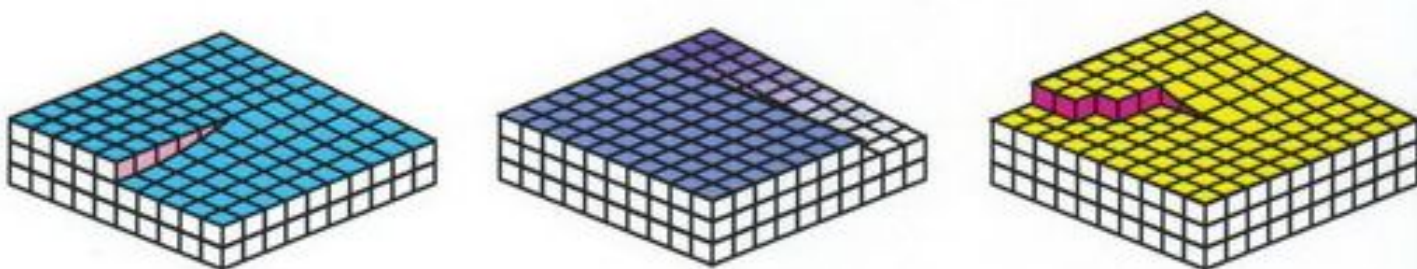


# Рост зародышевых центров

*с образованием двумерного зародыша*



*при наличии винтовой дислокации*



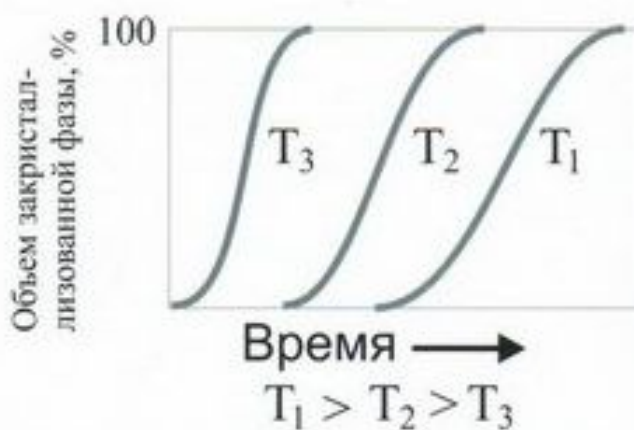
## Параметры кристаллизации

Ч.Ц. - число зародышевых центров, возникающих в единице объема за единицу времени

С.Р. - скорость увеличения линейных размеров растущего кристалла



## Кинетика кристаллизации



## Строение слитка

Схема дендритных кристаллов



Схема макроструктуры слитка

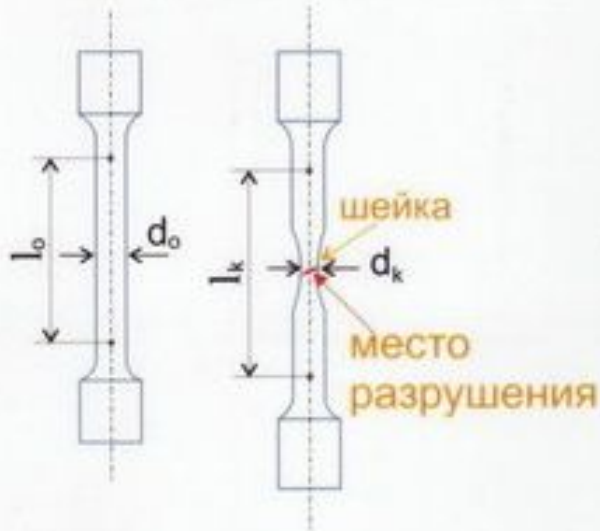


**Механические  
свойства металлов  
и сплавов**



# Испытания на растяжение

Разрывной образец до и после испытаний



Кривые растяжения



## Диаграмма условных напряжений



Условное напряжение:

$$\sigma = \frac{P}{F_0}$$

Где  $F_0$  - исходная площадь поперечного сечения образца

Относительная деформация

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$$

где  $l_0$  - начальная длина образца.

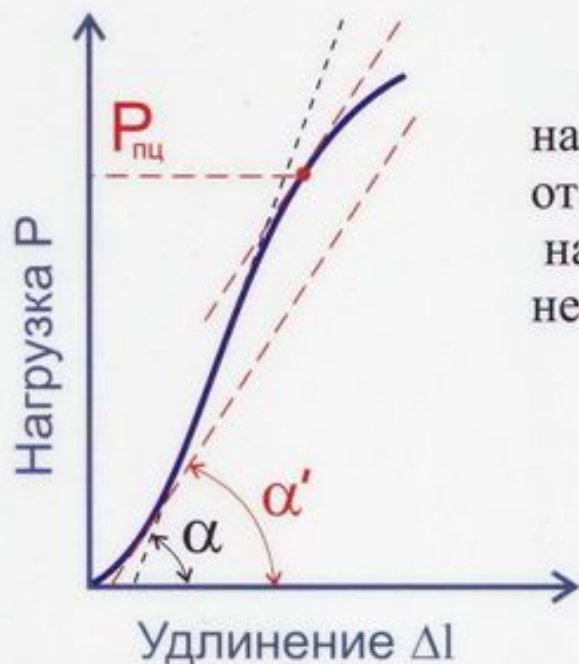
## Характеристики прочности (МПа)

Предел пропорциональности -	$\sigma_{\text{плц.}}$
Предел упругости -	$\sigma_{\text{упр.}}$
Предел текучести -	$\sigma_{\text{T}} (\sigma_{0.2})$
Предел прочности (временное сопротивление) -	$\sigma_{\text{В}}$

## Характеристики пластичности (%)

Относительное удлинение -	$\delta$
Относительное сужение -	$\psi$

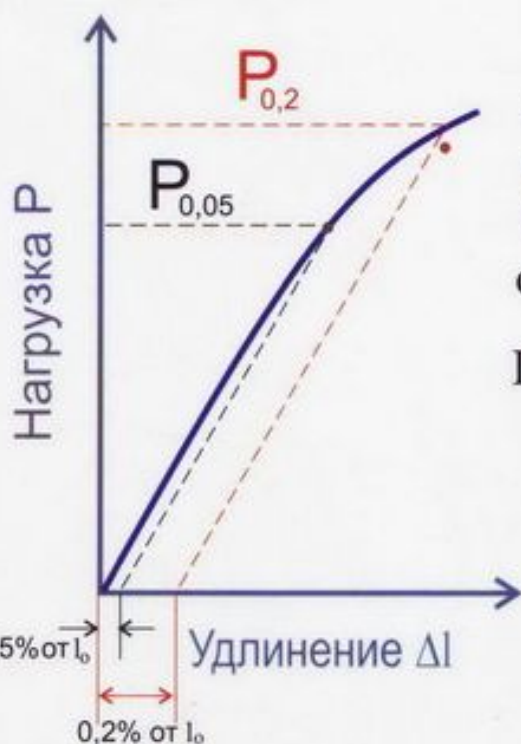
# Испытания на растяжение



**Предел пропорциональности** - напряжение, при котором отклонение от линейной зависимости между нагрузкой и деформацией достигает некоторой определенной величины

$$\sigma = \frac{P_{пц}}{F_0} \quad (\text{МПа})$$

По уменьшению  $\text{tg}\alpha$  на 10, 25 и 50% определяют  $\sigma_{пц10}$ ,  $\sigma_{пц25}$  и  $\sigma_{пц50}$  соответственно.



**Предел упругости** - напряжение, при котором остаточная деформация достигает заданной величины.

Остаточная деформация выбирается от 0,05 до 0,005%

При остаточной деформации 0,05%

$$\sigma_{0,05} = \frac{P_{0,05}}{F_0} \quad (\text{МПа})$$



# Испытания на растяжение



**Физический предел текучести** - напряжение, при котором образец деформируется под действием неизменной нагрузки

$$\sigma_T = \frac{P_T}{F_0} \quad (\text{МПа})$$

**Предел прочности** или **временное сопротивление** - условное напряжение, соответствующее максимальному усилию, которое может выдержать образец до разрушения.

$$\sigma_B = \frac{P_{\max}}{F_0} \quad (\text{МПа})$$

**Условный предел текучести ( $\sigma_{0,2}$ )** - напряжение, которому соответствует остаточная деформация, равная 0,2%

**Относительное удлинение** -  $\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} \times 100 \quad (\%)$

где  $l_0$  - начальная длина образца  
 $l_k$  - конечная длина образца.

**Относительное сужение** -  $\psi = \frac{F_0 - F_k}{F_0} \times 100 \quad (\%)$

где  $F_0$  - исходная площадь поперечного сечения образца,  
 $F_k$  - площадь поперечного сечения образца в месте разрушения.

# Измерения твердости по Бринеллю

Метод заключается во вдавливании стального шарика диаметром  $D$  в поверхность образца под действием нагрузки  $P$ , приложенной в течении определенного времени. После снятия нагрузки измеряют диаметр отпечатка  $d$ , остающийся на поверхности образца.



## Схема определения твердости по Бринеллю

**Индентор** - стальной закаленный шарик диаметром  $D$ , равным 10, 5 или 2,5 мм

**Нагрузка** - от  $2,5D^2$  до  $30D^2$  (кгс)

**Время выдержки под нагрузкой** - 10, 30 или 60 секунд..

**Число твердости по Бринеллю (НВ)** - отношение нагрузки к площади поверхности сферического отпечатка  $F_{отп}$ :

$$HB = \frac{P}{F_{отп}} = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

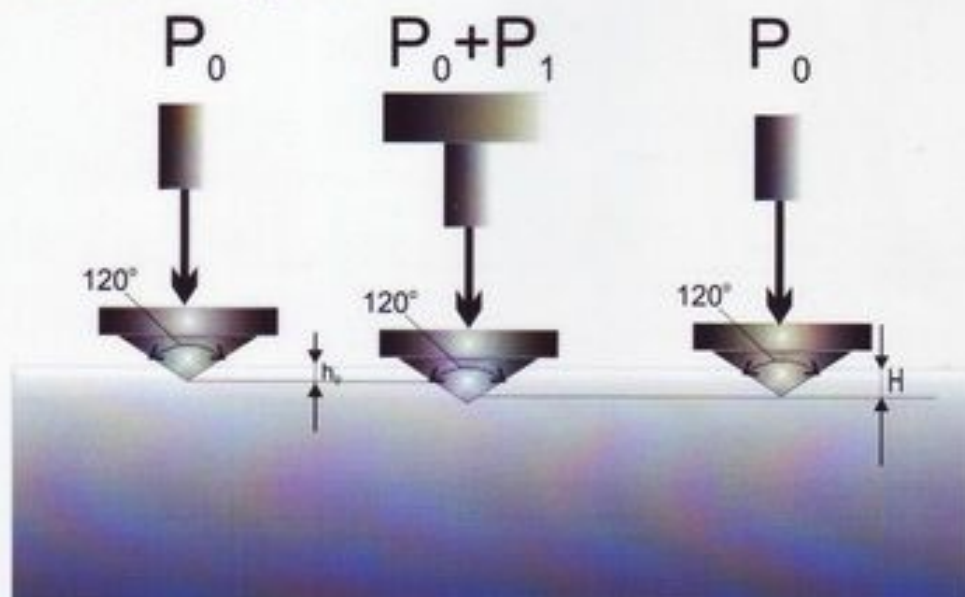


# Измерение твердости по Роквеллу

**Индентор** - алмазный конус с углом  $120^\circ$  при вершине или стальной шарик диаметром 1,588 мм.

$P_0$  - предварительная нагрузка (100 Н),

$P_1$  - основная нагрузка.



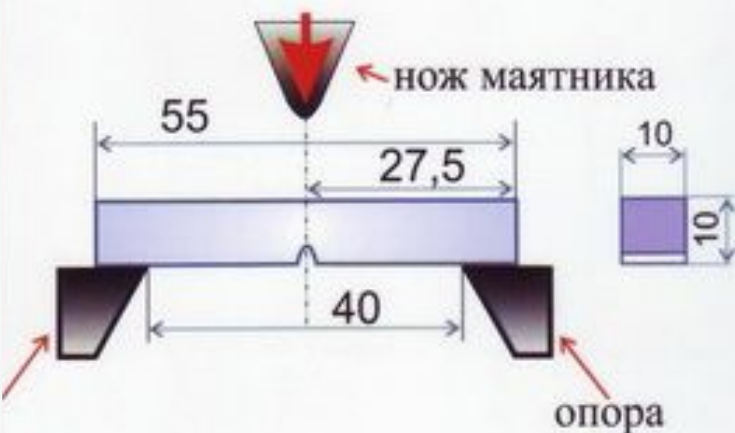
**Единица твердости по Роквеллу (HR)** - безразмерная величина, соответствующая осевому перемещению индентора на 0,002 мм.

Обозначения твердости	Индентор (наконечник)	Шкала индикатора	Основная нагрузка	Расчетная формула
HRC	алмазный конус	C	1400 Н	$100 - \frac{H - h_0}{0,002}$
HRA		A	500 Н	
HRB	стальной шарик	B	900 Н	$130 - \frac{H - h_0}{0,002}$



# Испытания на ударный изгиб

## Схема испытания

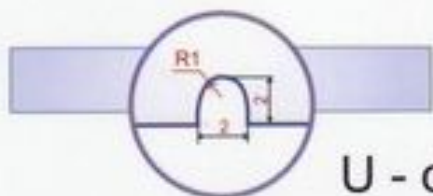


Ударная вязкость

$$K_C = \frac{K}{F} \text{ (МДж/м}^2\text{)},$$

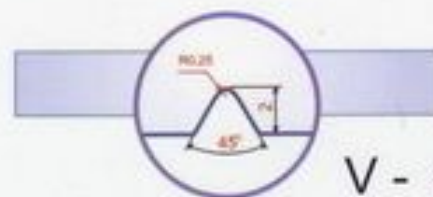
где  $K$  - работа удара, затраченная на пластическую деформацию и разрушение образца;  
 $F$  - площадь поперечного сечения образца в месте надреза до испытания.

## Виды концентраторов на образце



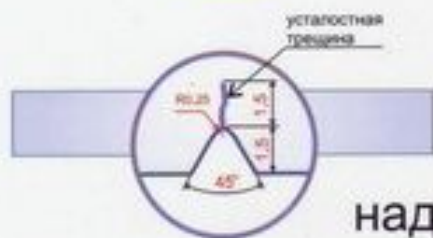
U - образный надрез

# KCU



V - образный надрез

# KCV



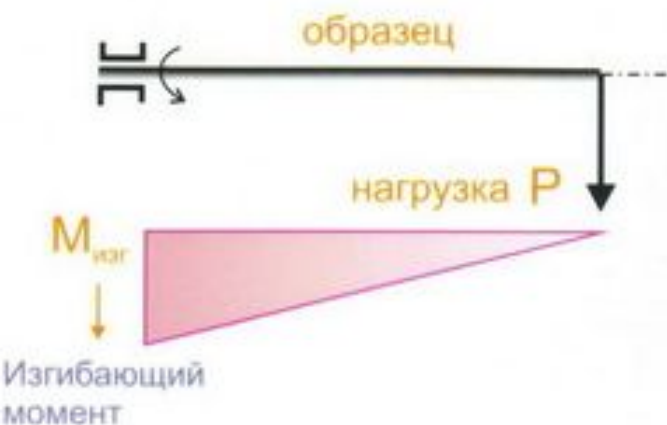
надрез с трещиной

# KCT

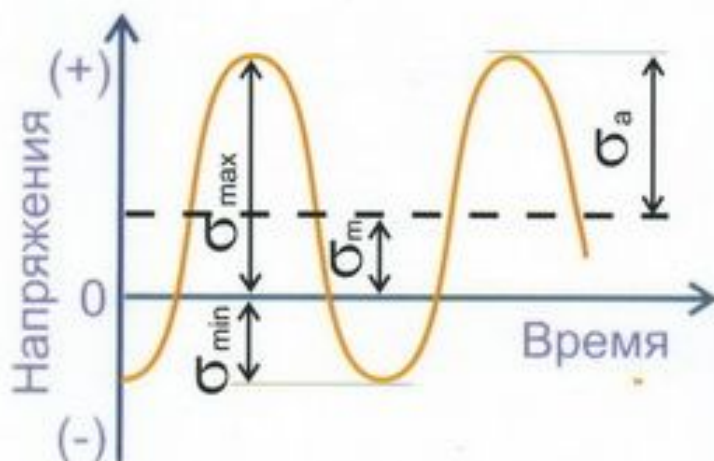
## Обозначения ударной вязкости

# Испытания на выносливость

Схема нагружения - изгиб с вращением



Цикл напряжений

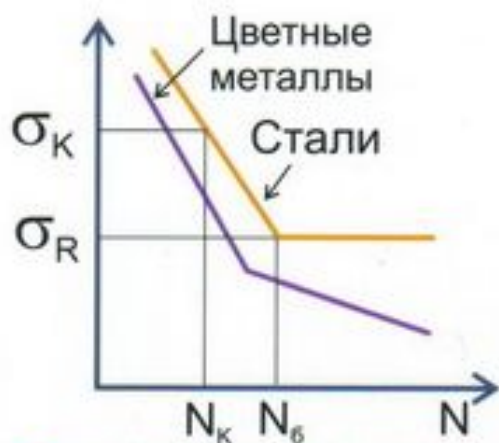


$\sigma_a$  - амплитуда напряжений;

$\sigma_m = (\sigma_{max} + \sigma_{min})/2$  - среднее напряжение цикла;

$R = \sigma_{min}/\sigma_{max}$  - асимметрия цикла

Кривые усталости



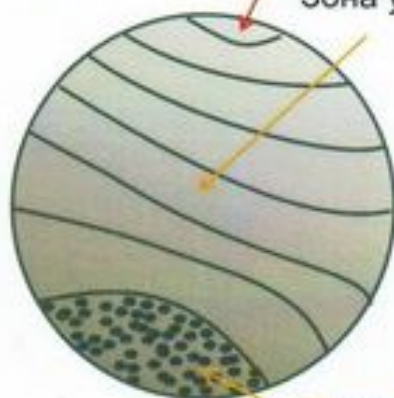
$\sigma_R$  - физический предел выносливости

$\sigma_K$  - ограниченный предел выносливости при заданном количестве циклов  $N_K$

Разрушение при усталости (схема).

Очаг зарождения трещины

Зона усталости



Зона долома

**Теория сплавов,  
диаграммы состояния  
двойных сплавов**



## Основные определения

**Фазой** называют совокупность однородных частей сплава (системы), одинаковых по химическому составу, атомному строению и отделенных от других частей системы поверхностью раздела

**Система** - совокупность взаимодействующих фаз, образующих сплав.

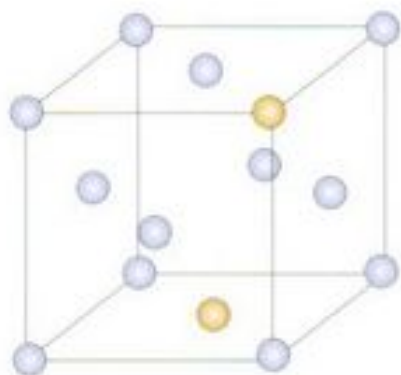
**Компонентами** сплава (системы) называются химические элементы и соединения, из которых может быть образована любая фаза сплава.

**Число степеней свободы** - количество независимых термодинамических переменных, полностью описывающих состояние системы.

Число степеней свободы ( $f$ ) подчиняется **правилу фаз Гиббса**:  $f = K - \Phi + 1$ ,  
где  $K$  - число компонентов, образующих систему;  
 $\Phi$  - количество фаз, находящихся в равновесии

## Твердые растворы замещения

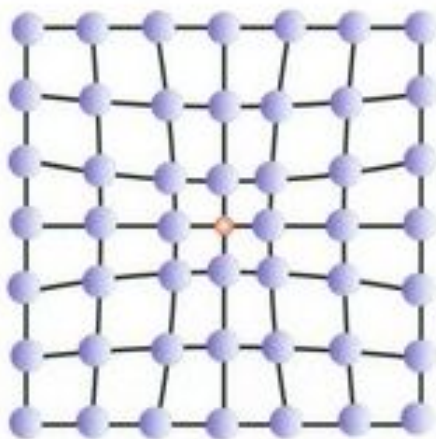
Растворы такого типа образуются путем замены атомов металла - растворителя в его кристаллической решетке атомами растворенного элемента



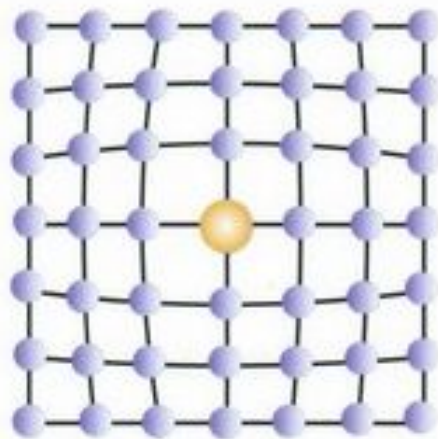
● – Атом растворителя

● – Атом растворенного элемента

Искажения кристаллической решетки  
в твердых растворах замещения



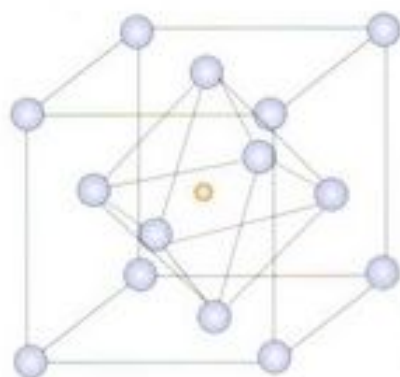
Атом растворяемого элемента  
меньше атома растворителя



Атом растворяемого элемента  
больше атома растворителя

## Твердые растворы внедрения

Растворы такого типа образуются путем размещения атомов растворяемого элемента в порах решетки растворителя

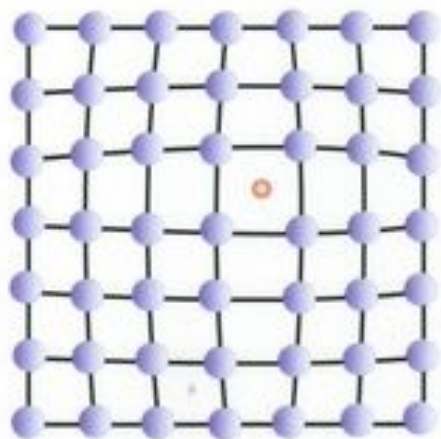


● Атом растворителя

● Атом растворенного элемента

Твердые растворы внедрения образуются в случае, когда радиус атома растворенного элемента невелик. Например, при растворении в железе атомов углерода, азота или водорода.

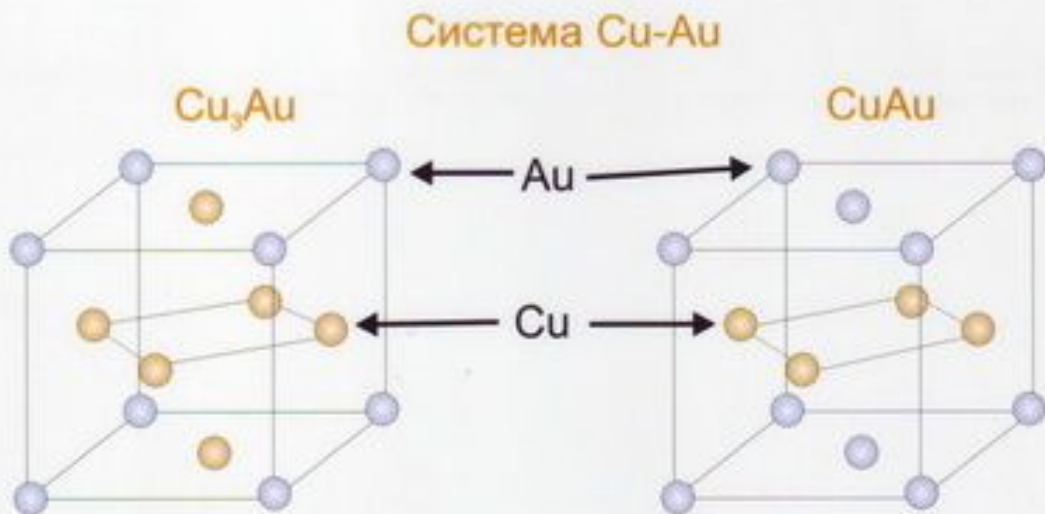
Искажения кристаллической решетки  
в твердых растворах внедрения





## Упорядоченные твердые растворы (сверхструктуры)

Они представляют твердые растворы замещения, в которых атомы растворителя и растворенного элемента занимают определенные положения в кристаллической решетке.



Упорядочение наблюдается при относительно невысоких температурах. В случае нагрева до определенной температуры (точка Курнакова -  $T_K$ ) упорядочение исчезает

# Химические соединения

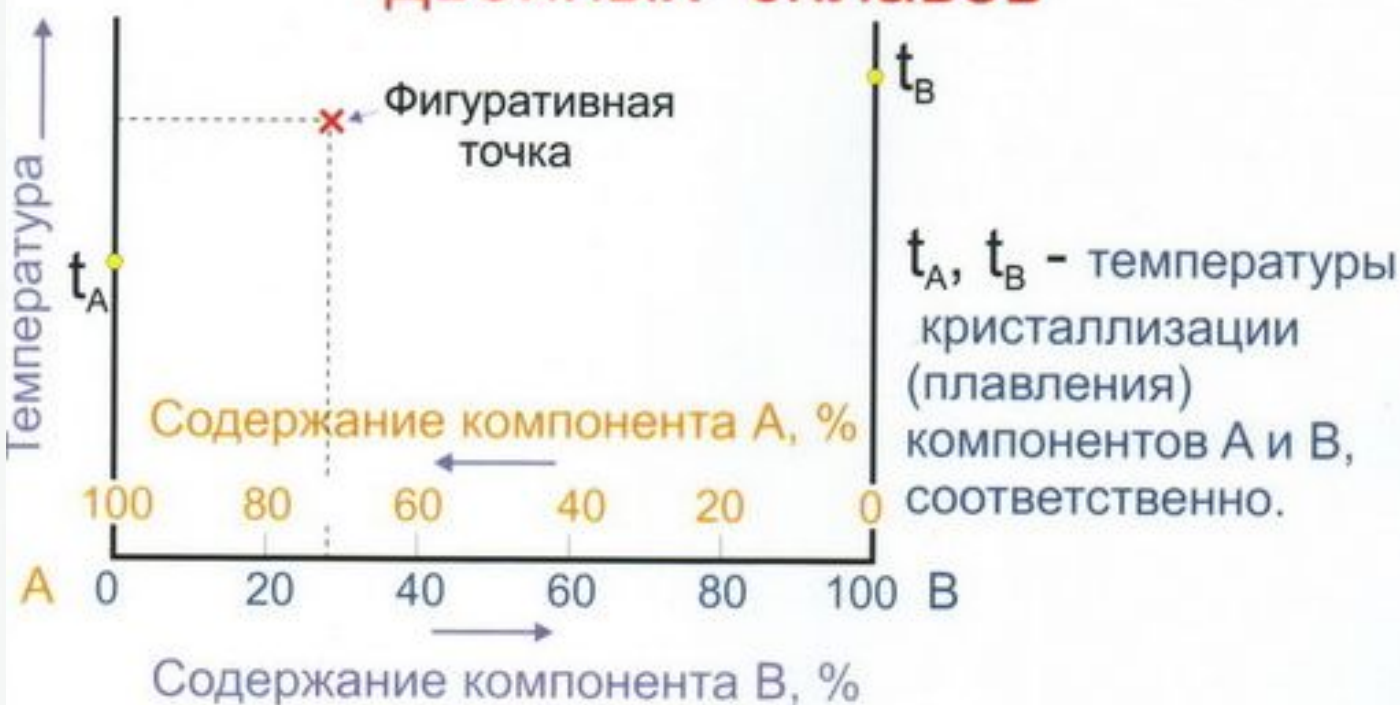
Они имеют следующие особенности:

- **состав**, который может быть выражен простой формулой  $A_nB_m$ , где  $A$  и  $B$  - соответствующие элементы, а  $n$  и  $m$  - целые числа;
- **кристаллическую решетку**, отличную от кристаллических решеток элементов, образующих соединение;
- **свойства**, резко отличающиеся от свойств образующих элементов;
- **постоянную температуру кристаллизации**, как и у чистых металлов.

Химические соединения делятся на две группы:

1. **Соединения с нормальной валентностью** (валентные соединения). В них атомы разного сорта связаны ионными или ковалентными связями. К этой группе относят соединения металлов с металлоидами, например, сульфиды, оксиды ( $Al_2O_3$ ,  $MnS$ ).
2. **Металлические соединения**. В этих соединениях преобладает металлический тип межатомной связи:
  - **электронные соединения** (фазы Юм-Розери). Химический состав этих фаз определяется электронной концентрацией, под которой понимают число валентных электронов, приходящееся на один атом ( $CuZn$ ,  $Cu_3Zn_8$ ,  $CuZn_3$ ).
  - **фазы внедрения**. Их образуют переходные металлы с неметаллами, имеющими малый атомный радиус (C, N). К этой группе относятся многие карбиды и нитриды ( $VC$ ,  $TiC$ ,  $NbC$ ,  $TiN$ ).
  - **фазы Лавеса**. Они имеют формулу  $AB_2$  и образуются при отношении атомных диаметров металлов  $A$  и  $B$  приблизительно 1,2 ( $Fe_2W$ ,  $Fe_2Mo$ ).

# Построение диаграммы состояний двойных сплавов

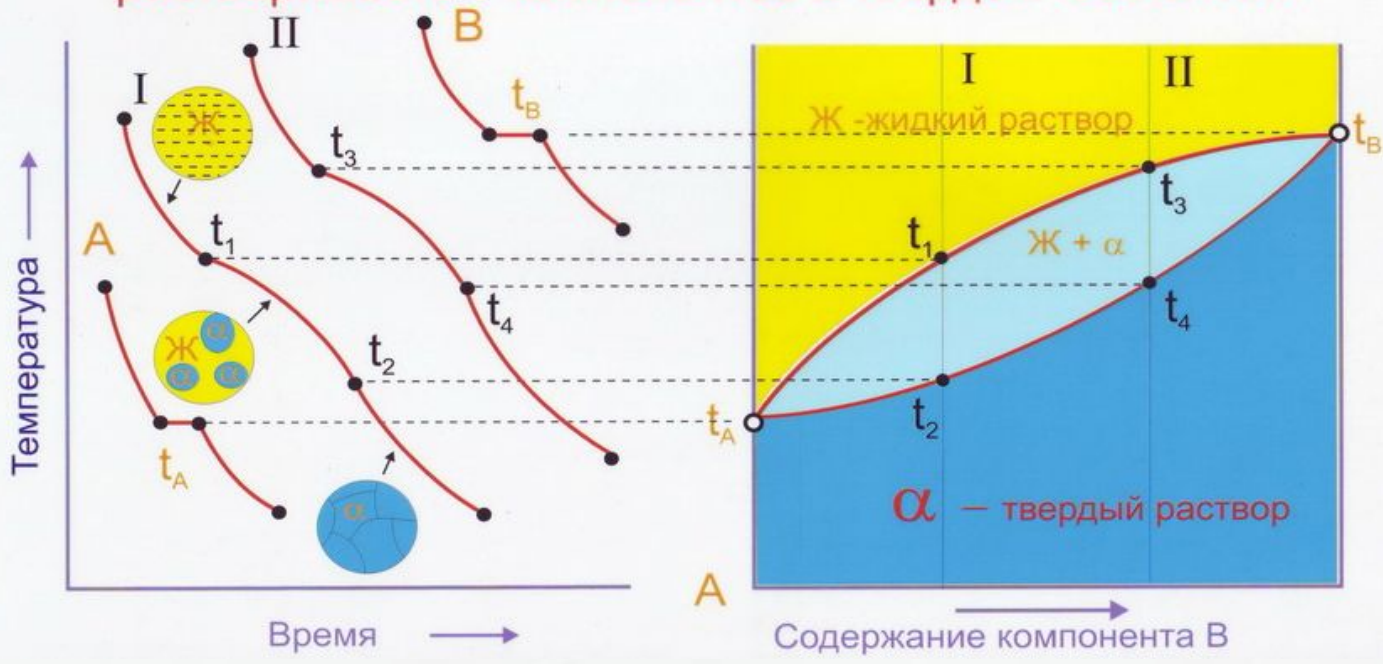


## Кривая охлаждения чистого металла





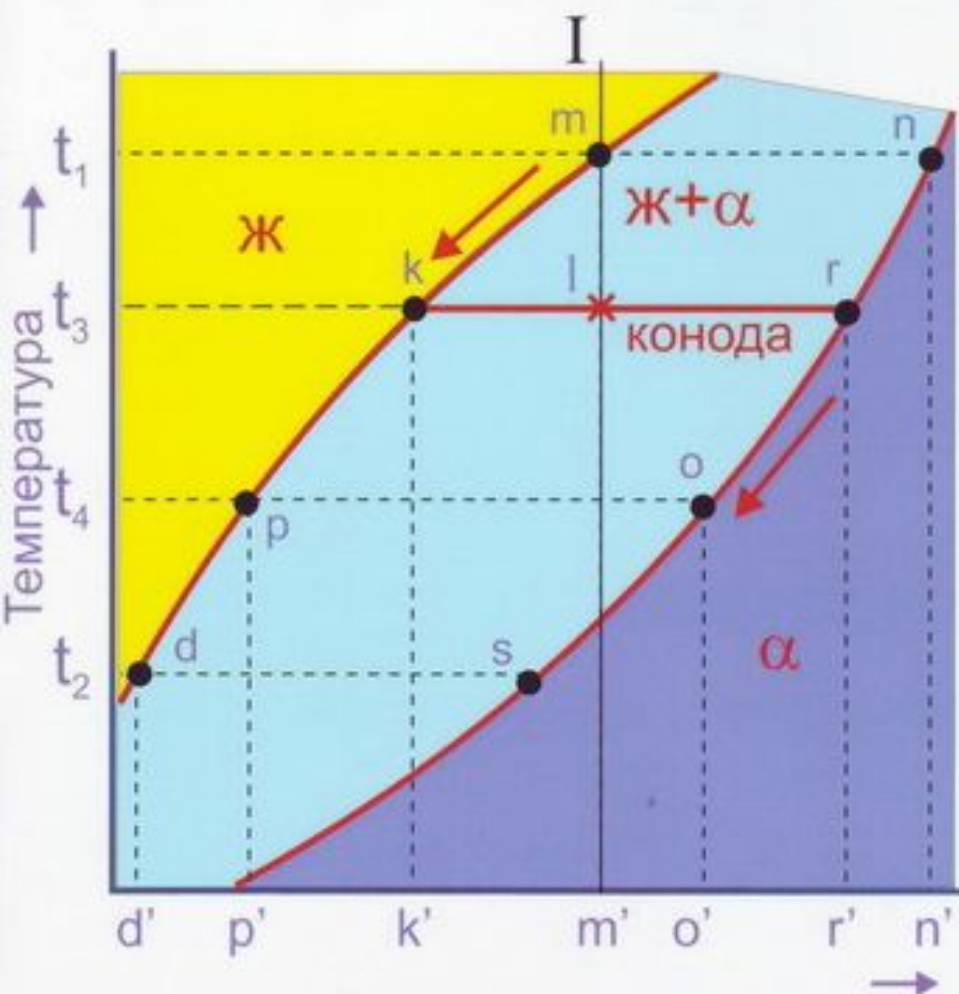
Диаграмма состояний сплавов с неограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии



# Правила концентраций и отрезков

**Правило концентраций** устанавливает концентрации фаз при заданной температуре. Через фигуративную точку проводят **коноду**. Проекция точки пересечения **коноды** с линией ликвидус на ось концентраций определяет состав жидкой фазы. Проекция точки пересечения **коноды** с линией солидус определяет состав твердой фазы. Для  $t_3$  - состав жидкой фазы соответствует точке  $k'$ , а твердой  $г'$ .

**Правило отрезков** - устанавливает количественное соотношение фаз при заданной температуре. Фигуративная точка делит коноду на отрезки, пропорциональные количеству фаз.



на отрезки, пропорциональные количеству фаз.

При температуре  $t_3$ :  
количество жидкой фазы

$$Q_{\text{ж}} = \frac{lr}{kr} \cdot 100\%$$

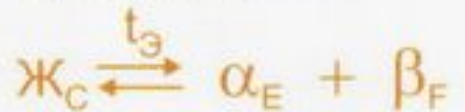
При температуре  $t_3$ :  
количество твердой фазы

$$Q_{\alpha} = \frac{kl}{kr} \cdot 100\%$$

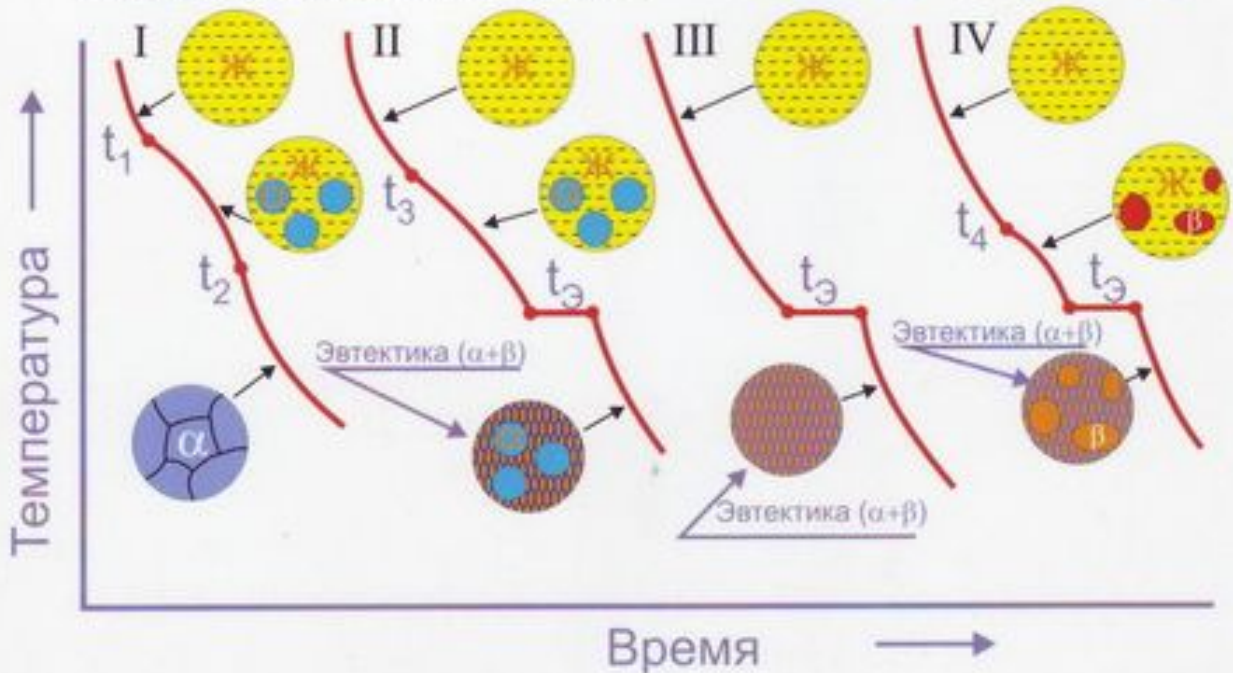
## Диаграмма состояний сплавов с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии



Эвтектическое превращение

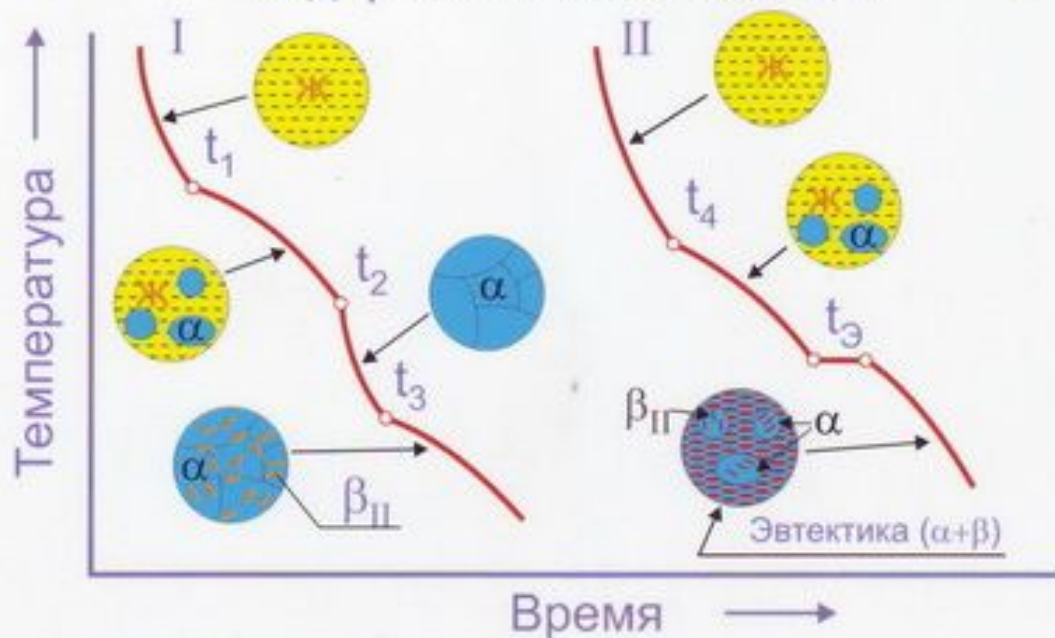


Оно протекает при постоянной температуре и постоянном составе реагирующих фаз,  $C = K - \Phi + 1 = 2 - 3 + 1 = 0$ .

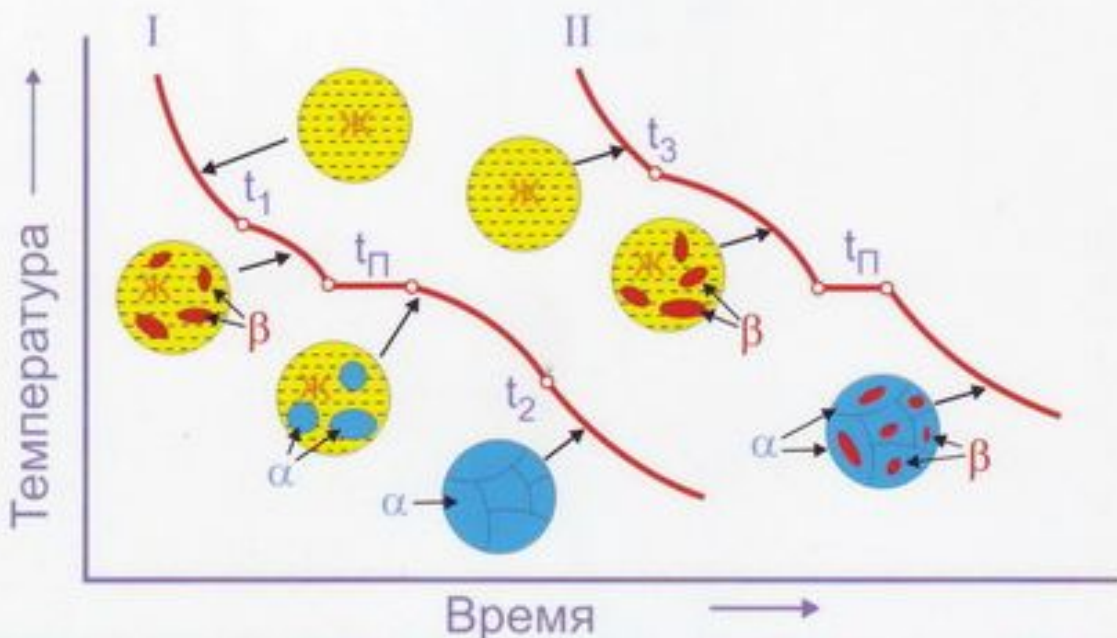
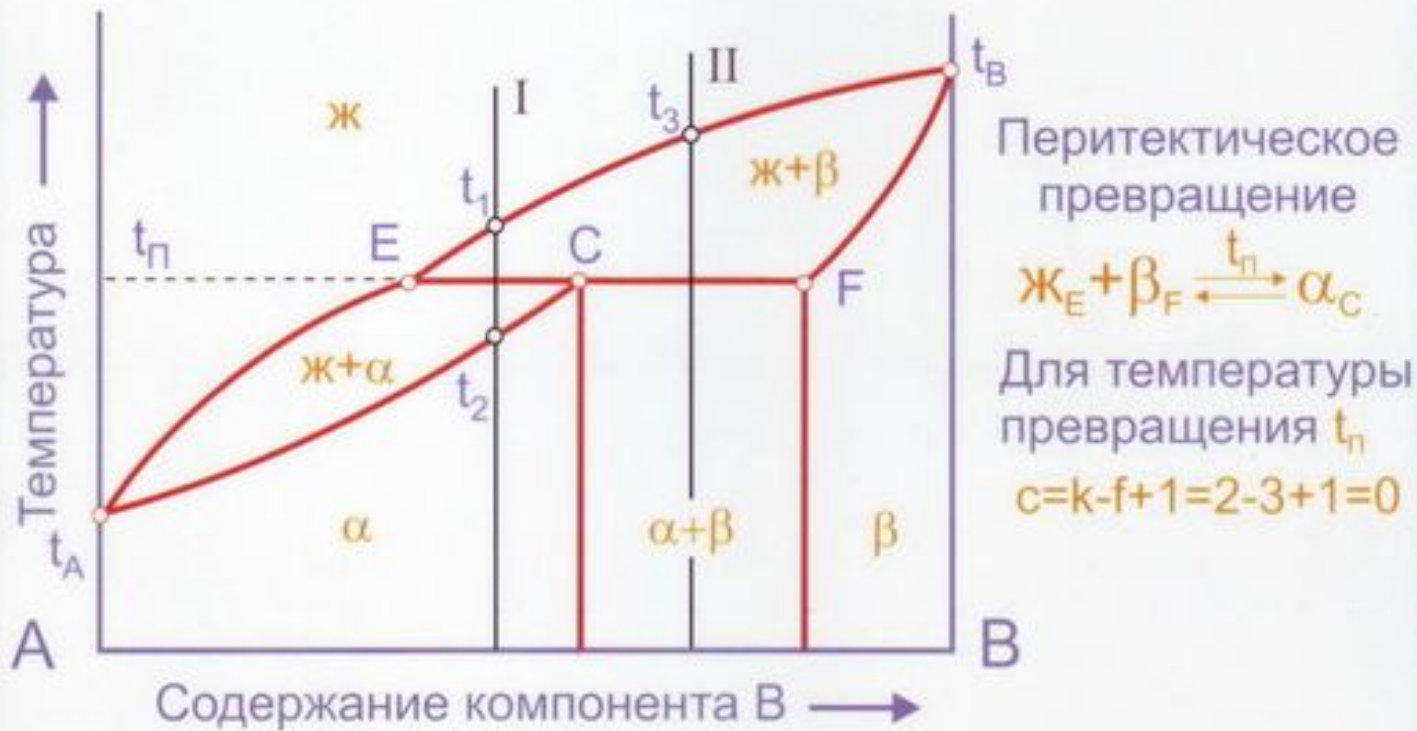




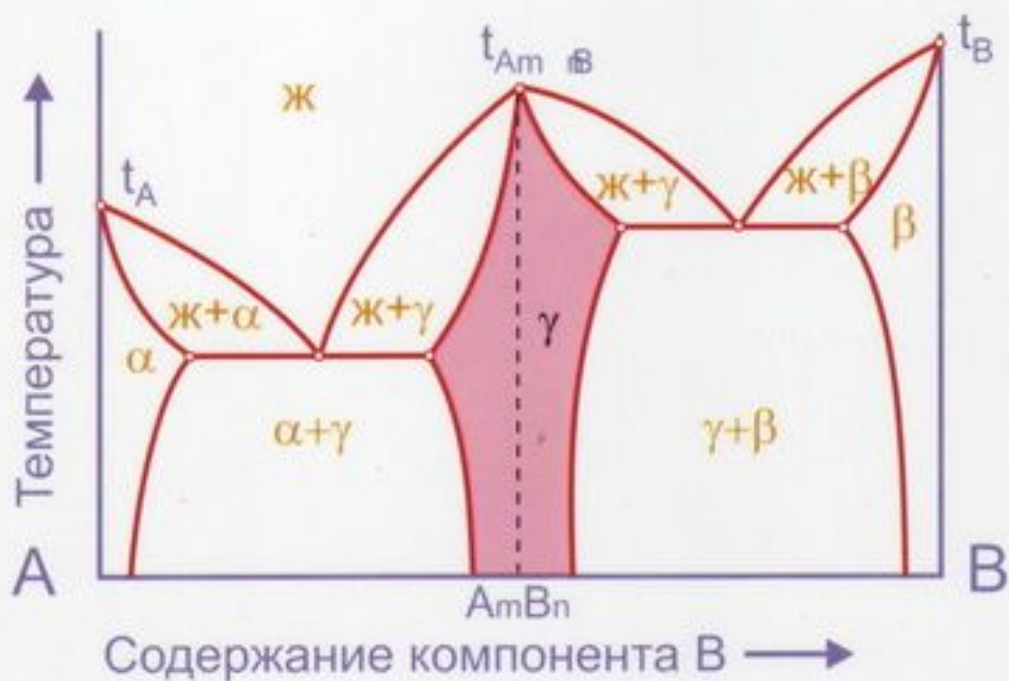
## Диаграмма состояний сплавов с ограниченной переменной растворимостью компонентов в твердом состоянии



## Диаграмма состояний сплавов с перитектическим превращением

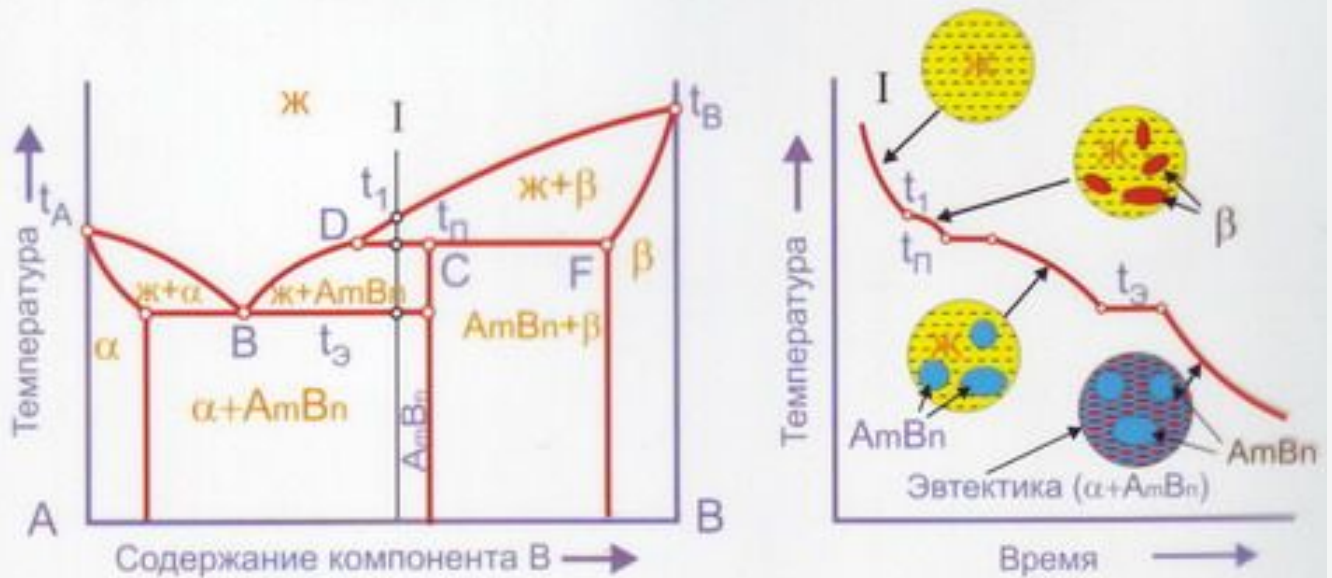


## Диаграммы состояний сплавов, компоненты которых образуют устойчивые химические соединения





## Диаграммы состояний сплавов, компоненты которых образуют неустойчивые химические соединения

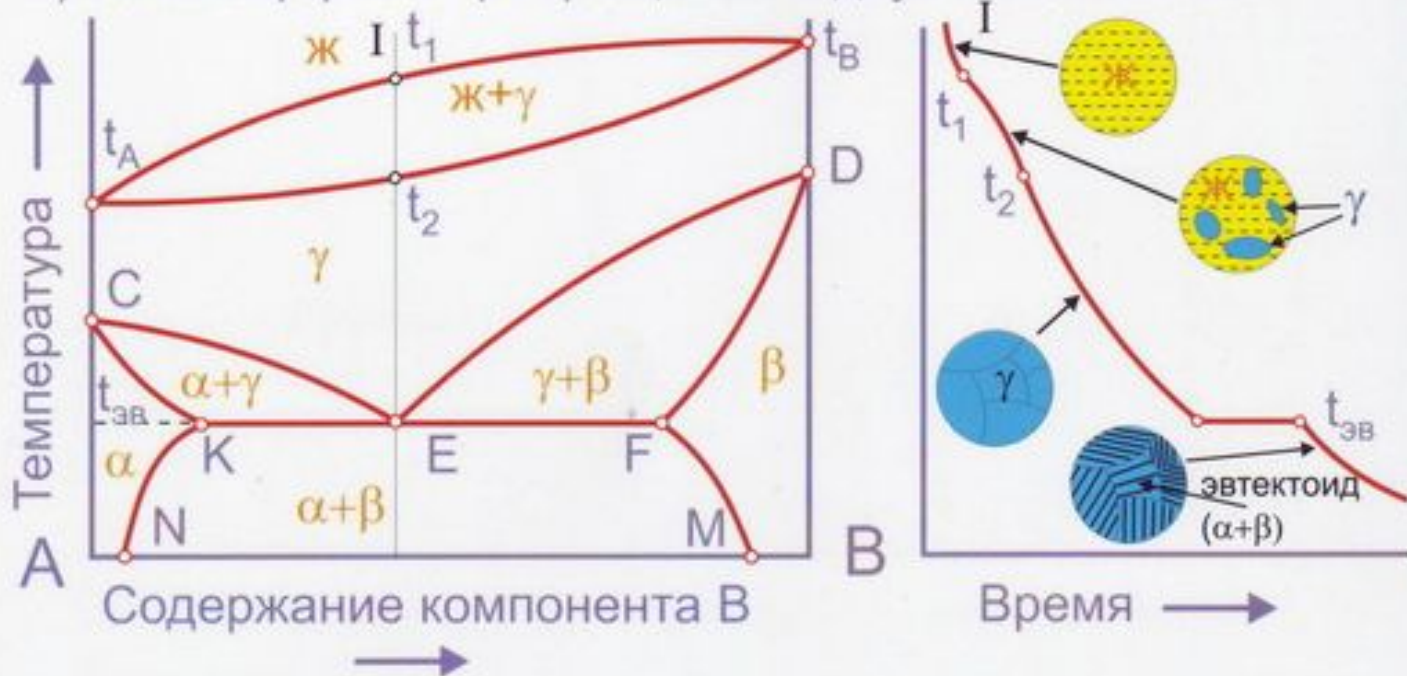


## Диаграммы состояний сплавов, компоненты которых имеют полиморфные превращения

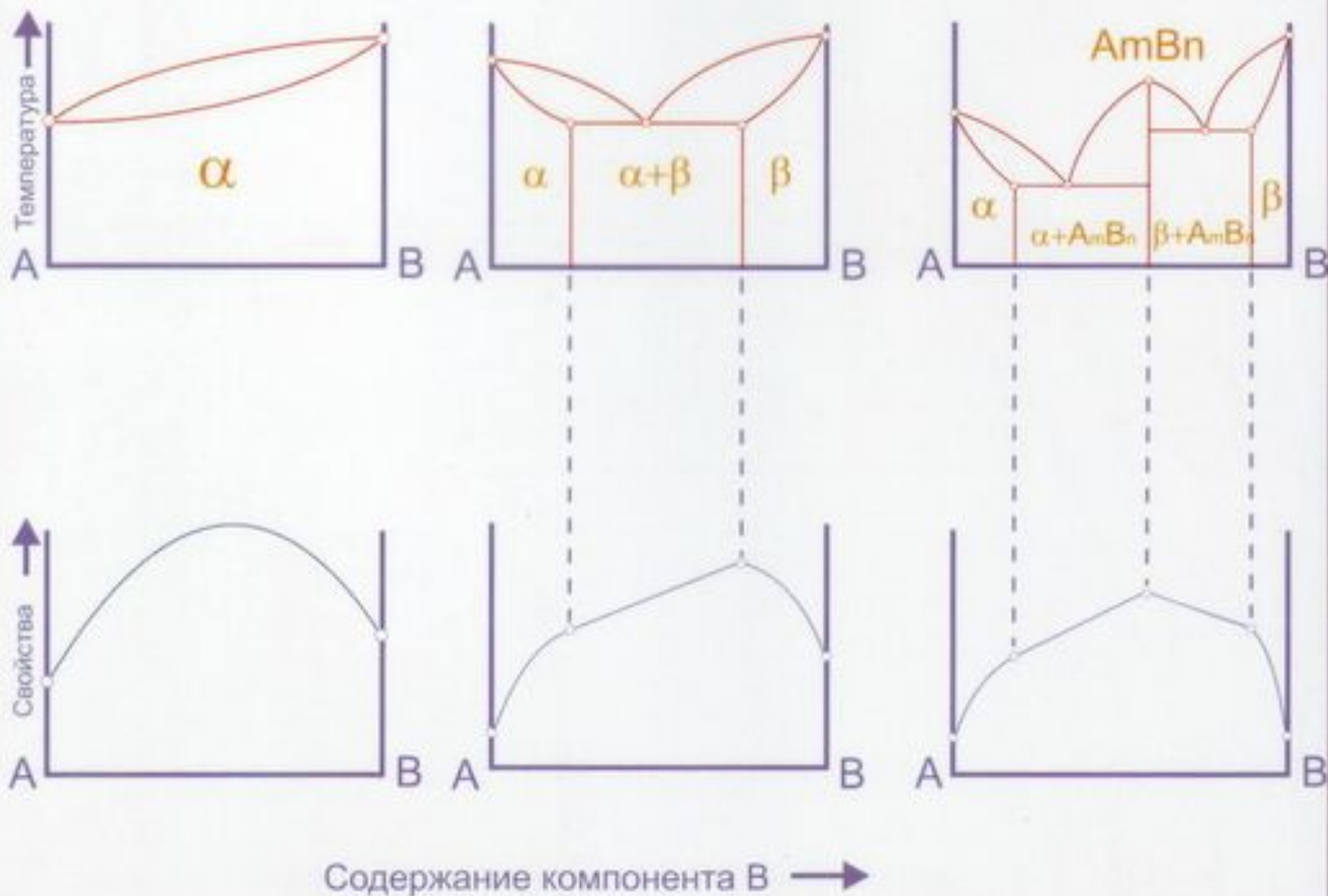
а) Полиморфное превращение в одном компоненте



б) Полиморфное превращение в двух компонентах



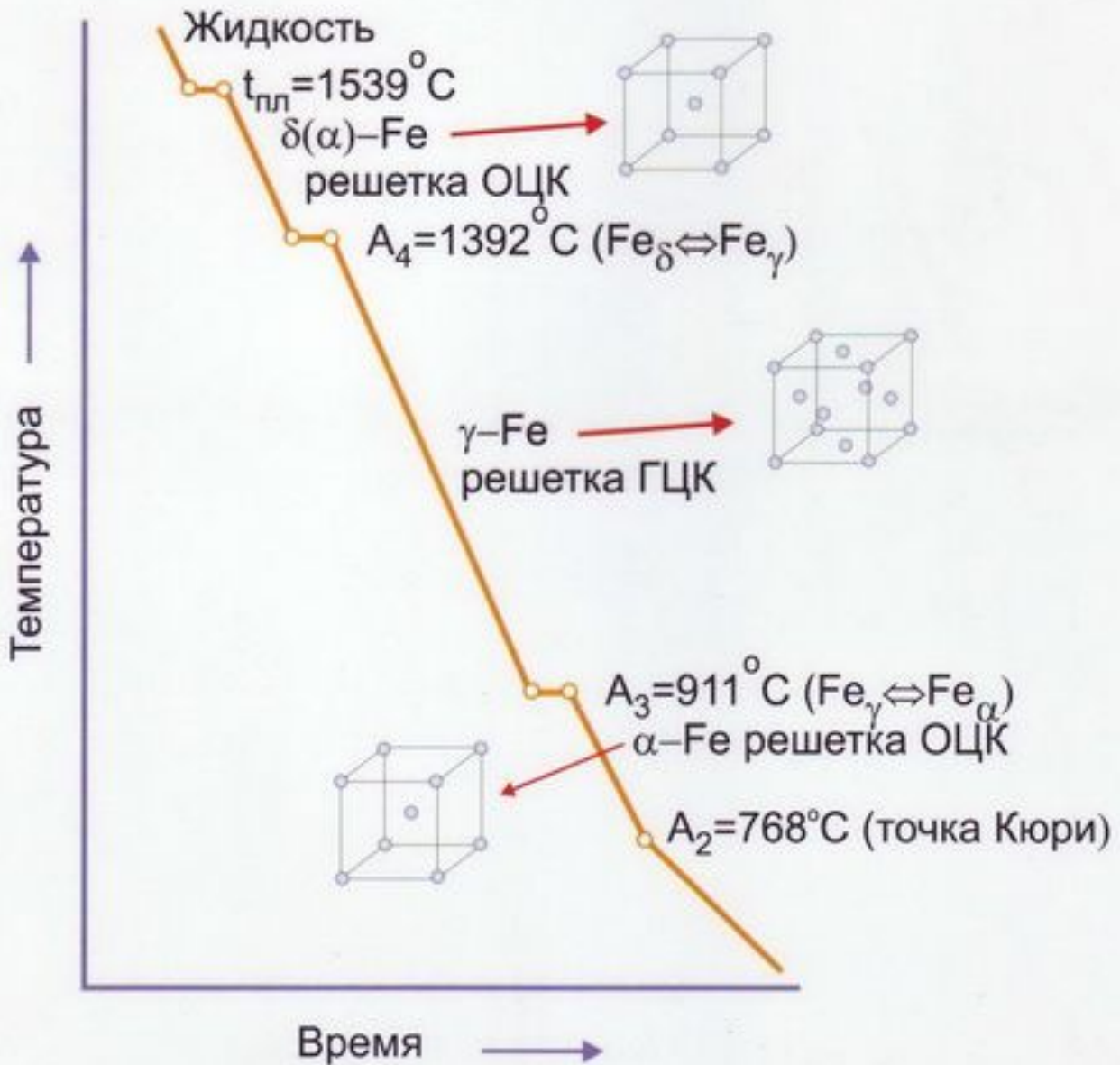
## Связь между свойствами сплавов и типом диаграммы состояний





**Диаграмма состояния  
железо-цементит,  
углеродистые стали**

# Температурный полиморфизм железа



Железо имеет две модификации:  $\alpha$  (ОЦК) и  $\gamma$  (ГЦК).

## Фазы в системе железо-углерод

**Феррит** - твердый раствор внедрения углерода в  $\alpha$ -железе.

Предельная растворимость углерода

в  $\alpha$ -феррите - 0,02%, а в  $\delta$ -феррите - 0,1%.

Феррит ферромагнитен (точка Кюри 768°C).

Феррит - мягкая пластичная фаза

с твердостью HB 80-100.



**Аустенит** - твердый раствор внедрения углерода в  $\gamma$ -железе.

Предельная растворимость углерода

в аустените - 2,14%.

Аустенит пластичен, его твердость

HB 160-180.



**Цементит** - карбид железа  $Fe_3C$  содержит 6,67% C.

Он имеет сложную ромбическую решетку.

Температура плавления около 1260°C. Цементит слабо

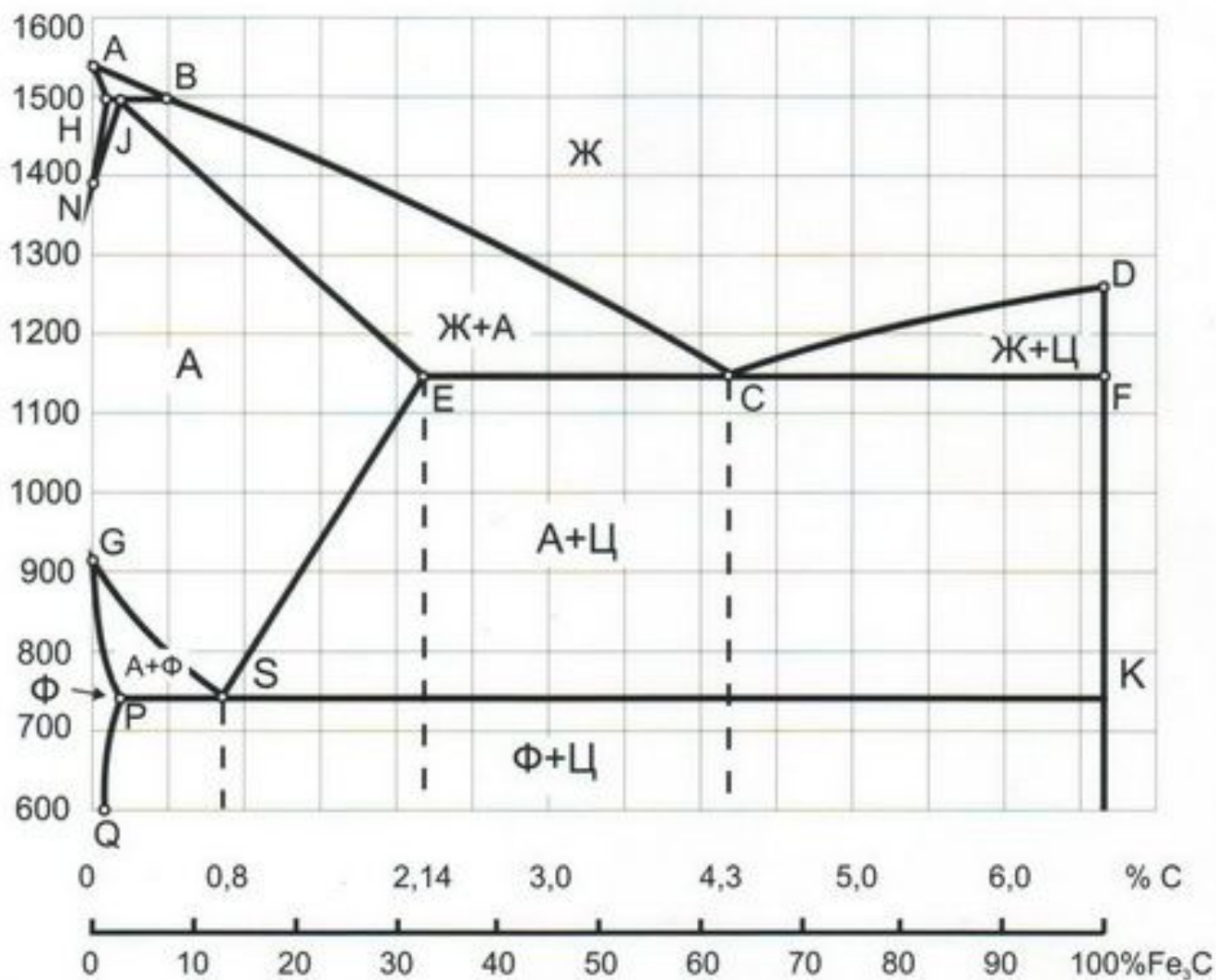
ферромагнитен (точка Кюри 210°C), обладает высокой

твердостью (HB 800) и малопластичен.

**Графит** - углерод, выделяющийся в железоуглеродистых сплавах в свободном состоянии. Он имеет слоистую гексагональную кристаллическую решетку и низкую прочность.

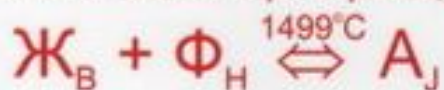


## Диаграмма состояний железо-цементит



Перитектическое превращение - (линия HJB) - 1499°C;  
 Эвтектическое превращение - (линия ECF) - 1147°C;  
 Эвтектоидное превращение - (линия PSK) - 727°C;

## Перитектическое превращение

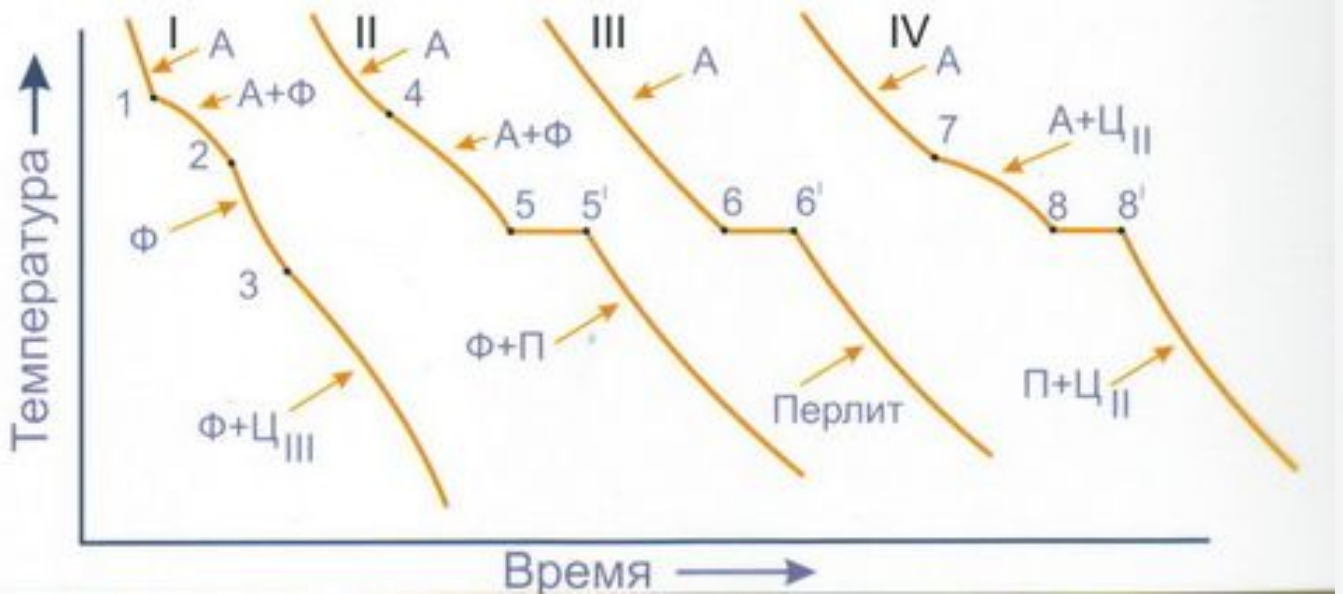


## Эвтектическое превращение





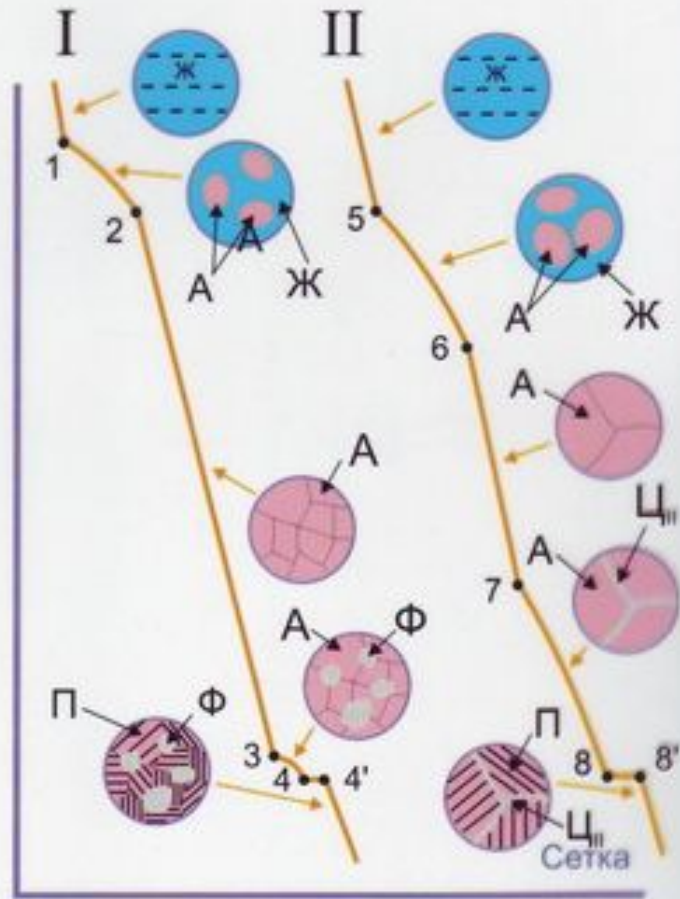
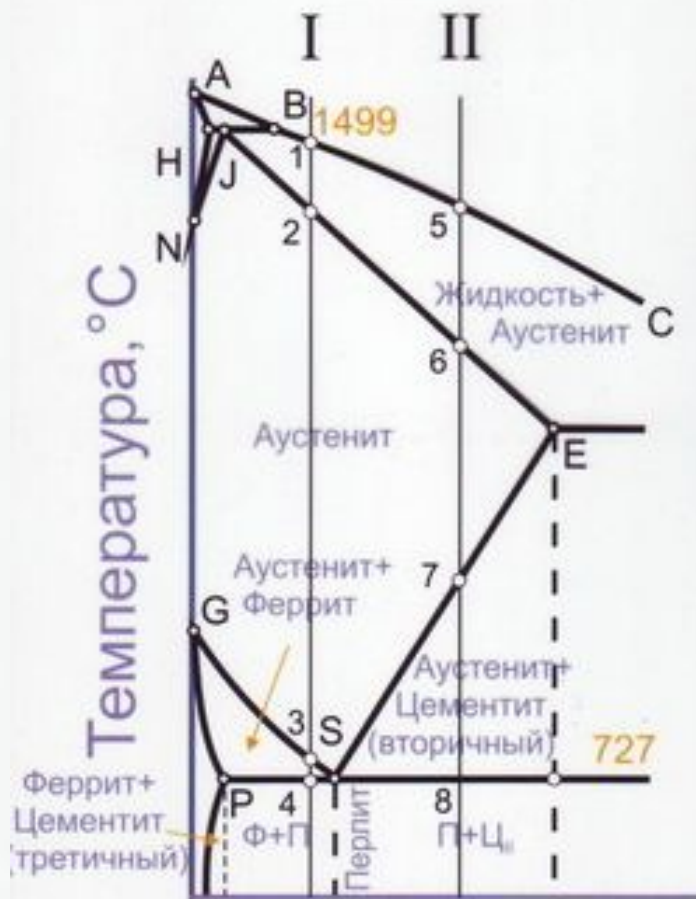
## Эвтектоидное превращение



# Структурная диаграмма состояний железо-цементит



# ПРЕВРАЩЕНИЯ В СТАЛЯХ ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ



ДОЭВТЕКТОИДНАЯ  
СТАЛЬ (40)



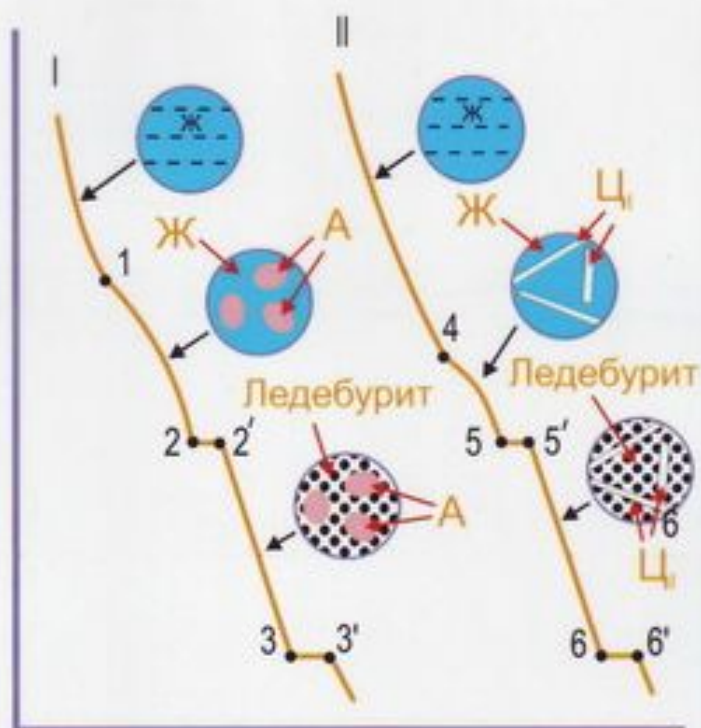
ЭВТЕКТОИДНАЯ  
СТАЛЬ (У8)



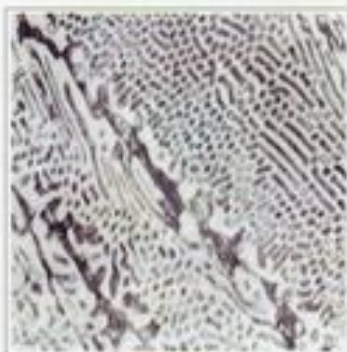
ЗАЭВТЕКТОИДНАЯ  
СТАЛЬ (У12)



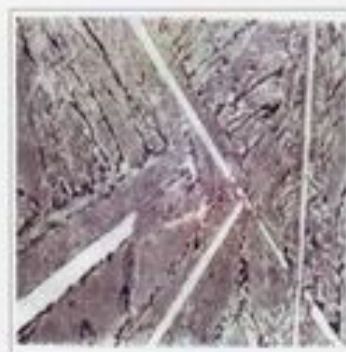
# ПРЕВРАЩЕНИЯ В ЧУГУНАХ ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ



ДОЭВТЕКТИЧЕСКИЙ  
ЧУГУН

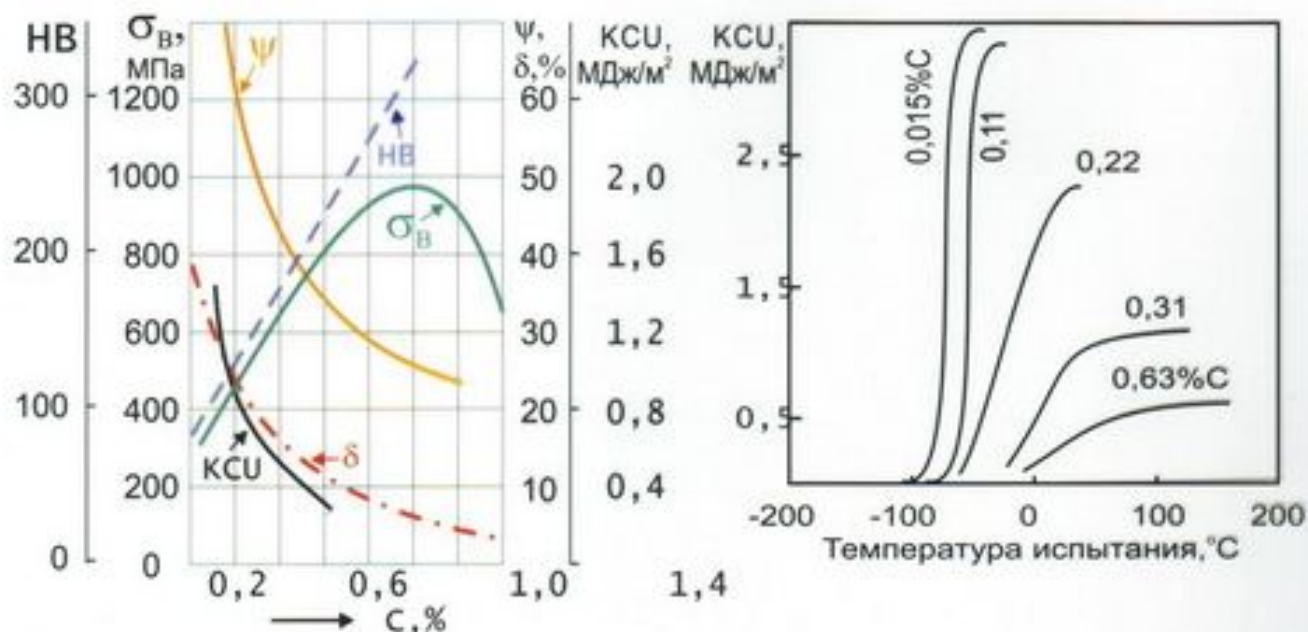


ЭВТЕКТИЧЕСКИЙ  
ЧУГУН

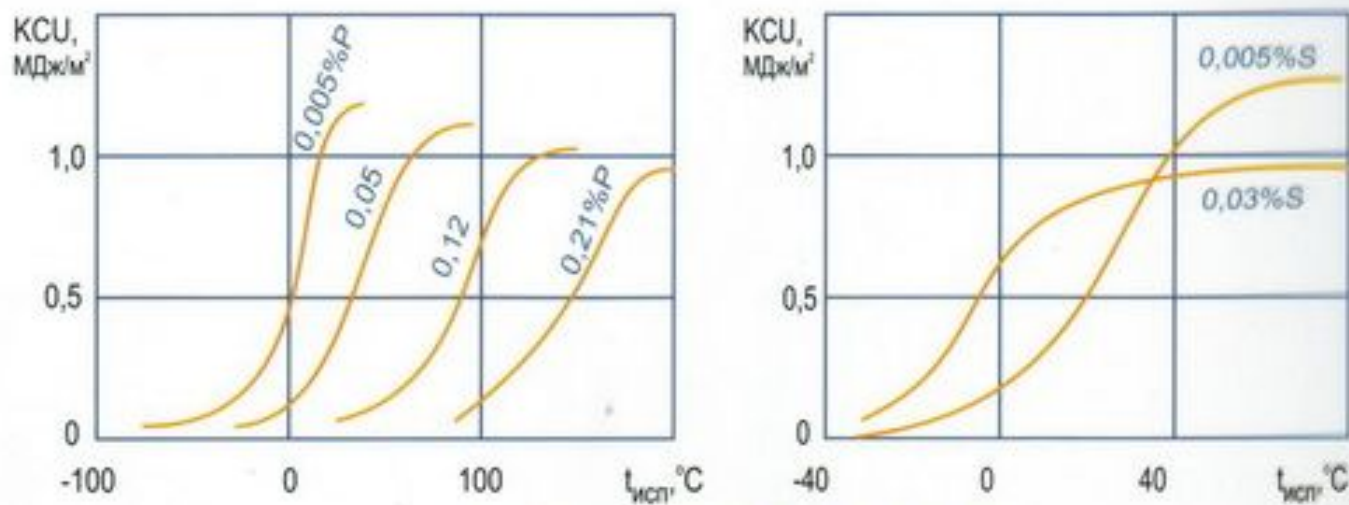


ЗАЭВТЕКТИЧЕСКИЙ  
ЧУГУН

## Влияние углерода на свойства стали



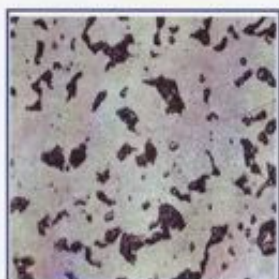
## Влияние примесей на свойства стали



Сталь содержит 0,2%С и 1%Mn

## МИКРОСТРУКТУРЫ ДОЭВТЕКТОИДНЫХ СТАЛЕЙ

Светлые зерна - ферритные, темные зерна пластинчатый перлит



Сталь 10



Сталь 20



Сталь 30



Сталь 40



Сталь 60



## МИКРОСТРУКТУРЫ ЗАЭВТЕКТОИДНЫХ СТАЛЕЙ



Сталь У8

Пластинчатый перлит



Сталь У12

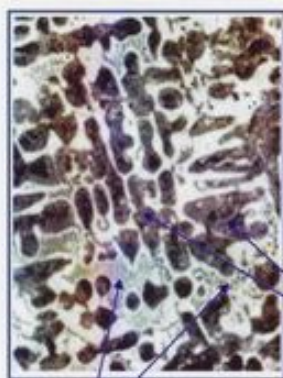
Пластинчатый перлит  
и цементитная сетка



Зернистый перлит

## МИКРОСТРУКТУРЫ БЕЛЫХ ЧУГУНОВ

Доэвтектический  
белый чугун



Ледобурит

Перлит

Эвтектический  
белый чугун



Эвтектика  
(ледобурит)

Заэвтектический  
белый чугун



Ледобурит

Цементит  
первичный

# Углеродистые конструкционные стали.

Они делятся на два класса:

- стали обыкновенного качества;
- качественные стали.

## 1. Углеродистые стали обыкновенного качества

Их маркируют буквами **Ст** и цифрами 0,1,2,3,4,5 и 6, определяющими их химический состав.

марка стали	Ст 0	Ст 1	Ст 2	Ст 3	Ст 4	Ст 5	Ст 6
содержание С, %	не более 0.23	0.06-0.12	0.09-0.15	0.09-0.15	0.14-0.22	0.28-0.37	0.38-0.49
$\sigma_B$ , МПа	не менее 310	320-340	340-440	380-490	420-540	500-640	600-670
$\delta$ , % не менее	20	31	29	23	21	17	12

В зависимости от условий раскисления различают стали: спокойные "сп", полуспокойные "пс" и кипящие "кп".

Например: Ст 2сп, Ст 2пс, Ст 2кп.

Концентрация марганца в сталях - 0.25 - 0.80 %.

Концентрация кремния в кипящих, полуспокойной и спокойной сталях не более 0.05 %, 0.05 - 0.15 % и 0.15 - 0.30 %, соответственно.

Допустимое содержание фосфора и серы - 0.04 и 0.05 %, соответственно.

В некоторых сталях допускается повышенное содержание марганца до 1,1 - 1,2 %. Тогда в маркировку добавляется буква **Г**.

Например: Ст 3Гсп.



# Углеродистые конструкционные стали.

## 2. Углеродистые качественные стали

По содержанию углерода они подразделяются на

**низкоуглеродистые** (менее 0.25% C)

**среднеуглеродистые** ( 0.3 - 0.5% C)

**высокоуглеродистые** (0.6 - 0.8% C)

Стали содержат 0.35 - 0.80% Mn, 0.17- 0.37% Si.

Содержание примесей S < 0.04% и P < 0.035%.

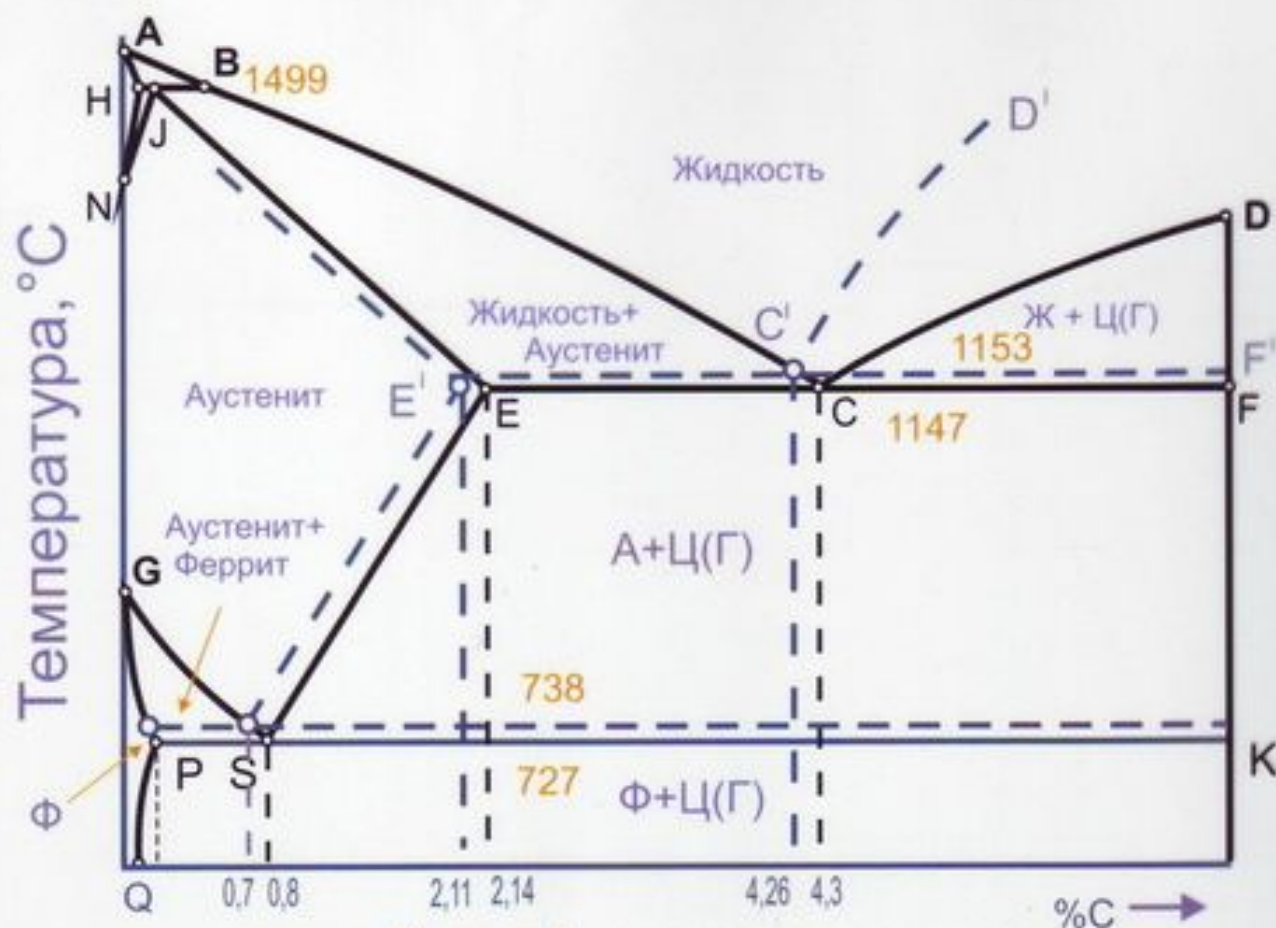
**Маркировка:** стали маркируют двумя цифрами, указывающими среднее содержание углерода в сотых долях процента.

Состав стали и их свойства после нормализации.

марка стали	08	10	20	30	40	50	60	70
содержание C, %	0.05-0.12	0.07-0.14	0.17-0.24	0.27-0.35	0.37-0.45	0.47-0.55	0.57-0.65	0.67-0.75
$\sigma_T$ , МПа	200	210	250	300	340	380	410	430
$\sigma_B$ , МПа	330	340	420	500	580	640	690	730
$\delta$ , %	33	31	25	21	19	14	12	9
$\psi$ , %	60	55	55	50	45	40	35	30

**Диаграмма состояния  
железо-графит,  
чугуны**

# ДИАГРАММА СОСТОЯНИЙ СИСТЕМЫ ЖЕЛЕЗО - ГРАФИТ



## Классификация чугунов

Белые - углерод связан в цементит  $Fe_3C$

Серые - углерод находится в виде графита

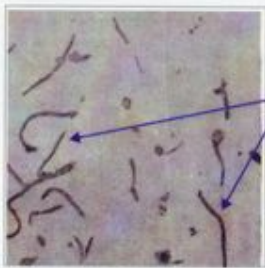
Серые чугуны подразделяются :

- по форме включений графита на **серые**, **ковкие** и **высокопрочные**
- по структуре металлической основы на **перлитные** ( $C_{связ} = 0,8\%$ ), **феррито-перлитные** ( $C_{связ} < 0,8\%$ ) и **ферритные** ( $C_{связ} = 0\%$ ).



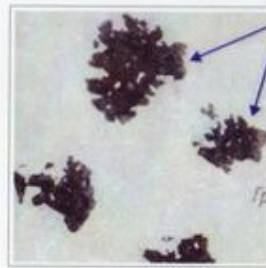
# МИКРОСТРУКТУРЫ СЕРЫХ ЧУГУНОВ

Виды включений графита  
(Нетравленные шлифы)



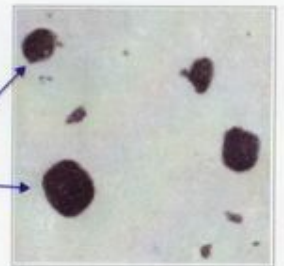
Графит  
(пластинчатый)

Серый чугун



Графит  
(хлопья)

Ковкий чугун



Графит  
(сферический)

Высокопрочный  
чугун

# СЕРЫЕ ЧУГУНЫ

Включения графита имеют форму пластин



Получению серого чугуна способствует:

- повышение содержания кремния
- медленное охлаждение.

Химический состав:

2,9-3,7% C, 1,2-2,6%Si, 0,5-1,1%Mn

Нетравленный шлиф

Серый перлитный



Серый феррито-перлитный



Серый ферритный



## Маркировка серых чугунов

СЧ20

↑ Предель прочности на разрыв (200 МПа)  
↑ Серый чугун

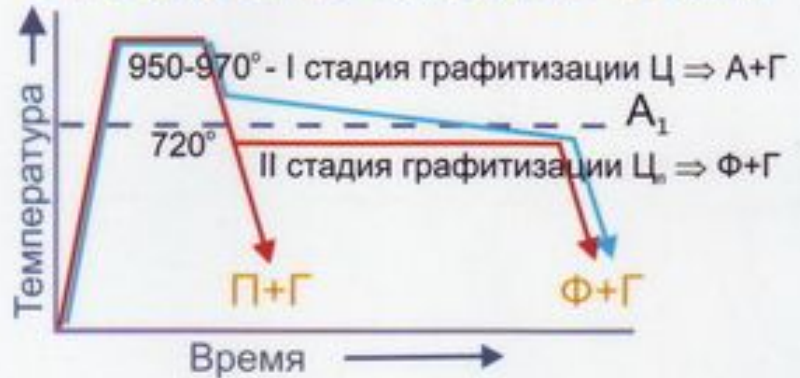
# КОВКИЕ ЧУГУНЫ

Включения графита имеют хлопьевидную форму

Ковкий чугун получают путем отжига белого чугуна, содержащего 2,4-2,9% C, 1,0-1,6% Si, 0,2-1,0% Mn

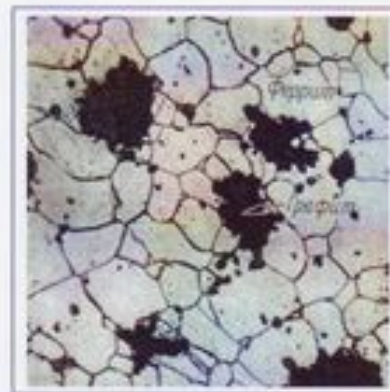


Нетравленный шлиф



Ковкий перлитный

Ковкий ферритный



## Маркировка ковких чугунов

КЧ 50-5 ← Относительное удлинение (5%)

↑ ← Предел прочности на разрыв (500 МПа)

↑ ← Ковкий чугун



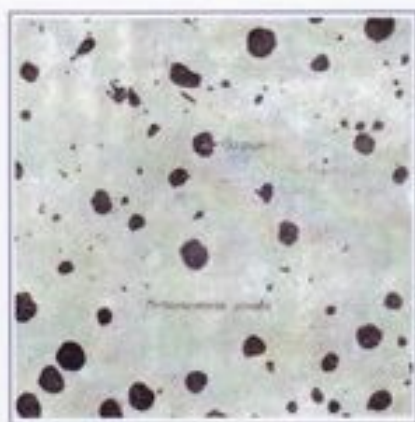
# ВЫСОКОПРОЧНЫЕ ЧУГУНЫ

Включения графита имеют шаровидную форму

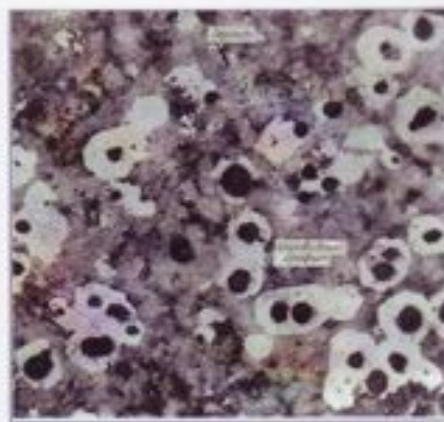
**Высокопрочный** чугун получают путем модифицирования серого чугуна магнием или церием.

**Химический состав:** 3.0-4.0% C, 2.5-3.8% Si, 0.2-0.7% Mn, 0.02-0.08% Mg, <0.02% S, <0.1% P

Нетравленный шлиф



Феррито-перлитная основа



**Маркировка высокопрочных чугунов**

**ВЧ 45**

↑ Предель прочности на разрыв (450 МПа)  
↑ Высокопрочный чугун

# **Теория термической обработки стали**

## Критические точки железа и стали

Критические точки железа: Точка  $A_3$  - температура равновесия  $Fe_\alpha \rightleftharpoons Fe_\gamma$  ( $911^\circ C$ )

Точка  $A_4$  - температура равновесия  $Fe_\gamma \rightleftharpoons Fe_\delta$  ( $1392^\circ C$ )

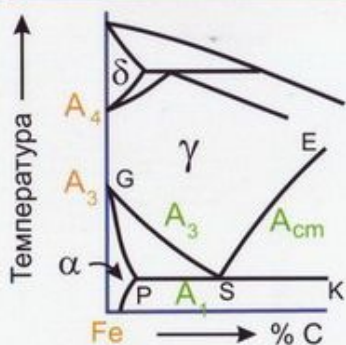
Критические точки стали: Точка  $A_1$  (линия PSK) - температура эвтектоидного превращения:

при медленном охлаждении аустенит состава S превращается в феррит состава P и цементит, при медленном нагреве реакция идет в обратном направлении.

Точка  $A_3$  (линия GS) - начало выделения феррита из аустенита при медленном охлаждении или конец превращения феррита в аустенит при медленном нагреве.

Точка  $A_{cm}$  (линия SE) - начало выделения цементита из аустенита при медленном охлаждении или окончание растворения цементита в аустените при медленном нагреве.

Точка  $A_2$  ( $768^\circ C$ ) - температура перехода феррита из ферромагнитного в парамагнитное состояние при нагреве и в обратном направлении при охлаждении.



Критические точки, определенные при нагреве -  $A_{C1}, A_{C3}, \dots$ , а при охлаждении -  $A_{r1}, A_{r3}, \dots$



## Основные превращения в сталях при термической обработке

Превращение феррито-карбидной структуры в аустенит при нагреве выше точки  $A_1$

Диффузионное (перлитное) превращение аустенита в феррито-карбидную структуру при небольших переохлаждениях ниже точки  $A_1$

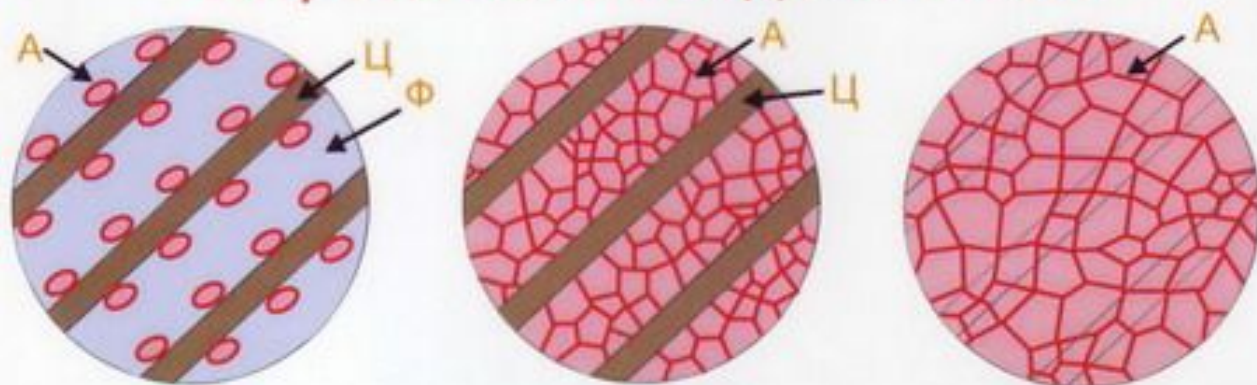
Бездиффузионное сдвиговое (мартенситное) превращение аустенита в мартенсит при больших переохлаждениях ниже точки  $A_1$

(*Мартенсит* - пересыщенный твердый раствор внедрения углерода в  $\alpha$ -железе)

Промежуточное (бейнитное) превращение аустенита в температурном интервале между перлитным и мартенситным превращениями

Превращение мартенсита в феррито-карбидную структуру при нагреве до температур ниже точки  $A_1$

## Образование аустенита при нагреве эвтектоидной стали

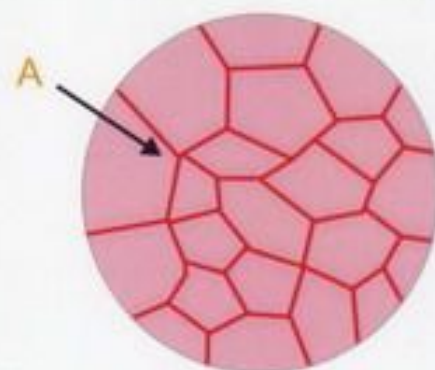
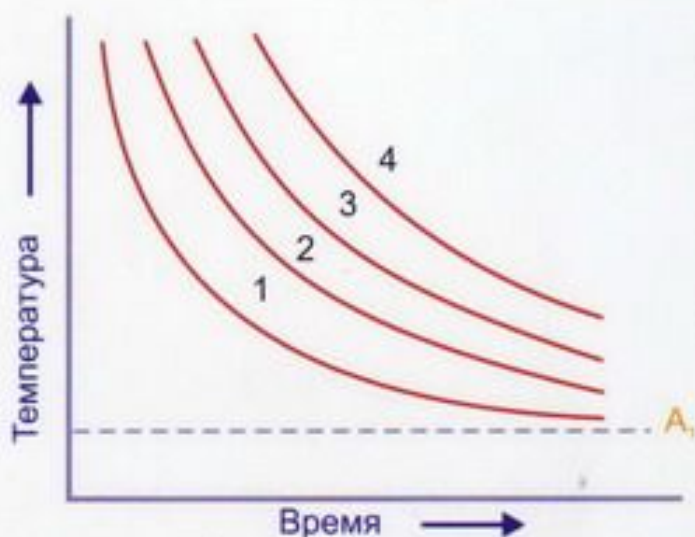


1 - Образование зародышей аустенита

2 - исчезновение феррита

3 - растворение цементита, аустенит неоднороден

### Диаграмма изотемического образования аустенита



4 - гомогенизация аустенита, однородный аустенит

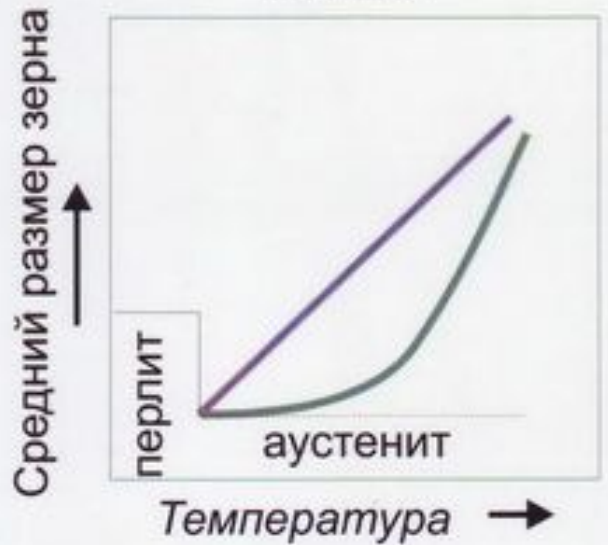
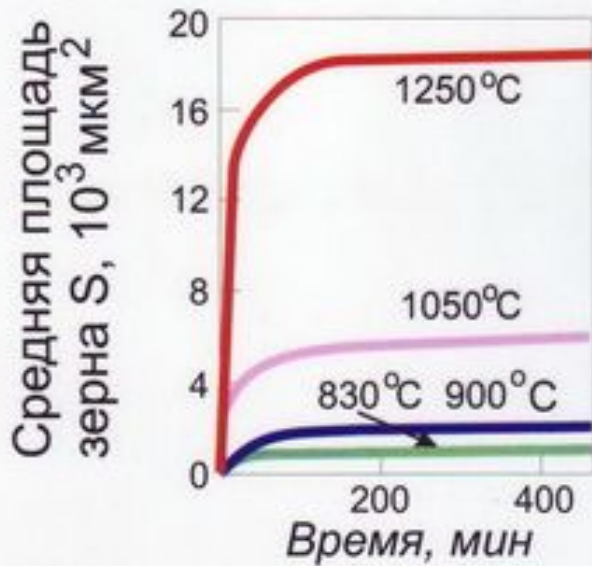
1 - начало образования аустенита; 2 - исчезновение феррита;  
3 - конец растворения цементита; 4 - конец гомогенизации аустенита.



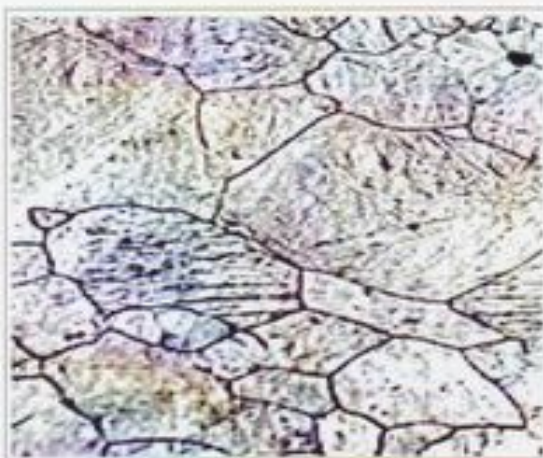
# Рост аустенитного зерна при нагреве

Изменение размера аустенитного зерна при нагреве эвтектоидной стали

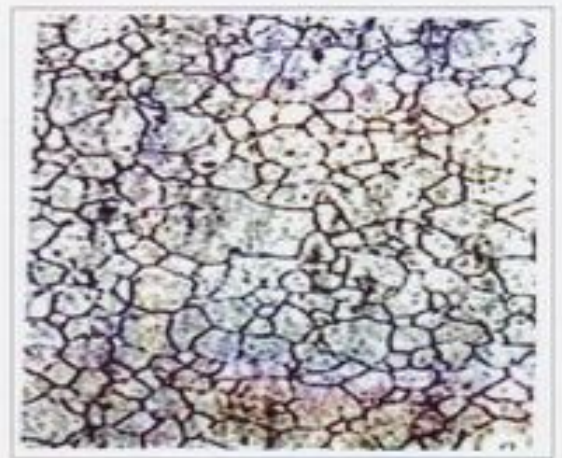
Наследственно мелкозернистые и крупнозернистые стали



Нагрев 900°C



Сталь с малым содержанием Al



Сталь, раскисленная Al



# Диффузионное (перлитное) превращение переохлажденного аустенита

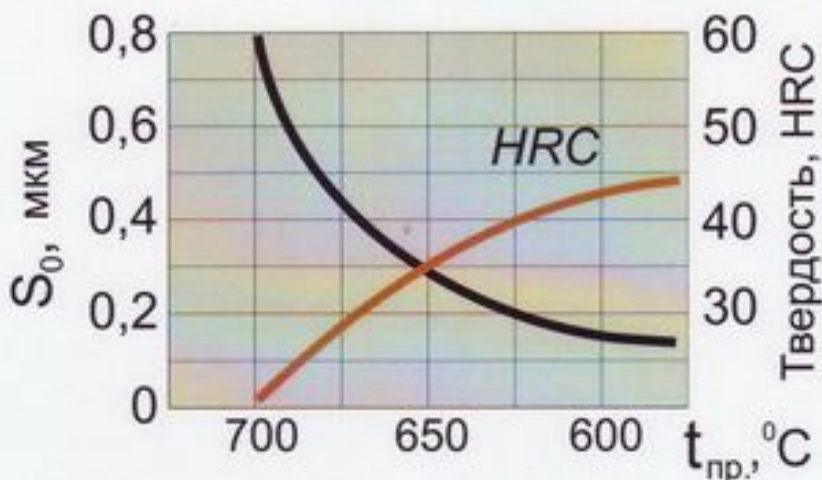
Схема образования перлита в зерне аустенита



В зависимости от дисперсности различают:

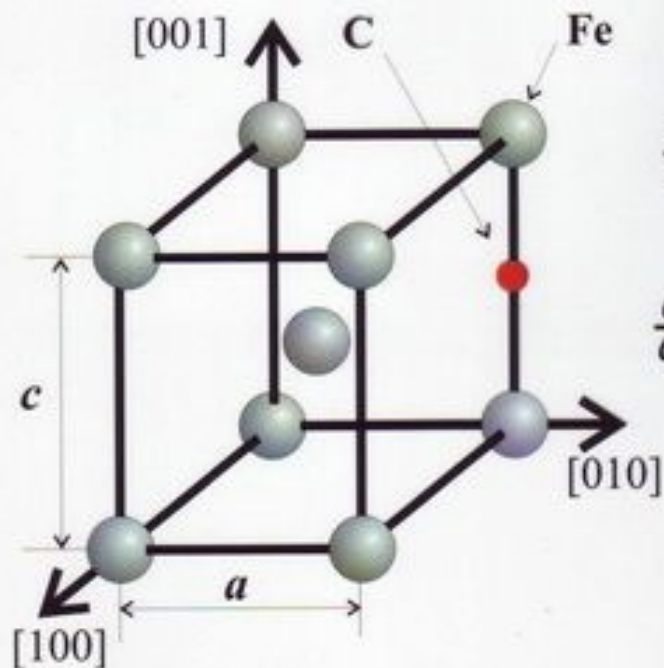
- **перлит** (700-650°C)  $S_0=0,5-1,0$  мкм
- **сорбит** (650-600°C)  $S_0=0,2-0,4$  мкм
- **троостит** (600-550°C)  $S_0<0,1$  мкм

Зависимость твердости и межпластинчатого расстояния от температуры перлитного превращения



## Мартенситное превращение

Мартенсит - пересыщенный твердый раствор внедрения углерода в  $\alpha$  - железе



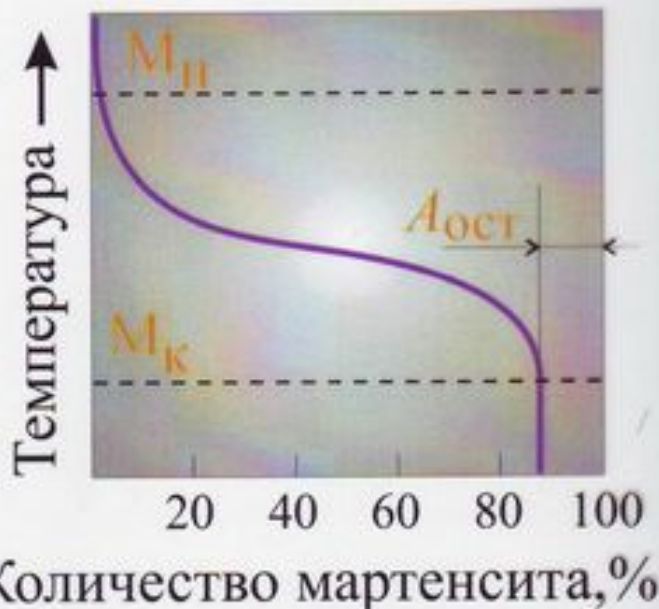
$\frac{c}{a}$  - степень тетрагональности  
решетки мартенсита

$$\frac{c}{a} = 1 + 0,046 \cdot C (\%)$$

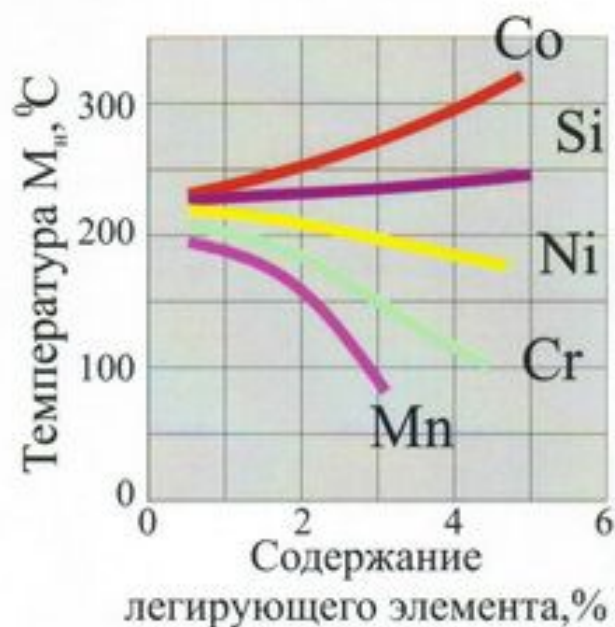
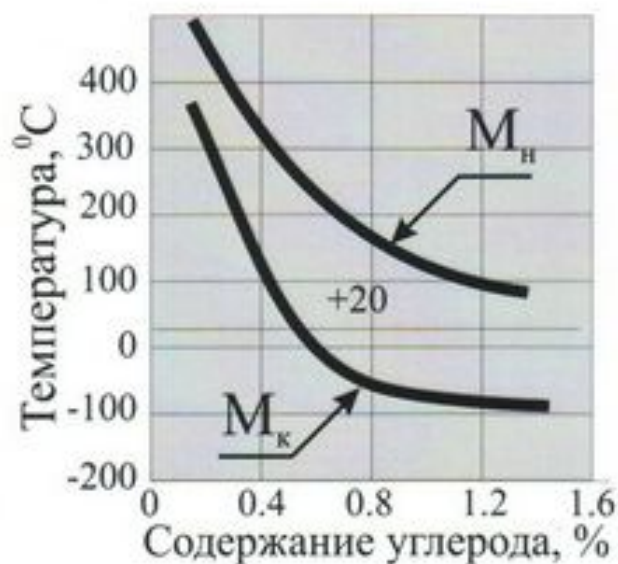
Кривая мартенситного  
превращения

$M_H$  и  $M_K$  - температуры  
начала и конца мартенсит-  
ного превращения

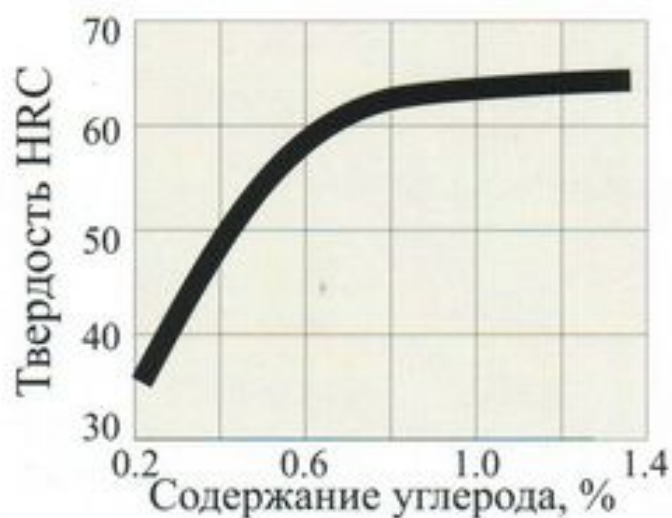
$A_{ост}$  - остаточный аустенит



## Мартенситное превращение Влияние углерода и легирующих элементов на положение мартенситных точек

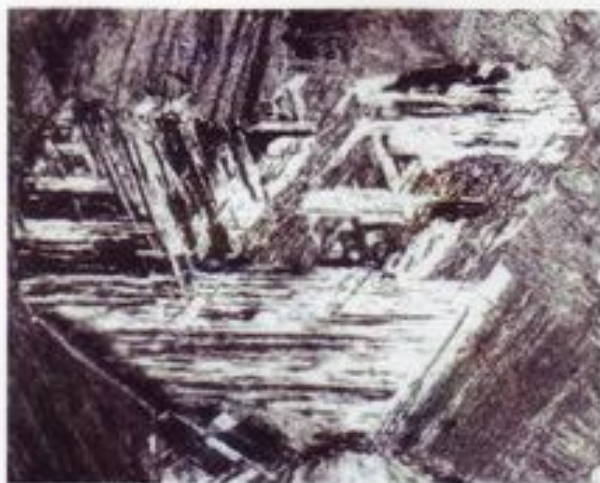


### Зависимость твердости мартенсита от содержания углерода

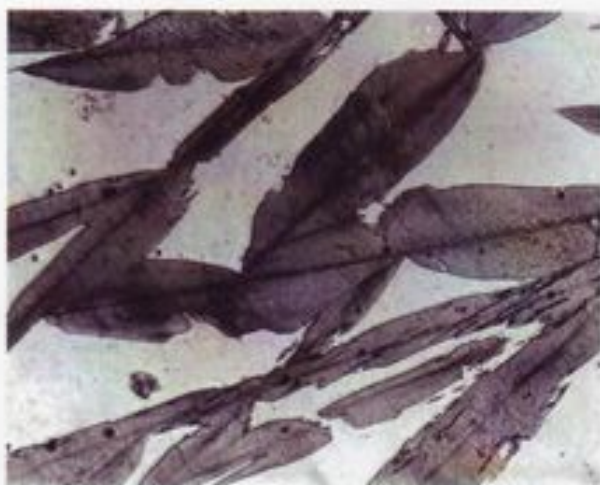




## Структура мартенсита



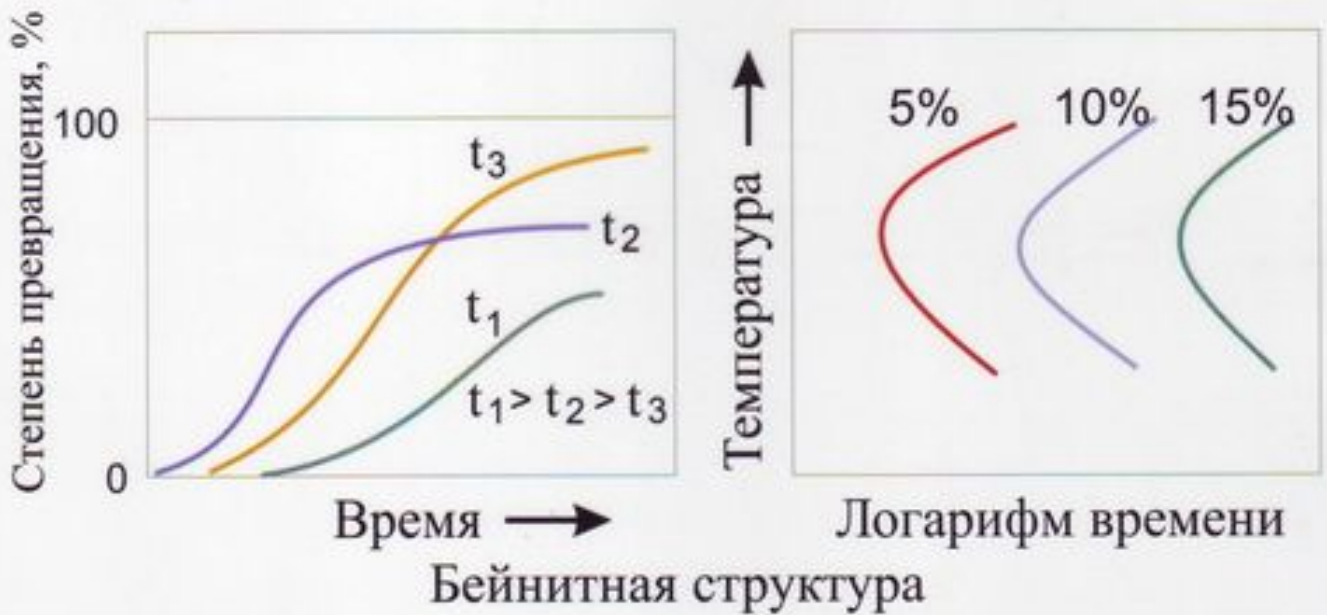
Пакетный (речный) мартенсит



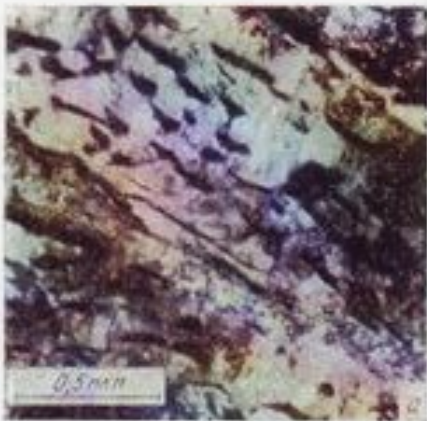
Пластинчатый (двойникованный)  
мартенсит

# Промежуточное (бейнитное) превращение

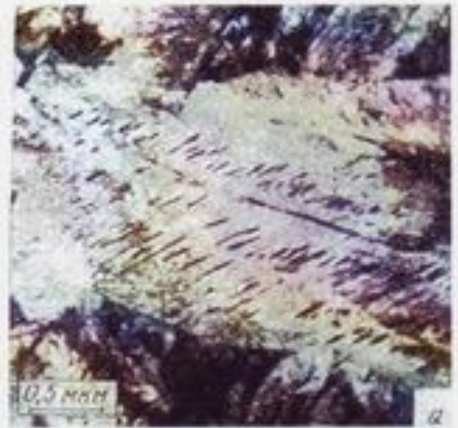
## Кинетика промежуточного превращения



Верхний бейнит



Нижний бейнит





## Отпуск закаленной стали

Процессы, происходящие при отпуске закаленных углеродистых сталей:

- распад мартенсита с образованием карбидов (20-350°C)
- превращение остаточного аустенита по механизму бейнитной реакции (200-300°C)
- снятие внутренних напряжений и превращение  $\epsilon$ -карбида ( $\text{Fe}_2\text{C}$ ) в цементит (350-400°C)
- сфероидизация и коагуляция карбидов (450°C и выше)
- уменьшение плотности дислокаций, полигонизация и рекристаллизация ферритной матрицы (450°C и выше)

Низкий отпуск

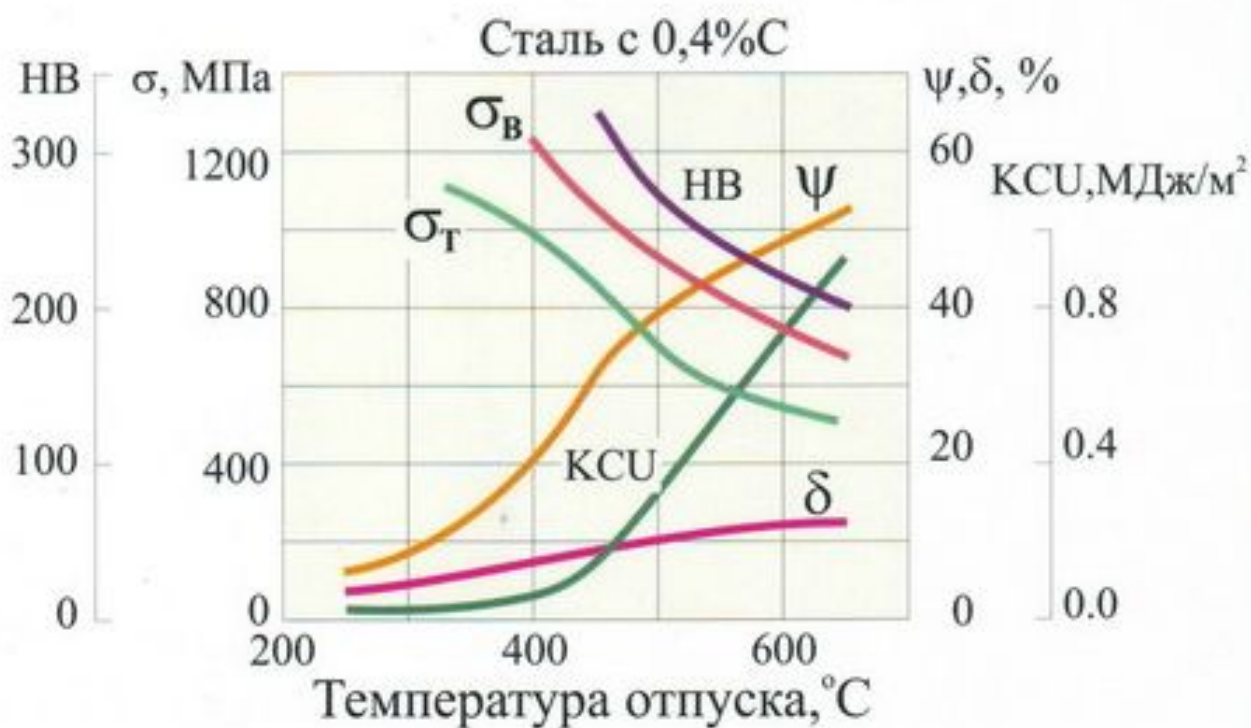
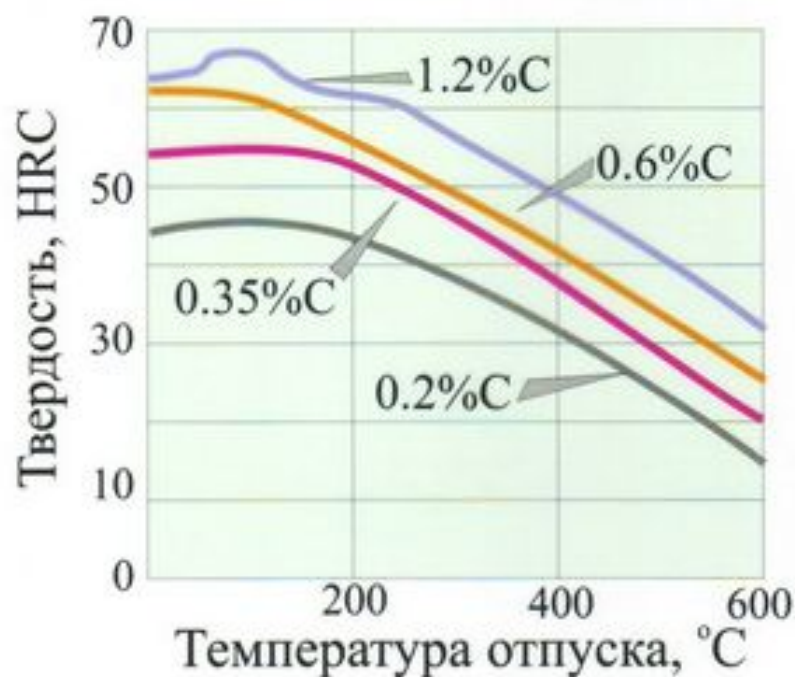


Высокий отпуск

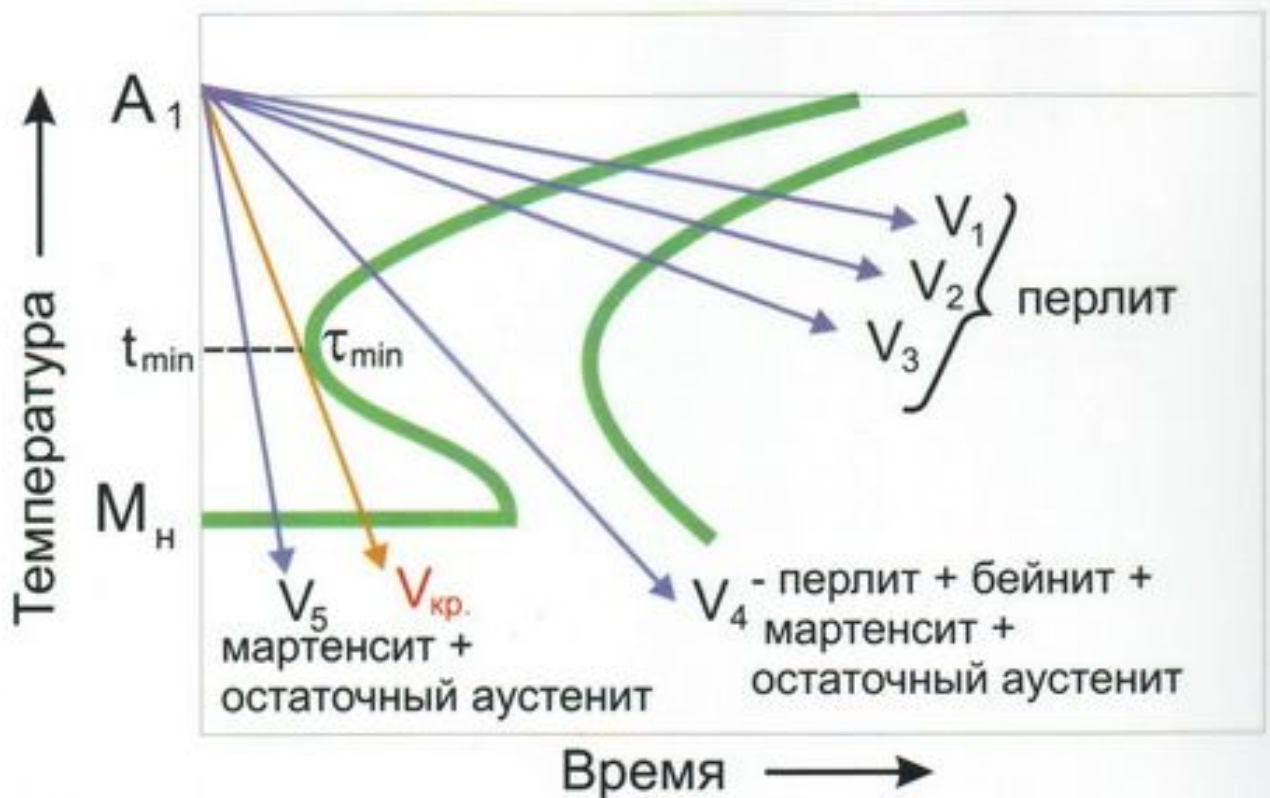




# Изменение механических свойств при отпуске



## Превращение аустенита при непрерывном охлаждении



$V_{кр.}$  - *критическая скорость закалки* - минимальная скорость охлаждения, при которой весь аустенит будет переохлажден до мартенситного интервала

$$V_{кр.} = \frac{A_1 - t_{min}}{1,5 \tau_{min}}$$

# **Технология термической обработки стали**



## Термическая обработка. Определение

Под термической обработкой понимают технологические процессы, при которых путем теплового воздействия целенаправленно изменяют структуру и свойства металлов и сплавов.

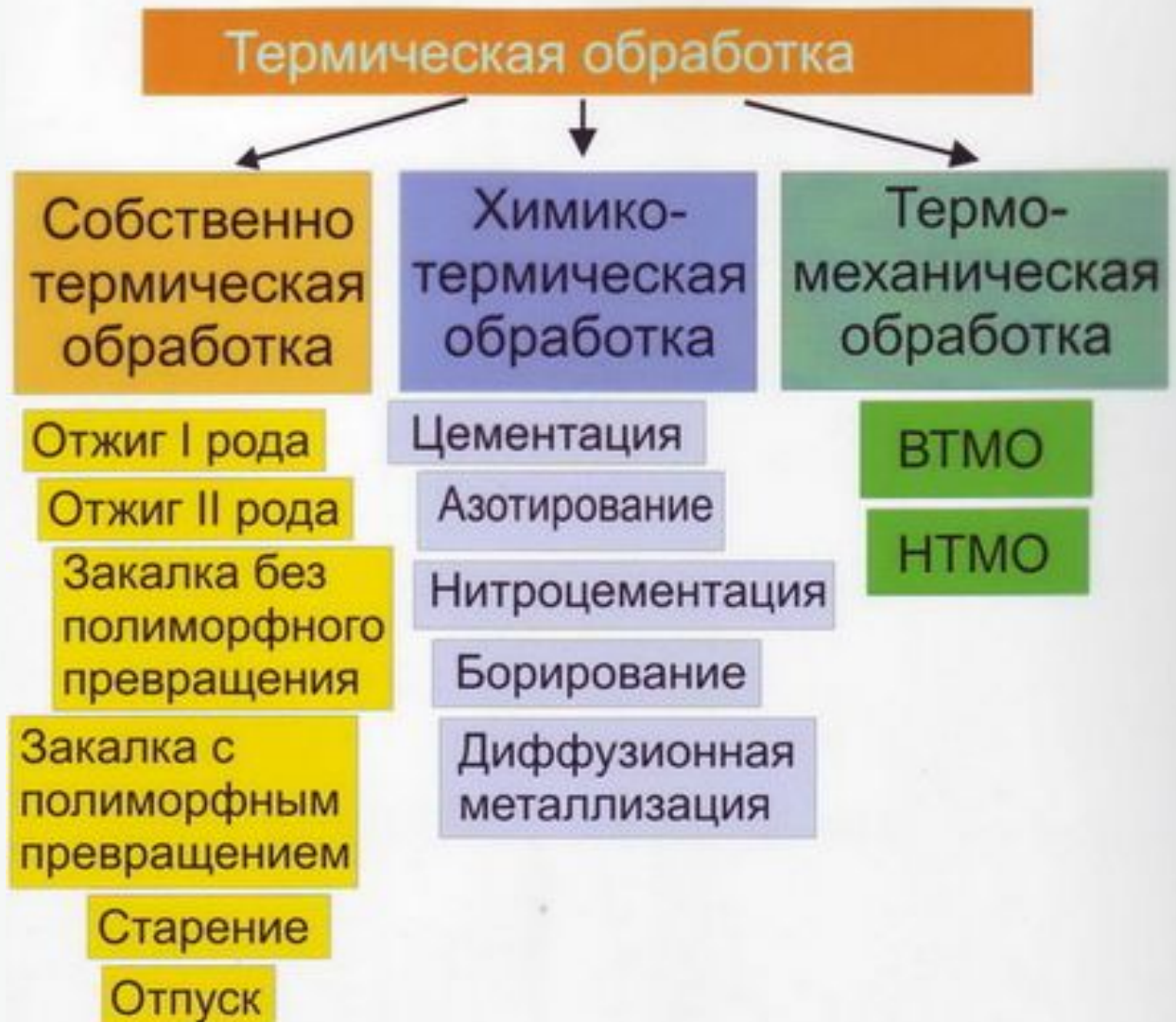
### Схема термической обработки



Основные параметры термической обработки:

- температура нагрева;
- длительность выдержки;
- скорость нагрева;
- скорость охлаждения.

## Классификация видов термической обработки



# Отжиг первого рода

При таком отжиге не используются фазовые превращения

- **Гомогенизационный (диффузионный) отжиг.**  
Цель - уменьшение дендритной (внутрикристаллической) ликвации. Температура нагрева 1100-1200°C

- **Рекристаллизационный отжиг**  
Цель - устранение наклепа, созданного холодной пластической деформацией. Нагрев производится выше температурного порога рекристаллизации (чаще всего до 600-720°C)

- **Отжиг для уменьшения внутренних напряжений**  
Нагрев до 450 - 650° С.



# Отжиг второго рода



Полный (перекристаллизационный) отжиг доэвтектоидных сталей

Для углеродистых сталей:  
аустенитизация при  $t=A_{c3} + (30-50^{\circ}\text{C})$   
+ охлаждение со скоростью  
150-200 град/час

Изотермический отжиг -  
разновидность полного отжига -  
применяется для легированных сталей.

Аустенитизация + ускоренное охлаждение до  $t=A_{c1} - (50-100^{\circ}\text{C})$  + выдержка до полного распада переохлажденного аустенита.



Неполный отжиг доэвтектоидных сталей:

Нагрев в интервал  $A_{c1}-A_{c3}$  + охлаждение по режиму полного отжига.

## Нормализация

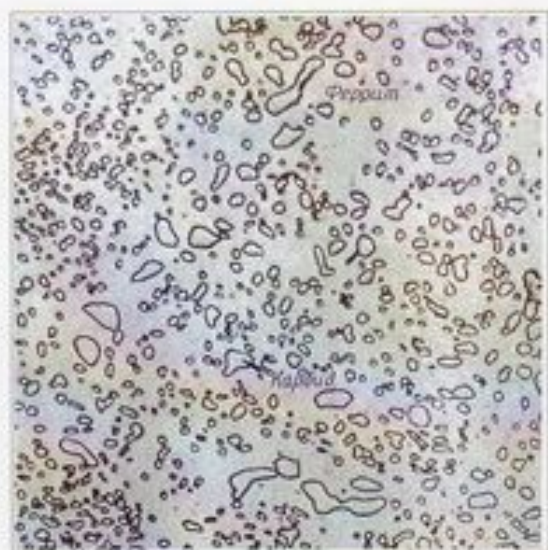
Аустенитизация при  $t=A_{c3}+(30-50^{\circ}\text{C})$  для доэвтектоидных сталей и  $t=A_{cm} + (30-50^{\circ}\text{C})$  для заэвтектоидных + ускоренное охлаждение на воздухе.

# Сфероидизирующий отжиг заэвтектоидных сталей

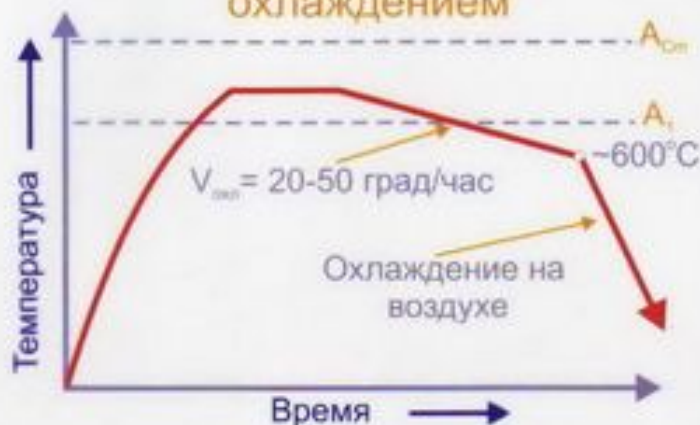
## Температура нагрева углеродистых сталей



## Структура стали после сфероидизирующего отжига



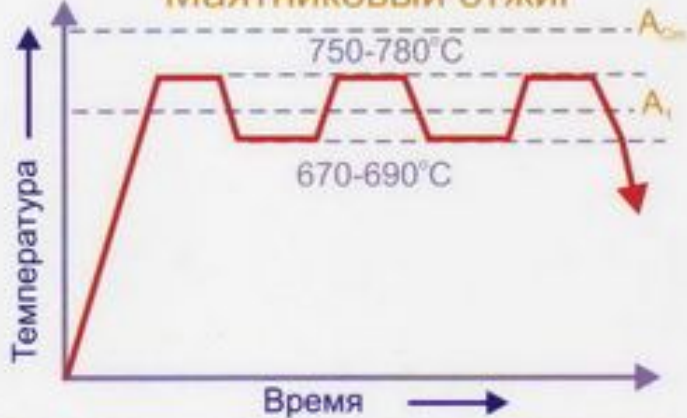
## Отжиг с непрерывным охлаждением



## Изотермический отжиг



## Маятниковый отжиг





# Закалка сталей



Температура нагрева сталей под закалку:

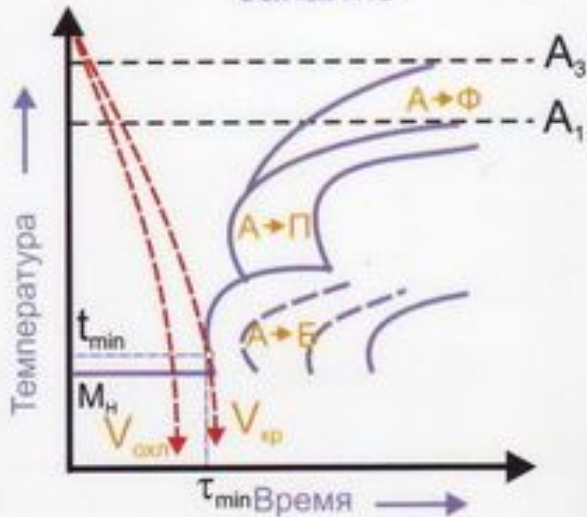
- углеродистая доэвтектоидная

$$t_{\text{н}} = A_{c3} + (30 - 50^{\circ}\text{C})$$

- углеродистая заэвтектоидная

$$t_{\text{н}} = A_{c1} + (30 - 50^{\circ}\text{C})$$

Охлаждение при закалке

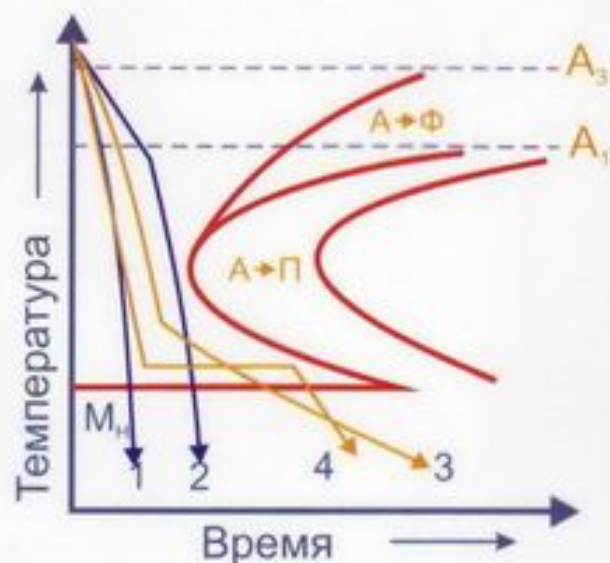


Охлаждающая способность воды и масла



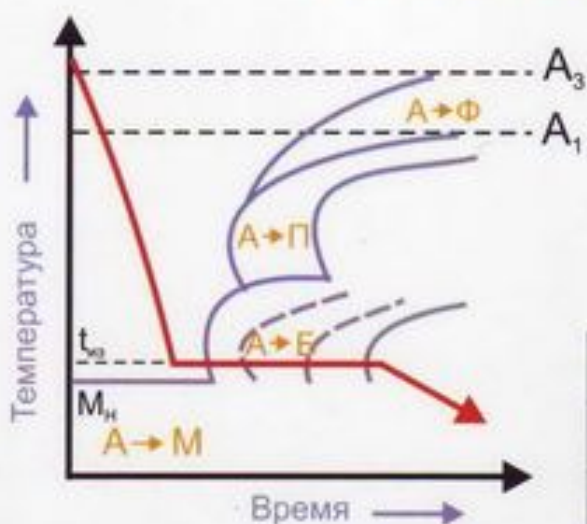


## Способы закалки стали



- 1 - непрерывная закалка
- 2 - закалка с подстуживанием
- 3 - закалка в двух средах
- 4 - ступенчатая закалка

## Изотермическая закалка



Изотермическая закалка обеспечивает формирование структуры нижнего бейнита.

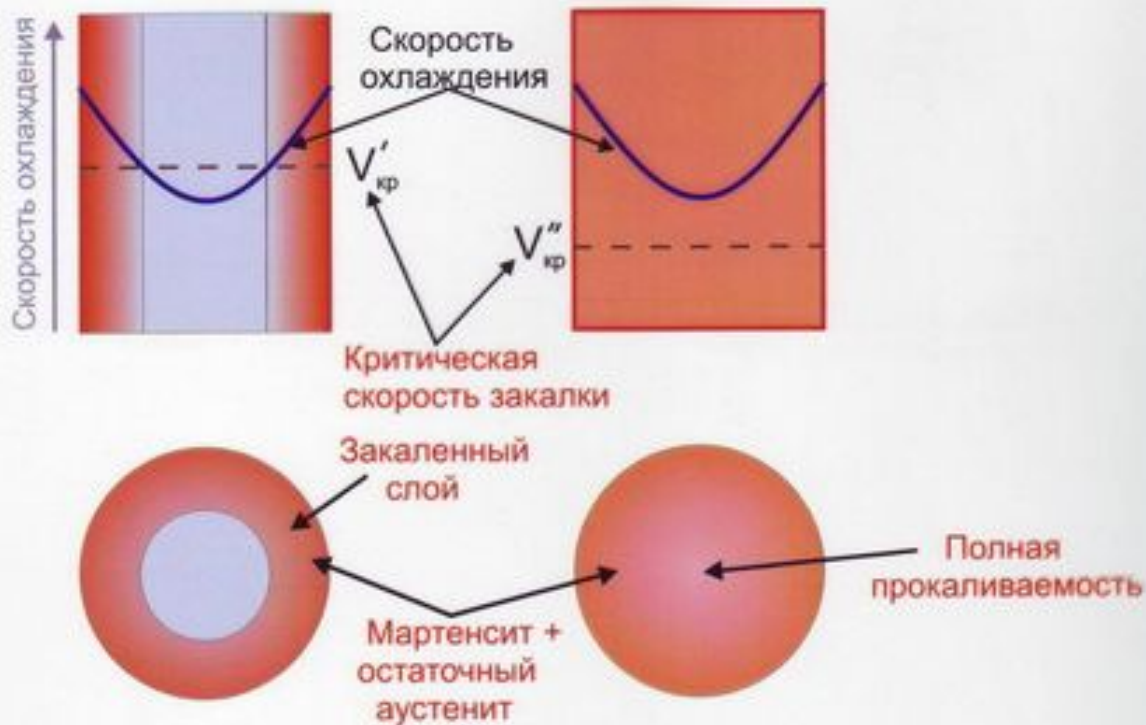
$$T_{из} = M_n + (20-40^\circ\text{C})$$

## Свойства стали 40ХСНМА

Обработка	$\sigma_{0.2}$ МПа	$\sigma_{в.}$ МПа	$\delta, \%$	$\psi, \%$	KCU, МДж/м <sup>2</sup>
Закалка в масле + отпуск 550°C, 2ч	1230	1320	12	45	0,53
Изотемическая за- калка (325°C, 1ч)	1200	1400	19	55	0,92

# Прокаливаемость стали

Под прокаливаемостью понимают глубину проникновения закаленной зоны



Определение прокаливаемости методом торцевой заковки



# Поверхностная закалка

## Закалка с нагревом ТВЧ



## Лазерная закалка



Схема термического влияния

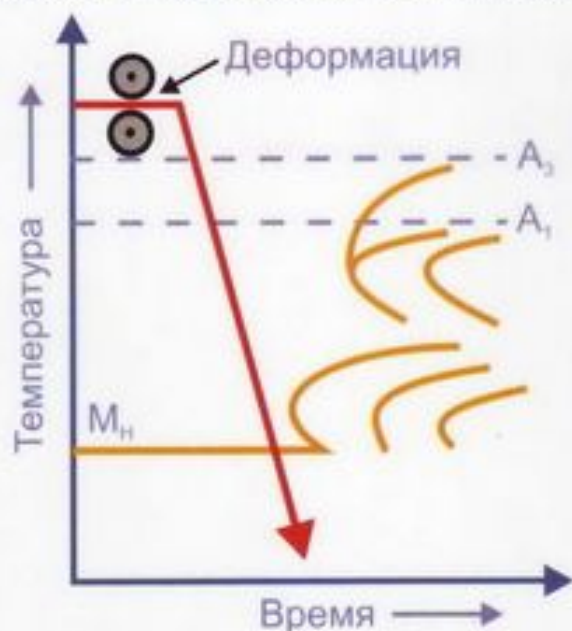


Сталь 20



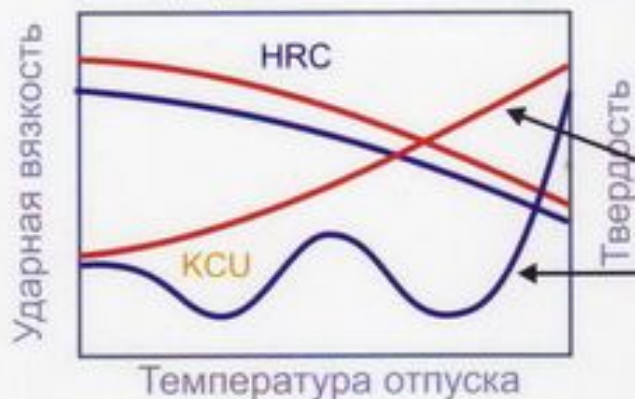
# Высокотемпературная термомеханическая обработка (ВТМО)

**ВТМО** заключается в совмещении горячей деформации, осуществляемой в аустенитном состоянии, с последующей закалкой на мартенсит и окончательном отпуске. При проведении ВТМО рекристаллизация горячедеформированного аустенита должна быть исключена.



Деформацию прокаткой, ковкой, или штамповкой проводят при 850-950°С с обжатиями 20-40%. ВТМО повышает пределы текучести и прочности на 150-250 МПа, циклическую прочность на 10-25%. Одновременно могут расти пластичность, ударная вязкость, сопротивление хрупкому разрушению

ВТМО является эффективным методом ослабления интеркристаллитных видов хрупкости сталей



Сталь 37ХНЗА

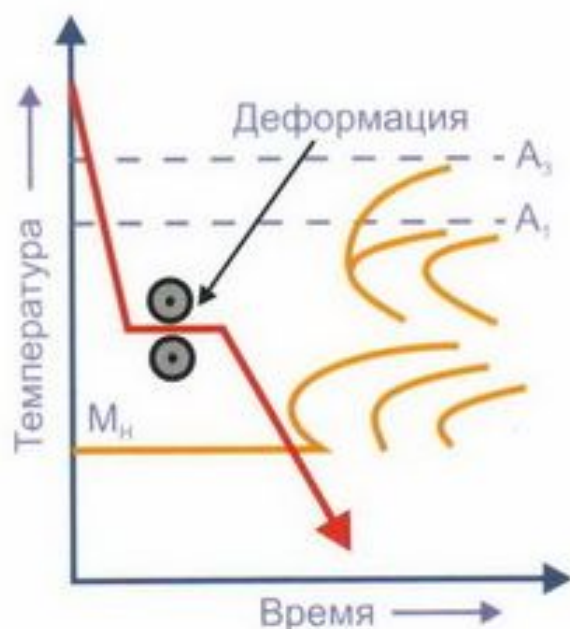
Аустенитизация при 1000°С, отпуск длительностью 1 час.

ВТМО с деформацией при 900°С на 20%.

Обычная термическая обработка

# Низкотемпературная термомеханическая обработка (НТМО)

**НТМО** заключается в совмещении интенсивной пластической деформации переохлажденного аустенита в температурном интервале его высокой устойчивости, с последующей закалкой на мартенсит и отпуском.



Деформацию прокаткой, экструзией или волочением проводят при 600-400°С с обжатиями 70-95%.

Для легированных сталей НТМО позволяет получить высокий уровень прочностных свойств.

Свойства сталей после отпуска при 220°С

Марка стали	Обработка	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %
37ХН3А	Обычная термообработка	1300	1900	6
	НТМО с деформацией при 525°С на 70% прокаткой	2600	2800	5
40ХН5С	Обычная термообработка	1300	1900	—
	НТМО с деформацией при 525°С на 70% прокаткой	2600	3300	6

# **Химико-термическая обработка**



# Химико-термическая обработка

- это технологический процесс, при котором некоторыми элементами насыщается поверхностный слой стальных деталей с целью изменения его химического состава, а следовательно, структуры и свойств.

Различают три стадии химико-термической обработки:

- **диссоциация** - процесс, протекающий во внешней среде и приводящий к выделению диффундирующего элемента в атомарном состоянии;
- **адсорбция** диффундирующего элемента поверхностью металла и растворение его в металле;
- **диффузия** элемента вглубь насыщаемого металла.

Толщина слоя  $L$  зависит:

- от продолжительности насыщения  $\tau$ . При  $t = \text{const}$   $L = k_1 \sqrt{\tau}$ .
- от температуры. При  $\tau = \text{const}$   $L = k_2 e^{-Q/RT}$  (где  $Q$  - энергия активации диффузионных процессов).

Толщина слоя тем больше, чем выше концентрация диффундирующего элемента на поверхности.



## Цементация стали

- процесс диффузионного насыщения поверхностного слоя стальных деталей углеродом.

Такой обработке подвергают стали с 0,10 - 0,20% С.

Содержание углерода в поверхностном слое - 0,8 - 1,0% С.

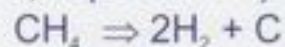
Толщина науглероженного слоя - 0,5 - 2,0 мм.



**Цементация в твердом карбюризаторе.** Процесс осуществляют при 910-930°C в карбюризаторе, состоящем из **древесного угля, 20-25% BaCO<sub>3</sub> и 3-5% CaCO<sub>3</sub>.**



**Газовая цементация** проводится при 930-950°C с использованием природного газа или жидких углеводородов (бензола, керосина ...).



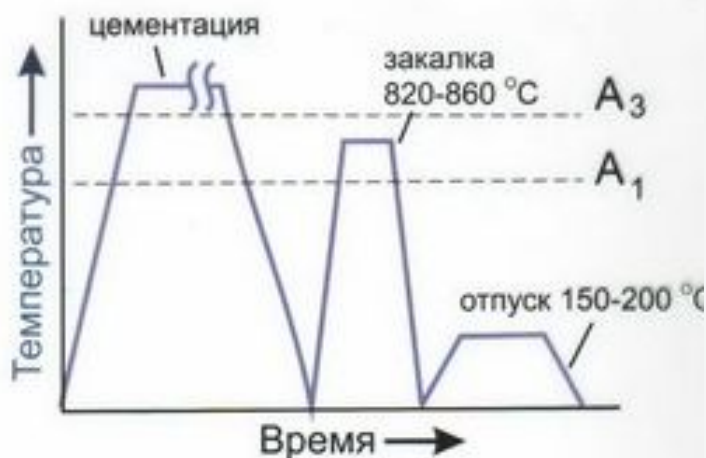


# Термическая обработка цементованных изделий

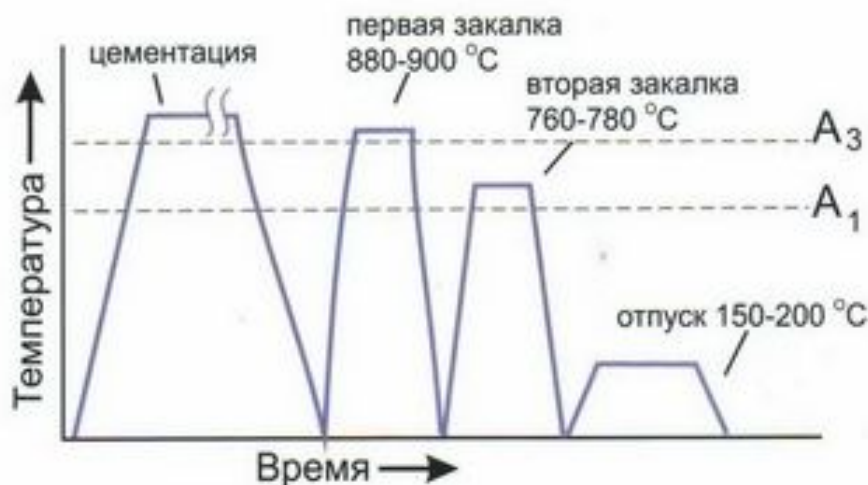
Она заключается в закатке и низком отпуске. После такой термической обработки твердость поверхностного слоя детали достигает **58-62 HRC** при твердости сердцевины **25-35 HRC** и ниже.

Закатка с цементационного нагрева.

Однократная закатка



Двойная закатка





# Азотирование стали

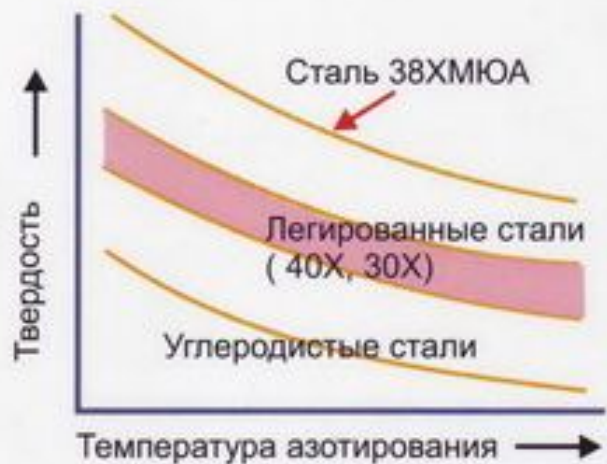
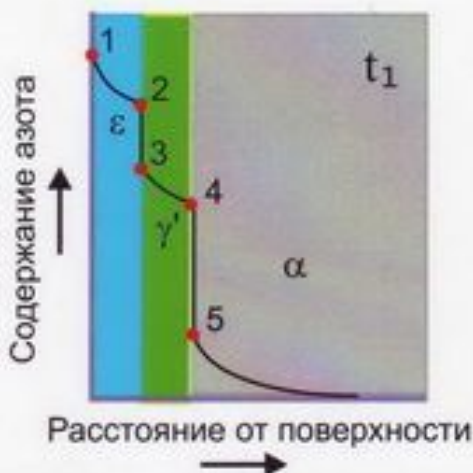
**Азотирование** - процесс диффузионного насыщения поверхностного слоя стальных деталей азотом.

Диаграмма Fe - N



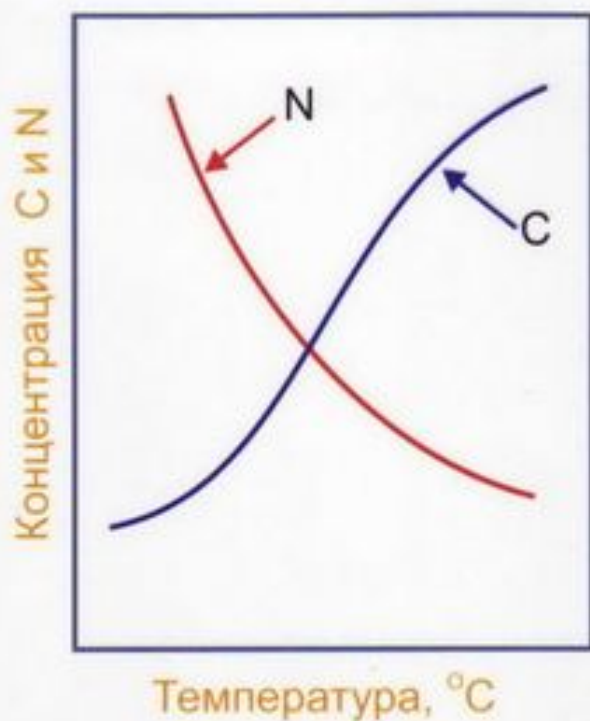
$\alpha$  – азотистый феррит  
 $\gamma$  – азотистый аустенит  
 $\gamma'$  – нитрид Fe<sub>4</sub>N  
 $\epsilon$  – нитрид Fe<sub>3</sub>N

Азотирование проводят в среде аммиака:  
 $2\text{NH}_3 \Rightarrow 2\text{N} + 6\text{H}$   
Температура азотирования 500 - 600°C  
Толщина слоя 0,3 - 0,6 мм



# Нитроцементация стали

**Нитроцементация** - процесс совместного насыщения поверхности стальных деталей углеродом и азотом. Она проводится либо в расплавленных цианистых солях (жидкостная нитроцементация или цианирование) либо в смеси науглероживающих газов и аммиака (газовая нитроцементация)



Различают высокотемпературную и низкотемпературную нитроцементацию.

## Высокотемпературная нитроцементация

Температура процесса: 820 - 960°C

толщина диффузионного слоя -

- 0,15 - 2,00 мм

После нитроцементации производят закалку и низкий отпуск.

Твердость диффузионного слоя после термической обработки 58 - 62 HRC.

## Низкотемпературная нитроцементация

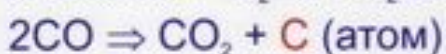
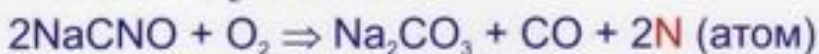
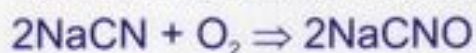
Температура процесса: 560 - 580°C

толщина диффузионного слоя -

- 0,2 - 0,6 мм.

Перед низкотемпературной нитроцементацией проводится **улучшение** - термическая обработка состоящая из закалки и высокого отпуска.

В основе жидкостной нитроцементации лежат следующие основные химические реакции:



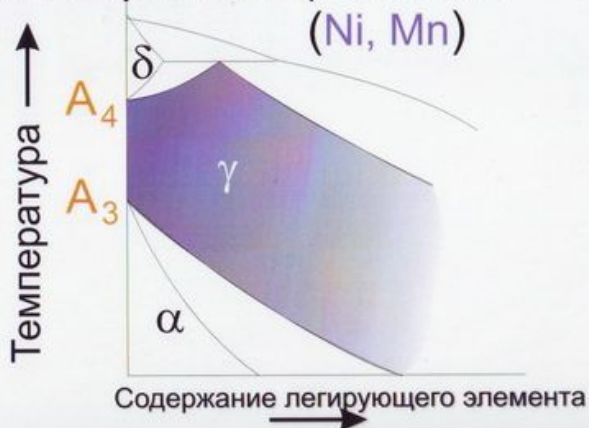
**Легированные  
конструкционные  
стали**



## Взаимодействие легирующих элементов с железом

**Первая группа** Легирующие элементы, расширяющие  $\gamma$  - область (понижают точку  $A_3$  и повышают точку  $A_4$  железа)

а) Элементы, неограниченно растворимые в  $\gamma$  - железе



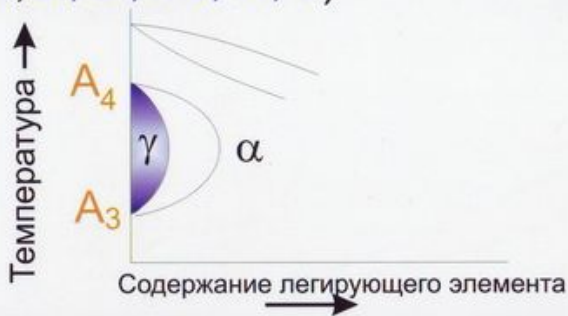
б) Элементы, образующие с железом сплавы, в которых гомогенная область ограничивается гетерогенной областью



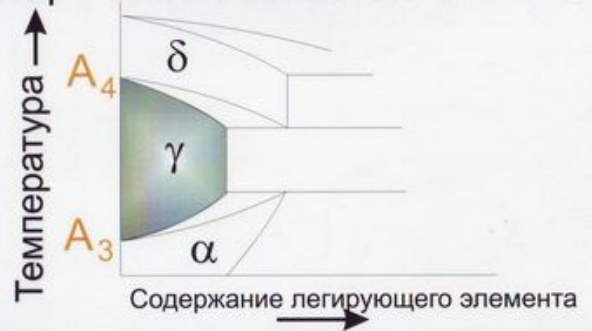
## Взаимодействие легирующих элементов с железом

**Вторая группа** Легирующие элементы, сужающие  $\gamma$  - область (повышают точку  $A_3$  и понижают точку  $A_4$  железа)

а) Элементы, полностью замыкающие  $\gamma$  - область и образующие гомогенную  $\alpha$  - область (Al, Cr, Si, Mo, W, V)



б) Элементы, образующие с железом сплавы, в которых  $\gamma$  - область ограничивается гетерогенной областью (Nb, Zr)



## Взаимодействие легирующих элементов с углеродом

### Первая группа

Некарбидообразующие элементы:

Al, Si, Ni, Co, Cu

### Вторая группа

Карбидообразующие элементы:

Fe, Mn, Cr, Mo, W, V, Nb, Zr, Ti

карбидообразующая способность →

Элементы Mn, Cr, Mo, W, растворяясь в цементите, образуют легированный карбид  $(Fe, M)_3C$  или  $M_3C$ .

### Специальные карбиды

карбиды хрома  $Cr_{23}C_6$ ,  $Cr_7C_3$  или  $M_{23}C_6$ ,  $M_7C_3$

карбиды молибдена и

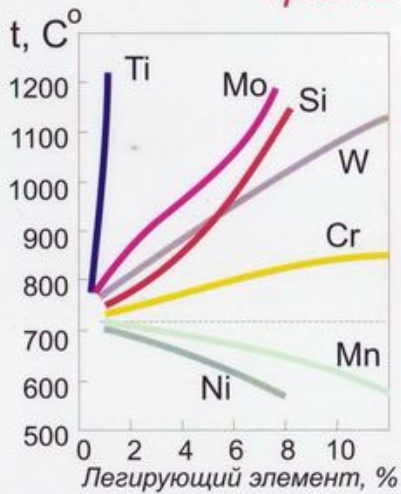
вольфрама  $MoC$ ,  $WC$ ,  $Mo_2C$ ,  $W_2C$  или  $MC$ ,  $M_2C$

карбиды ванадия,

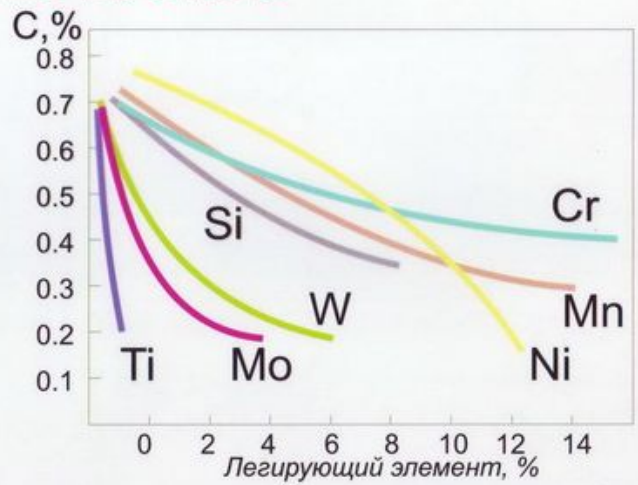
ниобия и титана  $VC$ ,  $NbC$ ,  $TiC$  или  $MC$



## Влияние легирующих элементов на критические точки стали



Влияние легирующих элементов на температуру  $A_1$



Влияние легирующих элементов на содержание  $C$  в эвтектоиде

# Конструкционные стали

Конструкционными называются стали, предназначенные для изготовления деталей машин механизмов и конструкций. Они должны обладать высокой конструктивной прочностью, под которой понимают комплекс механических свойств, обеспечивающих надежную работу материала в условиях эксплуатации.

По химическому составу конструкционные стали подразделяются на:

углеродистые

легированные

низколегированные (содержат не более 2,5% легирующих элементов)

среднелегированные (содержат от 2,5 до 10% легирующих элементов)

высоколегированные (содержат более 10% легирующих элементов)

По назначению конструкционные стали подразделяются на:

- строительные,
- машиностроительные,
- стали с особыми свойствами.

К группе машиностроительных относятся улучшаемые легированные стали, цементуемые легированные стали, подшипниковые стали. пружинные стали и др.

Группу сталей с особыми свойствами составляют коррозионностойкие, жаростойкие, жаропрочные стали и др.



# Легированные конструкционные стали

Большинство легированных конструкционных сталей являются *доэвтектоидными*.

Основные легирующие элементы в этих сталях:

хром (0,8-2,5%), кремний (0,4-1,2%), марганец (0,8-1,8%), никель (1,0-4,5%), молибден (0,15-0,4%), вольфрам (0,5-1,2), ванадий (0,06-0,3%), титан (0,03-0,09%), бор (0,002-0,005%).

**В зависимости от состава** различают стали:

- хромистые, -никелевые, - хромоникелевые и т.д.

**Маркировка:** в начале марки указывают содержание углерода в сотых долях процента; далее следует обозначение легирующих элементов и их содержание.

Легирующие элементы обозначаются: **X**-хром, **Г**-марганец, **С**-кремний, **Н**-никель, **М**-молибден, **В**-вольфрам, **К**-кобальт, **Ф**-ванадий, **Б**-ниобий, **Т**-титан, **Ю**-алюминий, **Д**-медь, **Р**-бор.

Буква **А** в середине маркировки указывает на содержание в стали азота, как легирующего элемента. Буква **А** в конце марки означает, что сталь высококачественная ( $S$  и  $P < 0,025\%$ ).

Цифры после букв указывают содержание легирующего элемента, с округлением до целого числа. При содержании элемента до 1,5% цифра не ставится.

**Например:** сталь **30ХН3А** содержит в среднем:

0,30% углерода,  
1,0% хрома,  
3% никеля,  
высококачественная.



## Строительные стали

В качестве строительных сталей используют:

- углеродистые стали обычного качества ( Ст0... Ст6 )
- низколегированные стали.

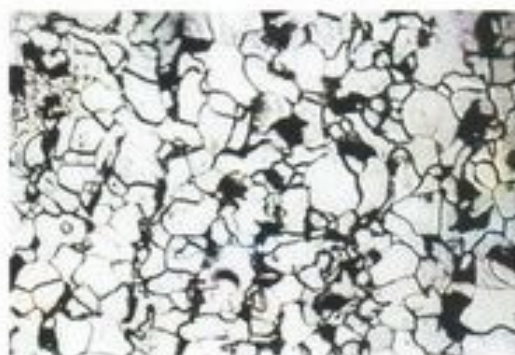
Низколегированные стали содержат не более 0.18 % **С** и в небольших количествах - **Si, Mn, V, Cr, Ni, Nb** и **Cu**.

Состав и свойства низколегированных сталей.

марка стали	Содержание , %				Свойства без термообработки		
	С	Si	Mn	Другие	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_T$ , МПа	$\delta$ , %
09Г2	$\leq 0.12$	0.17-0.37	1.4-1.8		450	310	21
09Г2С	$\leq 0.12$	0.5-0.8	1.3-1.4		480	330	21
17ГС	0.14-0.20	0.4-0.6	1.0-1.5		500	340	19
15ХСНД	0.12-0.18	0.4-0.7	0.4-0.7	Cr 0.6-0.9 Ni 0.3-0.6 Cu 0.2-0.4	500	350	21

Низколегированные стали подвергают нормализации (09Г2С, 17ГС), а также закалке и отпуску (15ХСНД).

Структура стали 09Г2С после нормализации с нагревом на 930 - 950°С.



## Цементуемые легированные стали

Цементации подвергают в основном стали с 0,08-0,25%С. После цементации проводят закалку и низкий отпуск.

### Состав цементуемых сталей.

Марка стали	Содержание, %				
	С	Mn	Cr	Ni	другие
<b>хромистые</b>					
15Х	0,12-0,18	0,3-0,9	0,7-1,0	-	-
20Х	0,17-0,23	0,5-0,8	0,7-1,0	-	-
<b>хромомарганцевые</b>					
18ХГТ	0,17-0,23	0,8-0,11	1,0-1,3	-	Ti 0,03-0,09
20ХГР	0,18-0,24	0,7-1,0	0,75-1,05	-	В 0,003%
<b>хромоникелевые</b>					
20ХН	0,17-0,23	0,3-0,8	0,4-0,7	1,0-1,4	-
12ХН3А	0,09-0,16	0,3-0,6	0,6-0,9	2,75-3,15	-
<b>хромоникельмолибденовые</b>					
18Х2Н4МА	0,14-0,20	0,25-0,55	1,35-1,65	4,0-4,5	Mo 0,3-0,4
18Х2Н4ВА	то же	то же	то же	то же	W 0,8-1,2%

### Свойства сталей 15Х, 12ХН3А и 18Х2Н4МА

Марка стали	Термическая обработка	$\sigma_{0,2}$ МПа	$\sigma_B$ МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	KCU, МДж/м <sup>2</sup>
15Х	Закалка от 880°C, масло + закалка от 720-820°C, вода (масло) +отпуск (180°C)	500	700	12	45	0,7
12ХН3А	Закалка от 860°C, масло + закалка от 760-810°C, масло +отпуск (180°C)	700	950	11	55	0,9
18Х2Н4МА	Закалка от 950°C, воздух + закалка от 860°C, воздух +отпуск (200°C)	850	1150	12	50	1,0



## Улучшаемые легированные стали.

Стали этой группы содержат 0.3 - 0.5 % С и подвергаются закалке и высокому отпуску.

### Состав сталей.

Марка стали	Содержание, %				
	С	Mn	Si	Cr	Другие
<b>Хромистые</b>					
30X	0,24-0,32	0,5-0,8	0,17-0,37	0,8-1,1	
40X	0,36-0,44	0,5-0,8	0,17-0,37	0,8-1,1	
40XФА	0,37-0,44	0,5-0,8	0,17-0,37	0,8-1,1	V 0,1-0,18
<b>Хромомарганцевые</b>					
35XГФ	0,31-0,38	0,95-1,25	0,17-0,37	1,0-1,3	V 0,06-0,12
40ГТР	0,38-0,45	0,7-1,0	0,17-0,37	0,8-1,1	Ti 0,03-0,09 B 0,001-0,005
<b>Хромокремнистые и хромокремнемарганцевые</b>					
38XC	0,32-0,42	0,3-0,6	1,0-1,4	1,3-1,6	
30XГС	0,28-0,34	0,8-1,1	0,9-1,2	0,8-1,1	

### Свойства сталей 30X и 30XГС после улучшения.

Марка стали	Термическая обработка	$\sigma_{02}$ , МПа	$\sigma_{в}$ , МПа	$\delta$ , %	$\Psi$ , %	KCU, МДж/м <sup>2</sup>
30X	закалка от 860°С, масло + отпуск при 550°С, масло (вода)	510	720	22	65	1,5
30XГС	закалка от 880°С, масло + отпуск при 550°С, масло (вода)	850	1100	10	45	0,5



# Состав и свойства улучшаемых легированных сталей

## Состав сталей

Марка стали	Содержание, %					
	C	Mn	Cr	Ni	Mo	V
<b>Хромоникелевые</b>						
40ХН	0,36-0,44	0,17-0,37	0,45-0,75	1,0-1,4	-	-
30ХН3А	0,27-0,33	0,30-0,60	0,60-0,90	2,7-3,15	-	-
<b>Хромоникельмолибденовые</b>						
40ХН2МА	0,37-0,44	0,5-0,8	0,60-0,90	1,25-1,65	0,15-0,25	-
38ХН3МФА	0,33-0,40	0,25-0,50	1,20-1,50	3,0-3,5	0,35-0,45	0,10-0,18
18Х2Н4МА	0,14-0,20	0,25-0,50	1,35-1,65	4,0-4,4	0,30-0,40	-

## Свойства сталей после закалки и отпуска при 600°C

Марка стали	$\sigma_{0,2}$ МПа	$\sigma_B$ МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	КСУ, МДж/м <sup>2</sup>
40ХН	760	910	20	60	0,8
30ХН3А	830	930	21	64	1,4
40ХН2МА	930	1070	13	55	1,0
38ХН3МФА	1100	1200	12	50	0,8
18Х2Н4МА	710	940	19	70	1,8

## Пружинные стали

Пружинные стали должны обладать высоким сопротивлением малым пластическим деформациям (предел упругости) и высоким пределом усталости при достаточной пластичности. Основные пружинные стали содержат около 0,5-0,7 % С и подвергаются закалке и среднему отпуску

Марка стали	Содержание, %				
	С	Si	Mn	Cr	другие
<b>углеродистые</b>					
65	0,62-0,70	0,17-0,37	0,5-0,8	-	-
75	0,72-0,80	0,17-0,37	0,5-0,8	-	-
<b>кремнистые</b>					
50С2	0,47-0,55	1,50 -2,00	0,6 -0,9	-	-
60С2	0,57-0,65	1,50 -2,00	0,6 -0,9	-	-
60С2ХА	0,56-0,64	1,40-1,80	0,4 - 0,7	0,70-1,00	-
60С2ХФА	0,56-0,64	1,40-1,80	0,4 - 0,7	0,90-1,20	V 0,1-0,2
<b>хромистые и хромомарганцевые</b>					
50ХФА	0,46-0,54	0,17-0,37	0,5-0,8	0,8-1,1	V 0,1-0,2
50ХГФА	0,48-0,54	0,17-0,37	0,8-1,0	0,95-1,1	V 0,1-0,2

Окончательная термическая обработка: закалка от 820-880°С в масле + средний отпуск при 410 - 480°С.

### Свойства пружинных сталей

Марка стали	Термическая обработка	$\sigma_{0,2}$ МПа	$\sigma_B$ МПа	$\delta$ %	$\psi$ %
65	Закалка от 840°С, масло + отпуск (480°С)	800	1100	10	35
60С2	Закалка от 870°С, масло + отпуск (460°С)	1200	1300	6	30
60С2ХФА	Закалка от 950°С, масло + отпуск (450°С)	1680	1820	7	30



## Подшипниковые стали

Подшипниковые стали должны обладать высокими твердостью, износостойкостью и контактной выносливостью.

Основные подшипниковые стали содержат около 1 % С и легированы хромом.

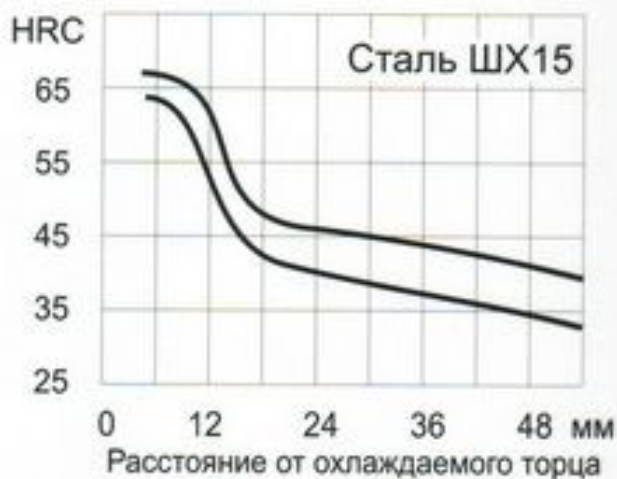
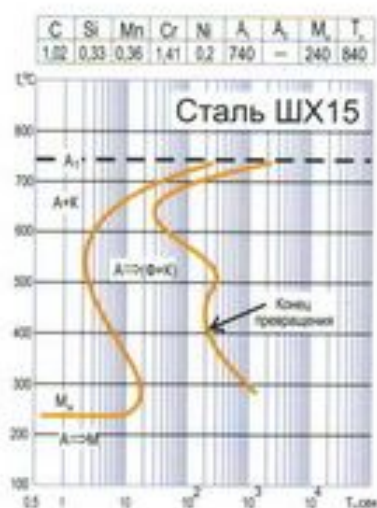
марка стали	Содержание , %			
	С	Mn	Si	Cr
ШХ15	0,95-1,05	0,20-0,40	0,17-0,37	1,30 - 1,65
ШХ15СГ	0,95-1,05	0,90-1,20	0,40-0,65	1,30 - 1,65

Маркировка: ШХ - обозначает шарикоподшипниковая хромистая, цифры 15 - среднее содержание хрома в десятых долях процента.

Предварительная термическая обработка: отжиг на зернистый перлит.

Окончательная термическая обработка: закалка от 840-860°C в масле + низкий отпуск при 150 - 170°C.

Твердость после окончательной термической обработки - 60-65 HRC.





## Автоматные стали

Автоматные стали отличаются хорошей обрабатываемостью резанием и предназначены для изготовления деталей массового производства на станках-автоматах. Они имеют повышенное содержание серы и фосфора или легированы свинцом.

**Маркировка:** стали обозначаются буквой **А** и цифрами, указывающими среднее содержание углерода в сотых долях процента.

Если в стали присутствует свинец, то в маркировке после буквы **А** ставится буква **С**.

марка стали	Содержание, %					Свойства без термообработки	
	C	Mn	S	P	Pb	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %
A12	0.08-0.12	0.7-1.0	0.08-0.20	0.08-0.15		420	22
A20	0.17-0.24	0.7-1.0	0.08-0.15	<0.06		460	20
A40Г	0.37-0.45	1.2-1.55	0.18-0.30	<0.05		600	14
АС40	0.37-0.45	0.8-1.1	0.15-0.30	<0.04	0.15-0.3	580	19

Структура стали АС45Г2



# **Инструментальные стали и сплавы**

## Классификация инструментальных сталей

К **инструментальным** относятся стали, применяемые для обработки материалов резанием и давлением.

Инструментальные стали подразделяются на:

- стали для режущего инструмента;
- штамповые стали для холодного деформирования;
- штамповые стали для горячего деформирования;
- стали для измерительного инструмента.

### **Стали для режущего инструмента**

Требования к сталям: высокая твердость, прочность, износостойкость и теплостойкость при достаточной вязкости.

**Теплостойкость** - это способность материала сохранять высокую твердость в течении длительного времени при повышенных температурах.

**Маркировка:** углеродистые инструментальные стали маркируют буквой **У**, за ней следуют цифры, которые показывают среднее содержание углерода в десятых долях процента.

Сталь **У10** содержит около **1% С**.

Маркировка легированных сталей начинается с цифры, показывающей среднее содержание углерода в десятых долях процента. Если содержание углерода около 1 % цифра не ставится.

Сталь **9ХС** содержит около **0,95 %С**, а сталь **ХВГ** около **1%**.



# Стали для измерительных инструментов

Требования к сталям: высокая твердость и износостойкость, сохранение постоянных линейных размеров и формы, способность получать высокую чистоту поверхности при полировании.

Для изготовления измерительных инструментов используют высокоуглеродистые хромистые стали.

Термическая обработка: закалка и низкий отпуск. Твердость стали после термообработки - 62-64 HRC.

Для уменьшения количества остаточного аустенита в закаленной стали используют обработку холодом.

Марка стали	Содержание, %		
	C	Mn	Cr
X	0,95-1,10	0,15-0,4	1,36-1,65
12X1	1,15-1,25	0,3-0,6	1,30-1,65
XГ	0,95-1,10	0,4-0,7	1,30-1,60

## Режим термической обработки стали X



# Штамповые стали для холодного деформирования

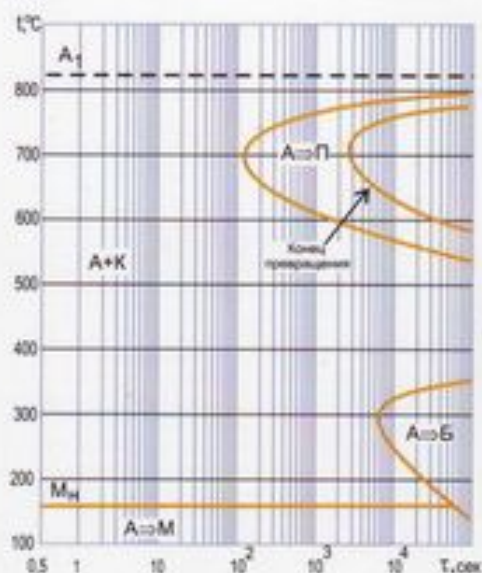
**Требования к сталям:** высокая **твердость**, **прочность** и **износостойкость** в сочетании с удовлетворительной вязкостью.

## 1. Стали повышенной износостойкости

К этой группе относятся высоколегированные стали с высоким содержанием **хрома** (6-12%). Высокую их износостойкость в основном обеспечивает наличие в стали карбидов  $Me_7C_3$  на основе хрома, объемная доля которых достигает 12-24%.

Марка стали	Содержание, %				Термообработка		Твердость, HRC
	C	Cr	V	другие	$t_{зак.}, ^\circ C$	$t_{отп.}, ^\circ C$	
<b>X12Ф1</b>	1,25-1,45	11-12,5	0,7-0,9	-	1000-1020	170-200	61-63
<b>X12M</b>	1,45-1,65	11-12,5	0,15-0,3	Mo 0,4-0,6	1000-1020	170-200	61-63
<b>X6ВФ</b>	1,05-1,15	5,5-6,5	0,5-0,8	W 1,1-1,5	980-1000	150-170	61-63

Диаграмма изотермического распада аустенита стали X12M



Структура стали X12M после закалки и отпуска



Сквозная прокаливаемость при охлаждении в масле до **100 мм** для сталей **X12Ф1** и **X12M** и до **80 мм** для стали **X6ВФ**

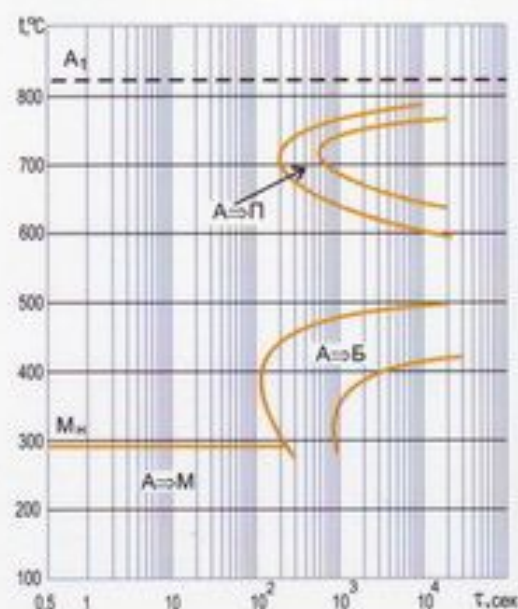


# Штамповые стали для холодного деформирования

## 2. Стали повышенной вязкости

Марка стали	Содержание, %				Термообработка		Твердость, HRC
	C	Si	Cr	W	$t_{\text{зак}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{отп}}, ^\circ\text{C}$	
4XB2C	0,35-0,45	0,6-0,9	1,0-1,3	2,0-2,5	860-900	200-250	54-59
5XB2C	0,45-0,55	0,8-1,1	0,9-1,2	1,8-2,3	860-900	430-470	47-52
6XB2C	0,55-0,80	0,5-0,8	1,0-1,3	2,2-2,7	860-900	430-470	47-52

Диаграмма изотермического распада переохлажденного аустенита стали 5XB2C



Стали 5XB2C и 6XB2C подвергают изотермической заалке. Для стали 5XB2C ее режим: нагрев до 980-1000°C - охлаждение в расплаве солей до 300°C, выдержка 30 мин - охлаждение на воздухе. Такая обработка при твердости около 52 HRC обеспечивает ударную вязкость 0,6-0,7 МДж/м<sup>2</sup>, тогда как после заалки на мартенсит и отпуска на такую же твердость, ударная вязкость равна 0,2-0,25 МДж/м<sup>2</sup>.



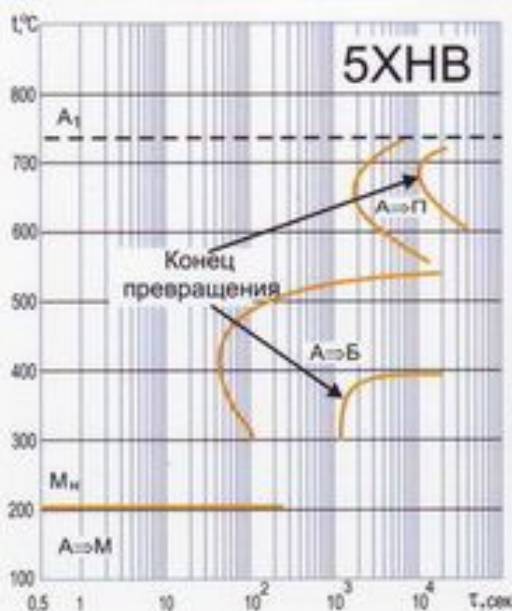
# Штамповые стали для горячего деформирования

**Требования к сталям:** высокая **прочность** при повышенных температурах, высокая **теплостойкость**, **износостойкость** и **разгаростойкость** при достаточной вязкости.

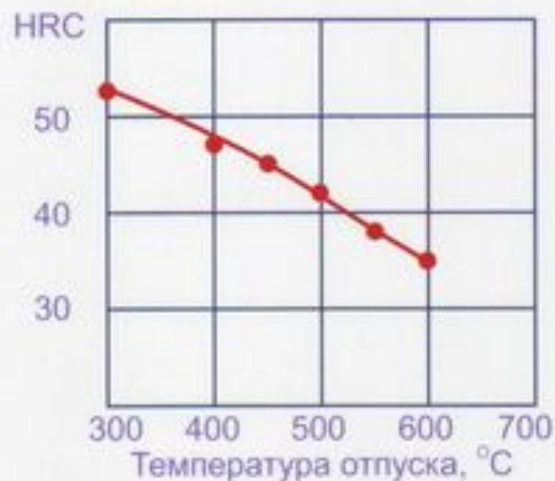
**Разгаростойкость** - это способность стали выдерживать многократные нагревы и охлаждения без образования трещин. Стали данной группы содержат **0,3-0,6%** углерода и подвергаются **закалке и высокому отпуску**.

**1. Стали для изготовления крупных штампов, работающих с ударными нагрузками, при относительно невысоких температурах (500 - 550°C).**

Марка стали	Содержание, %				Термообработка		Твердость, HRC
	C	Cr	Ni	другие	$t_{\text{зак.}}$ , °C	$t_{\text{отп.}}$ , °C	
<b>5XHM</b>	0,50-0,60	0,5-0,8	1,4-1,8	Mo 0,15-0,3	<b>840 - 860</b>	<b>500 - 550</b>	40-45
<b>5XHB</b>	0,50-0,60	0,5-0,8	1,4-1,8	W 0,4-0,7	<b>840 - 860</b>	<b>500 - 550</b>	40-45



Изменение твердости стали 5XHB при отпуске



# Штамповые стали для горячего деформирования

## 2. Стали для изготовления штампов, работающих при температурах до 600 - 700°C .

К этой группе относятся **вторичноотверждающие** стали. Основные упрочняющие фазы, выделяющиеся при отпуске - **MeC** на основе ванадия и **Me<sub>6</sub>C** на основе молибдена и вольфрама.

Марка стали	Содержание, %				Термообработка		Твердость, HRC
	C	Si	Cr	другие	t <sub>зак.</sub> , °C	t <sub>отп.</sub> , °C	
<b>4X5MΦC</b>	0,32-0,40	0,9-1,2	4,5-5,5	<b>Mo</b> 1,2-1,5 <b>V</b> 0,3-0,5	<b>1000 - 1020</b>	<b>540 - 560</b>	48-50
<b>4X4BMΦC</b>	0,37-0,44	0,6-1,2	3,2-4,0	<b>Mo</b> 0,6-0,9 <b>W</b> 0,8-1,2 <b>V</b> 0,6-0,95	<b>1050 - 1070</b>	<b>620 - 640</b>	48-50
<b>3X2B8Φ</b>	0,30-0,40	0,15-0,4	2,2-2,7	<b>W</b> 7,5-8,5 <b>V</b> 0,2-0,5	<b>1130 - 1150</b>	<b>630 - 660</b>	44-47

## Механические свойства штамповых сталей при 600°C

Марка стали	σ <sub>B</sub> , МПа	δ, %	ψ, %	KCU, МДж/м <sup>2</sup>
<b>5XHB</b>	500	42	85	1,2
<b>4X5MΦC</b>	980	15	58	0,5
<b>4X4BMΦC</b>	1100	15	50	0,5
<b>3X2B8Φ</b>	1180	11	32	0,35



# Стали для режущего инструмента

## Стали с низкой теплостойкостью

Высокая твердость этих сталей сохраняется до температур нагрева 200-250°C.

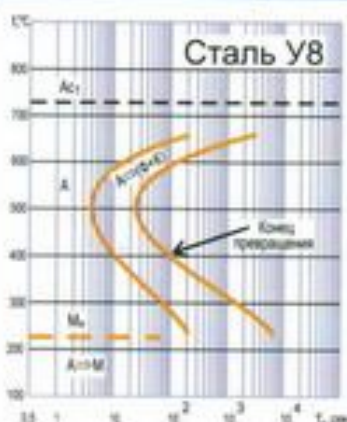
К этой группе сталей относятся:

- углеродистые стали небольшой прокаливаемости;
- легированные стали повышенной прокаливаемости.

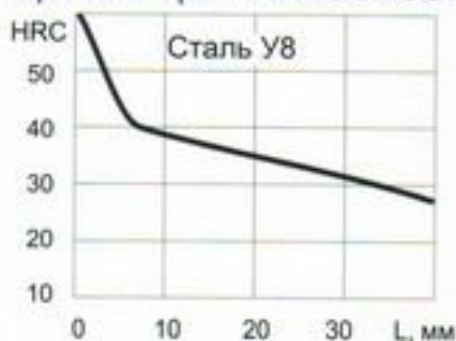
**1. Углеродистые стали небольшой прокаливаемости:**

У7, У8, У9, У10, У11, У12, У13. Эти стали содержат от 0,7 до 1,3% С и подвергаются закалке и низкому отпуску.

Марка стали	Термическая обработка		Твердость, HRC
	$t_{\text{зак.}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{отп.}}, ^\circ\text{C}$	
У7	800- 820	150-160 275-325	61-63 48-55
У8	780- 800	150-160 200-220	61-63 57-59
У9 - У13	760- 780	150-160 200-220	62-63 58-59



Кривая прокаливаемости



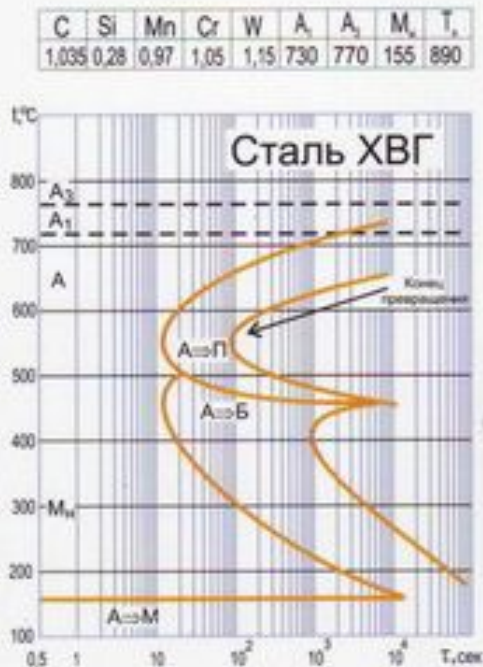


# Стали для режущего инструмента

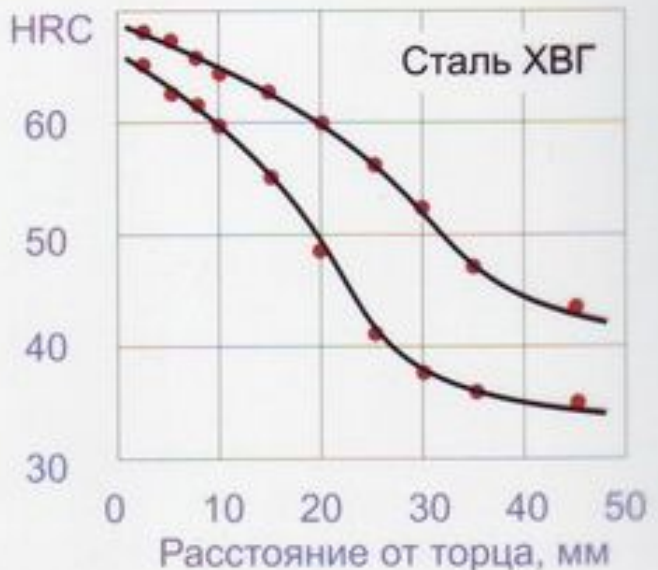
Стали с низкой теплостойкостью и повышенной прокаливаемостью

Стали применяются для изготовления инструмента сечением до 30-100 мм. Они подвергаются закалке и низкому отпуску.

Марка стали	Содержание, %					Термообработка		Твердость, HRC
	C	Mn	Si	Cr	другие	$t_{\text{зак}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{отп}}, ^\circ\text{C}$	
<b>9ХФ</b>	0,8-0,9	0,3-0,6	0,15-0,35	0,4-0,7	V 0,15-0,3	820-840	200-220	58-60
<b>9ХС</b>	0,85-0,95	0,3-0,6	1,2-1,6	0,95-1,25	-	860-880	140-160	62-65
<b>ХВГ</b>	0,9-1,05	0,8-1,1	0,15-0,35	0,9-1,2	W 1,2-1,6	830-850	140-160	62-65
<b>ХВГС</b>	0,95-1,05	0,6-0,9	0,65-1,0	0,6-1,1	W 0,5-0,8 V 0,05-0,15	840-860	140-160	62-64



Полоса прокаливаемости



# Стали для режущего инструмента

## Быстрорежущие стали

Высокая твердость этих сталей сохраняется при нагреве до  $600-640^{\circ}\text{C}$ . Инструмент из этих сталей работает с высокими скоростями резания.

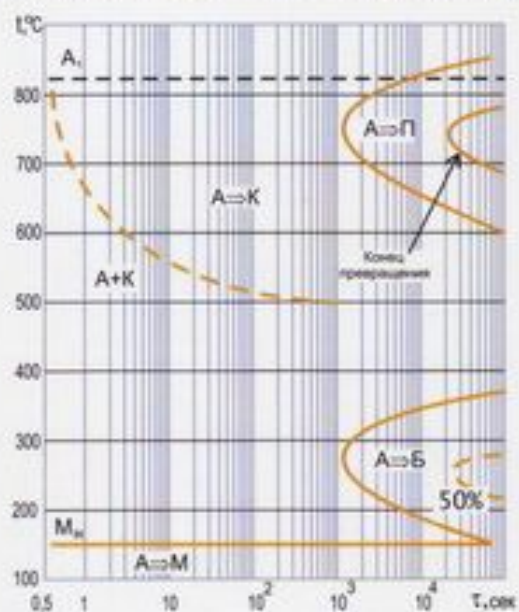
**Маркировка:** Марка стали начинается с буквы **P**, за которой следует число, обозначающее содержание **вольфрама**.

Марка стали	Содержание, %				
	C	W	Mo	Cr	V
<b>P18</b>	0,7-0,8	<b>17-19</b>	0,5-1,0	3,8-4,4	1,0-1,4
<b>P9</b>	0,85-0,95	<b>8,5-10,5</b>	до 1,0	3,8-4,4	2,0-2,6
<b>P6M5</b>	0,82-0,90	<b>5,5-6,5</b>	<b>5,0-5,5</b>	3,8-4,4	1,7-2,1

Структура стали P18



Диаграмма изотермического распада переохлажденного аустенита стали P6M5



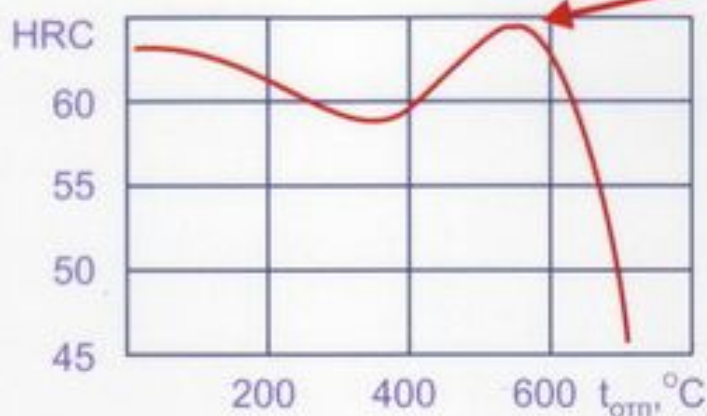


# Стали для режущего инструмента

## Термическая обработка быстрорежущих сталей

Основные легирующие элементы образуют специальные карбиды:  $Me_6C$  - на основе молибдена и вольфрама,  $MeC$  - на основе ванадия и  $Me_{23}C_6$  на основе хрома.

Изменение твердости закаленной стали P6M5 при отпуске

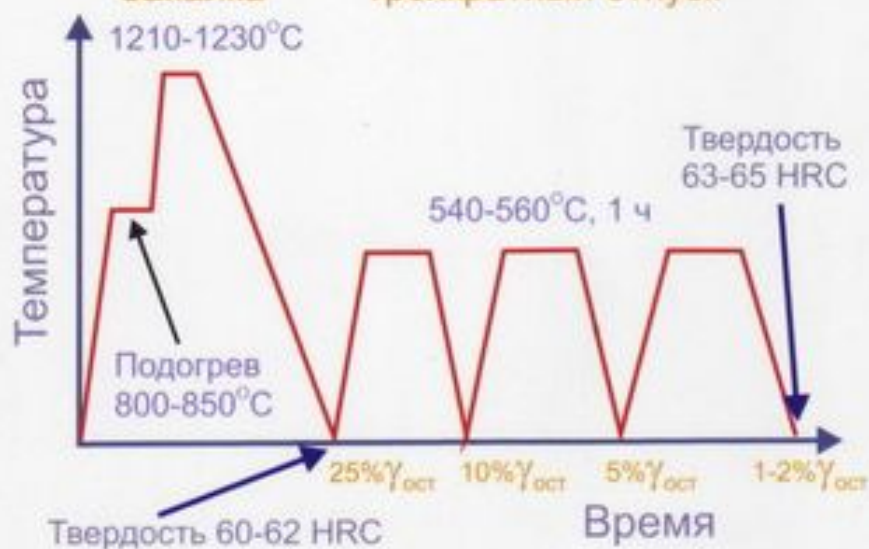


Вторичное твердение, обусловленное выделением специальных карбидов

## Термическая обработка стали P6M5

Закалка

Трехкратный отпуск



Структура после закалки





# Твердые сплавы для режущего инструмента

**Твердые сплавы** - это сплавы, изготовленные методом порошковой металлургии и состоящие из карбидов тугоплавких металлов (WC, TiC, TaC), соединенных кобальтовой связкой.

Твердые сплавы сочетают высокую **твердость** (74-76HRC) и **износостойкость** с высокой **теплостойкостью** и применяются для резания с высокими скоростями.

**Различают 3 группы сплавов.**

1. **Вольфрамовые** сплавы (система **WC-Co**).

**ВК3, ВК6, ВК8, ВК10, ВК20** и другие.

Они маркируются буквами **ВК** и цифрой, показывающей содержание кобальта в процентах.

2. **Титановольфрамовые** сплавы (система **TiC-WC-Co**).

**T30K4, T15K6, T5K10** и другие.

Они маркируются буквами **T** и **K** и цифрами, стоящими за этими буквами, показывающими содержание в процентах титана и кобальта.

3. **Титанотанталовольфрамовые** сплавы

(система **TiC-TaC-WC-Co**).

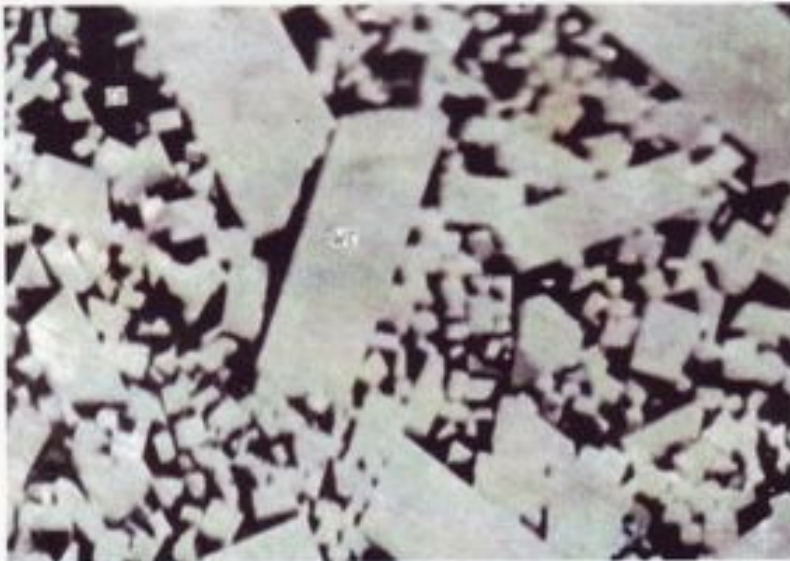
**ТТ7К12, ТТ8К6** и другие.

В маркировке после букв **ТТ** стоит цифра, указывающая количество карбидов титана и вольфрама в процентах.

Цифра после буквы **К** указывает содержание кобальта.

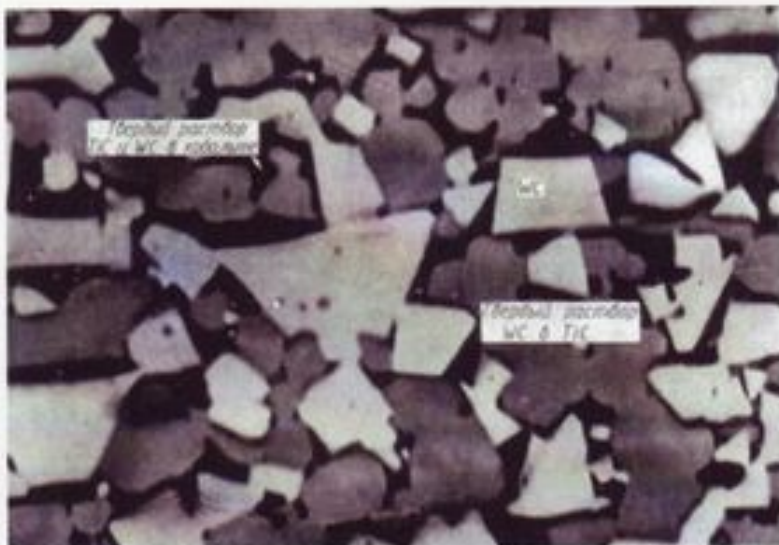
# Твердые сплавы для режущего инструмента

Микроструктура вольфрамового сплава ВК15.



X3000

Микроструктура титановольфрамового сплава Т15К6



X3000

# **Цветные металлы и сплавы**



# Алюминий и алюминиевые сплавы

## Алюминий:

- температура плавления -  $660^{\circ}\text{C}$ ;
- плотность при  $20^{\circ}\text{C}$  -  $2,7 \text{ г/см}^3$
- кристаллическая решетка - **ранецентрированная кубическая**;

Механические свойства чистого алюминия:

$$\sigma_{\text{в}} = 40 \text{ МПа}; \delta = 50\%.$$

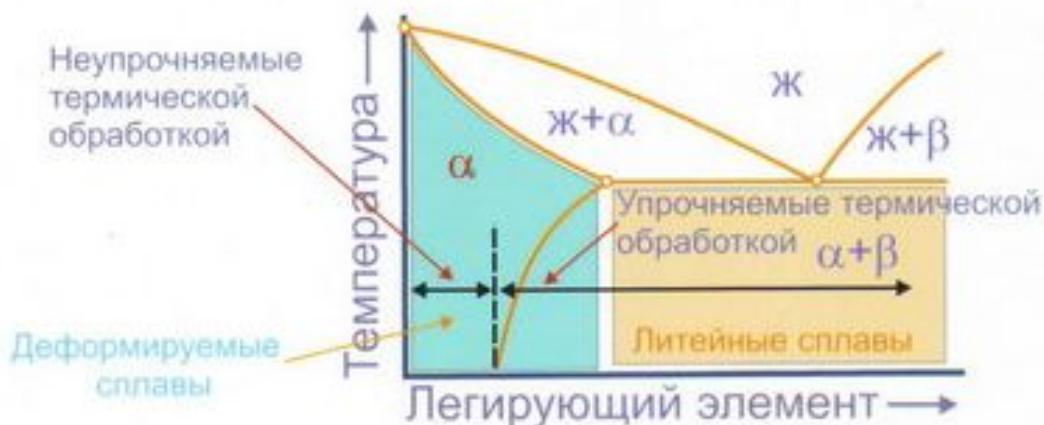
Маркировка первичного алюминия:

- *особой чистоты* **A999** (99,999%Al);
- *высокой чистоты* **A995** (99,995%Al), **A99** (99,99%Al), **A97** (99,97%Al), **A95** (99,95%Al);
- *технической чистоты* **A85** (99,85Al%), **A8** (99,8%Al), **A7** (99,7%Al), **A6** (99,6%Al), **A5** (99,5%Al) и **A0** (99,0%Al).

Маркировка деформируемого технического алюминия:

- AD00** (99,7%Al), **AD0** (99,5%Al), **AD1** (99,3%Al), **AD** (98,8%Al).

Алюминиевые сплавы подразделяются на **деформируемые** и **литейные**. Они могут быть неупрочняемыми и упрочняемыми термической обработкой.



# Деформируемые алюминиевые сплавы, неупрочняемые термической обработкой

К этой группе относятся сплавы систем Al-Mn и Al-Mg

Диаграмма состояний системы Al-Mn

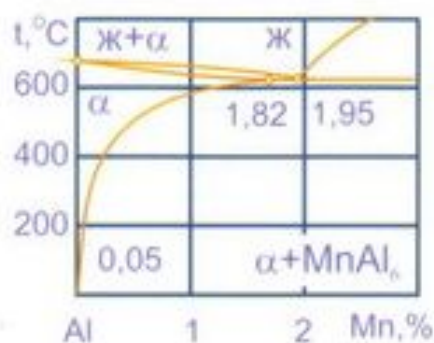
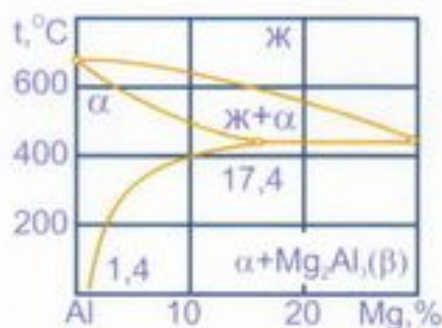


Диаграмма состояний системы Al-Mg



Структура сплава АМг



x200

Состав и механические свойства сплавов в отожженном состоянии

Марка сплава	Содержание, %		$\sigma_{в1}$ МПа	$\delta$ , %
	Mg	Mn		
АМц	<0,2	1,0-1,6	130	23
АМг1	0,7-1,6	<0,2	110	28
АМг2	1,8-2,6	0,3-0,6	200	23
АМг3	3,2-3,8	0,3-0,6	220	23
АМГ5	4,8-5,8	0,3-0,8	300	20
АМГ6	5,8-6,8	0,5-0,8	340	18

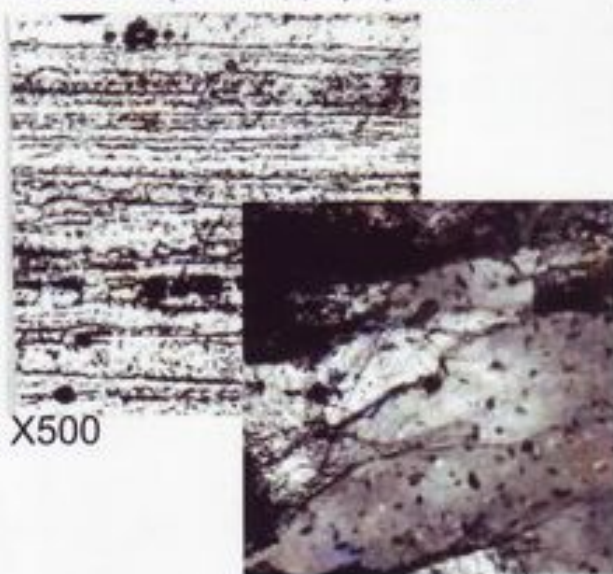


# Прессэффект при обработке деформируемых алюминиевых сплавов

Под **прессэффектом** понимают дополнительное повышение прочности вследствие сохранения при термической обработке нерекристаллизованной структуры, созданной горячим прессованием.

Сплав **Al-Zn-Mg** (горячекатанный лист)

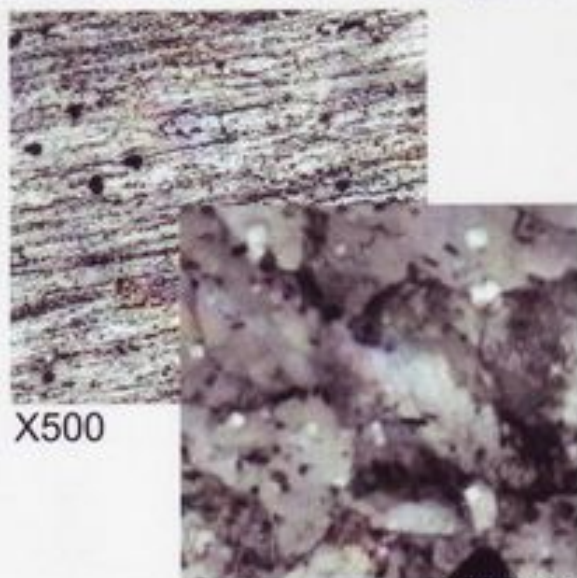
После горячей деформации



X500

X14500

После закалки от 470°C и старения



X500

X14500

Свойства сплава после закалки от 470°C и старения 120°C, 12ч  
- **рекристаллизованная структура**  $\sigma_{0.2} = 410$  МПа,  $\sigma_b = 495$  МПа,  $\delta = 15\%$

- **нерекристаллизованная структура (прессэффект)**  $\sigma_{0.2} = 450$  МПа,  $\sigma_b = 526$  МПа,  $\delta = 13\%$

Проявлению прессэффекта способствует легирование небольшими добавками **Mn, Cr, Zr, Ti**.



# Деформируемые алюминиевые сплавы, упрочняемые термической обработкой

## 1. Сплавы системы *Al-Cu-Mg* (дуралюмины)

Основные фазы упрочнители :  $\theta(\text{CuAl}_2)$  и  $S(\text{CuMgAl}_2)$

### Структура сплава Д16

Марка сплава	Содержание, %		
	Cu	Mg	Mn
Д1	3,8-4,8	0,4-0,8	0,4-0,8
Д16	3,8-4,9	1,2-1,8	0,3-0,9



X300

### Свойства сплавов

Марка сплава	Вид полу-фабриката	Термическая обработка	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %
Д1	листы	Закалка от $500-505^\circ\text{C}$ + естественное старение	400	20
Д16	листы	Закалка от $495-505^\circ\text{C}$ + естественное старение	440	18
	листы	Закалка от $495-505^\circ\text{C}$ + старение $190^\circ\text{C}$ , 12ч	440	16
	прессованный профиль	Закалка от $495-505^\circ\text{C}$ + естественное старение (прессэфект)	530	11

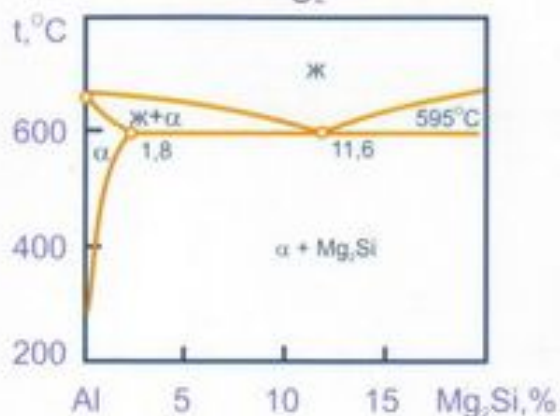
# Деформируемые алюминиевые сплавы, упрочняемые термической обработкой

## 2. Сплавы системы *AL-Mg-Si* (авиали)

Основная фаза - упрочнитель -  $\beta$  ( $Mg_2Si$ )

Марка сплава	Содержание, %			
	Cu	Mg	Mn	Si
<b>АД31</b>	<0,1	0,4-0,9	<0,1	0,3-0,7
<b>АВ</b>	0,1-0,5	0,4-0,9	0,15-0,35	0,5-1,2

Квазибинарный разрез  $Al-Mg_2Si$



### Свойства сплавов

Марка сплава	Вид полу-фабриката	Термическая обработка	$\sigma_{в1}$ , МПа	$\delta$ , %
<b>АД31</b>	прессованный профиль	Закалка от 510-530°C + естественное старение	170	22
		Закалка от 510-530°C + старение 160-170°C, 12ч	240	12
<b>АВ</b>	лист	Закалка от 510-530°C + старение 160-170°C, 12ч	330	14
	прессованный профиль	Закалка от 510-530°C + старение 160-170°C, 12ч (прессэфект)	380	12



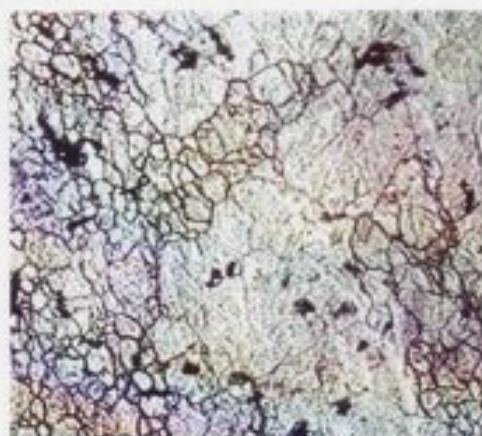
# Деформируемые алюминиевые сплавы, упрочняемые термической обработкой

## 3. Сплавы системы *AL-Mg-Si-Cu* (ковочные)

Основные фазы - упрочнители:  $W$  ( $Cu_2Mg_8Si_6Al_5$ ),  $\theta$  ( $CuAl_2$ ),  $\beta$  ( $Mg_2Si$ )

Структура сплава АК6

Марка сплава	Содержание, %			
	Cu	Mg	Mn	Si
АК6	1,8-2,6	0,4-0,8	0,4-0,8	0,7-1,2
АК8	3,9-4,8	0,4-0,8	0,4-1,0	0,6-1,2



x300

Свойства сплавов

Марка сплава	Вид полу-фабриката	Термическая обработка	$\sigma_{в}$ , МПа	$\delta$ , %
АК6	поковки	Закалка от $505-525^{\circ}C$ + старение $160^{\circ}C$ , 10-15ч	400	12
АК8	поковки	Закалка от $495-505^{\circ}C$ + старение $160^{\circ}C$ , 10-15ч	480	9



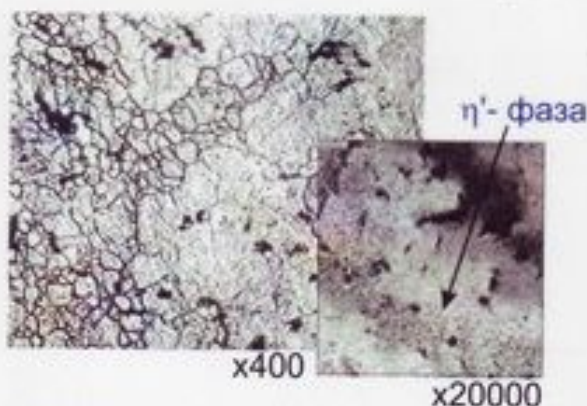
# Деформируемые алюминиевые сплавы, упрочняемые термической обработкой

## 4. Сплавы системы *AL-Zn-Mg-Cu* (высокопрочные)

Основные фазы - упрочнители:  $\eta$ ( $MgZn_2$ ),  $T$ ( $Al_2Zn_3Mg_3$ ),  $S$ ( $CuMgAl_2$ ).

Структура горячедеформированного сплава В95 после закалки и старения

Марка сплава	Содержание, %			
	Cu	Mg	Mn	Zn
<b>В95</b>	1,4-2,0	1,8-2,8	0,2-0,6	5,0-7,0
<b>В96</b>	2,3	2,7		8,5



### Свойства сплавов

Марка сплава	Вид полуфабриката	Термическая обработка	$\sigma_{в}$ , МПа	$\delta$ , %
<b>В95</b>	прессованный профиль	Закалка от $460-470^{\circ}C$ + старение $120-140^{\circ}C$ , 15-25ч	600	8
	листы	Закалка от $460-470^{\circ}C$ + старение $100-120^{\circ}C$ , 3-10ч + $160-170^{\circ}C$ , 8-10 ч	470	12
<b>В96</b>	штамповка	Закалка от $460-470^{\circ}C$ + старение $120-140^{\circ}C$ , 15-25ч	670	7

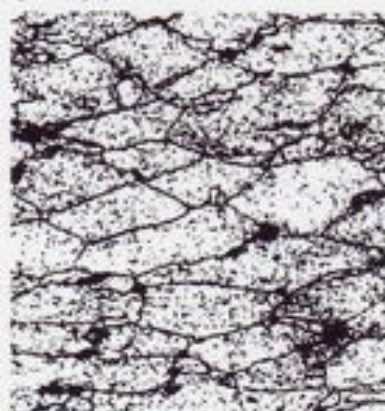
# Деформируемые алюминиевые сплавы, упрочняемые термической обработкой

## 5. Сплавы системы *Al-Mg-Li-Zr*

Основная фаза упрочнитель :  $\delta(\text{LiAl}_3)$

Марка сплава	Содержание, %			
	Mg	Li	Zr	Sc
01420	5-6	1,9-2,3	0,09-0,15	-
01421	5-6	1,9-2,3	0,09-0,15	0,14-0,21

Структура сплава 01420



x250

Свойства сплава

Марка сплава	Вид полу-фабриката	Термическая обработка	$\sigma_{в}$ , МПа	$\delta$ , %
01420	листы	Закалка от $450^{\circ}\text{C}$ + старение $120^{\circ}\text{C}$ , 12-24ч	440	12
01421	листы	Закалка от $450^{\circ}\text{C}$ + старение $120^{\circ}\text{C}$ , 12-24ч	450	6



## Литейные алюминиевые сплавы

Для литья используют сплавы систем *Al-Si*, *Al-Cu*, *Al-Mg*.

*Маркировка литейных сплавов* при использовании первичного алюминия: буквы **АЛ** и цифры, указывающие **условный номер** сплава.

*Условные обозначения* разновидностей термической обработки:

**Режим T1** - искусственное старение без предварительного нагрева под закалку;

**Режим T2** - отжиг отливок;

**Режим T4** - закалка без последующего искусственного старения;

**Режим T5 и T6** - закалка и искусственное старение. (T6 - старение на максимальную прочность, T5 - неполное старение);

**Режим T7** - закалка и стабилизирующее старение (перестаривание).



# Литейные алюминиевые сплавы

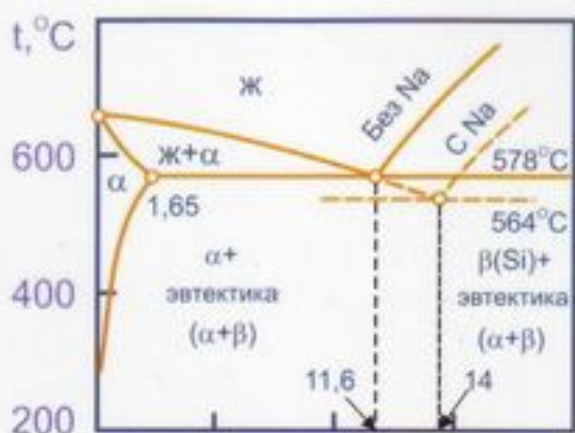
## Химический состав и свойства сплавов

Марка сплава	Содержание, %					Термо-обр-ка	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %
	Si	Mg	Cu	Mn	Другие			
	<b>Система Al-Si</b>							
АЛ2	10-13	-	-	-	-		160	1,0
АЛ4	8-10,5	0,2-0,4	-	0,2-0,4	-	T6	230	3,0
АЛ9	6-8	0,2-0,4	-	-	-	T6	230	1,0
АЛ5	4,5-5,5	0,4-0,6	1,0-1,5	-	-	T5	226	0,5
	<b>Система Al-Cu</b>							
АЛ7	-	-	4,0-5,0	-	-	T6	250	5,0
АЛ19	-	-	4,5-5,3	0,6-1,0	Ti 0,15-0,35	T6	370	5,0
	<b>Система Al-Mg</b>							
АЛ23	-	6-7,0	-	-	Ti 0,05-0,15 Zr 0,05-0,2 Be 0,02-0,1		200	4,0
АЛ27	-	9,5-10,5	-	-	Ti 0,05-0,15 Zr 0,05-0,2 Be 0,05-0,1	T4	360	18,0
АЛ8	-	9,5-11,5	-	-		T4	315	11,0

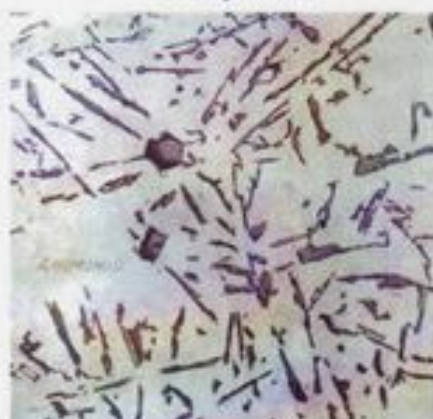
# Литейные алюминиевые сплавы

## Сплавы системы Al-Si (силумины)

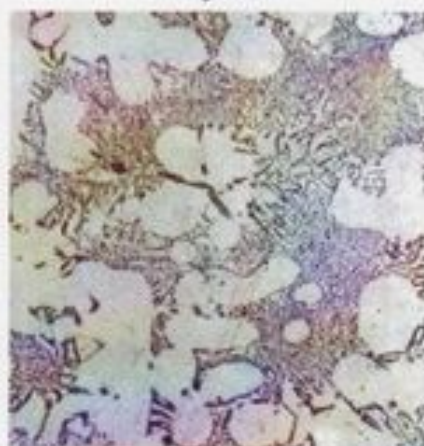
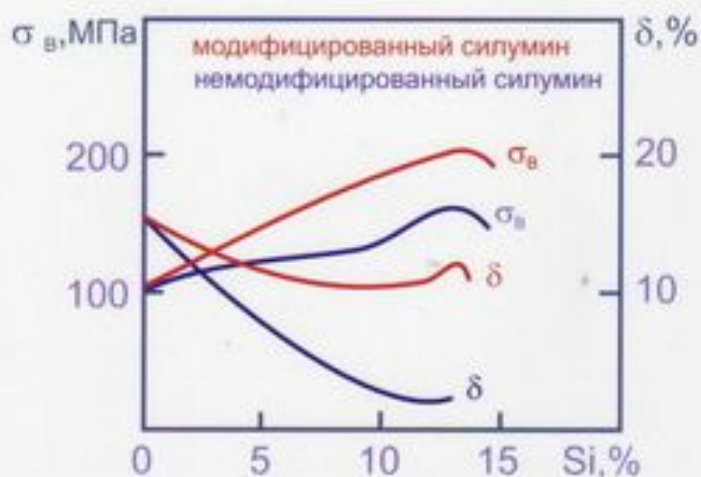
Диаграмма состояний Al-Si и влияние кремния на структуру и механические свойства сплавов



немодифицированный силумин



модифицированный силумин



x200

# Магний и магниевые сплавы

## Магний:

- температура плавления - **650°C**;
- плотность при 20°C - **1,740 г/см<sup>3</sup>**;
- кристаллическая решетка -  
гексагональная плотноупакованная.

## Механические свойства магния:

литого -  $\sigma_B = 80 - 110$  МПа,  $\delta = 6 - 8\%$ ;

деформированного -  $\sigma_B = 180 - 200$  МПа,  $\delta = 15 - 17\%$ .

**Маркировка** первичного магния:

**Mg99** (99,96 % Mg), **Mg95** (99,95 % Mg),

**Mg90** (99,90% Mg).

Основное достоинство магниевых сплавов -  
**высокая удельная прочность.**

Основные легирующие элементы сплавов -  
**Al, Zn, Mn.**

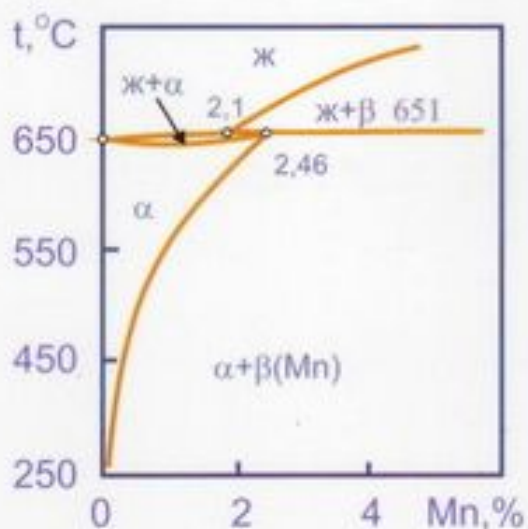
Магниевые сплавы подразделяются на  
**деформируемые** и **литейные**. Деформируемые сплавы маркируются буквами **МА**, а литейные - **МЛ**, далее идут условные номера сплавов.



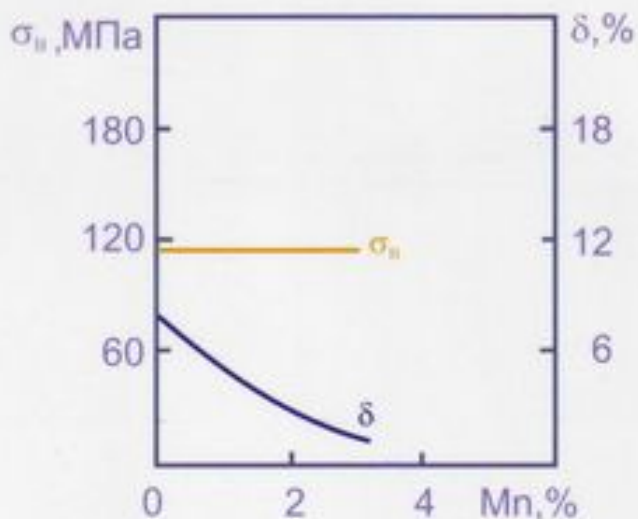
# Деформируемые магниевые сплавы

## 1. Сплавы системы Mg-Mn

Диаграмма состояний системы Mg-Mn



Влияние Mn на механические свойства



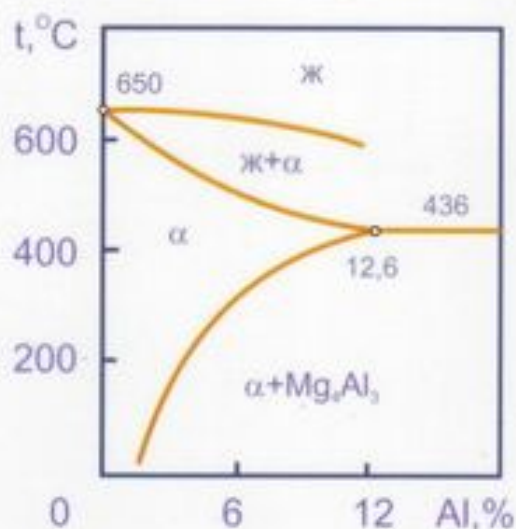
Состав и свойства сплавов

Марка сплава	Содержание, %				σ <sub>в</sub> , МПа	δ, %
	Al	Mn	Zn	другие		
<b>MA1</b>	-	1,3-2,5	-	-	-	-
<b>MA8</b>	-	1,3-2,2	-	Ce 0,15- 0,35	250	16

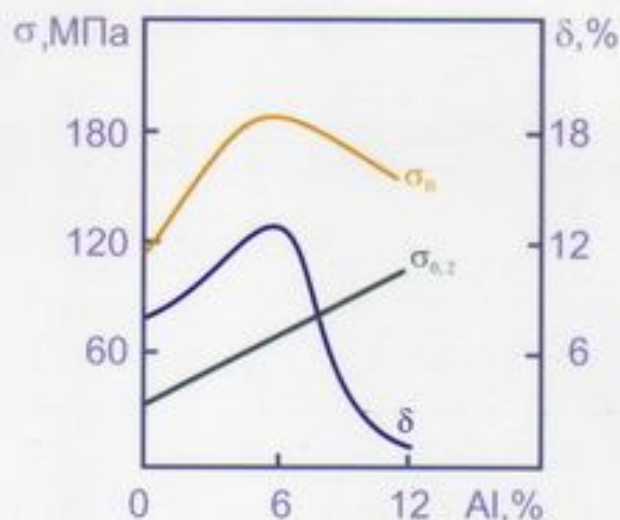
# Деформируемые магниевые сплавы

## 2. Сплавы системы Mg-Al-Zn

Диаграмма состояний системы Mg-Al



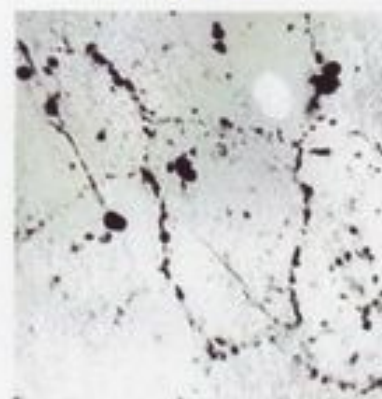
Влияние Al на механические свойства



Состав и свойства сплавов

Марка сплава	Содержание, %			$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %
	Al	Mn	Zn		
<b>MA2-1</b>	3,8-5,0	0,3-0,7	0,8-1,5	280	12
<b>MA5</b>	7,8-9,2	0,15-0,5	0,2-0,8	310	8

Структура сплава MA5

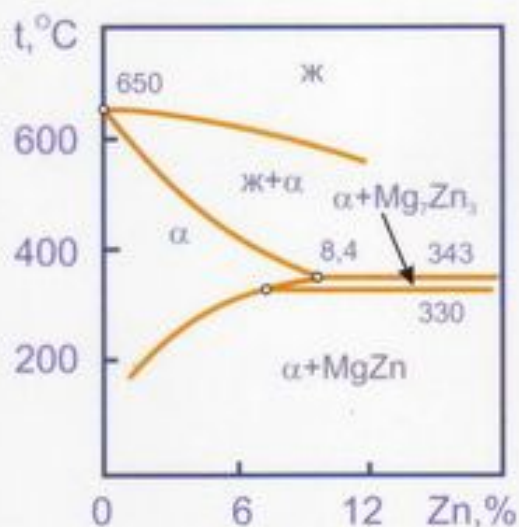


x300

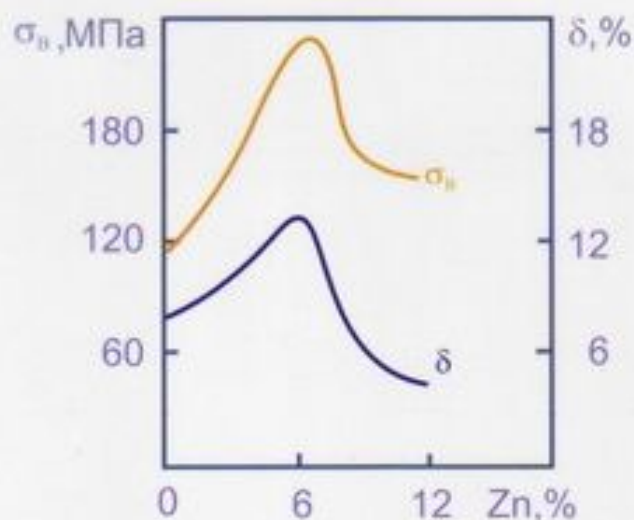
# Деформируемые магниевые сплавы

## 3. Сплавы системы Mg-Zn-Zr

Диаграмма состояний системы Mg-Zn



Влияние Zn на механические свойства



Состав и свойства сплавов

Марка сплава	Содержание, %					σ <sub>в</sub> , МПа	δ, %
	Al	Mn	Zn	другие	Термическая обработка		
<b>МА14</b>	-	-	5,0-6,0	Zr 0,3-0,9	старение	340	10
<b>МА19</b>	-	-	5,5-7,0	Zr 0,5-1,0 Cd 0,2-1,0 Nd 1,4-2,0		380	5

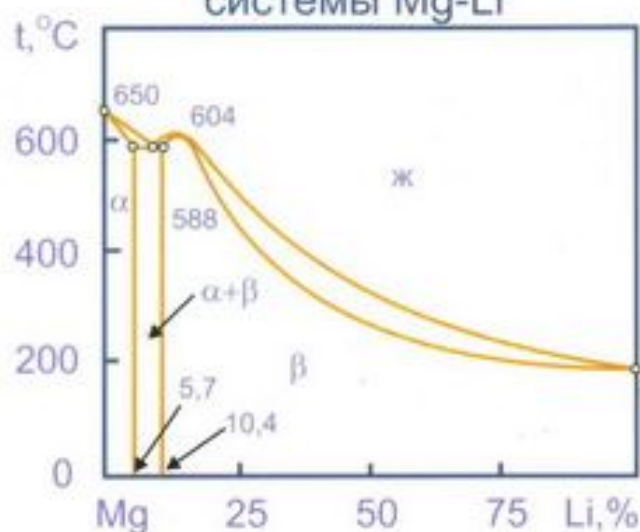


# Деформируемые магниевые сплавы

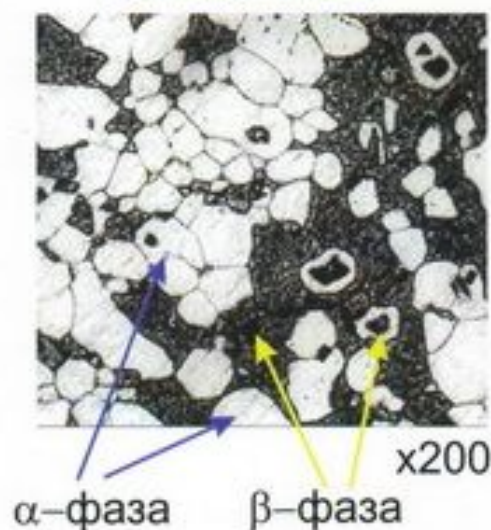
## 4. Сплавы системы Mg-Li

Легирование литием позволяет получить сверхлегкие сплавы с плотностью 1,5 - 1,6 г/см<sup>3</sup>

Диаграмма состояний системы Mg-Li



Структура двухфазного сплава MA21



Состав и свойства сплавов

Марка сплава	Содержание, %				Термическая обработка	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %
	Al	Mn	Zn	другие			
<b>MA18</b>	0,5-1,0	0,1 - 0,4	2,0 - 2,5	Ce 0,15-0,25 Li 10 - 11,5 Y 7,8 - 9,0	отжиг 150 - 175°C, 6-16ч	190	18
<b>MA21</b>	4,0-6,0	0,15 - 0,5	0,8 - 2,0	Li 7,0-10,0 Cd 3,0-5,0	отжиг 150 - 175°C, 6-16ч	240	16

# Литейные магниевые сплавы

## Состав и свойства сплавов

Марка сплава	Содержание, %					$\sigma_{в}$ , МПа	$\delta$ , %
	Al	Mn	Zn	другие	Термическая обработка		
	<b>Система Mg - Al - Zn</b>						
<b>МЛ5</b>	7,5-9	0,15-0,5	0,2-0,8	-	T4	230	5
<b>МЛ6</b>	9-10,2	0,1-0,5	0,6-1,2	-	-	150	1
	<b>Система Mg - Zn - Zr</b>						
<b>МЛ12</b>	-	-	4,0-5,0	Zr 0,6-1,1	T1	230	5
<b>МЛ15</b>	-	-	4,0-5,0	Zr 0,7-1,1 La 0,6-1,2	T1	210	3
	<b>Система Mg - PЗМ - Zr</b>						
<b>МЛ10</b>	-	-	0,1-0,7	Zr 0,4-1,0 Nd 2,2-2,8	T6	250	5
<b>МЛ19</b>	-	-	0,1-0,6	Zr 0,4-1,0 Nd 1,6-2,3 Y 1,4-2,2	T6	250	5

Условные обозначения режимов термической обработки:

**T1** - искусственное старение без предварительной закалки;

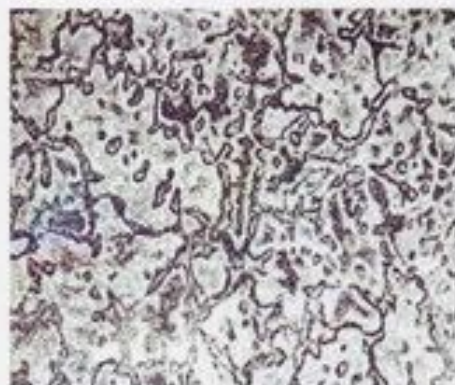
**T2** - отжиг;

**T4** - закалка;

**T6** - закалка на воздухе и старение;

**T61** - закалка в горячей воде и старение

Структура сплава МЛ5



X300



# Медь и медные сплавы

## Медь:

- температура плавления - **1083°C**;
- плотность при 20°C - **8,96 г/см<sup>3</sup>**;
- кристаллическая решетка -  
гранцентрированная кубическая.

## Механические свойства меди высокой чистоты:

$$\sigma_b = 220 \text{ МПа}, \delta = 50 \%;$$

## Маркировка меди:

**M00** (99,99 % Cu), **M0** (99,97 % Cu), **M1** (99,9% Cu),  
**M2** (99,7 % Cu), **M3** (99,5 % Cu).

## Основные группы медных сплавов:

**Латуни** - сплавы на основе меди, в которых главным легирующим элементом является **цинк**.

**Бронзы** - сплавы на основе меди, в которых основной добавкой может быть любой элемент, кроме **цинка и никеля**.

**Медноникелевые сплавы** - это сплавы на основе меди, у которых основной легирующий элемент - **никель**.

Медные сплавы подразделяют на **деформируемые** и **литейные**.



# Латуни

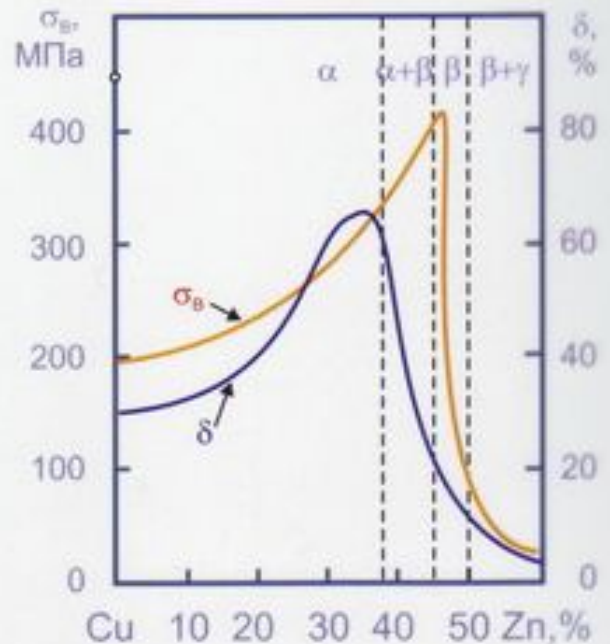
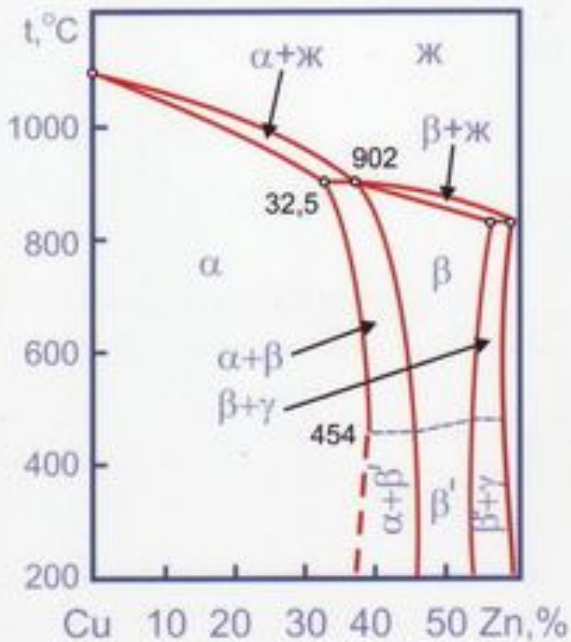
**Латуни** подразделяются по химическому составу на **двойные** и **многокомпонентные**, а по структуре на однофазные ( $\alpha$ -латуни) и двухфазные ( $\beta$ -латуни).

**Маркировка:** Латуни обозначаются буквой **Л**. У двойных латуней за буквой **Л** идет **число**, указывающее содержание меди в процентах.

В марке **многокомпонентной** латуни после буквы **Л** ставят буквенное обозначение легирующих элементов, а затем **цифры**, указывающие содержание **меди** и **легирующих элементов**. (латунь марки **Л90** содержит **90% Cu** и **10% Zn**; латунь **ЛС59-1** содержит **59% Cu**, **1%Pb** и **40% Zn**).

В марках **литейных** латуней после буквы **Л** указываются буквы, обозначающие **легирующие элементы, включая цинк**.

За буквами следуют цифры, указывающие содержание легирующих элементов. Их обозначение: **алюминий - А**, **никель - Н**, **олово - О**, **свинец - С**; **железо - Ж**; **кремний - К**; **марганец - Мц**; **цинк - Ц**; **фосфор - Ф**, **бериллий - Б**.



## Состав и механические свойства латуней

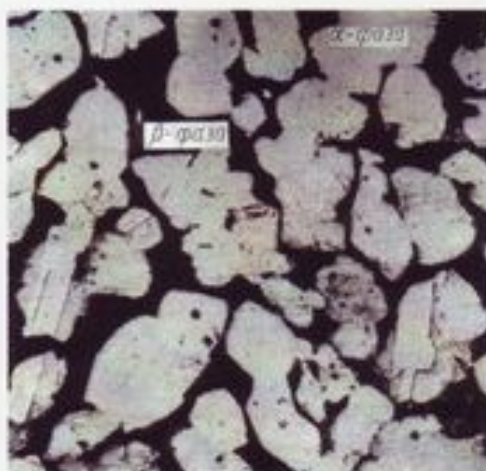
Марка сплава	Содержание, %		$\sigma_{в}$ , МПа	$\delta$ , %	Структура
	Cu	другие элементы			
	<b>Деформируемые латуни</b>				
Л90	88,0 - 91,0	-	260	44	$\alpha$
Л68	67,0 - 70,0	-	330	56	$\alpha$
Л63	62,0 - 65,0	-	360	49	$\alpha$
ЛС59-1	57,0 - 60,0	Pb 0,8 - 1,9	420	40	$\alpha+\beta$
ЛЖМц59-1-1	57,0 - 60,0	Fe 0,6 - 1,2 Mn 0,5 - 0,8	450	50	$\alpha+\beta$
	<b>Литейные латуни</b>				
ЛЦ40С	57,0 - 61,0	Pb 0,8 - 2,0	300	30	
ЛЦ16К4	78,0 - 81,0	Si 3,0 - 4,0	380	15	
ЛЦ23А6ЖЗМц2	64,0 - 68,0	Al 4,0 - 7,0 Fe 2,0 - 4,0 Mn 1,5 - 3,0	650	7	

Структура однофазной латуни



x200

Структура двухфазной латуни



x200



# Бронзы

Бронзы обозначаются буквами **Бр**, после чего следует буквенное обозначение легирующих элементов в порядке убывания их концентрации; в конце марки указываются средние концентрации соответствующих элементов.

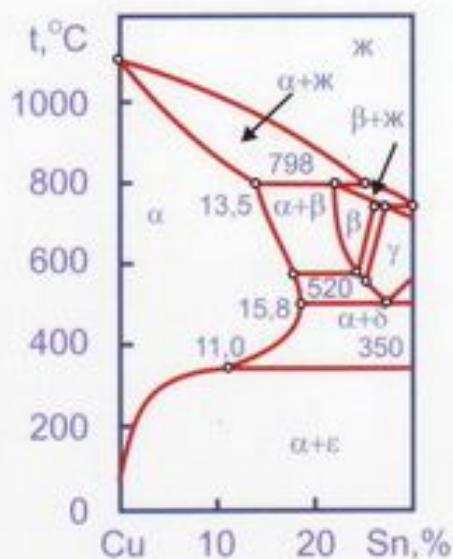
( Бронза **БрАЖ 9-4** содержит 9% **Al** и 4% **Fe**)

В марках литейных бронз содержание компонентов ставится сразу после буквы, обозначающей его название.

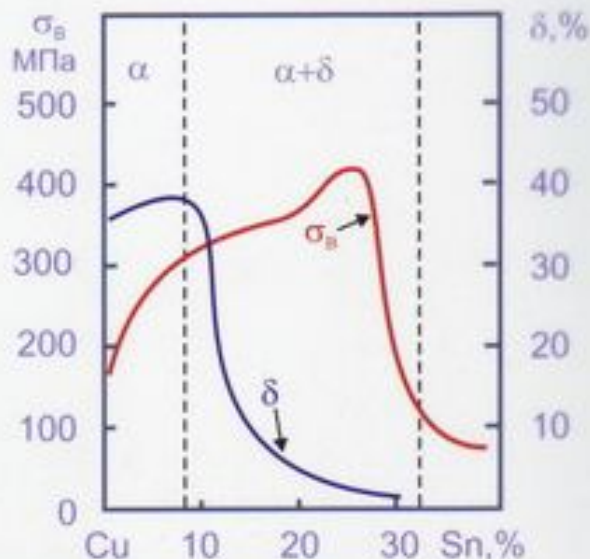
(Бронза **БрО5Ц5С5** содержит 5% **Sn**, 5%**Zn** и 5%**Pb**)

## Оловянные бронзы

Диаграмма состояний  
Cu-Sn



Влияние олова на свойства  
сплавов





# Оловянные бронзы

## Состав и свойства сплавов

Марка сплава	Содержание, %				$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %
	Sn	Pb	Zn	другие		
<b>Деформируемые бронзы</b>						
БрОФ6,5-0,15	6,0-7,0	-	-	P 0,1-0,25	300	38
БрОФ6,5-0,4	6,0-7,0	-	-	P 0,26-0,40	400	65
БрОЦ4-3	3,5-4,0	-	2,7-3,3	-	350	40
БрОЦС4-4-2,5	3,0-5,0	1,5-3,5	3,0-5,0	-	325	40
<b>Литейные бронзы</b>						
БрО10Ф1	9,0-11,0	-	-	P 0,4-1,1	220	3
БрО5Ц5С5	4,0-6,0	4,0-6,0	4,0-6,0	-	180	4
БрО3Ц7С5Н1	3,5-4,0	3,0-6,0	6,0-9,5	Ni 0,5-2,0	210	5

Структура деформированной бронзы с 5 % Sn после рекристаллизации



x300

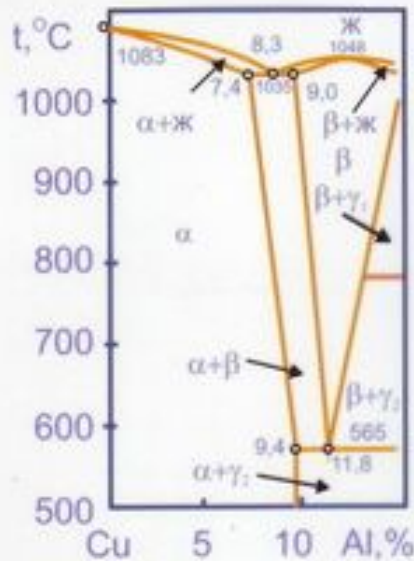
Структура литой бронзы с 10 % Sn



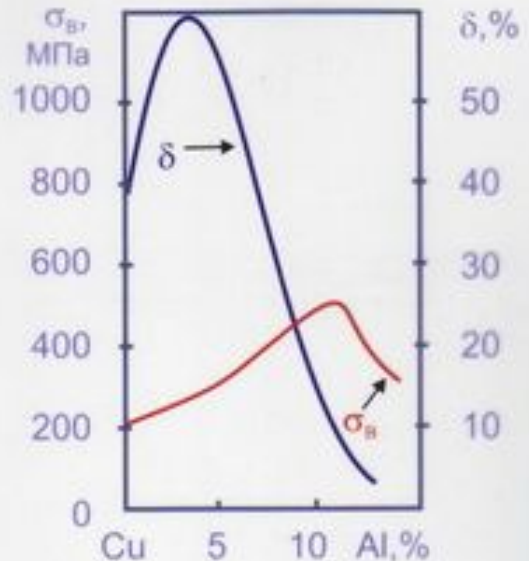
x250

# Алюминиевые бронзы

Диаграмма состояний  
Cu-Al



Влияние алюминия на свойства  
сплавов



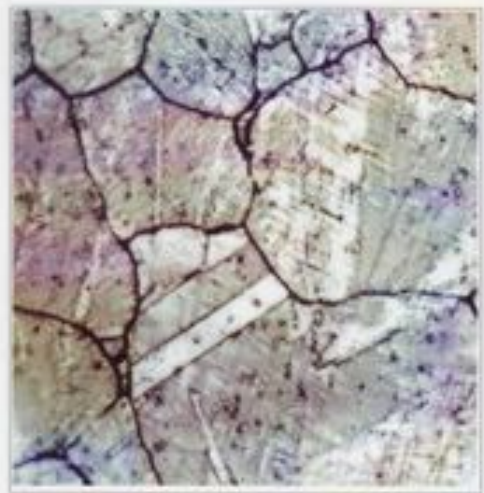
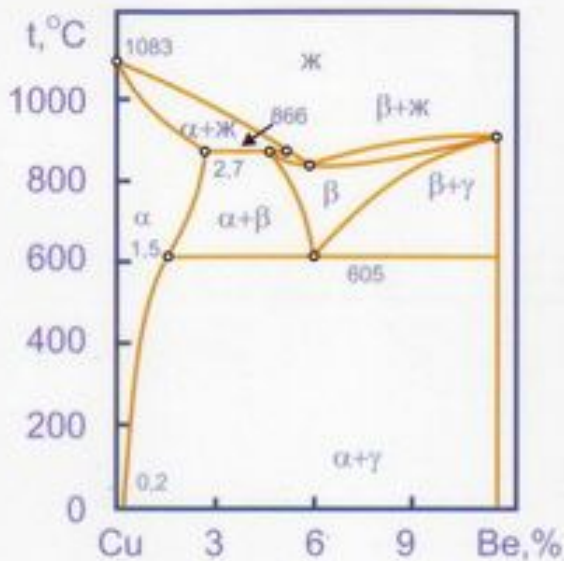
## Состав и механические свойства бронз

Марка сплава	Содержание, %			$\sigma_{в}$ , МПа	$\delta$ , %
	Al	Mn	Fe		
<b>Деформируемые бронзы</b>					
БрАЖ9-4	8,0-10,0	-	2,0-4,0	550	40
БрАЖМц10-5-1,5	9,0-11,0	1,0-2,0	2,0-4,0	600	20
<b>Литейные бронзы</b>					
БрА9ЖЗЛ	8,0-10,5	-	2,0-4,0	400	10
БрА10ЖЗМц2	9,0-11,0	1,0-3,0	2,0-4,0	400	10

# Бериллиевые бронзы

Диаграмма состояний  
Cu-Be

Структура бронзы БрБ2



x800

## Состав и свойства бериллиевых бронз

Марка сплава	Содержание, %			Термическая обработка	$\sigma_{в}$ , МПа	$\delta$ , %
	Be	Ni	Ti			
<b>БрБ2</b>	1,9-2,2	0,2-0,5	-	Закалка от 760-780°C старение 320-350°C 2-5 часов	1150	4
<b>БрБНТ1,7</b>	1,6-1,85	0,2-0,4	0,1-0,25	Закалка от 760-780°C старение 320-350°C 2-5 часов	1000	5



## Свинцовые бронзы

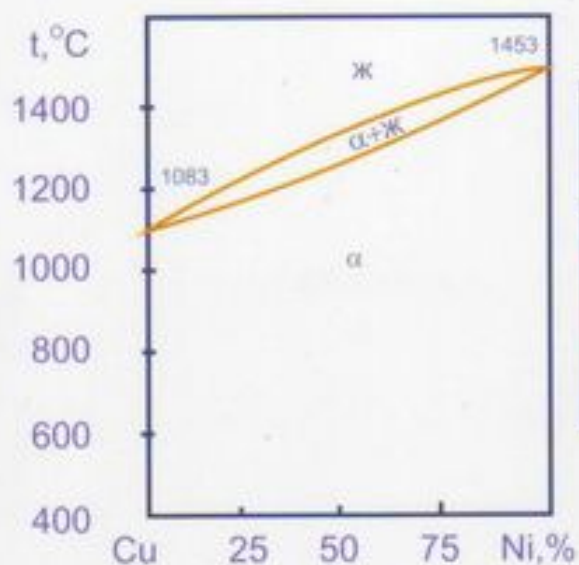
Марка сплава	Содержание, %		$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %
	Pb	Ni		
БрС30	27-33	-	60	4
БрСН60-2,5	57-63	2,25-2,75	30	5



x250

## Медноникелевые сплавы

Диаграмма состояний  
Cu - Ni



Состав и свойства сплавов

Марка сплава	Содержание, %		$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %
	Ni+Co	Zn		
<b>МН19</b> мельхиор	18-20	-	400	35
<b>МНЦ15-20</b> нейзильбер	13,5 - 16,5	18 - 22	415	40

# Титан и титановые сплавы

## Титан:

- температура плавления - **1668°C**;
- плотность при 20°C - **4,5 г/см<sup>3</sup>**;

Имеет полиморфное превращение:  $Ti_{\alpha} \leftrightarrow Ti_{\beta}$

выше 882°C -  $Ti_{\beta}$  с объёмноцентрированной кубической решеткой **ОЦК**;

ниже 882°C -  $Ti_{\alpha}$  с гексагональной плотноупакованной решеткой **ГП**

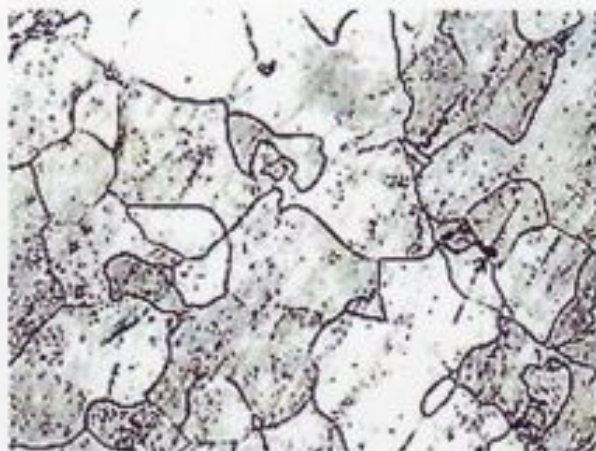
## Механические свойства чистого титана:

$$\sigma_b = 250 \text{ МПа}, \delta = 50 \%$$

**Маркировка** титана: **BT1-00** (99,53 % Ti),  
**BT1-0** (99,46 % Ti)

При быстром охлаждении с температур, превышающих 882°C, может происходить мартенситное превращение (с образованием игольчатой структуры).

## Микроструктура технического титана



После отжига x100

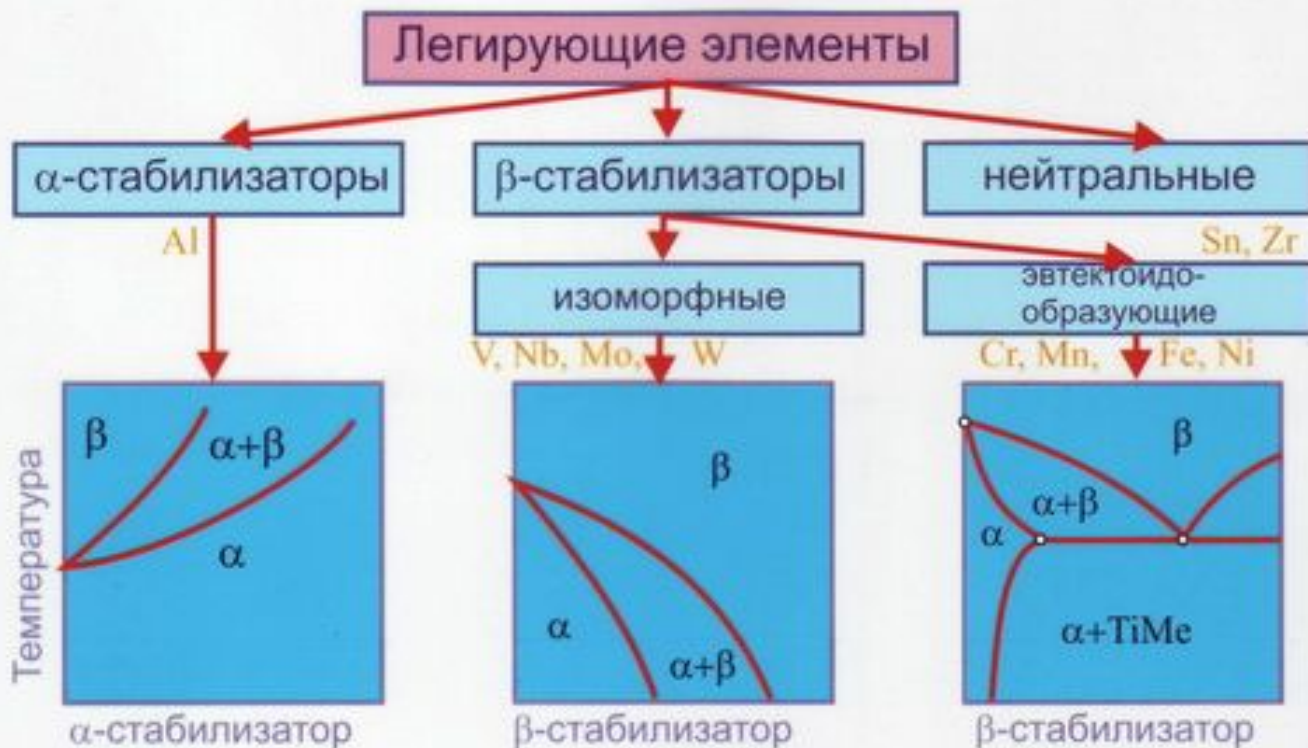


После быстрого охлаждения x300

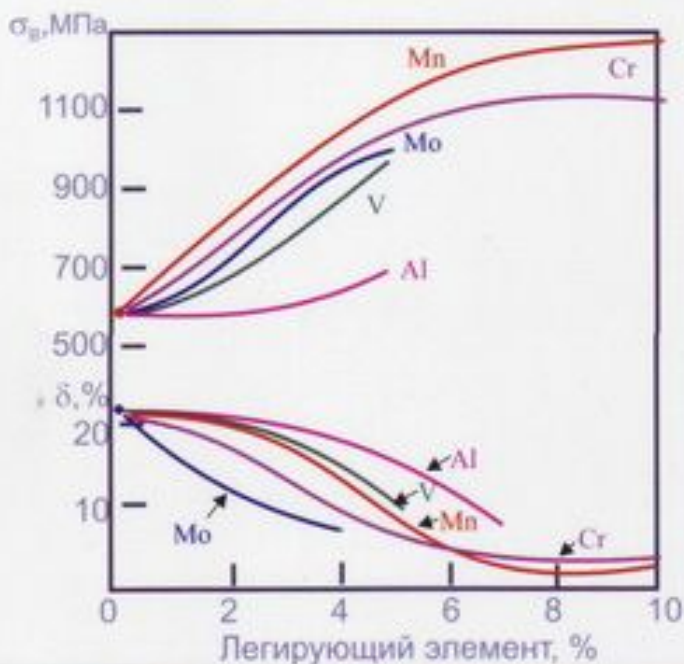


# Влияние легирующих элементов на полиморфизм титана

## Классификация легирующих элементов



## Влияние легирующих элементов на механические свойства титана





# Деформируемые титановые сплавы

## Маркировка:

буквы **BT** или **OT**, за которыми следует **число**, обозначающее условный номер сплава.

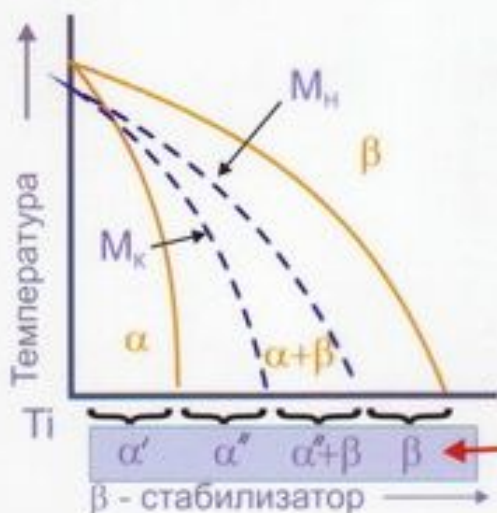
Классификация сплавов:

- $\alpha$  - сплавы;
- псевдо  $\alpha$  - сплавы, содержащие до 5 %  $\beta$  - фазы;
- $(\alpha+\beta)$  - сплавы;
- $\beta$  - сплавы.

## Состав и свойства сплавов

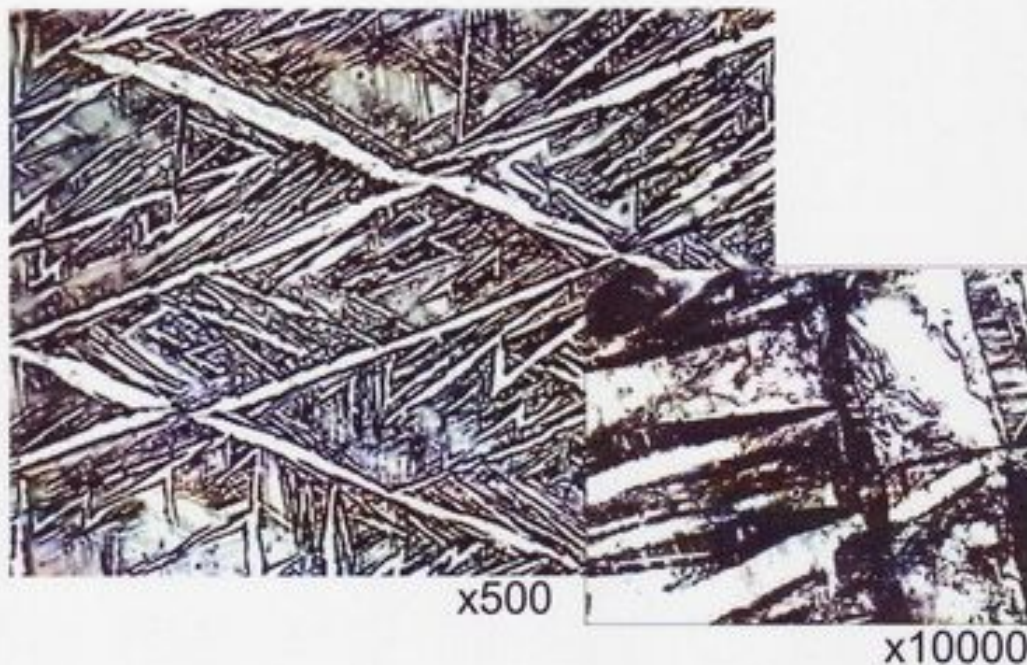
Марка сплава	Содержание, %				Термическая обработка	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	
	Al	V	Mo	другие				
<b>BT5-1</b>	4,0-6,0	<b><math>\alpha</math> - сплавы</b>			отжиг 800-850 °С	780	10	
		-	-	Sn 2,0-3,0				
		<b>Псевдо <math>\alpha</math> - сплавы</b>				отжиг 740-760 °С	680	11
<b>OT4-1</b>	3,5-5,0	-	-	Mn 0,8-2,0				
<b>BT20</b>	5,5-7,5	0,8-1,8	0,5-2,0	Zr 1,5-2,5	отжиг 700-800 °С	960	8	
		<b><math>(\alpha+\beta)</math> - сплавы</b>				закалка 900-950 °С старение 450-550 °С	1050	10
<b>BT6</b>	5,5-7,0	4,2-6,0	-	-				
<b>BT14</b>	5,6-6,3	0,9-1,9	2,5-3,8	-				
<b>BT20</b>	4,5-5,9	4-5,5	4-5,5	Cr 0,5-2,0	закалка 700-760 °С старение 500-660 °С	960	10	

# Деформируемые титановые сплавы



Мартенситные фазы:  
 $\alpha'$  - с гексагональной  
решеткой;  
 $\alpha''$  - с ромбической  
решеткой.

Структура сплава с  $\alpha'$  - мартенситом





## Литейные титановые сплавы

**Маркировка** литых сплавов такая же, как и деформируемых, но в конце маркировки ставят букву **Л**.

В литых сплавах допускается большее содержание примесей, чем в деформируемых.

### Состав и свойства сплавов

Марка сплава	Содержание, %				Термическая обработка	$\sigma_{в}$ , МПа	$\delta$ , %
	Al	V	Mo	другие			
<b>BT5Л</b>	4,1-6,2	-	-	-	отжиг 800-850°C, охл. на воздухе	700	6
<b>BT20Л</b>	5,5-7,5	0,8-1,8	0,5-2,0	Zr 1,5-2,5	отжиг 700-800°C, охл. на воздухе	930	8
<b>BT6Л</b>	5,0-6,5	3,5-4,5	-	-	закалка от 900-950°C старение 450-550°C	850	5
<b>BT14Л</b>	4,3-6,3	0,9-1,9	3,5-3,8	-	отжиг 740-760°C	880	5



# Никель и никелевые сплавы

## Никель:

- температура плавления - **1455°С**;
- плотность при 20°С - **8,9 г/см<sup>3</sup>**;
- кристаллическая решетка -  
гранецентрированная кубическая.

## Механические свойства никеля высокой чистоты:

$$\sigma_B = 280 \text{ МПа}, \delta = 50 \%;$$

## Маркировка технически чистого никеля:

**НП1** (99,9 % Ni+Co), **НП2** (99,5 % Ni+Co),  
**НП3** (99,3 % Ni+Co), **НП4** (99,0 % Ni+Co).

## Жаростойкие никелевые сплавы

Марка сплава	Содержание, %					Применение
	C	Cr	Al	Si	Ti	
<b>X20H80</b> (нихром)	<0,12	20-23	-	0,4-1,5	-	электронагреватели до 1100°С
<b>XH70Ю</b>	<0,12	26-29	2,8-3,5	<0,8	-	детали камер сгорания до 1200°С
<b>XH78T</b>	<0,12	19-22	-	<0,8	0,15-0,3	детали камер сгорания до 1000°С

# Деформируемые никелевые сплавы

**Маркировка** сплавов:

1) Марка сплава состоит из букв, обозначающих элементы, входящие в его состав. Обозначения элементов, такие же, что и у сталей. Марка сплава начинается с буквы **X** (хром), затем идет **N** и цифра, указывающая среднее содержание никеля, а далее буквы, обозначающие остальные элементы (**XN77TiЮP**).

2) используются условные обозначения, не имеющие отношения к химическому составу сплавов (**ЭИ437Б**).

Влияние количества  $\gamma'$ -фазы на длительную прочность

Состав сплавов

Марка сплава	Содержание, %			
	Cr	Al	Ti	другие
<b>XN77TiЮP</b> (ЭИ437Б)	19-22	0,6-1,0	2,4-2,8	B <0,01 C <0,12
<b>XN70BMTiЮ</b> (ЭИ617)	13-16	1,7-2,3	1,8-2,3	Mo 2,0-4,0 W 5,0-7,0 V 0,1-0,5 C <0,12
<b>XN55BMTiKЮ</b> (ЭИ929)	9-12	3,6-4,5	1,4-2,0	Mo 4,0-6,0 W 4,5-6,5 V 0,2-0,8 Co 12-16 C <0,12



Термическая обработка:

**ЭИ437Б** - закалка от 1080-1120°C, старение при 700-750°C, 16ч;

**ЭИ617** - закалка от 1180-1200°C, закалка от 1040-1060°C и старение при 800°C, 16ч;

**ЭИ929** - закалка от 1190-1210°C, закалка от 1040-1080°C и старение при 850°C, 8ч;



# Жаропрочные никелевые сплавы

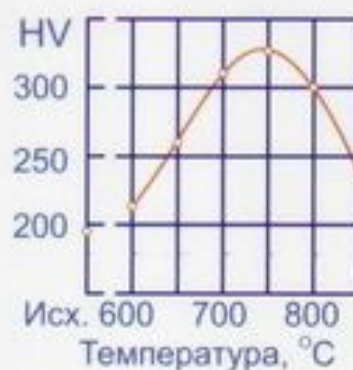
Термическая обработка сплавов Ni-Cr-Ti-Al:  
*закалка и старение.*

Упрочнение при старении обеспечивает  $\gamma'$ -фаза -  $Ni_3(Ti,Al)$  с решеткой ГЦК..

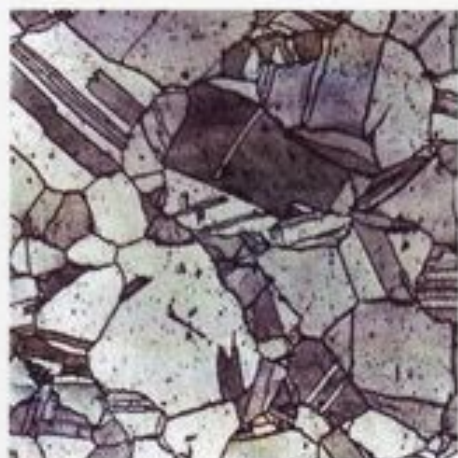
Схема термической обработки



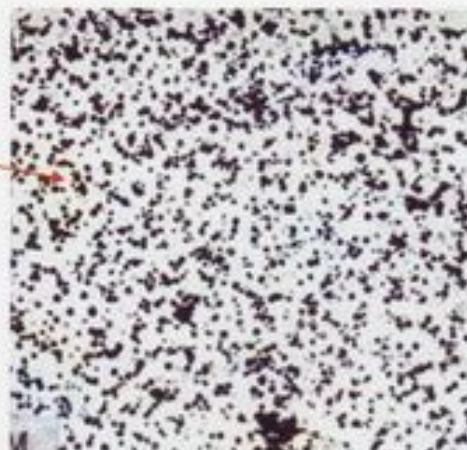
Изменение твердости сплава ХН77ТЮР при старении (16ч)



Структура сплава ХН77ТЮР после старения 750°C, 16ч



x100



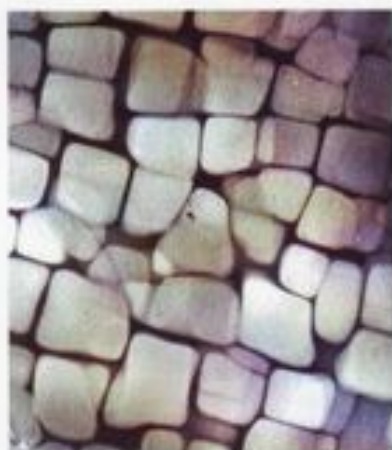
x20000



# Литейные никелевые сплавы

Литейные сплавы содержат 45-60 %  $\gamma'$ -фазы

Структура литого сплава



x20000

Направленная кристаллизация



x75

Марка сплава	Содержание, %				Рабочие температуры, °C	Длительная прочность, $\sigma_{100}^{800}$ , МПа
	Cr	Al	Ti	Другие		
<b>ЖС6К</b>	10,5 - 12,5	5,0 - 6,0	2,5 - 3,0	Mo 3,5-4,5 W 4,5-5,5 Co 4,0-5,0 B < 0,02 C=0,13-0,2	850-1050	520

Термическая обработка сплава ЖС6К:  
закалка от 1210-1230°C и старение 950°C, 2ч