

# Цветные металлы и сплавы

## Алюминий и его сплавы

Характеристика	Значение	Комментарий
Решётка	ГЦК	$a = 0,40496 \text{ нм}$
Плотность, г/см <sup>3</sup>	2,7	Низкая (относится к лёгким металлам)
Температура плавления, °С	660	Низкая
Удельное электро-сопротивление, 10 <sup>-8</sup> Ом·м	2,8	Низкое (проводниковый металл, уступает Ag и Cu)
Теплопроводность, Вт/(м·К)	228	Высокая
Распространённость в земной коре, %	8	Высокая (у Fe 5 %)
Объём производства, млн. т/г	>40	Лидер среди цветных металлов
Коррозионная стойкость	Высокая	$V_{\text{уд}}(\text{Al}) \approx V_{\text{уд}}(\text{Al}_2\text{O}_3)$

# Микроструктура литого алюминия



Чистота 99,9998 % Al  
55×37 мм

# Маркировка алюминия

*Пример* марки: **A5**

*Расшифровка* (по ГОСТ 11069-2001):

A – алюминий, 5 – цифра (или цифры) после цифр 99 и запятой в значении содержания основного металла в процентах, т.е. A5 содержит 99,5 % Al.

**Алюминий особой чистоты:** марка A999.

**Алюминий высокой чистоты:** марки от A95 до A995.

**Алюминий технической чистоты:** марки от A0 до A85.

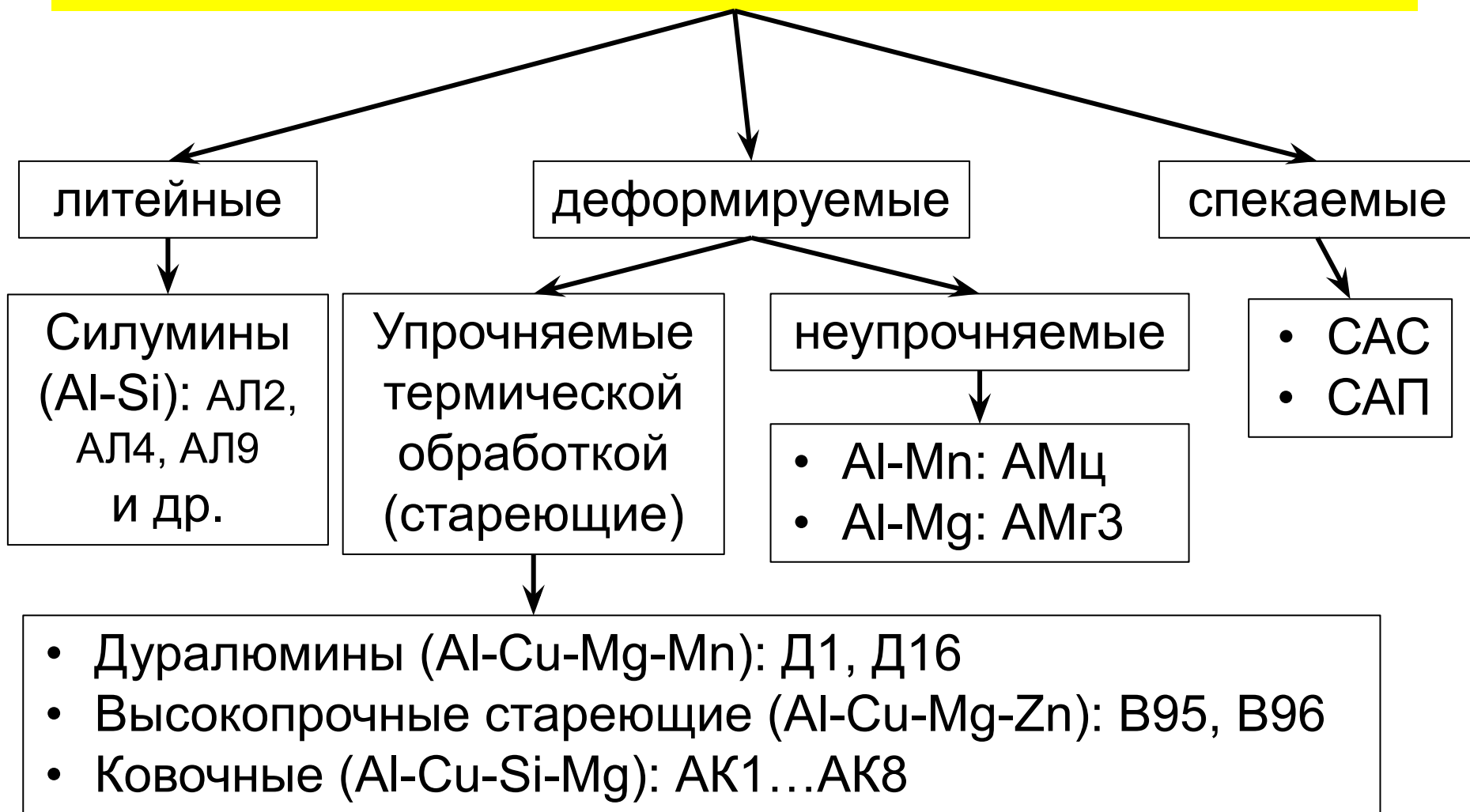
В марках A5E и A7E буква E указывает на предназначение алюминия для электротехнических целей.

Металл	Постоянные примеси	Взаимодействие с металлом-основой	Полезный эффект	Вредный эффект
Al	Fe, Si, Cu, Zn, Ti	Растворение	Упрочнение	Снижение пластичности

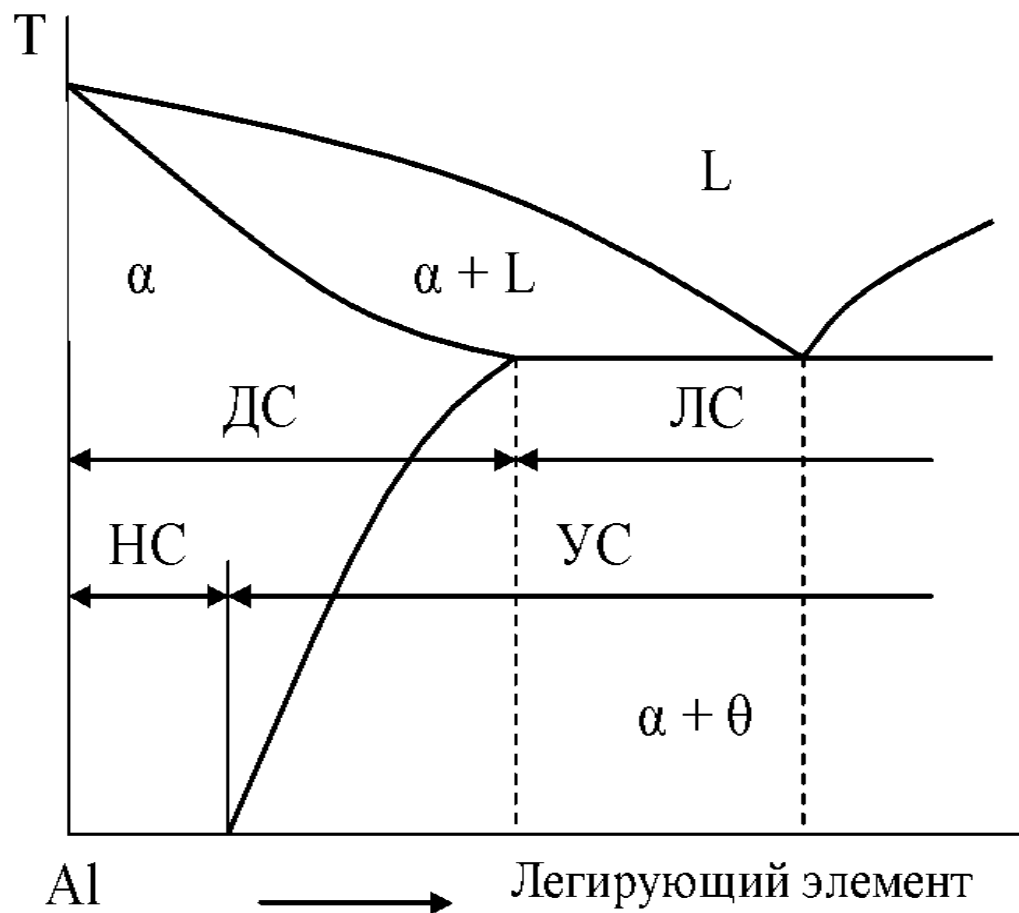
# Классификация легирующих элементов и примесей по влиянию на структуру Al-сплавов

Воздействие на структуру	Легирующие элементы и примеси
Твёрдорастворное упрочнение $\alpha$ и образование фаз-упрочнителей при старении	<b>Cu, Mg, Si, Zn, Mn, Li</b>
Образование нерастворимых (при отжиге) эвтектических фаз	Fe, Ni, Mn, Mg, Si, Cu, Be
Образование первичных кристаллов	Fe, Ni, Mn, Si, Zr, Cr, Ti
Образование интерметаллидов при распаде твёрдого раствора $\alpha$	Mn, Zr, Cr, Ti, Sc
Микродобавки для связывания вредных примесей, измельчения зерна $\alpha$ , модифицирования эвтектики, воздействия на распад $\alpha$	Be, Cd, Sr, Na, Ti, B

# Классификация сплавов Al по технологическим свойствам



# Диаграмма состояния алюминий – легирующий элемент (схема)



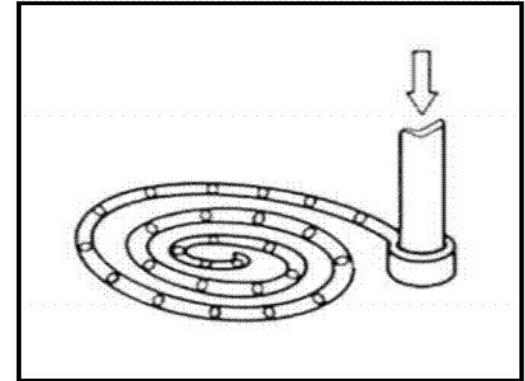
ДС – деформируемые сплавы;  
ЛС – литейные сплавы;  
НС – неупрочняемые сплавы;  
УС – сплавы, упрочняемые термической обработкой (подвергаемые закалке с последующим старением)



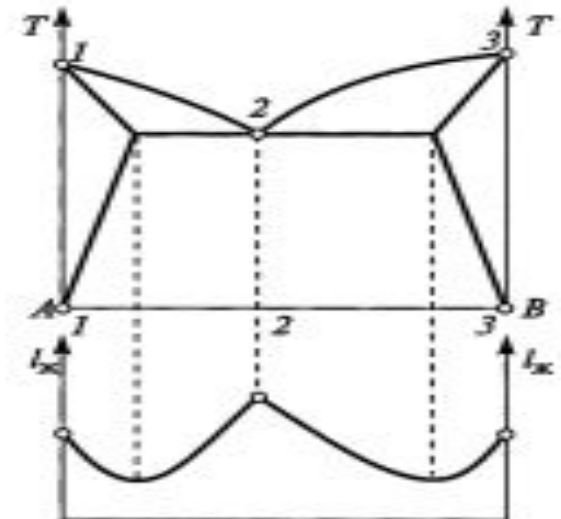
# Литейные сплавы

Основное свойство – хорошая жидкотекучесть.

- **Жидкотекучесть** – способность расплава заполнять литейную форму.
- Склонность к образованию *усадочных пустот*
- *Герметичность* – способность отливки выдерживать давление газа или жидкости без течи
- *Линейная усадка*
- Склонность к образованию *горячих трещин*
- Склонность к *ликвации*



Спиральная проба на жидкотекучесть



# Классификация литейных алюминиевых сплавов

По химическому составу

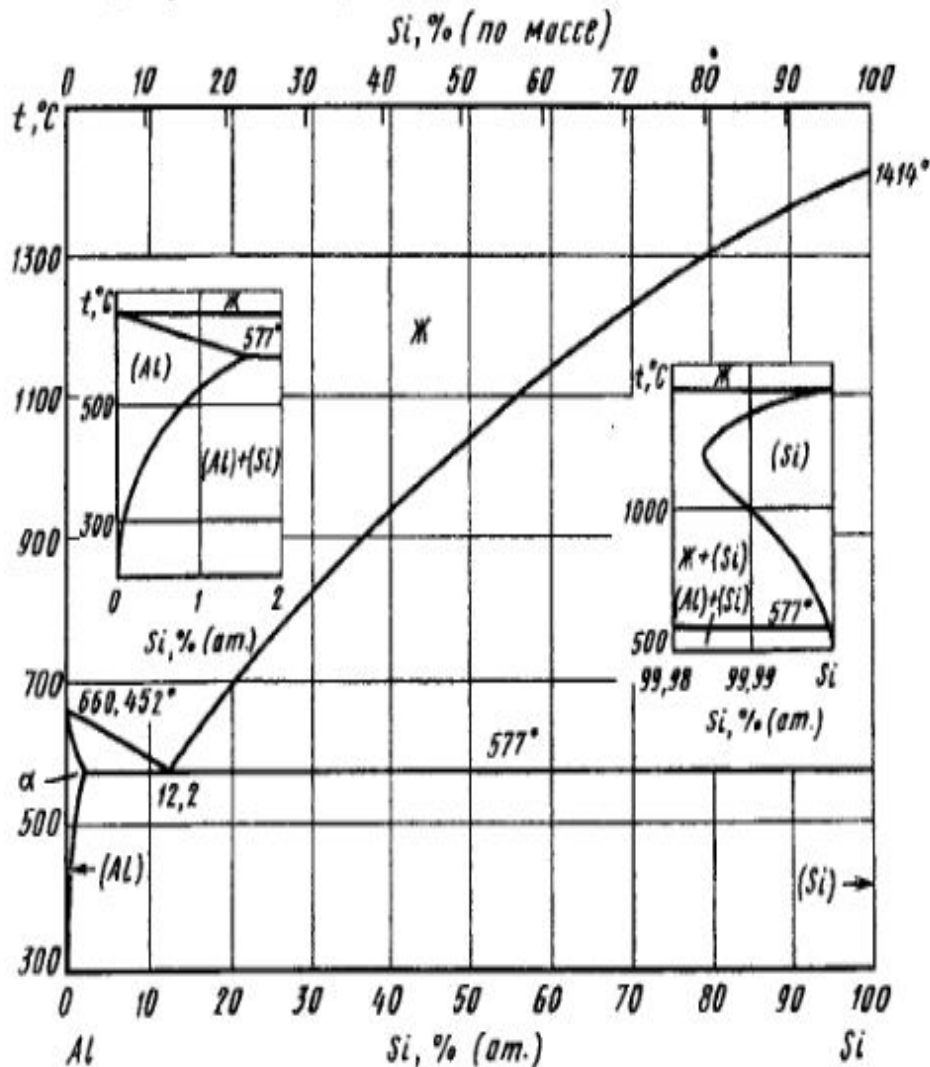
- Al-Si (силумины)
- Al-Si-Mg
- Al-Si-Cu
- Al-Cu
- Al-Mg
- Al-прочие компоненты

По назначению

- **С высокой герметичностью** — АК12 (АЛ2), АК9ч (АЛ4), АК7ч (АЛ9), АК8МЗч (ВАЛ8), АК7пч (АЛ9-1), АК8л (АЛ34), АК8М (АЛ32);
- **Высокопрочные, жаропрочные** — АМ5 (АЛ 19), АК5М (АЛ5), АК5Мч (АЛ5-1), АМ4, 5 Кд (ВАЛ10);
- **Коррозионностойкие** — АМч11 (АЛ22), АЦ4Мг (АЛ24), АМг10 (АЛ27), АМг10ч (АЛ27-1)



# Диаграмма Al-Si



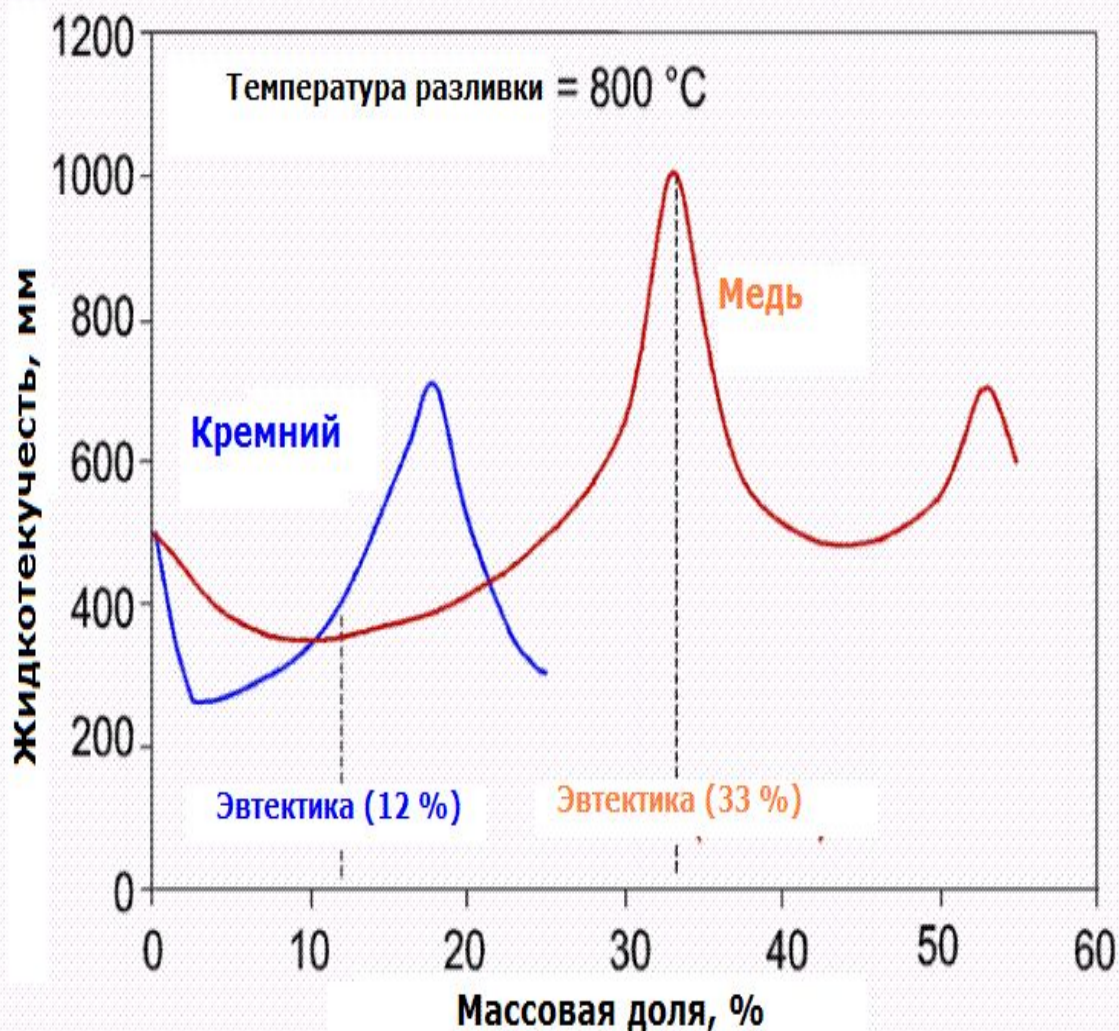
Силумины – сплавы  $\text{Al}+(4-22) \% \text{Si}$

Маркировка:

**АЛ##** (алюминий литейный, ## - порядковый номер) или

**АК##** (алюминий, кремний, ## - содержание кремния в %) по ГОСТ 1583-93, например, АК12 (АЛ2 = АК12)

# Жидкотекучесть сплавов Al-Si и Al-Cu



Максимум жидкотекучести в Al-Si сдвинут от эвтектической точки в сторону кремния из-за большей теплоты кристаллизации Si (1,4 против 0,4 кДж/г у Al) в сочетании с компактностью его первичных кристаллов.

У Al-Cu высокая жидкотекучесть эвтектического сплава, но при этом большая хрупкость, поэтому для литья используют сплавы AM4, AM5 с малым % Cu (4 и 5 %).

# Деформируемые неупрочняемые алюминиевые сплавы (ДНАС)

Основное свойство деформируемых сплавов – высокая пластичность в горячем и холодном состоянии.

Подвергаются обработке давлением:  
прокатке, штамповке, прессованию, ковке

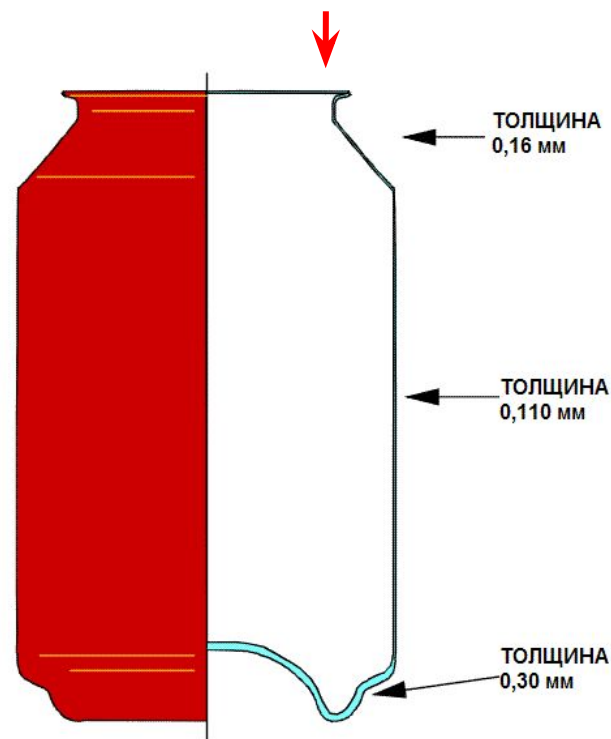
ДНАС

**Низкопрочные:** технический алюминий АД, сплавы АМц

**Средней прочности:**  
магналии АМг3, АМг6, ...

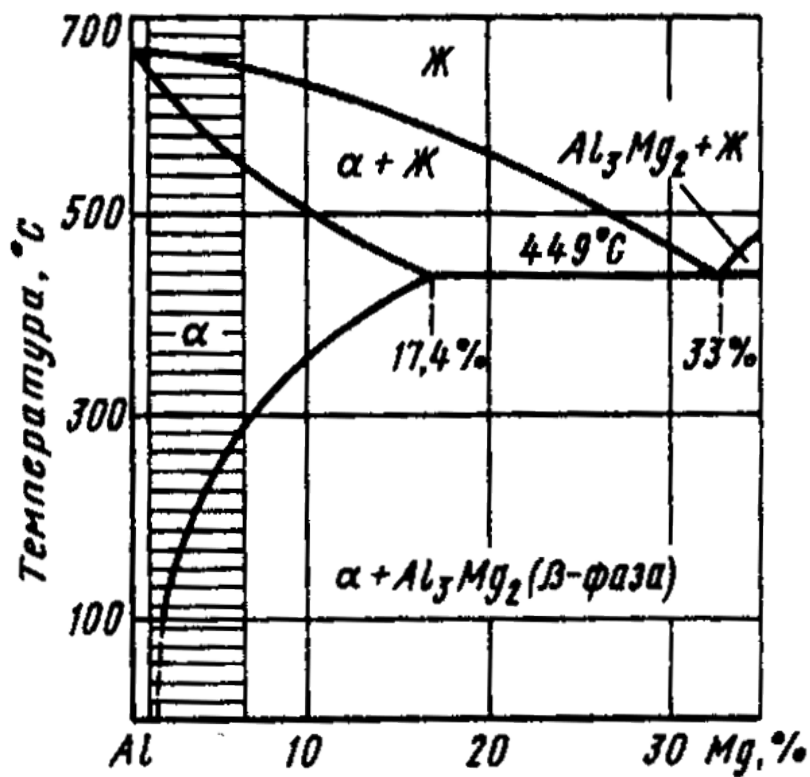


Сплавы типа АМц



Типичное поперечное сечение  
алюминиевой пивной банки

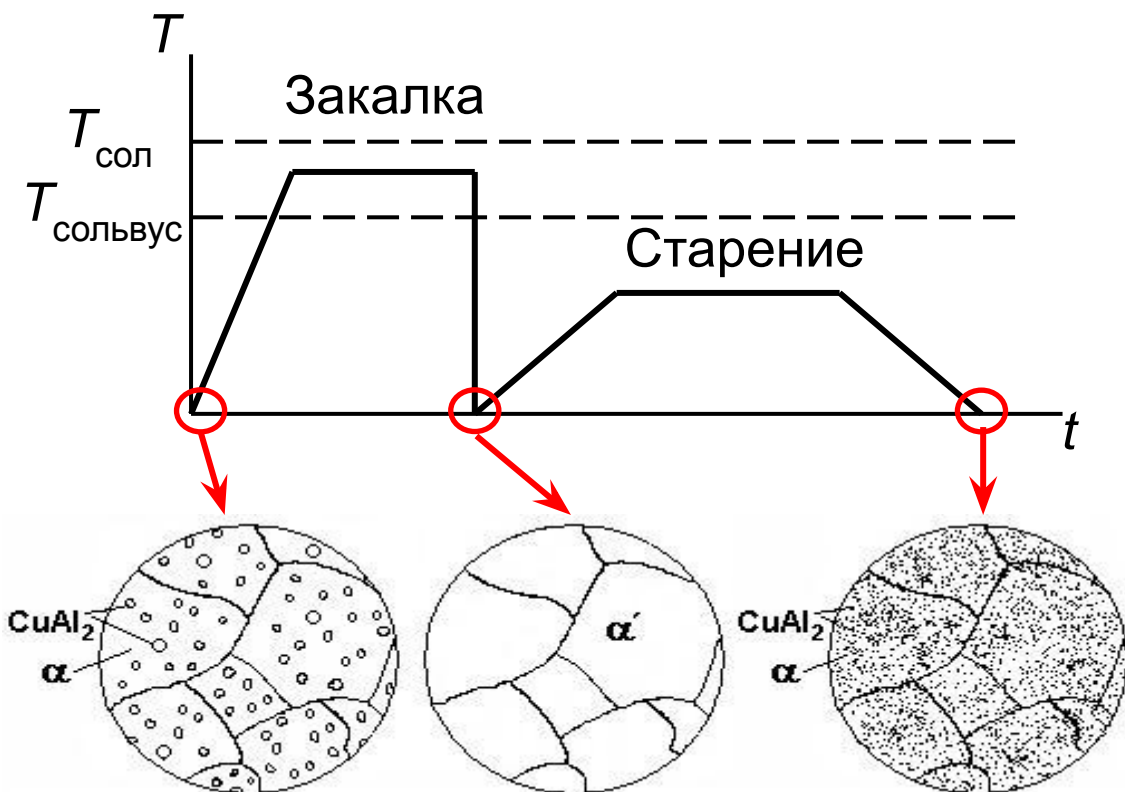
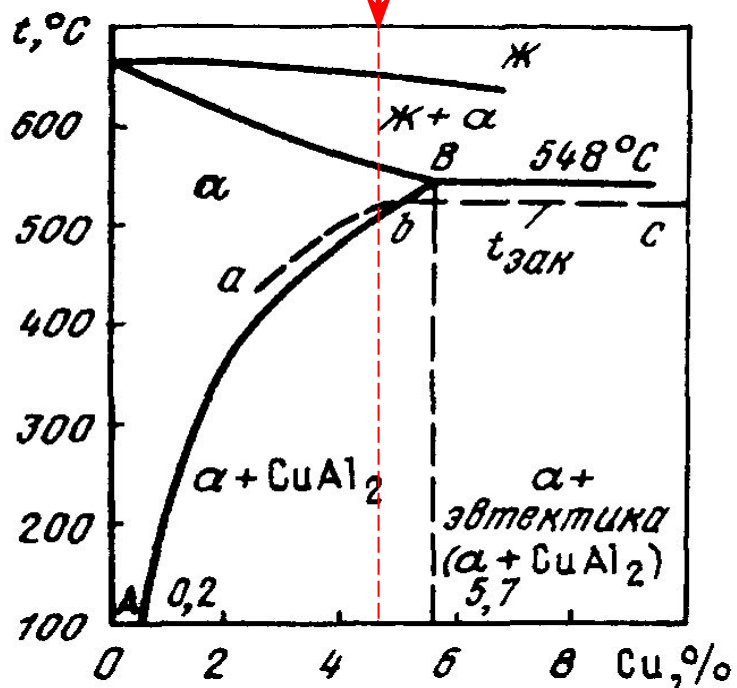
# Диаграмма состояния Al-Mg



Промышленные сплавы

# Дюралюмины (Al-Cu-Mg)

Классический состав (Д1):  
Al – 4,5 % Cu – 0,5 % Mg – 0,5 % Mn  
Аналог – сплав Al – 4,5 % Cu



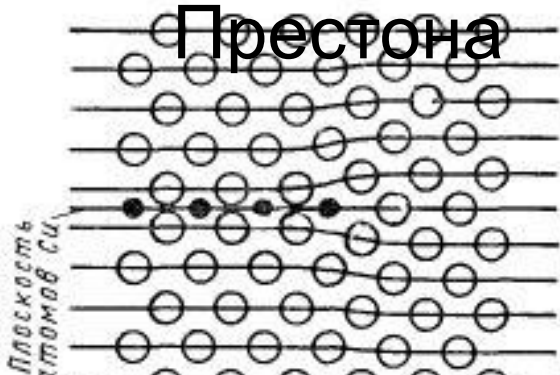


# Старение в сплавах Al-Cu

$T, ^\circ\text{C}$	Процесс	Характеристика
< 100	Образование зон Гинье-Престона (ГП, или ГП-1)	Плоские дискообразные скопления атомов Cu, $\text{Ø}(4-10) \text{ нм}^x$ (0,5-1) нм
100-150	Образование зон ГП-2 ( $\theta''$ ), сильнее обогащённых Cu	Состав близок к $\text{Al}_2\text{Cu}$ , нет границ с $\alpha$ , $\text{Ø}(20-30) \text{ нм}^x$ (1-4) нм
150-200	Образование метастабильной фазы $\theta'$	Упорядоченное расположение Al и Cu, когерентные границы с $\alpha$ по плоскостям (100)
200-250	Срыв когерентности границ и образование $\theta$	Атомы Al и Cu образуют решётку $\text{Al}_2\text{Cu}$ , некогерентные границы с $\alpha$
> 250	Коалесценция $\theta$	Рост крупных частиц за счёт растворения мелких

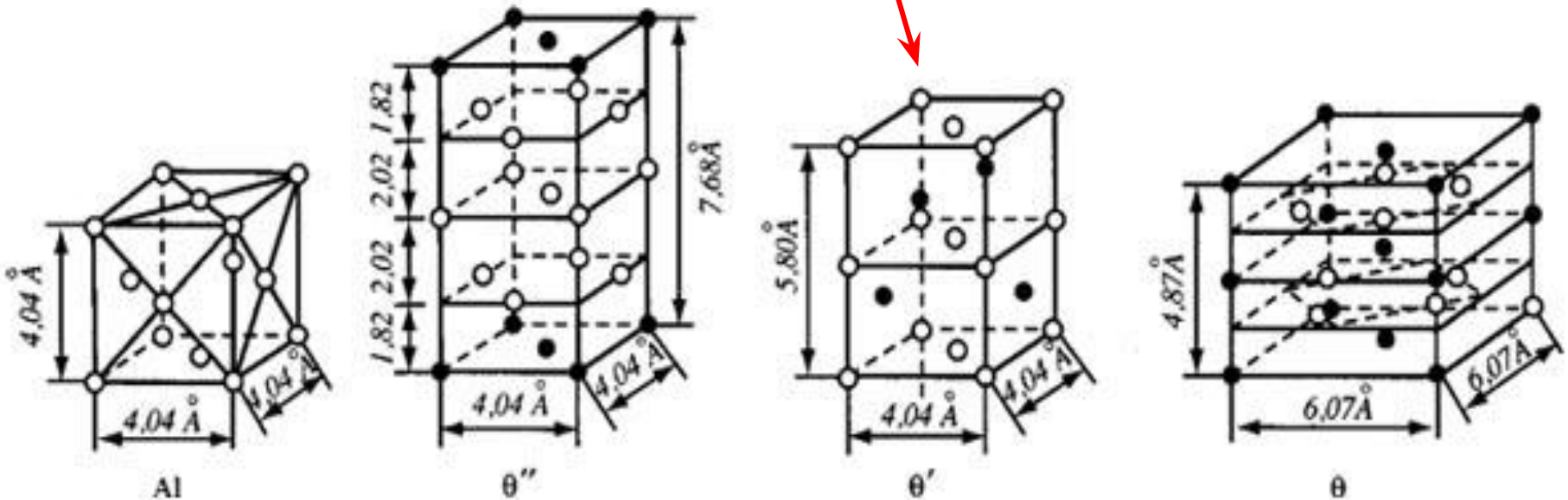
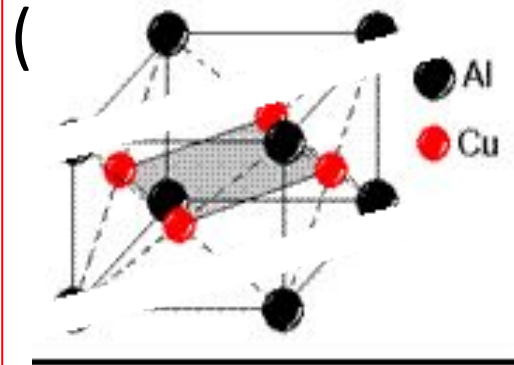
# Строение выделений в Al-Cu

## Зона Гинье-Престона



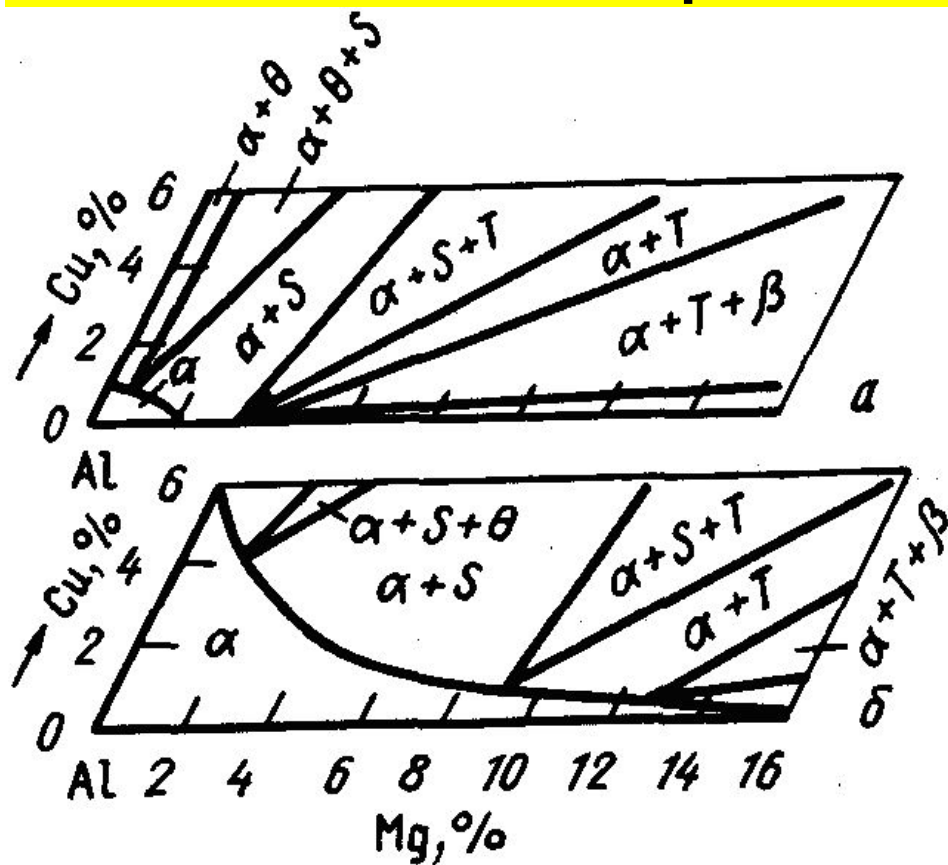
## Стабильная фаза $\theta$

В  $\theta'$  есть плоскости с квадратной сеткой атомов и параметрами, близкими к параметрам решетки алюминиевой матрицы!





# Влияние соотношения Cu и Mg на фазовое состояние и прочность дюралюминов

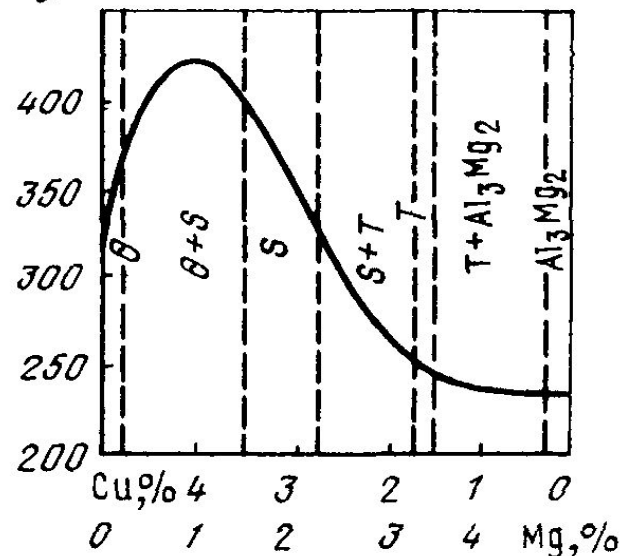


а – 200 °С, б – 500 °С

Д1 – 0,5 % Mg, Д16 – 1,5 % Mg

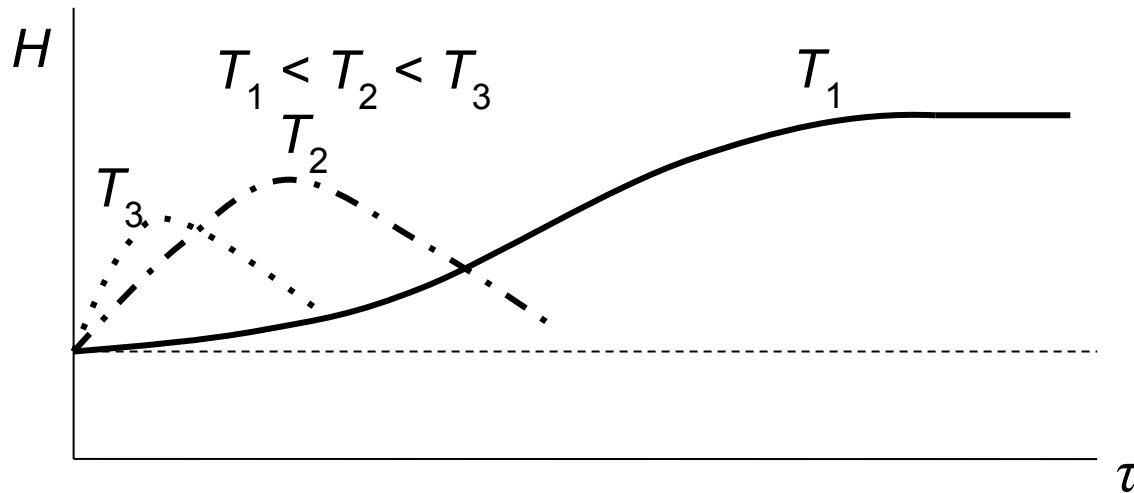
$\Theta = \text{Al}_2\text{Cu}$ , HV 5,3 ГПа  
 $S = \text{Al}_2\text{MgCu}$ , HV 5,6 ГПа  
 $T = \text{Al}_6\text{MgCu}_6$ , HV 4,1 ГПа

$\sigma_{\theta}$ , МПа

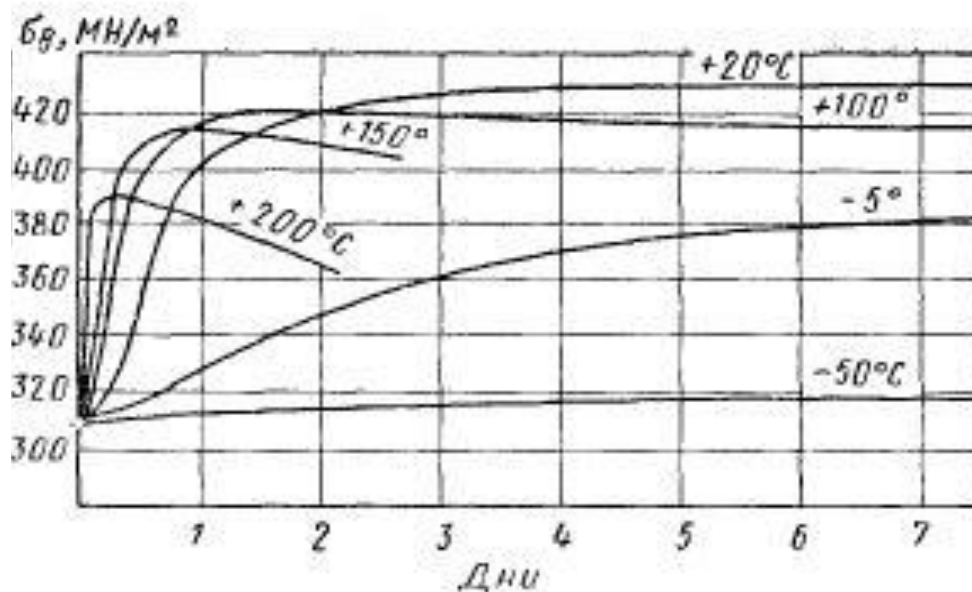


После закалки и старения, Cu+Mg= 5 %

# Изменение свойств при старении дюралюмина



1 – естественное старение;  
2, 3 – искусственное старение



Механические свойства Д16

Состояние	$\sigma_{в}, \text{МПа}$	$\delta, \%$
Отжиг	200	25
Закалка	300	23
Закалка и старение	450	18

# Медь и её сплавы

Плотность  $8,95 \text{ г/см}^3$   
Т-ра плавления  $1083 \text{ }^\circ\text{C}$   
Решётка ГЦК  
Высокая электро- и теплопроводность

50 % производимой меди – для электро- и радиотехники

Состояние	$\sigma_{\text{В}}, \text{ МПа}$	$\sigma_{0,2}, \text{ МПа}$	$\delta, \%$
Литое	160	35	25
Горячедеформированное	250	95	50

Низкая прочность и высокая стоимость – как конструкционный материал чистая медь не используется.

## Проводниковая медь

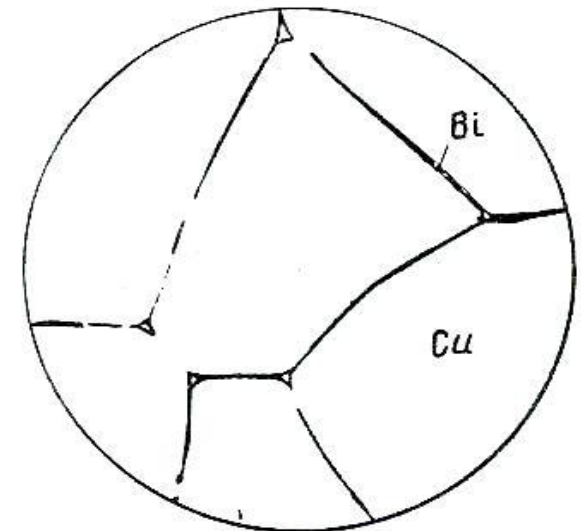
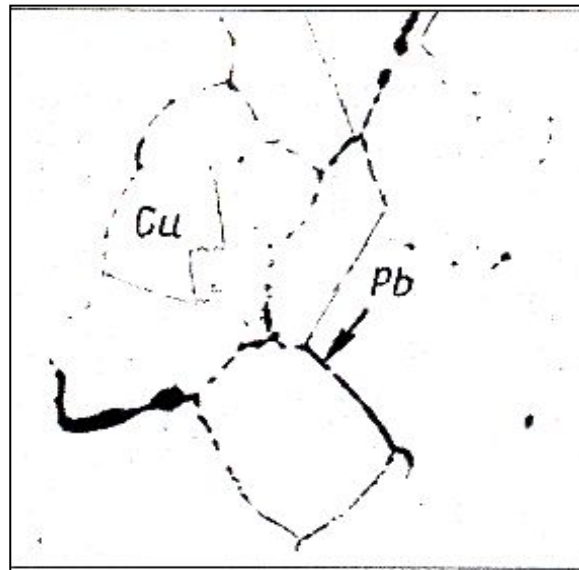
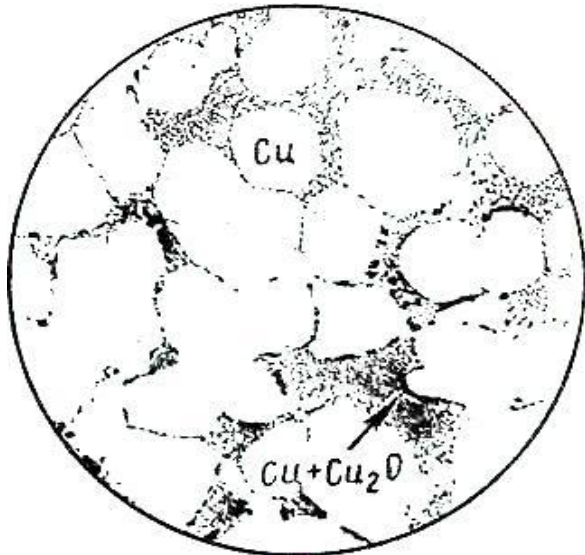
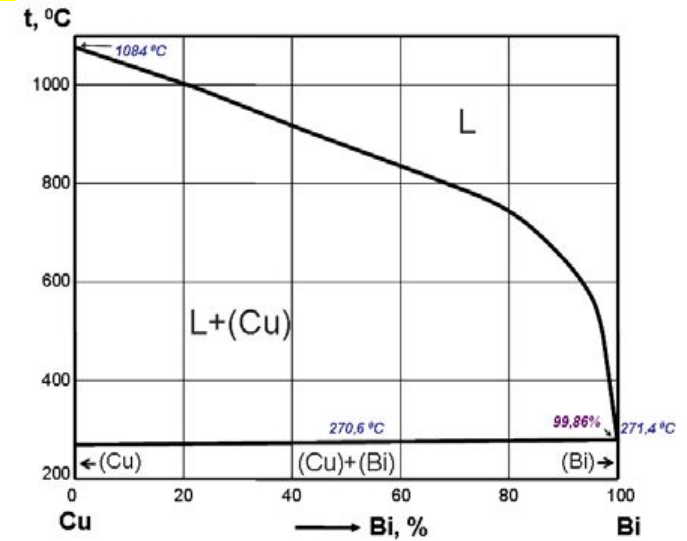
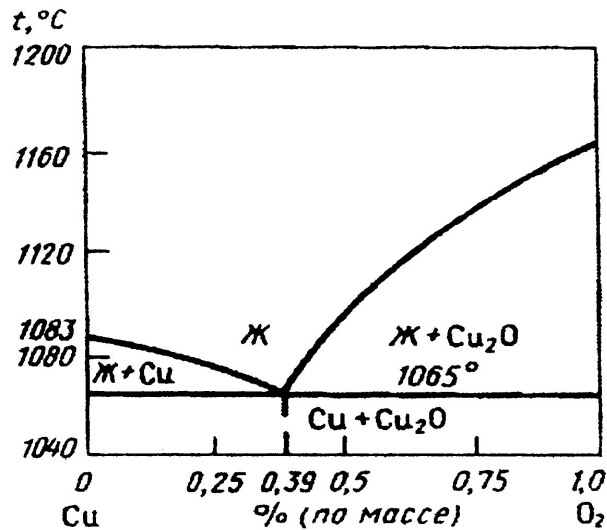
Марка	M3	M2	M1	M0	M00
% Cu (масс.)	99,5	99,7	99,9	99,95	99,99



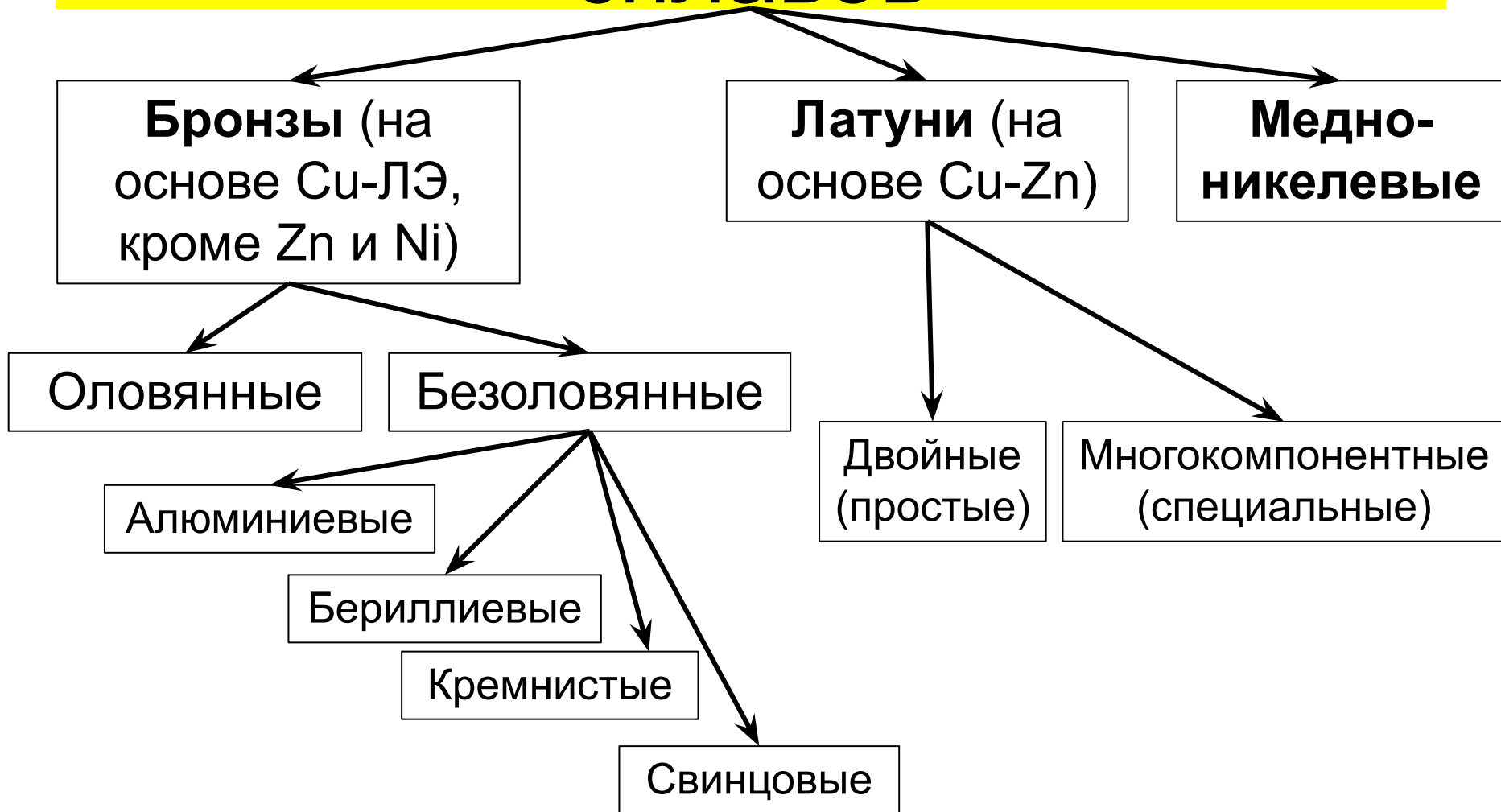
# Примеси в меди

Постоянные примеси	Взаимодействие с металлом-основой	Полезный эффект	Вредный эффект
Al, Fe, Ni, Sn, Zn, Ag	Растворение	Упрочнение	Снижение пластичности
Pb	Образование легкоплавких эвтектик	Улучшение обрабатываемости резанием	Горячеломкость
Bi		Нет	Горячеломкость + охрупчивание
O	Образование тугоплавких эвтектик	Нет	Водородная болезнь
S, Se, Tl			Снижение пластичности

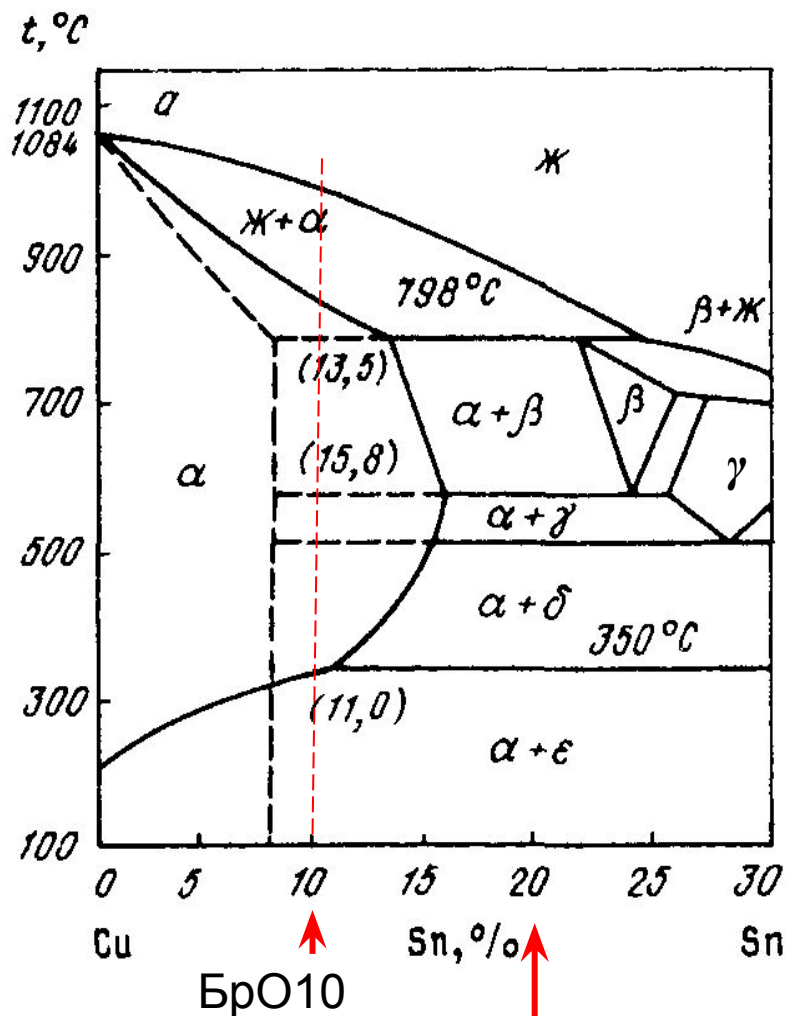
# Микроструктура меди с примесями



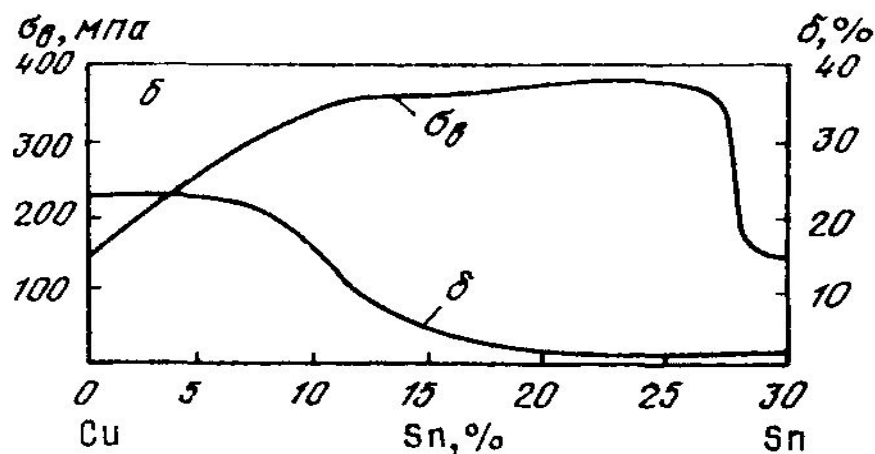
# Классификация медных сплавов



# Оловянные бронзы



Колокольная бронза

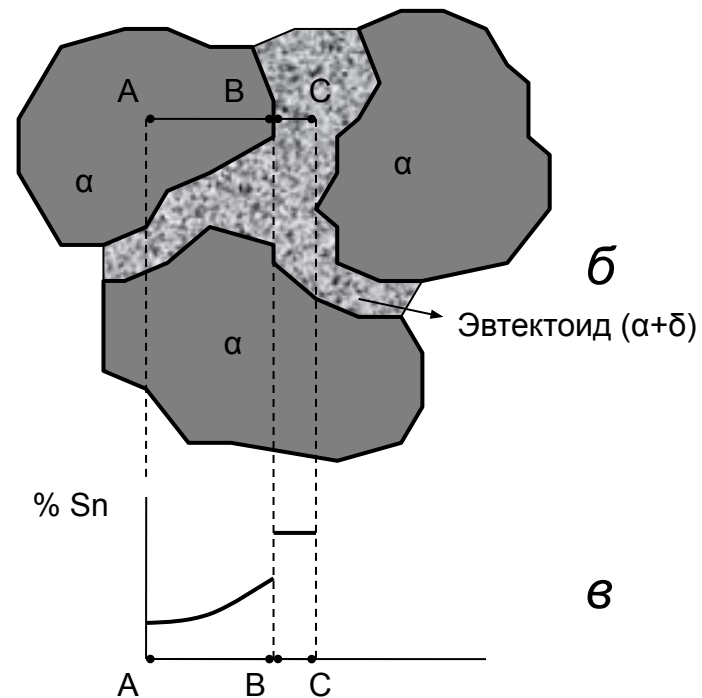
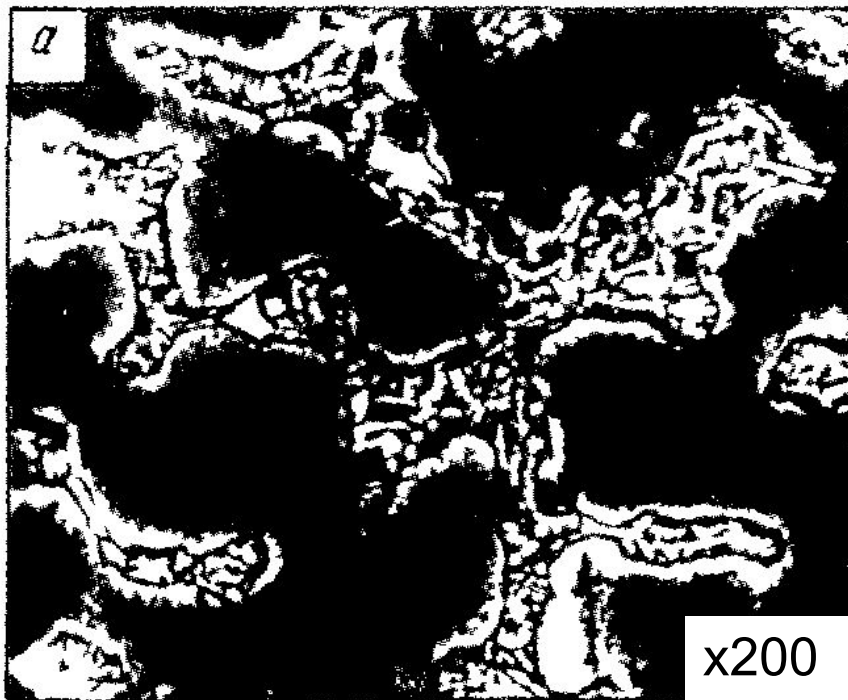


Особенности микроструктуры БрО10 в неравновесном состоянии:

- Неравновесный фазовый состав ( $\alpha+\delta$ ) вместо ( $\alpha+\epsilon$ )
- Наличие эвтектоида ( $\alpha+\delta$ ) и отсутствие вторичных кристаллов  $\epsilon$
- Неравновесный химический состав  $\alpha$  (8 % Sn вместо 0).



# Микроструктура оловянной бронзы БрО10 в литом состоянии



Микроструктура (*a*), её схема (*б*) и пространственное распределение концентрации олова в  $\alpha$ -фазе (*в*) для сплава БрО10

# Классификация оловянных бронз

Деформируемые

Характеристика:  
Однофазные,  
среднелегированные,  
с высокой пластичностью

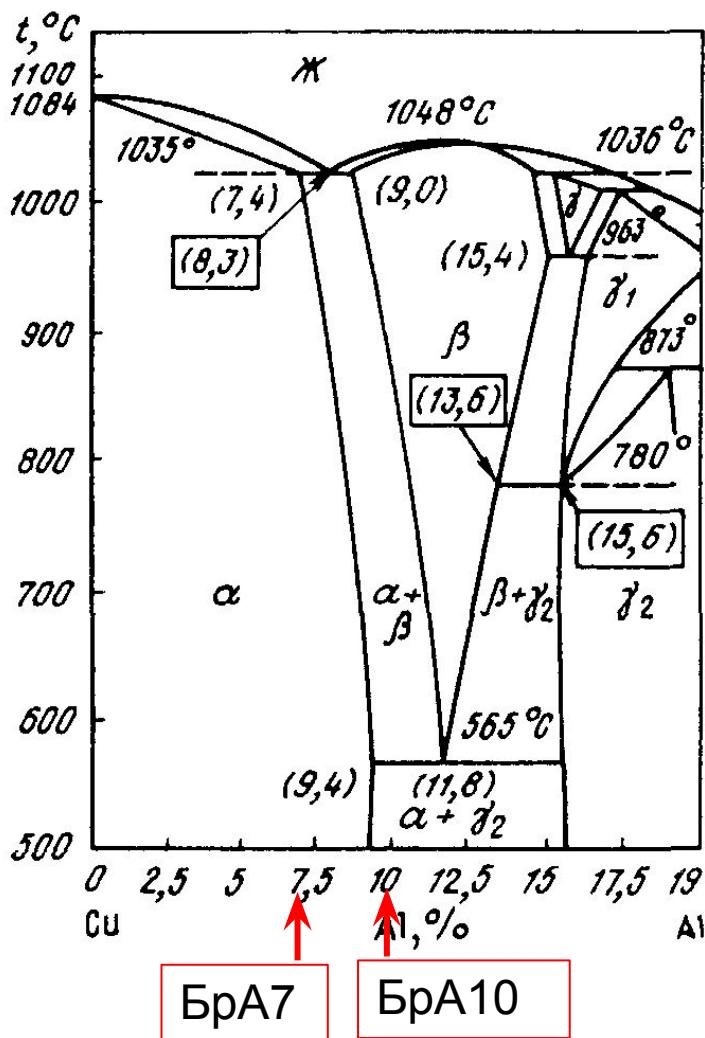
Марка	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %
БрОФ4-0,25	340	52
БрОФ6,5-0,15	400	65
БрОЦ4-3	350	40
БрОЦС4-3,5-2,5	350	40

Литейные

Характеристика: двухфазные, с  
( $\alpha+\delta$ )-эвтектоидом,  
высоколегированные, с хорошей  
жидкотекучестью

Марка	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %
БрО10Ф1	250	7
БрО5Ц5С5	180	4

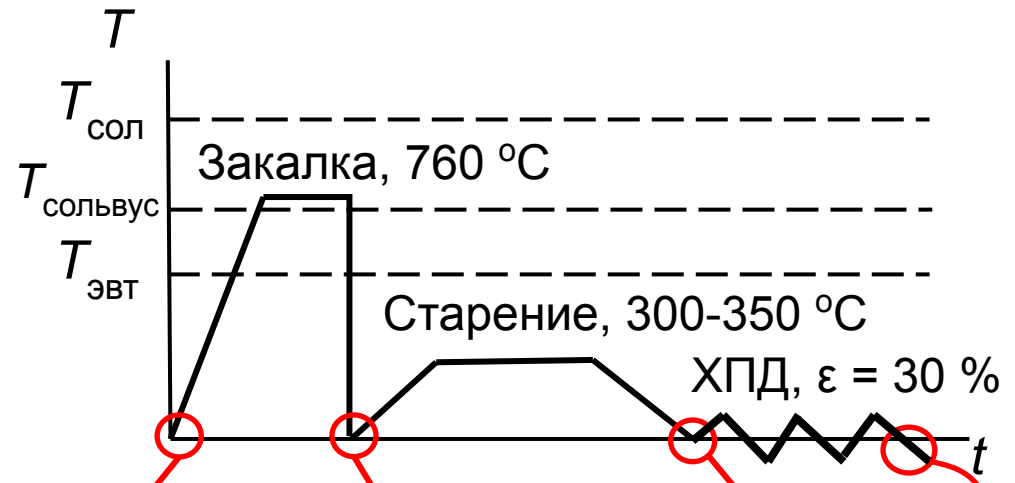
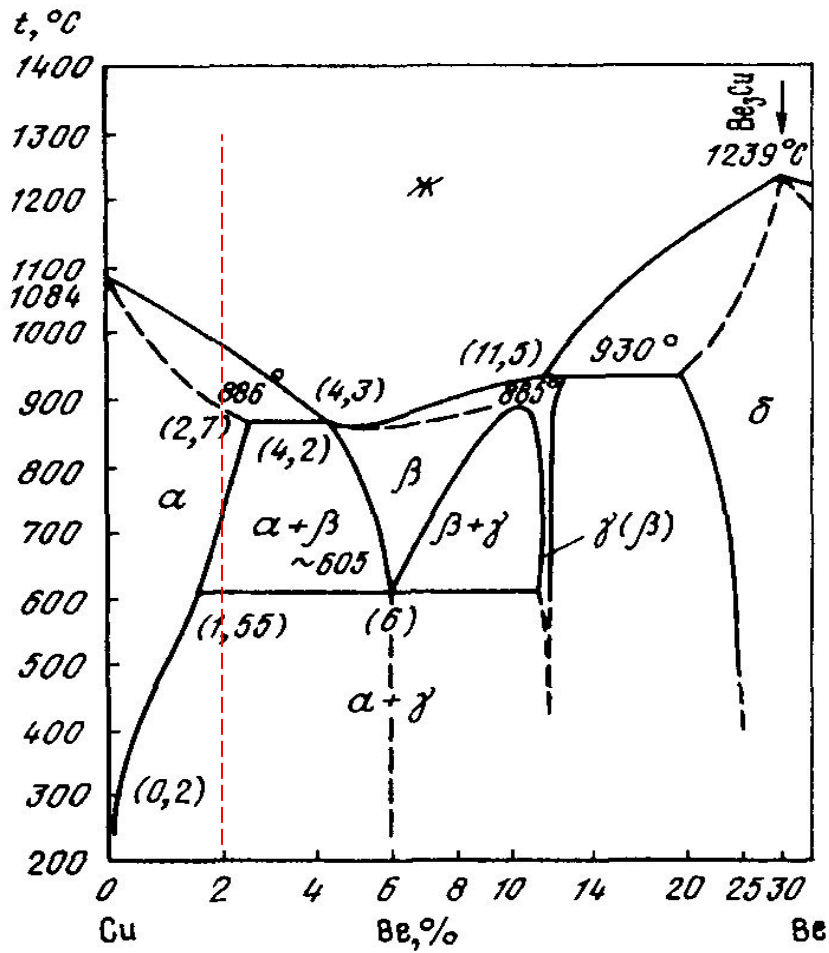
# Алюминиевые бронзы



- **Однофазные** ( $< 9\%$  Al, фаза  $\alpha$ , высокопластичные, упрочняемые наклёпом, штампуемые): БрА5, БрА7
- **Двухфазные** ( $\geq 9\%$  Al, фазы после отжига  $\alpha + \gamma_2$ , доэвтектоидные, термически упрочняемые - улучшаемые): БрА10, БрАЖ9-4, БрАЖМц10-3-1,5

Термообработка двухфазных бронз:  
Закалка на мартенсит из  $\beta$ -области (900-950  $^\circ\text{C}$ ) + отпуск при 200-250  $^\circ\text{C}$   
Мартенсит  $\beta'$  – игольчатый, невысокой прочности. Упрочнение при отпуске за счёт образования мелких дисперсных частиц  $\gamma_2$ .

# Бериллиевая бронза БрБ2



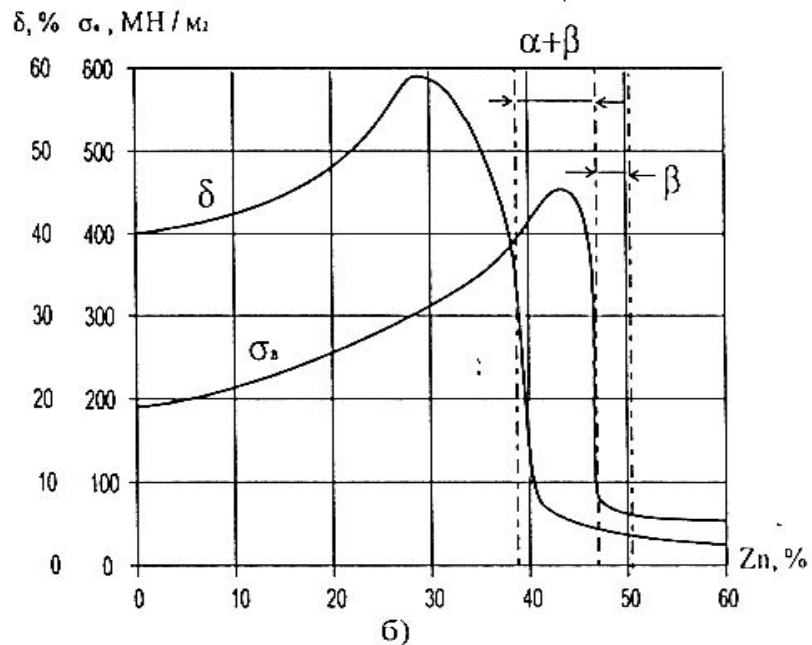
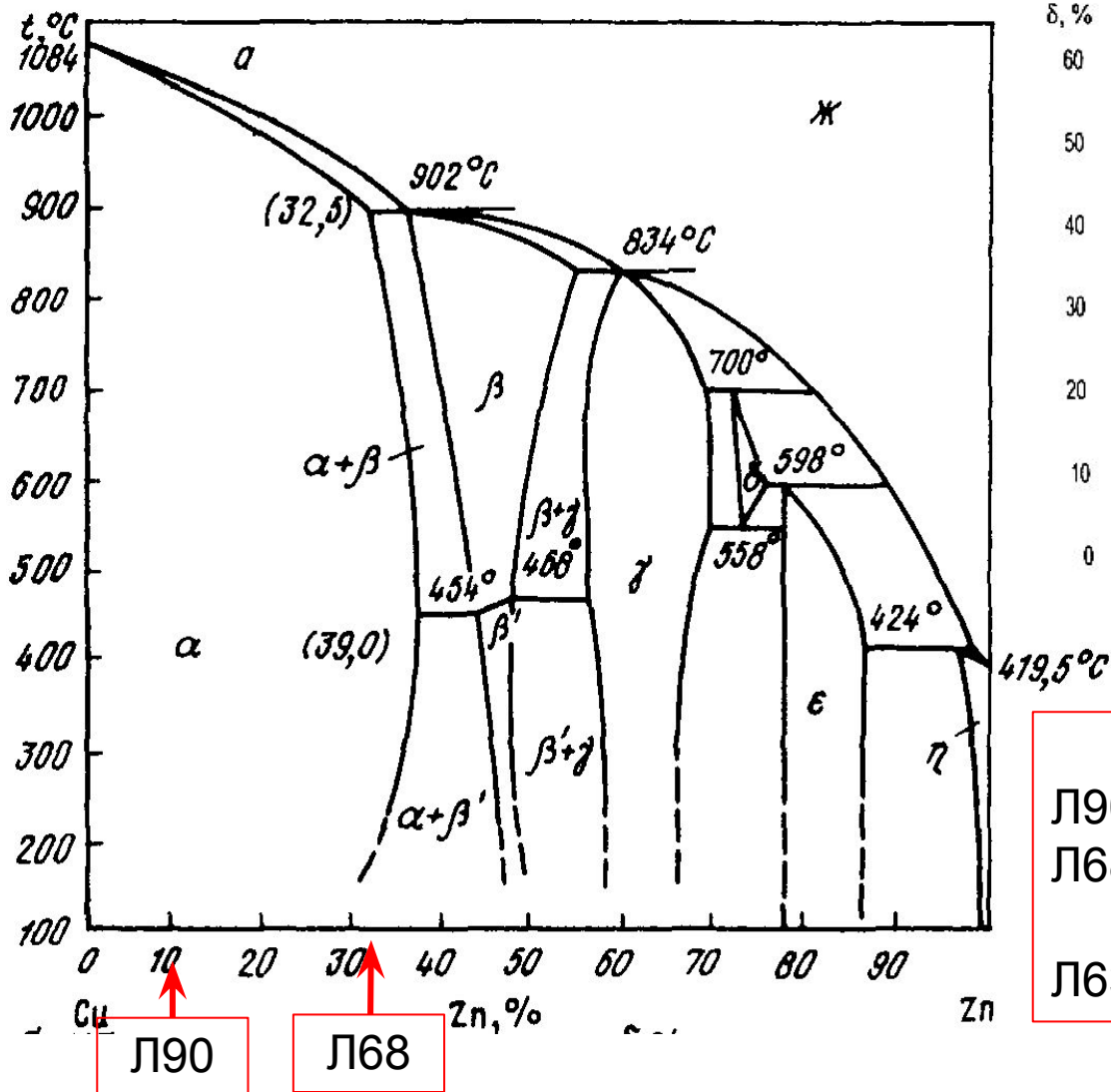
$\alpha + \gamma$   
(CuBe),  
 $\sigma_B = 550$   
МПа

$\alpha$   
 $\sigma_B = 500$  МПа,  
 $\delta = 30\%$

$\alpha + \gamma$ ,  
 $\sigma_B = 1200$  МПа,  
 $\delta = 4\%$

$\alpha + \gamma$ ,  
 $\sigma_B = 1400$  МПа,  
 $\delta = 2\%$

# Латуни



## $\alpha$ -латуни:

Л90 (томпак), % Zn = 10

Л68 (патронная латунь), % Zn = 32

## ( $\alpha+\beta$ )-латуни:

Л63 (торговая латунь), % Zn = 37

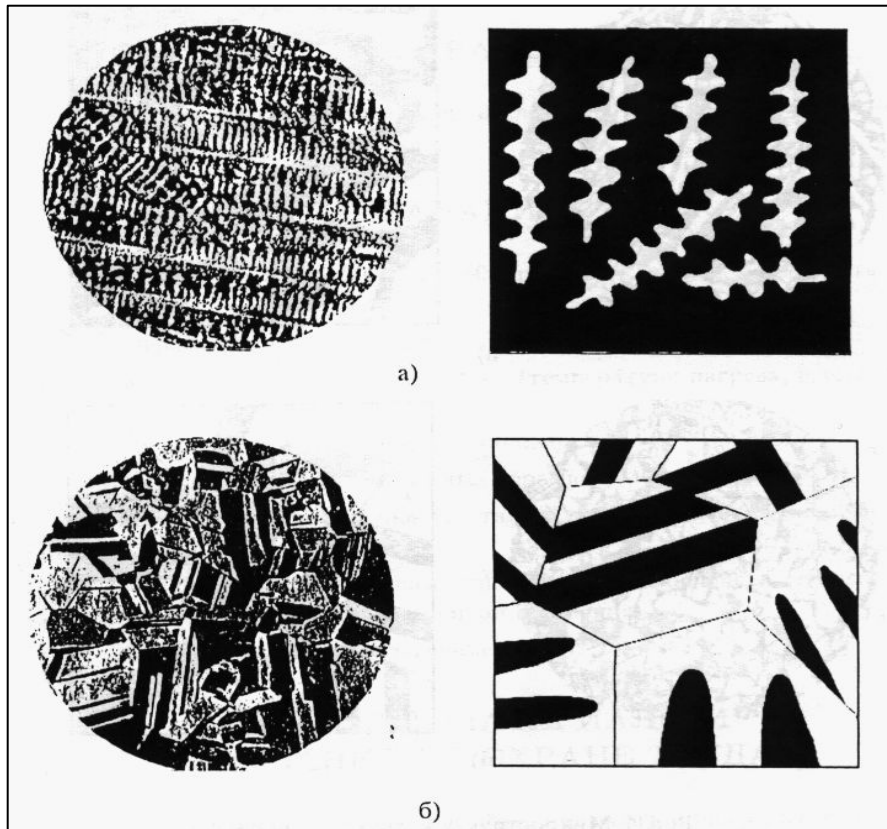
# Состав и свойства латуней

Марка	Ср. состав, %	Состояние и фазовый состав	$\sigma_{в'}$ , МПа	$\delta$ , %
Обрабатываемые давлением латуни				
Л90	90 Cu	Рекрист., $\alpha$	285	36
Л68	68 Cu	Рекрист., $\alpha$	340	42
Л63	63 Cu	Рекрист., $\alpha+\beta$	345	38
ЛС59-1	59 Cu, 1 Pb	Рекрист., $\alpha+\beta+Pb$	400	45
Литейные латуни				
ЛЦ40С	59 Cu, 0,8-2 Pb	Кокиль, $\alpha+\beta+Pb$	300	30
ЛЦ16К4	80 Cu, 4 Si	Кокиль, $\alpha+\beta$	380	15

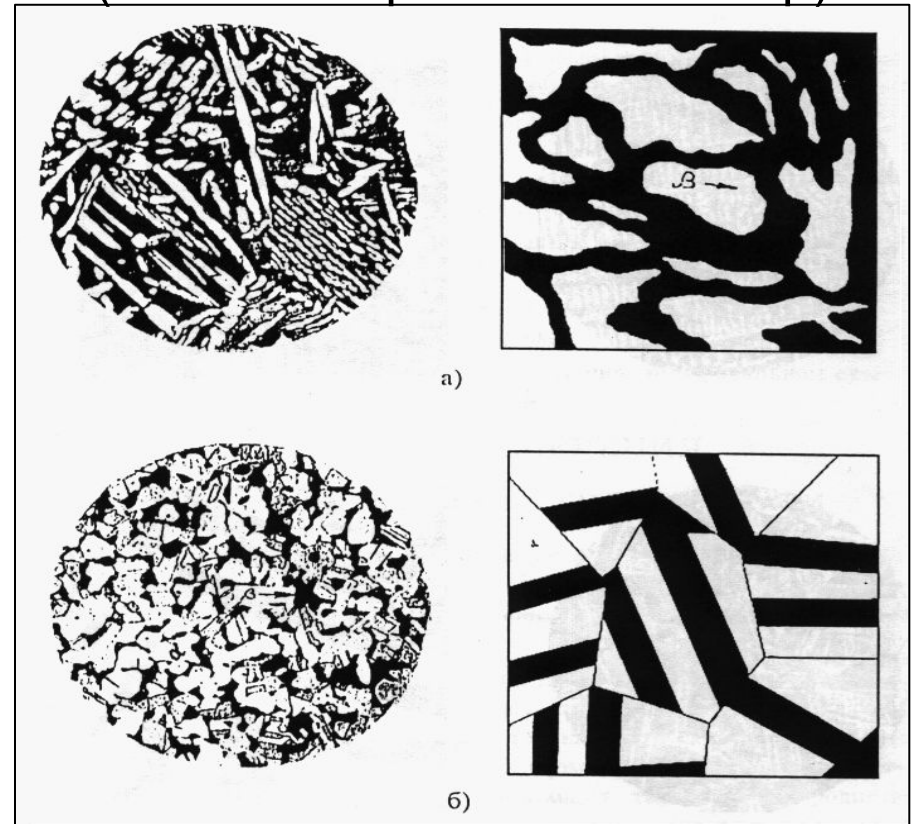


# Микроструктура латуней

Однофазной



Двухфазной  
(светлые зёрна  $\alpha$  и тёмные  $\beta$ )



а) литое состояние, б) после деформации и отжига



# Жаропрочные никелевые сплавы на основе Ni-Cr-Al-Ti (суперсплавы, НИМОНИКИ)

**Назначение:** детали газотурбинных двигателей (лопатки, диски и др.)

**Рабочие температуры:** 750-950 °C

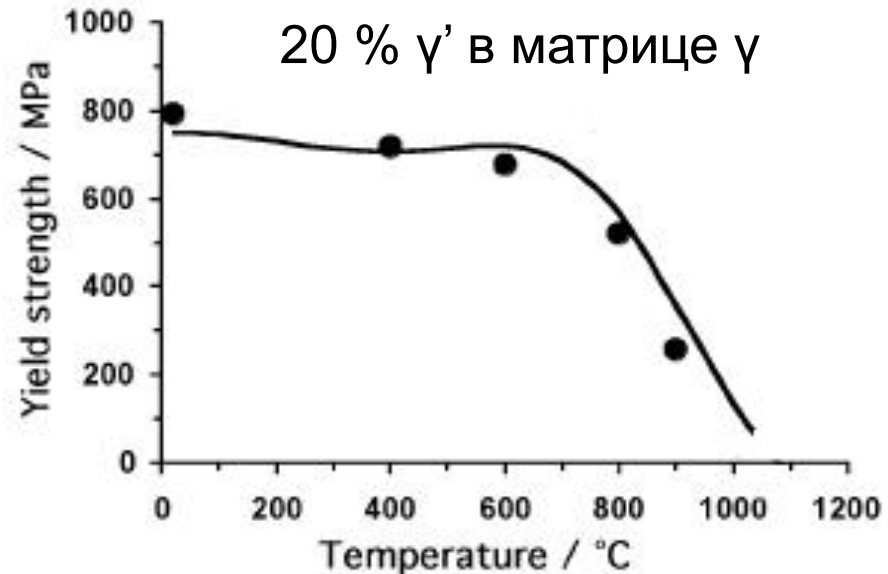
**Химический состав** классического нимоника: **Ni-20Cr-2Ti-1Al**

**Фазовый состав:**  $\gamma + \gamma'$

**Марки:** ХН77ТЮ, ХН70МВТЮБ, ХН55ВМТФКЮ и др.

**Термическая обработка:**

**закалка** с 1050...1150°C на воздухе +  
**старение** при 600...800°C.



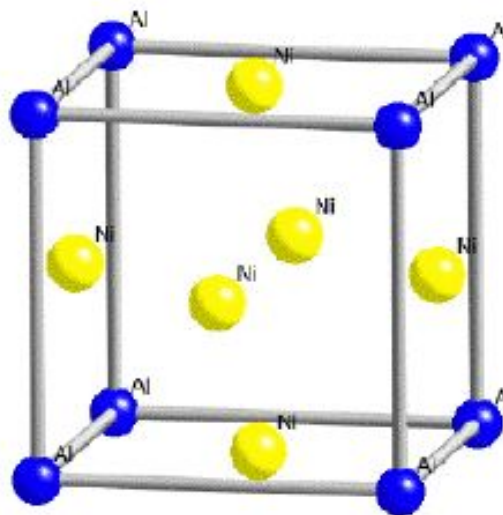
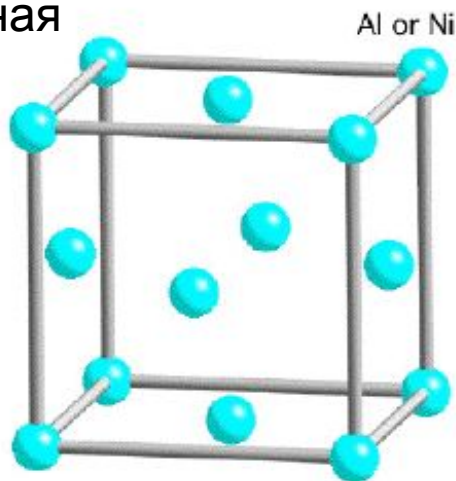
**Жаропрочность** – способность материала выдерживать механические нагрузки при высоких температурах без значительной деформации (оценивается сопротивлением ползучести) и без разрушения (оценивается длительной прочностью).

**Жаростойкость** – способность материала сопротивляться окислению при высоких температурах.

# Назначение легирующих элементов в суперсплавах

Легирующий элемент	Взаимодействие с Ni	Основное назначение
Cr	Образует твердый раствор $\gamma$	Повышение жаростойкости за счёт образования сплошной оксидной плёнки
Al	Образует фазу $\gamma'$ ( $\text{Ni}_3\text{Al}$ )	Повышение жаропрочности из-за формирования дисперсных выделений $\gamma'$ $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$ с той же решёткой, что и матрица $\gamma$
Ti	Образует фазу $\gamma'$ ( $\text{Ni}_3\text{Ti}$ )	

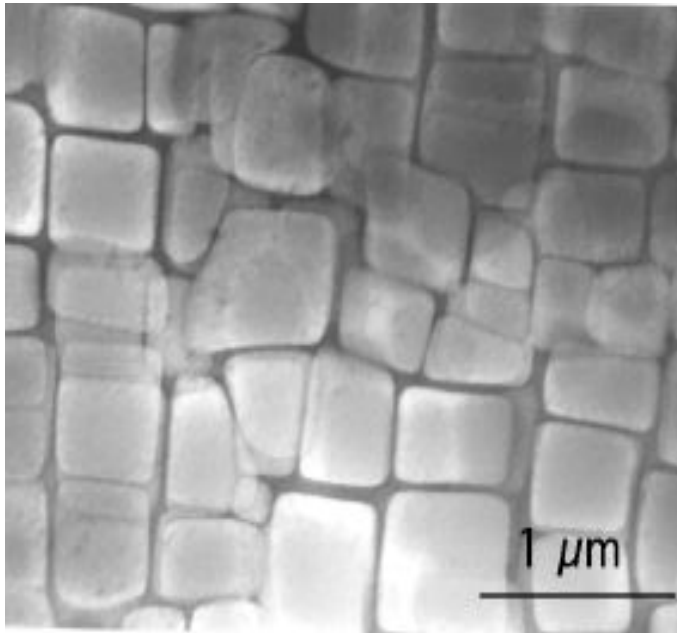
Неупорядоченная  $\gamma$ -фаза (ГЦК)



Упорядоченная на основе ГЦК-решётки  $\gamma'$ -фаза ( $\text{Ni}_3\text{Al}$ )

# Микроструктура суперсплавов

Кубоидальные частицы  $\gamma'$  в матрице  $\gamma$ .

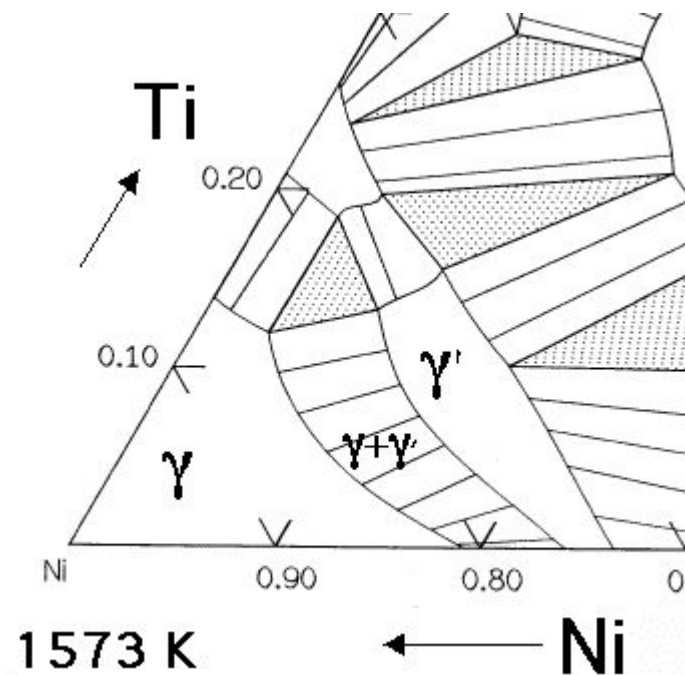
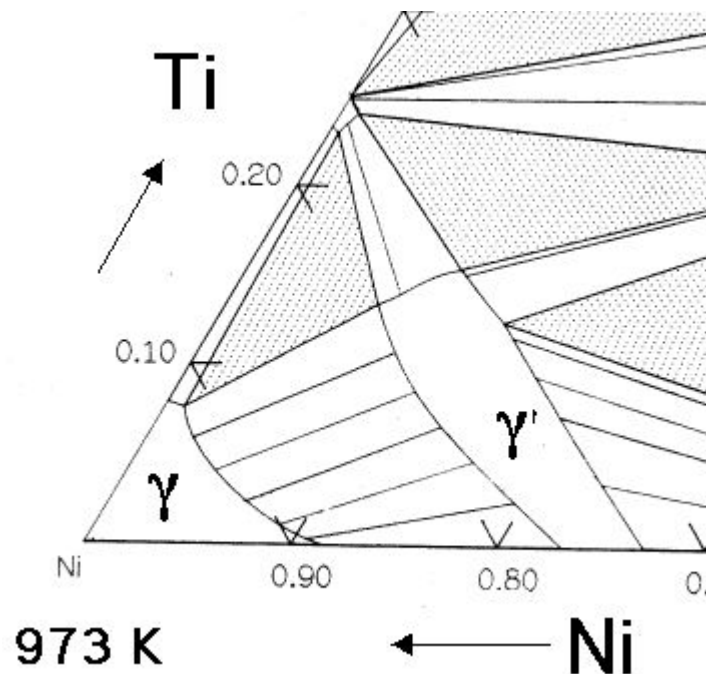


[www.msm.cam.ac.uk](http://www.msm.cam.ac.uk)

Границы между  $\gamma$  и  $\gamma'$  – когерентные.  
Низкая межфазная энергия на когерентной границе  $\gamma' / \gamma \rightarrow$

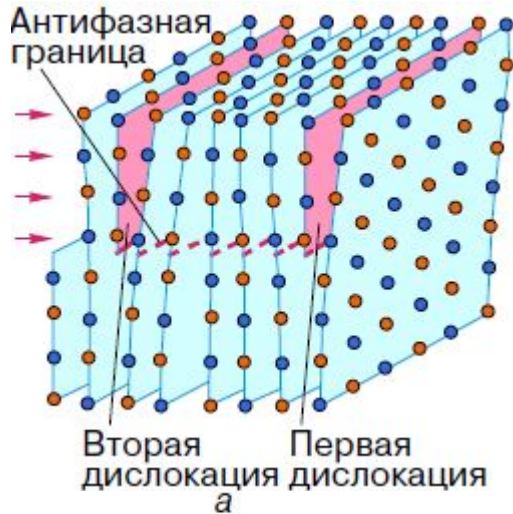
- 1) малый размер критического зародыша, низкая работа образования критического зародыша  $\rightarrow$  высокая скорость зарождения зародышей  $\gamma'$   $\rightarrow$  большая дисперсность  $\gamma'$ .
- 2) Низкая движущая сила коалесценции  $\rightarrow$  высокая устойчивость частиц  $\gamma'$  против укрупнения  $\rightarrow$  стабильность структуры и свойств  $\rightarrow$  высокие рабочие температуры и срок службы.

# Изотермические сечения диаграммы Ni-Cr-Ti



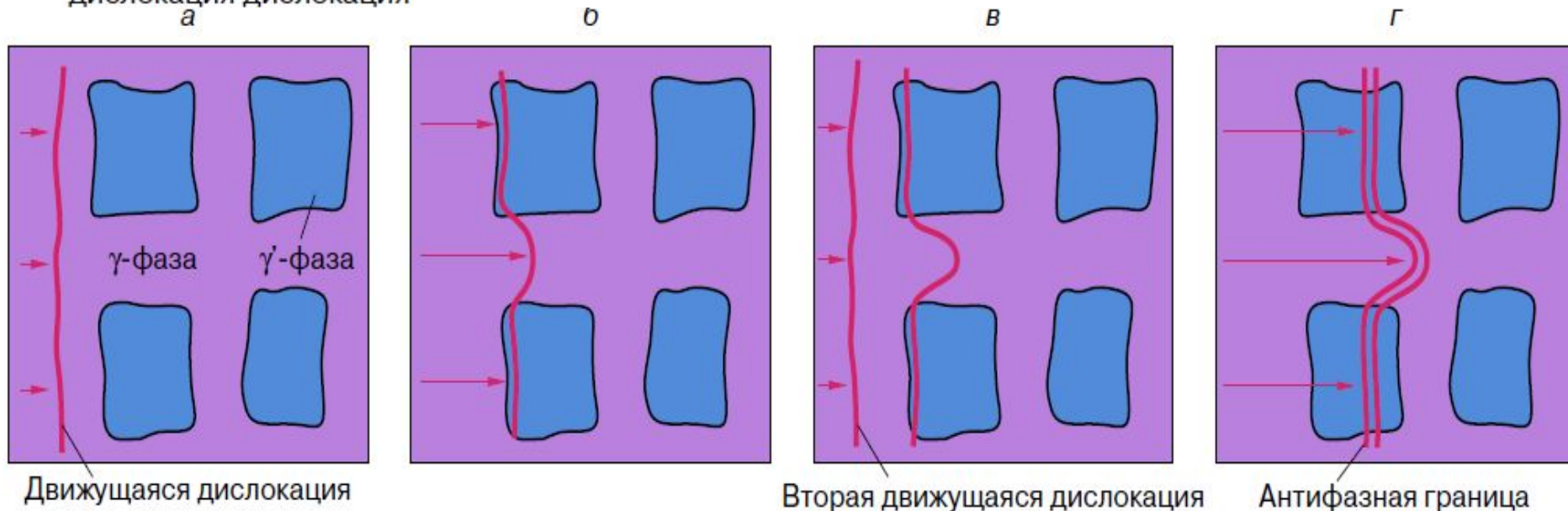
Сильная температурная зависимость растворимости  $\gamma'$  в  $\gamma$  – основа получения после закалки и старения большого количества упрочняющей фазы  $\gamma'$ .

# Природа упрочнения в суперсплавах

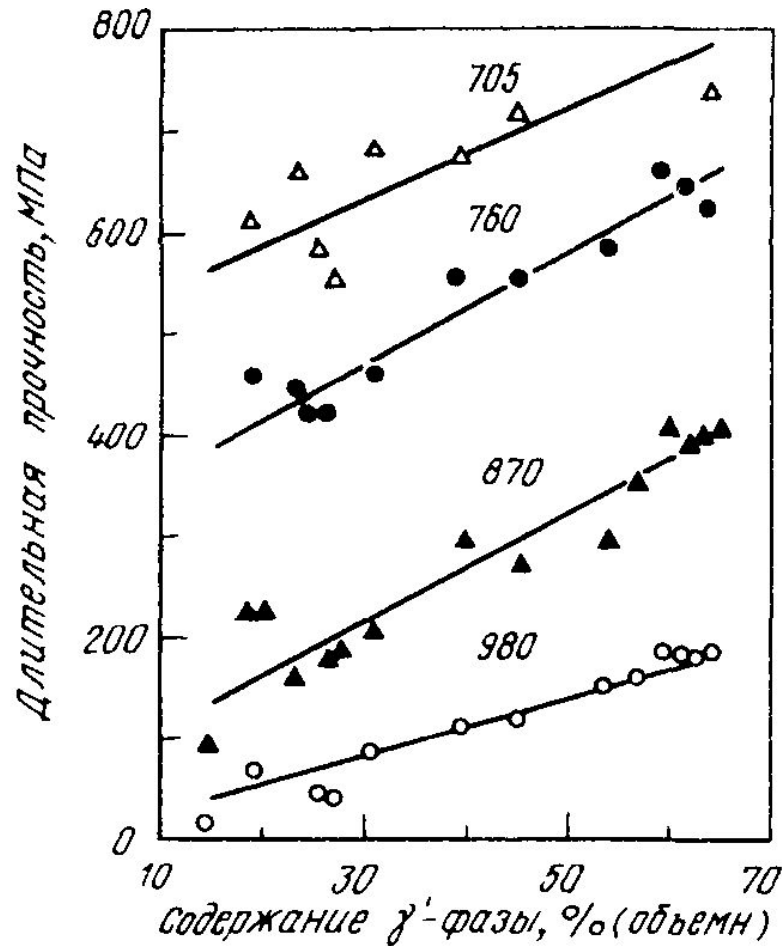


В упорядоченном кристалле одиночная дислокация нарушает атомный порядок, поэтому её скольжение чрезвычайно затруднено. Вторая дислокация порядок восстанавливает. Поэтому скольжение дислокаций в упорядоченном кристалле осуществляется парами. Однако при этом между дислокациями возникает антифазная граница (АФГ).

**Основной механизм упрочнения – образование и увеличение протяжённости АФГ при перерезании частиц  $\gamma'$  дислокациями.**



# Влияние объёмной доли выделений на длительную прочность



Цифры над линиями — температура испытаний в °C.