

# МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ

Габелая Давид Ивлэриевич  
к.т.н., доцент кафедры металлургии,  
машиностроения и технологического  
оборудования, ЧГУ

# МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ

— наука, изучающая строение и свойства металлов и их сплавов, устанавливающая связь между их составом, строением и свойствами и разрабатывающая пути воздействия на их свойства.

# МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ

— наука, которая, базируясь на основных положениях физики твердого тела, физической химии и электрохимии, исследует и направленно использует взаимосвязь структуры и свойств для улучшения свойств применяемых металлов и их сплавов или для создания новых материалов с заданными свойствами.

**Главное** – научно обоснованное предсказание поведения применяемых в технике материалов.



# МЕТАЛЛЫ

(от лат. *metallum* — шахта, рудник) — группа элементов, в виде простых веществ, обладающих характерными **металлическими свойствами**:

- высокие тепло- и электропроводность;
- положительный температурный коэффициент сопротивления;
- высокая пластичность (ковкость);
- металлический блеск.

# КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТАЛЛОВ

3 Li Литий	4 Be Бериллий																
11 Na Натрий	12 Mg Магний	13 Al Алюминий															
19 K Калий	20 Ca Кальций	21 Sc Скандий	22 Ti Титан	23 V Ванадий	24 Cr Хром	25 Mn Марганец	26 Fe Железо	27 Co Кобальт	28 Ni Никель	29 Cu Медь	30 Zn Цинк	31 Ga Галлий	32 Ge Германий	33 As Мышьяк			
37 Rb Рубидий	38 Sr Стронций	39 Y Итрий	40 Zr Цирконий	41 Nb Ниобий	42 Mo Молибден	43 Tc Технеций	44 Ru Рутений	45 Rh Родий	46 Pd Палладий	47 Ag Серебро	48 Cd Кадмий	49 In Индий	50 Sn Олово	51 Sb Сурьма			
55 Cs Цезий	56 Ba Барий	57-71 Лантаноиды	72 Hf Гафний	73 Ta Тантал	74 W Вольфрам	75 Re Рений	76 Os Осмий	77 Ir Иридий	78 Pt Платина	79 Au Золото	80 Hg Ртуть	81 Tl Таллий	82 Pb Свинец	83 Bi Висмут			
87 Fr Франций	88 Ra Радий	89-103 Актиноиды															

Щелочно-земельные

Редкоземельные

Тугоплавкие

Благородные

Легкие металлы

Урановые

Железные

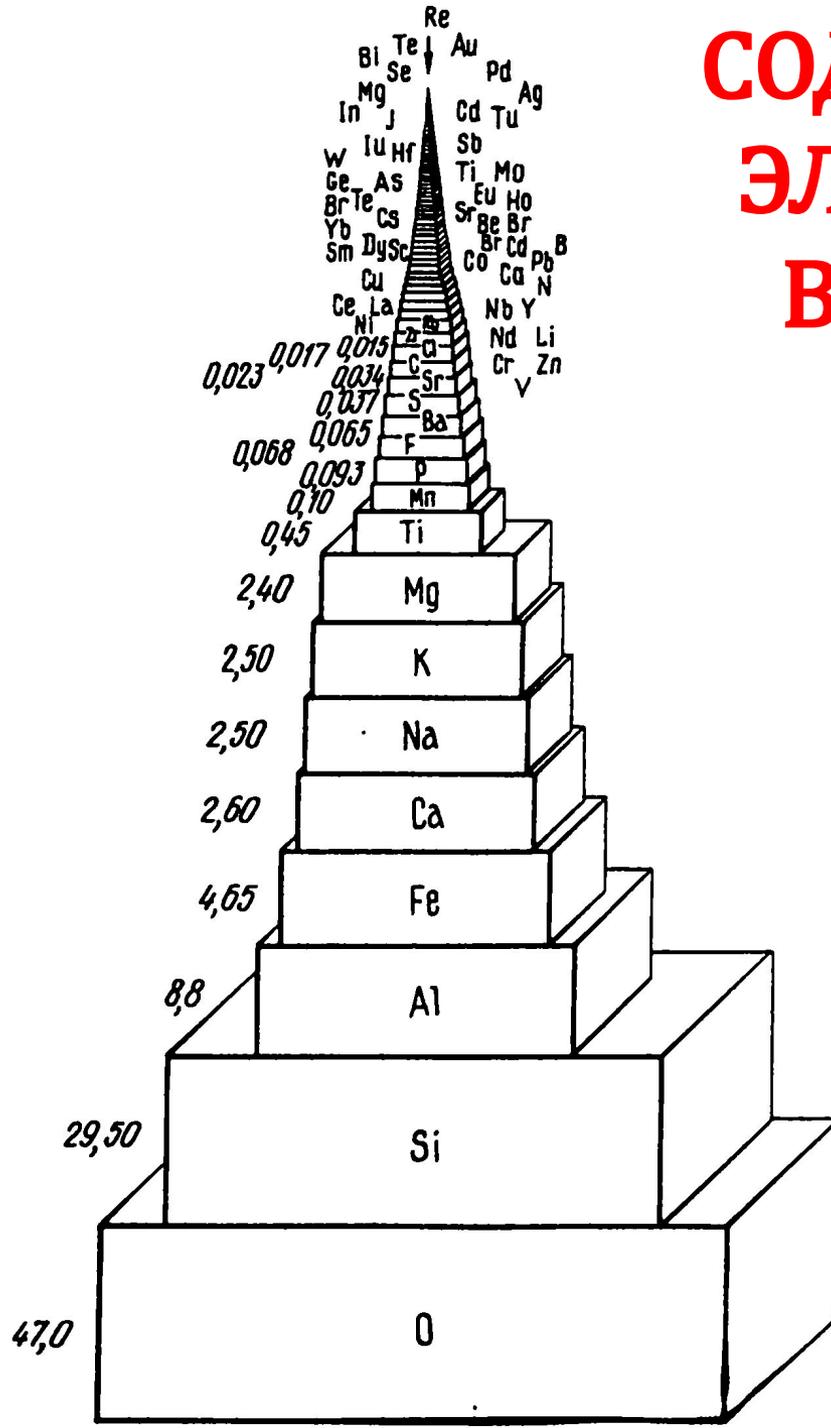
Легкоплавкие

# КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТАЛЛОВ

Из 118 химических элементов, открытых на данный момент к металлам относят 94 элемента:

- Щелочные (6): Li, Na, K, Rb, Cs, Fr
- Щёлочноземельные (4): Ca, Sr, Ba, Ra
- Переходные (40): Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn...
- Лёгкие (7): Al, Ga, In, Sn, Tl, Pb, Bi
- Полуметаллы (7): B, Si, Ge, As, Sb, Te, Po
- Лантаноиды (14): La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu...
- Актиноиды (14): Ac, Th, U..
- Вне определённых групп (2): Be и Mg

# СОДЕРЖАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ В ЗЕМНОЙ КОРЕ, %



# СОДЕРЖАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ В ЗЕМНОЙ КОРЕ, %



# ЧЕРНЫЕ МЕТАЛЛЫ

- **железо** (Fe) и сплавы на его основе (стали, ферросплавы, чугуны);
- марганец (Mn), хром (Cr).

## Характерные свойства:

- темно-серый цвет;
- большая плотность;
- высокая температура плавления;
- термоэлектронная эмиссия, (способность к испусканию электронов при нагреве);
- полиморфизм (аллотропия).

# ЦВЕТНЫЕ МЕТАЛЛЫ

## Характерные свойства:

- определенная окраска;
- высокая пластичность;
- малая твердость;
- относительно низкая температура плавления;
- отсутствие полиморфизма.

Наиболее типичный представитель этой группы – медь (Cu).

# ЦВЕТНЫЕ МЕТАЛЛЫ. КЛАССИФИКАЦИЯ

- легкие металлы (Mg, Be, Al, Ti), обладающие малой плотностью;
- легкоплавкие металлы (Zn, Sn, Pb) с температурой плавления соответственно 419,5; 232; 327 °C;
- тугоплавкие металлы (W, Mo, Nb, Ta) с температурой плавления выше, чем у железа (1539 °C);
- благородные металлы (Ag, Au, Pt) с высокой устойчивостью против коррозии;

# НЕКОТОРЫЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ

	Fe	Cu	Al	Si	Na	Ti	Au	W	Ag	Hg	Ir
Тпл, °С	1538	1085	660	1414	98	1668	1064	3422	962	-38,8	2466
Ткип, °С	2860	2927	2520	2900	883	3287	2856	5555	2162	357	4428
$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	7870	8920	2700	2330	968	4500	19300	19250	10500	13534	22650
$\lambda$ , Вт/(м·К)	80	400	235	150	140	22	320	165	430	8,3	150
НВ, МПа	490	874	245		0,69	716	2450	488	24,5		1670

\*min max

# СТОИМОСТЬ МЕТАЛЛОВ

Me	Относи- тельная СТОИМОСТЬ
<b>Fe</b>	<b>1</b>
Pb	2,5
Zn	3
Al	6
Sb	6,5
Cu	7,5
Mg	8
Mn	10
Ni	17
Sn	22
Cr	25
Co	35
Bi	50
Hg	65

Me	Относи- тельная СТОИМОСТЬ
Ti	90
W	120
Mo	170
Ag	500
V	750
Nb	800
Ta	1500
Rb	2200
Pd	5000
Au	11000
Ir	25000
Os	25000
Pt	27000
Rh	45000

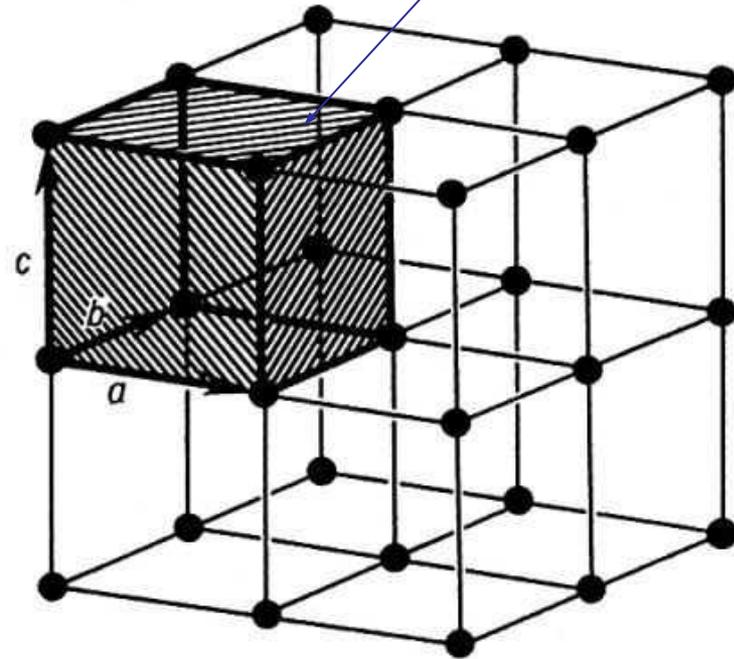
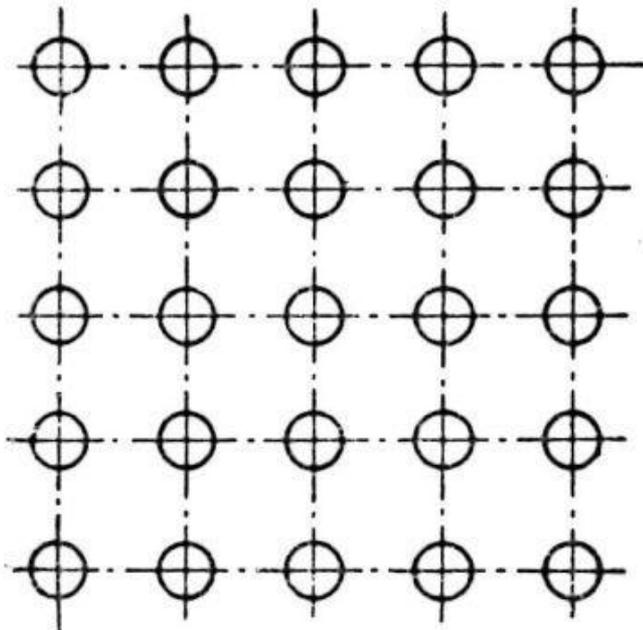
# КРИСТАЛЛИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ МЕТАЛЛОВ

Характеризуется определенным закономерным расположением атомов в пространстве.

Для описания атомно-кристаллической структуры используют понятие **кристаллической решетки**, являющейся воображаемой пространственной сеткой с ионами (атомами) в узлах.

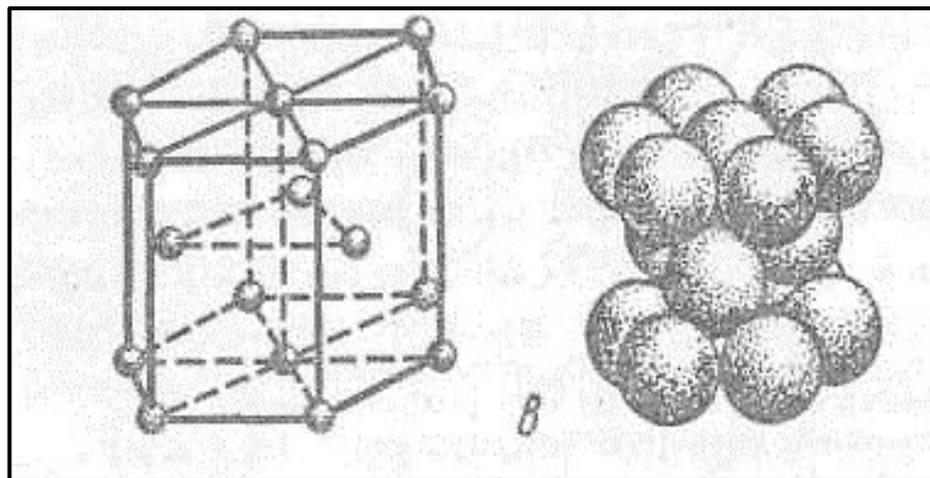
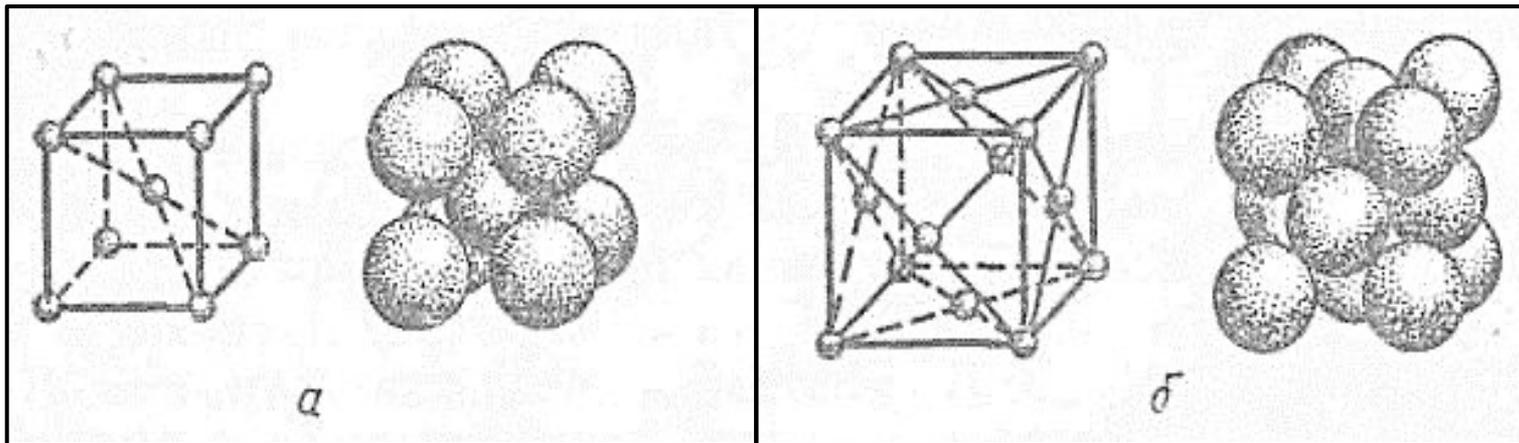
# КРИСТАЛЛИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ МЕТАЛЛОВ

Элементарная ячейка кристаллической решетки – наименьший комплекс атомов, который при многократном повторении позволяет воспроизвести пространственную кристаллическую решетку.

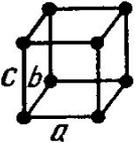
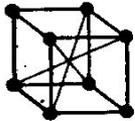
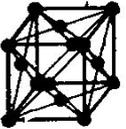
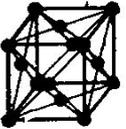
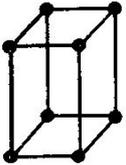
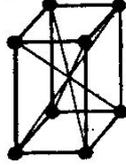
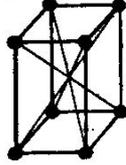
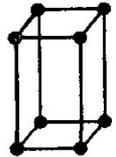
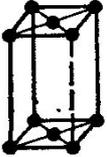
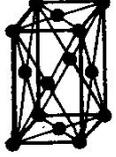
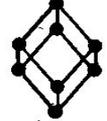
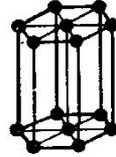
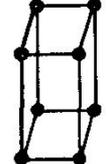
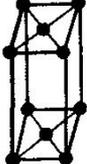
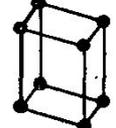


$a, b, c$  – периоды решетки (для решетки Fe  $a=b=c=2,866 \text{ \AA}$ )

# ТИПЫ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ЯЧЕЕК



- а – объемноцентрированная кубическая (ОЦК);  
б – гранецентрированная кубическая (ГЦК);  
в – гексагональная плотноупакованная (ГП)

Кристаллическая система	Постоянные решетки	Углы	Типы элементарных кристаллических ячеек			
			простая	с центро- ваинным базисом	о. ц. к.	г. ц. к.
Кубическая	$a=b=c$	$\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$				
Тетрагональная	$a=b \neq c$	$\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$				
Ромбическая, орторомбическая	$a \neq b \neq c$	$\alpha=\beta=\gamma \neq 90^\circ$				
Ромбоэдрическая, тригональная	$a=b=c$	$\alpha=\beta=\gamma \neq 90^\circ$				
Гексагональная	$a_1=a_2 \neq a_3 \neq c$	$\alpha_1=\alpha_2=\alpha_3=90^\circ; \gamma=120^\circ$				
Моноклинная	$a \neq b \neq c$	$\alpha \neq 90^\circ; \beta=\gamma=90^\circ$				
Триклинная	$a \neq b \neq c$	$\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$				

# ПАРАМЕТРЫ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ЯЧЕЕК

**Координационное число** – число атомов, находящихся на наиболее близком равном расстоянии от данного атома.

**Коэффициент компактности** – отношение суммарного объёма атомов, входящих в решетку, к объёму решетки.

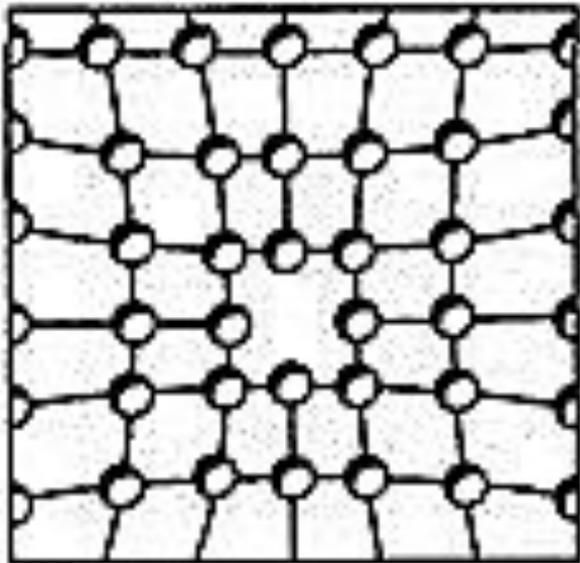
Тип решетки	Координационное число	Коэффициент компактности, %	Металлы
ОЦК	8	68	Na, K, V, Nb, Cr, Mo, W
ГЦК	12	74	Cu, Ag, Au, Pt, Al, Pb, Ni
ГП	12	74	Be, Mg, Zn, Cd

# РЕАЛЬНОЕ СТРОЕНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КРИСТАЛЛОВ

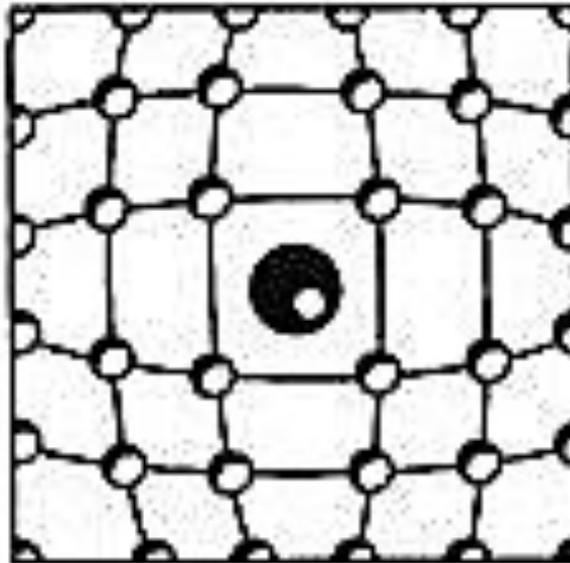
- Строение металлов является **поликристаллическим**.
- Кристаллы неправильной формы в металле называют **зёрнами**. Ориентация кристаллической решетки в зерне случайна.
- При холодной обработке давлением возникает **текстура** – преимущественная ориентировка зерен.

# ТОЧЕЧНЫЕ ДЕФЕКТЫ КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ

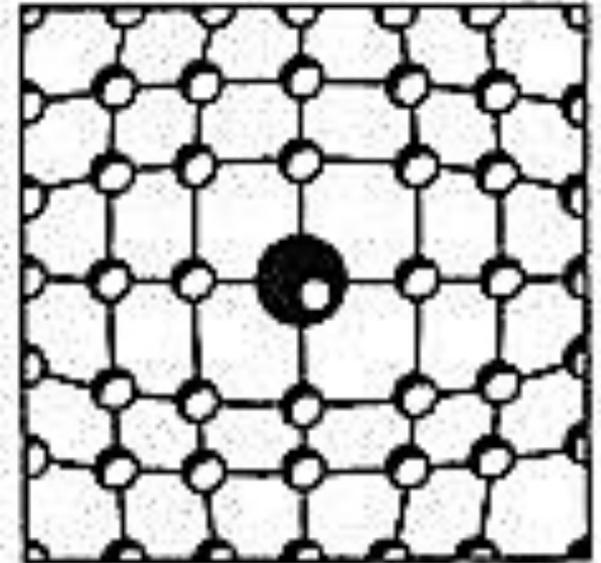
вакансия



внедренный атом

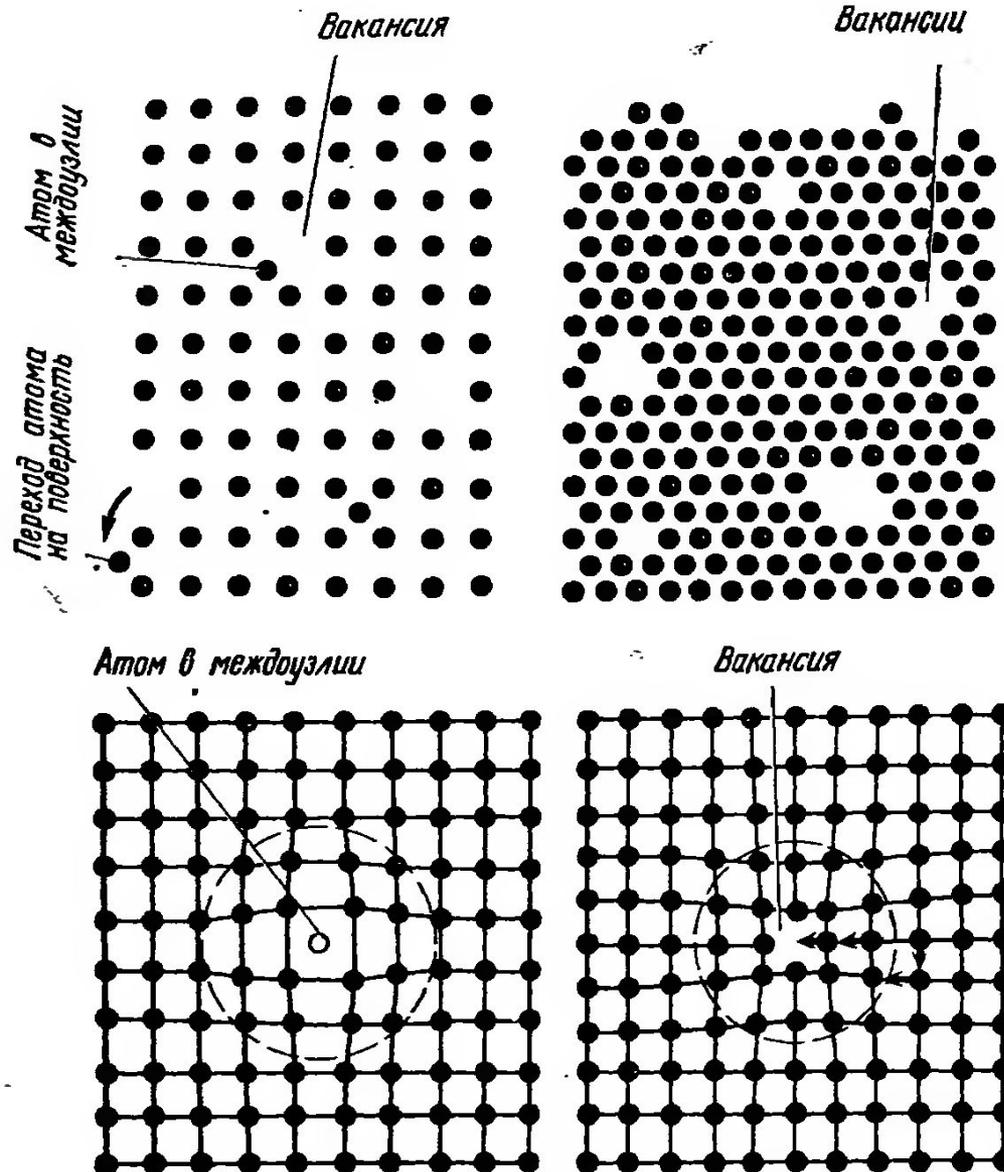


замещенный атом



дислоцированные атомы

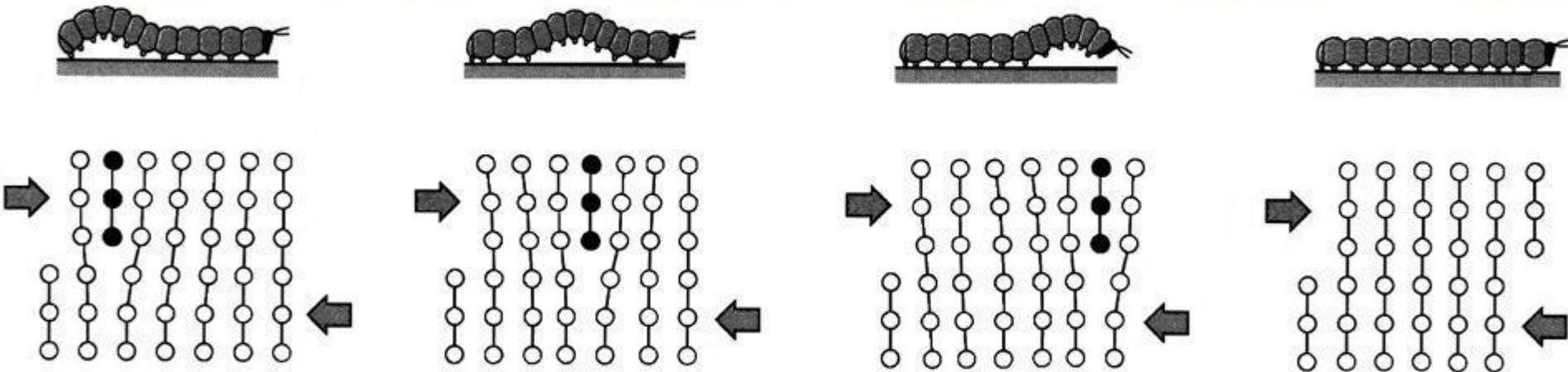
# ТОЧЕЧНЫЕ ДЕФЕКТЫ КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ





# СХЕМА ДВИЖЕНИЯ ДИСЛОКАЦИЙ

Скольжение дислокации подобно перемещению гусеницы в пространстве.



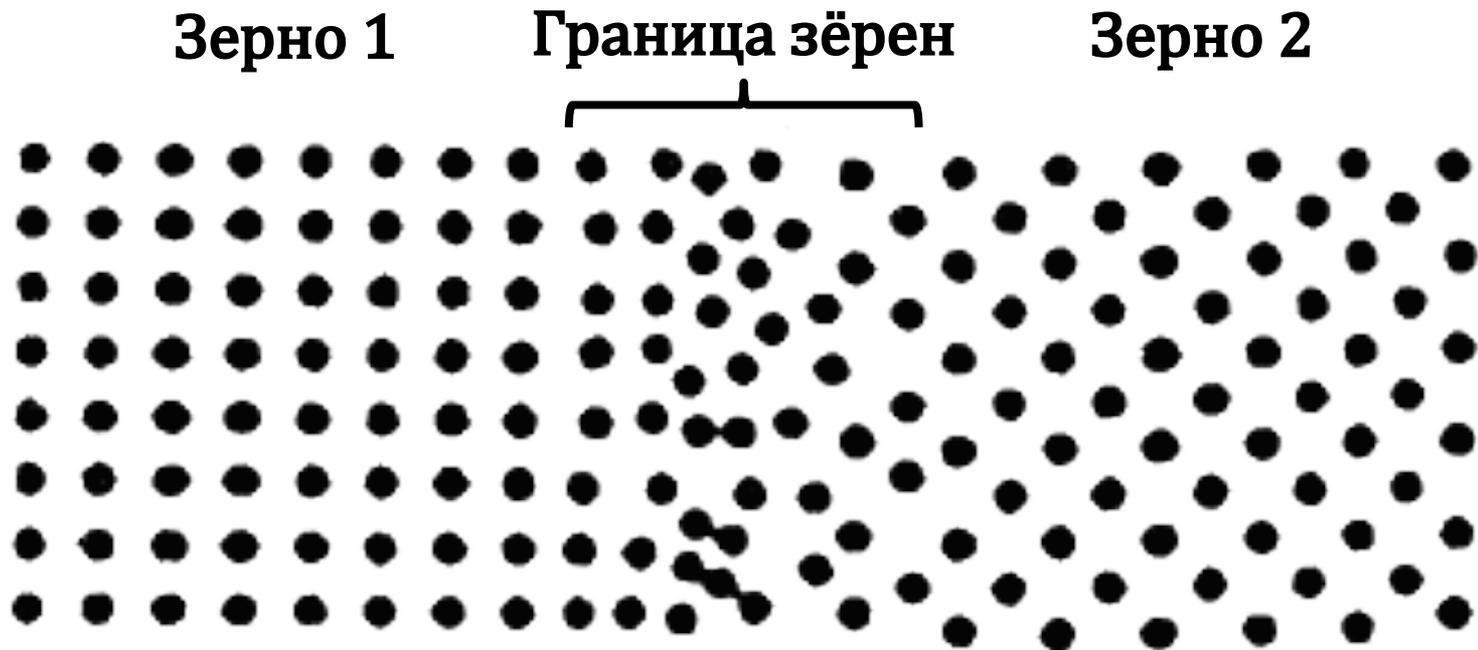
Приподнятые над землей лапки – дефект.

Дислокация (недостроенная атомная плоскость) – дефект.

Движение дефекта приводит к перемещению всей гусеницы (верхней части кристалла).

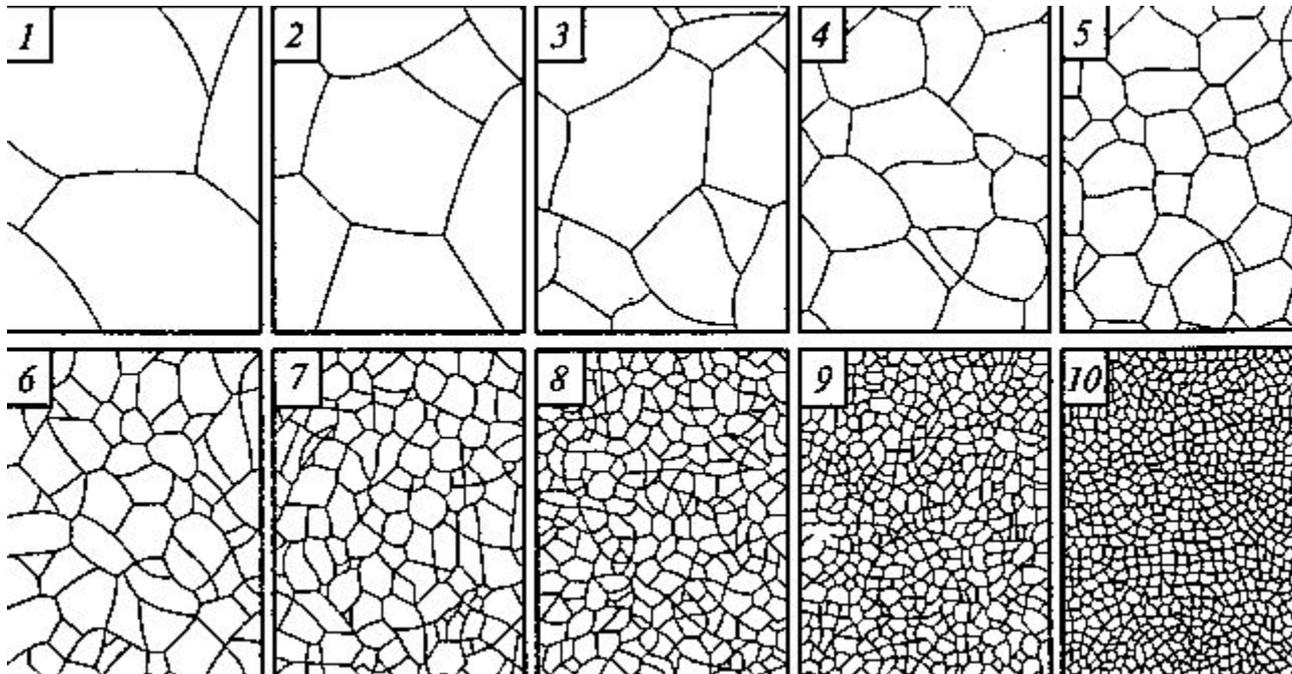
# ПОВЕРХНОСТНЫЕ ДЕФЕКТЫ КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ

Обычно это места стыка двух ориентированных участков кристаллической решетки. Ими могут быть границы зерен, границы фрагментов внутри зерна, границы блоков внутри фрагментов.



# РАЗМЕР ЗЕРНА

- Под **размером зерна** принято понимать величину его среднего диаметра, выявляемого в поперечном сечении.
- Это определение условно, так как действительная форма зерна в металлах меняется в широких пределах — от нескольких микрометров до миллиметров.
- Оценивается в **баллах** по специальной стандартизованной шкале и характеризуется числом зерен, приходящихся на  $1 \text{ мм}^2$  поверхности шлифа при увеличении в 100 (200) раз.



# ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА ЗЕРНА НА СВОЙСТВА

Процесс пластического течения, а, следовательно, и **предел текучести** зависят от длины свободного пробега дислокаций до «непрозрачного» барьера, т. е. до границ зерен металла.

Предел текучести  $\sigma_T$  связан с размером зерна  $d$  уравнением Холла—Петча:

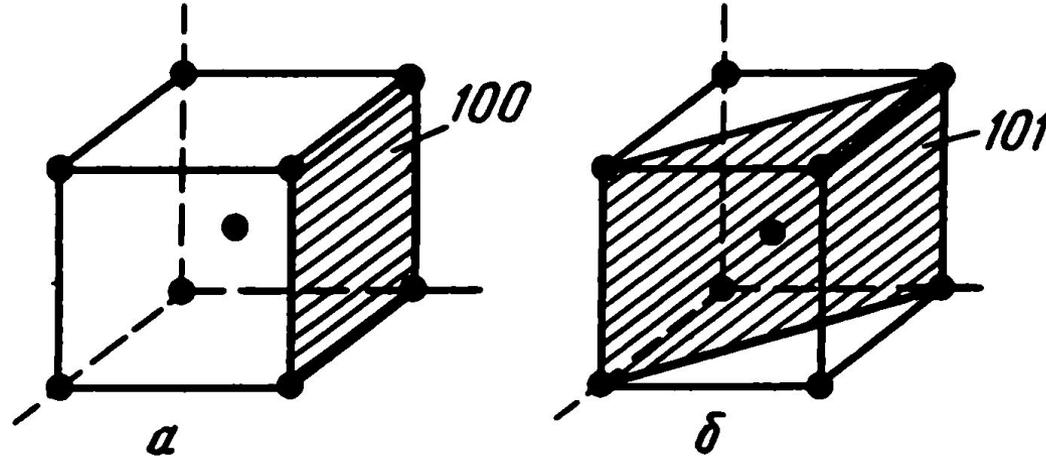
$$\sigma_T = \sigma_0 + k \cdot d^{-1/2},$$

где  $\sigma_0$  и  $k$  — постоянные для данного металла.

- Чем мельче зерно, тем выше предел текучести и прочность металла.
- Одновременно при измельчении зерна увеличиваются пластичность и вязкость металла.
- Повышенные пластичность и вязкость обусловлены более однородным составом и строением мелкозернистого металла, отсутствием в нем крупных скоплений, структурных несовершенств, способствующих образованию трещин.

# АНИЗОТРОПИЯ СВОЙСТВ

**Анизотроп́ия** (от др.-греч. ἄνισος — неравный и τρόπος — направление) — различие свойств среды (например, физических: упругости, теплопроводности и др.) в различных направлениях внутри этой среды; в противоположность **изотропии**.



Все кристаллы анизотропны.

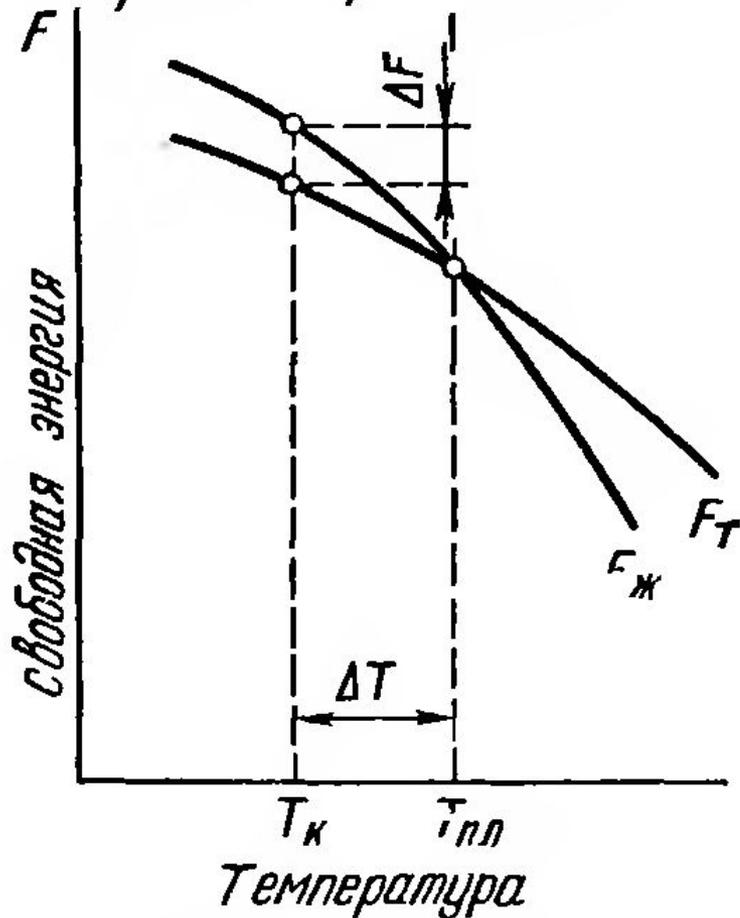
Поликристаллическим телам присуща кажущейся изотропностью свойств – **квазиизотропность**.

# КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ МЕТАЛЛОВ

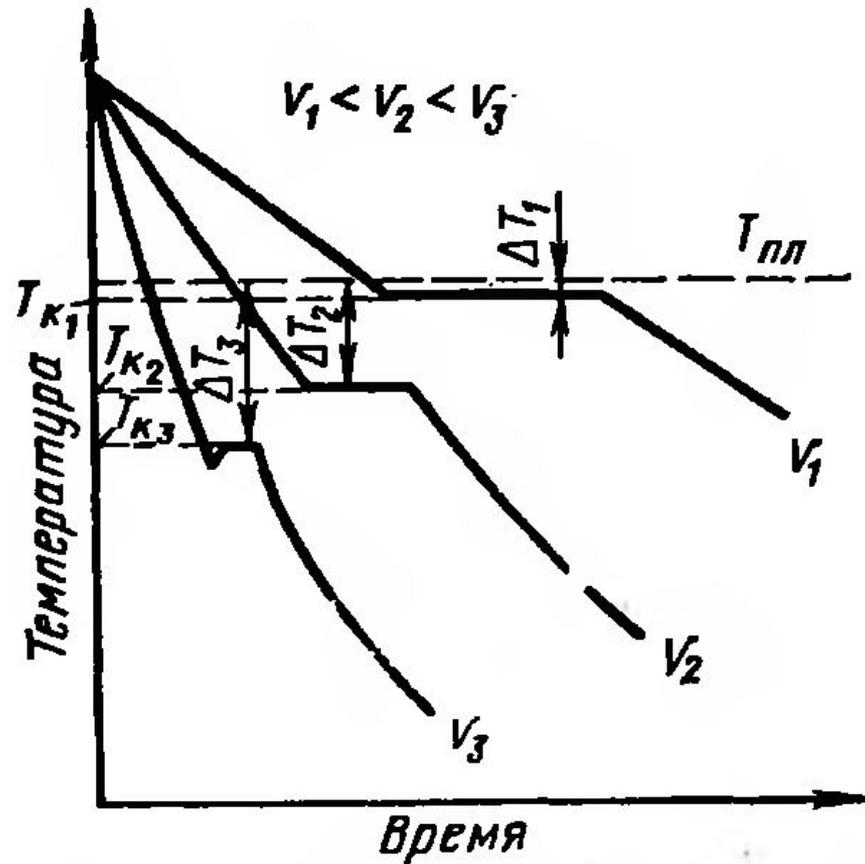
Влияние температуры на изменение свободной энергии жидкого и твердого

металла

Кристаллизация | Плавление

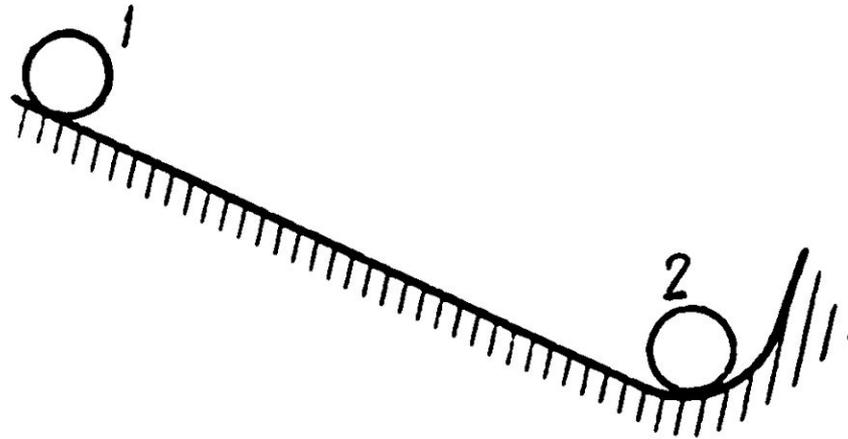


Температурные кривые кристаллизации металла с различными скоростями охлаждения



# УСЛОВИЕ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ МЕТАЛЛОВ

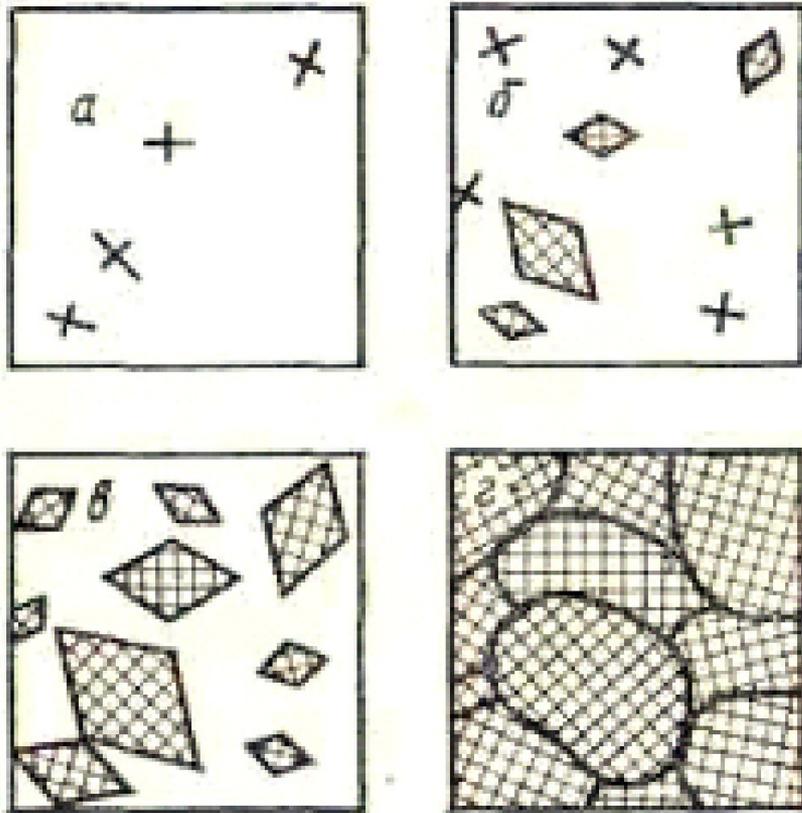
В природе все самопроизвольно протекающие превращения, в том числе, кристаллизация и плавление, обусловлены тем, что новое состояние в новых условиях является **энергетически более устойчивым**, обладает меньшим запасом энергии.



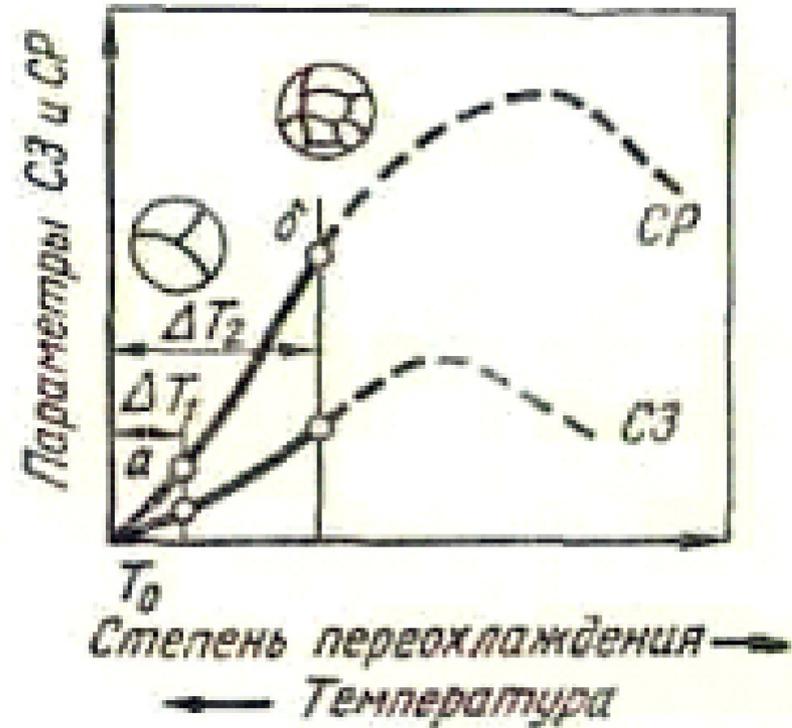
$$E_{п2} < E_{п1}$$

# КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ МЕТАЛЛОВ

Схема кристаллизации  
металла



Влияние степени переохлаждения  
на скорость зарождения и роста  
кристаллов



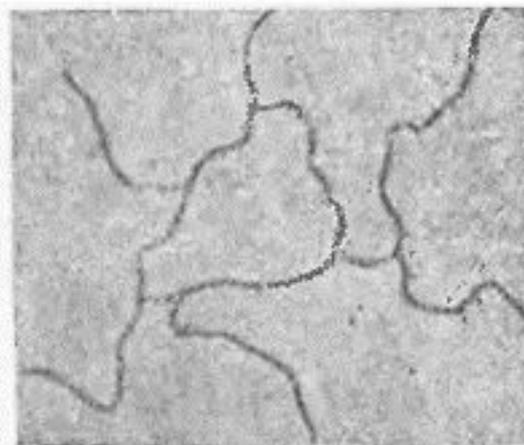
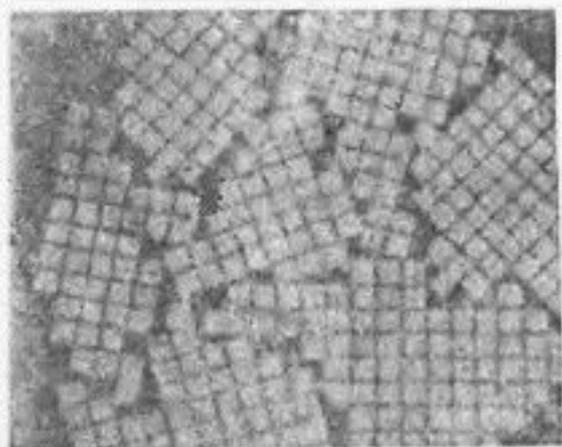
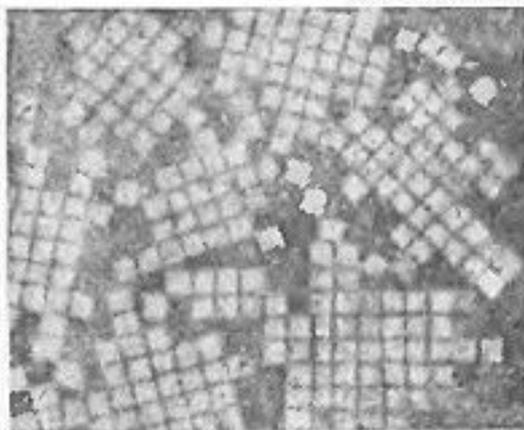
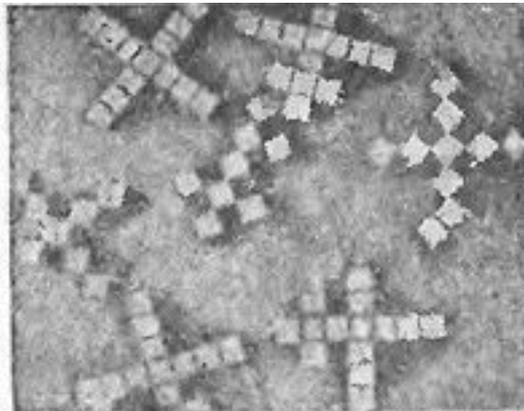
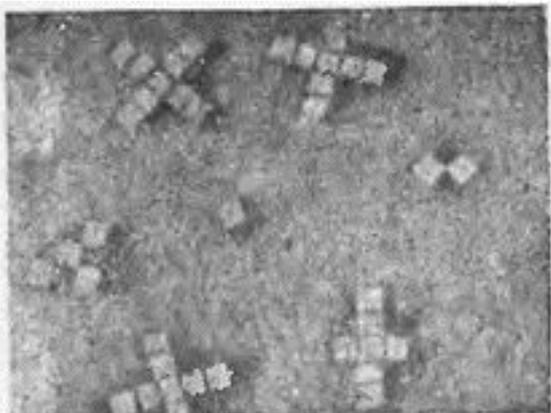
# КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ МЕТАЛЛОВ

Изменение свободной энергии  $\Delta F$  металла при образовании зародышей кристаллов в зависимости от их размера  $R_k$  и степени переохлаждения  $\Delta T$



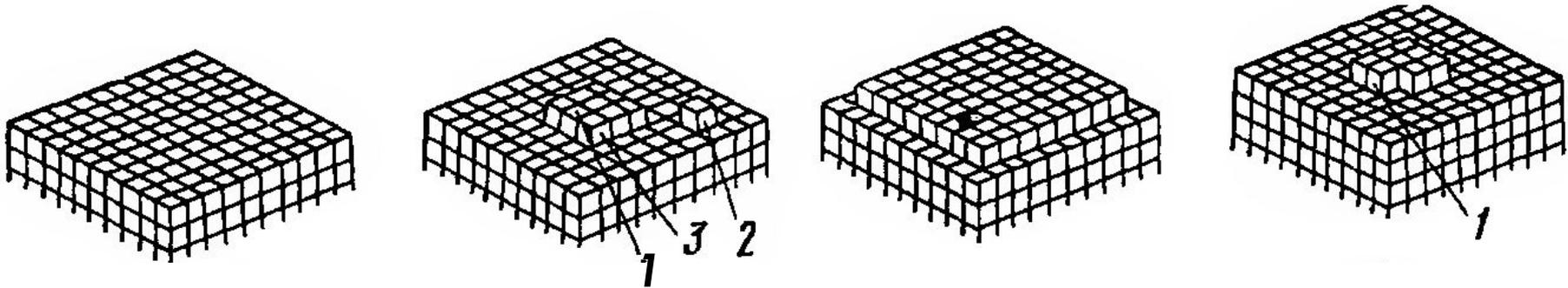
$R_k$  – критический размер зародыша – минимальный размер способного к росту зародыша при данных температурных условиях

# СХЕМА КРИСТАЛ- ЛИЗАЦИИ (Rosenhain)

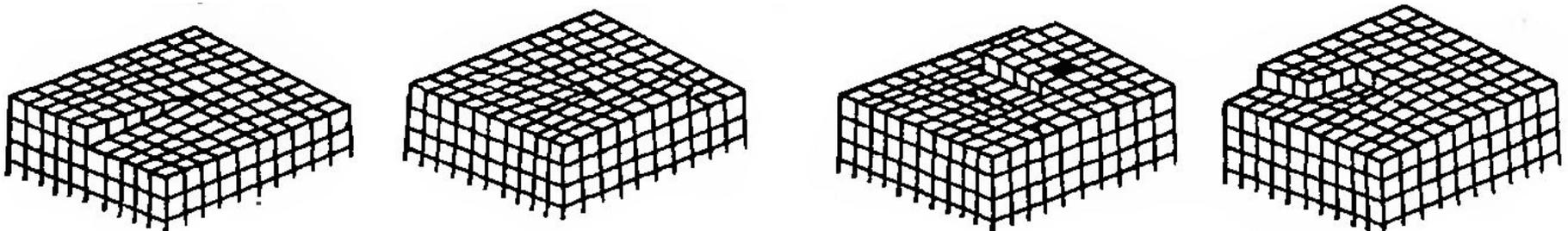


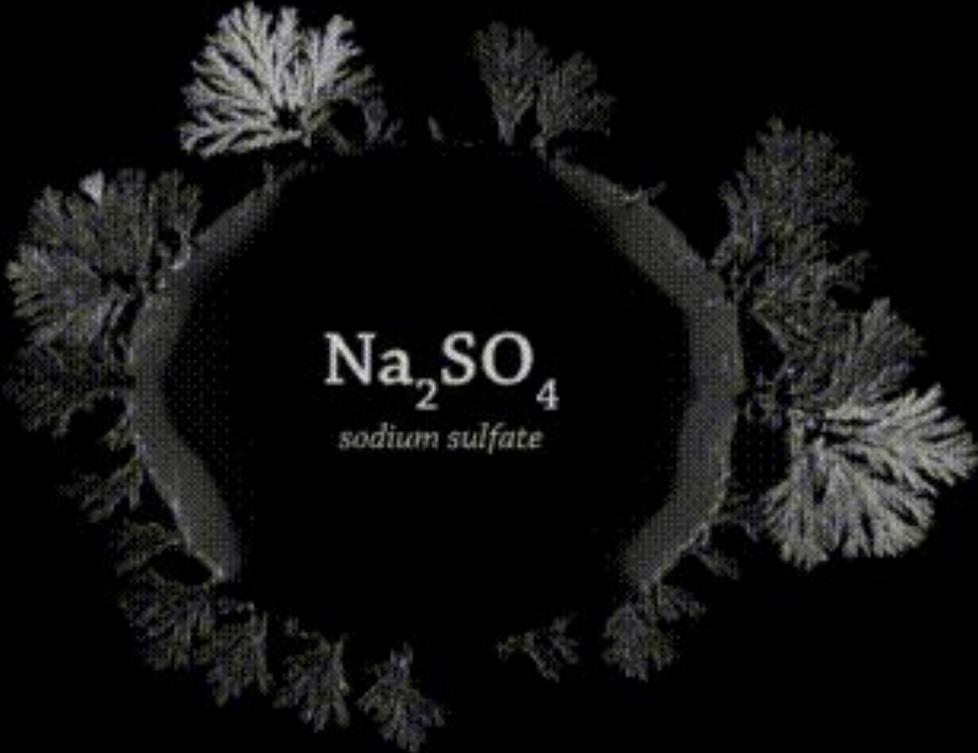
# СХЕМА РОСТА КРИСТАЛЛОВ

С образованием двумерного зародыша

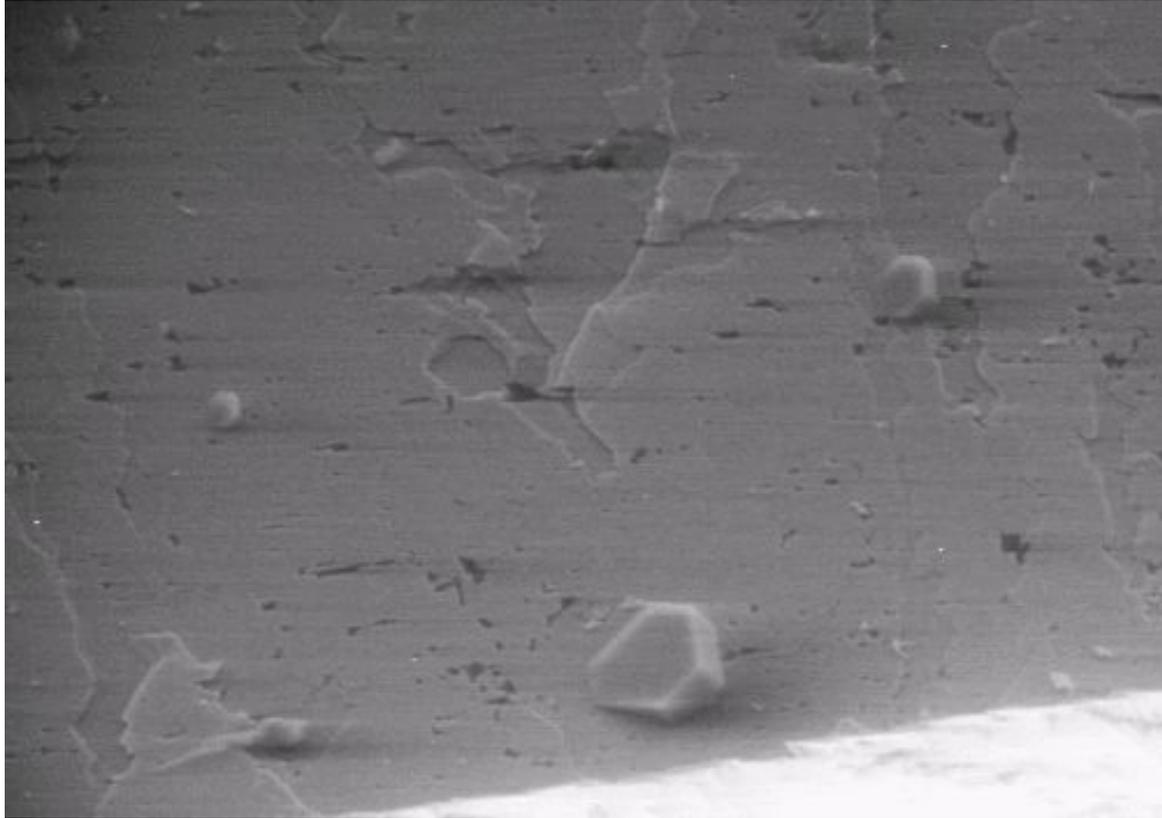


При наличии винтовой дислокации

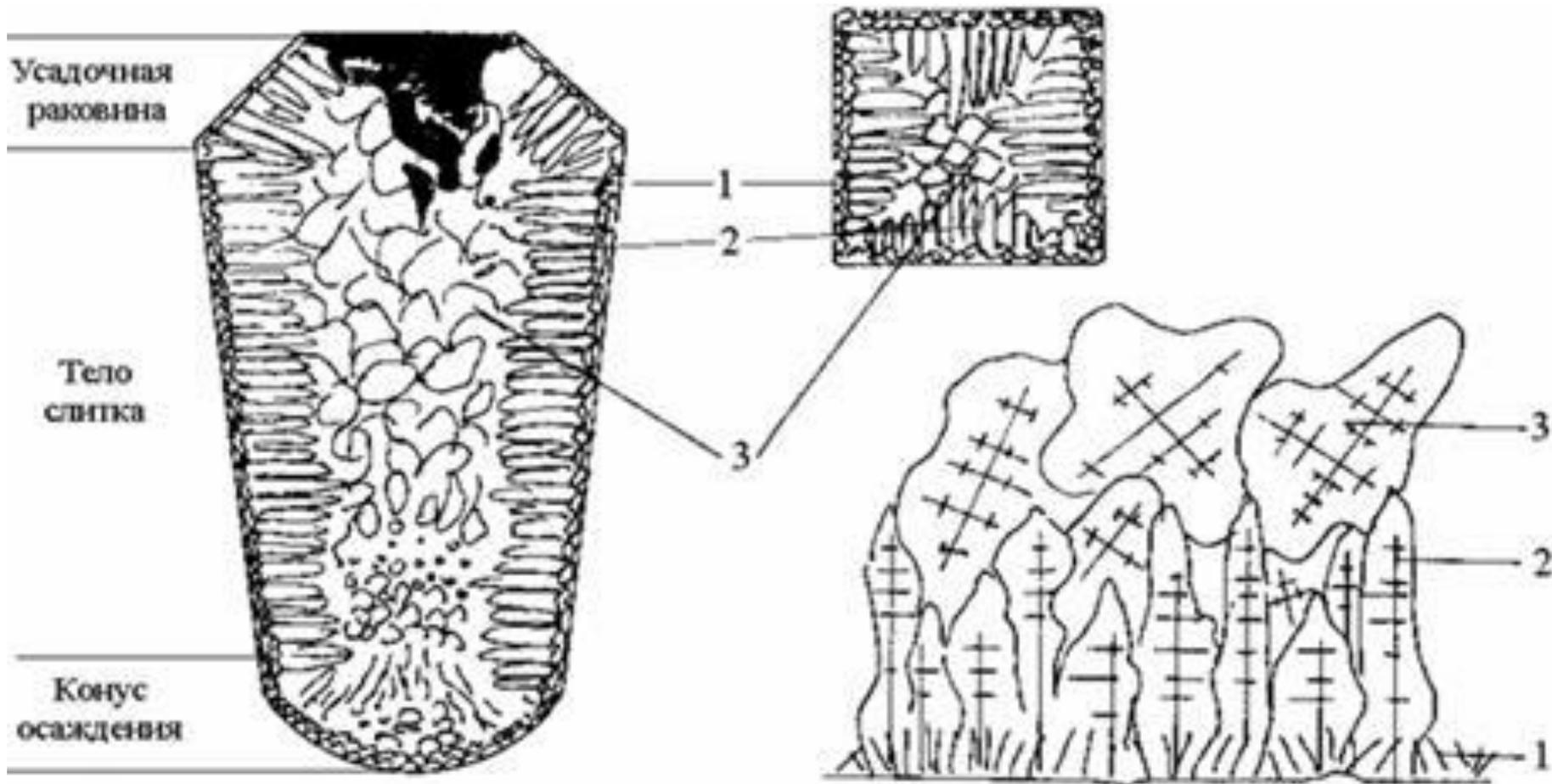




$\text{Na}_2\text{SO}_4$   
*sodium sulfate*



# СТРОЕНИЕ СТАЛЬНОГО СЛИТКА

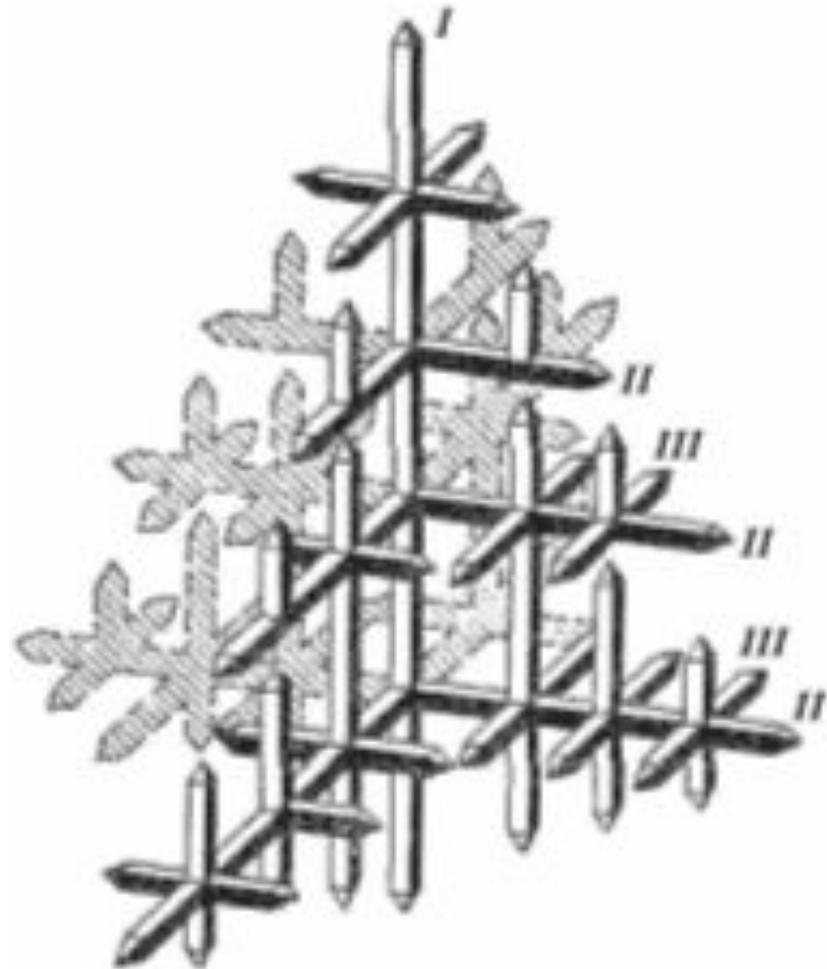


1 – наружная мелкозернистая корка;

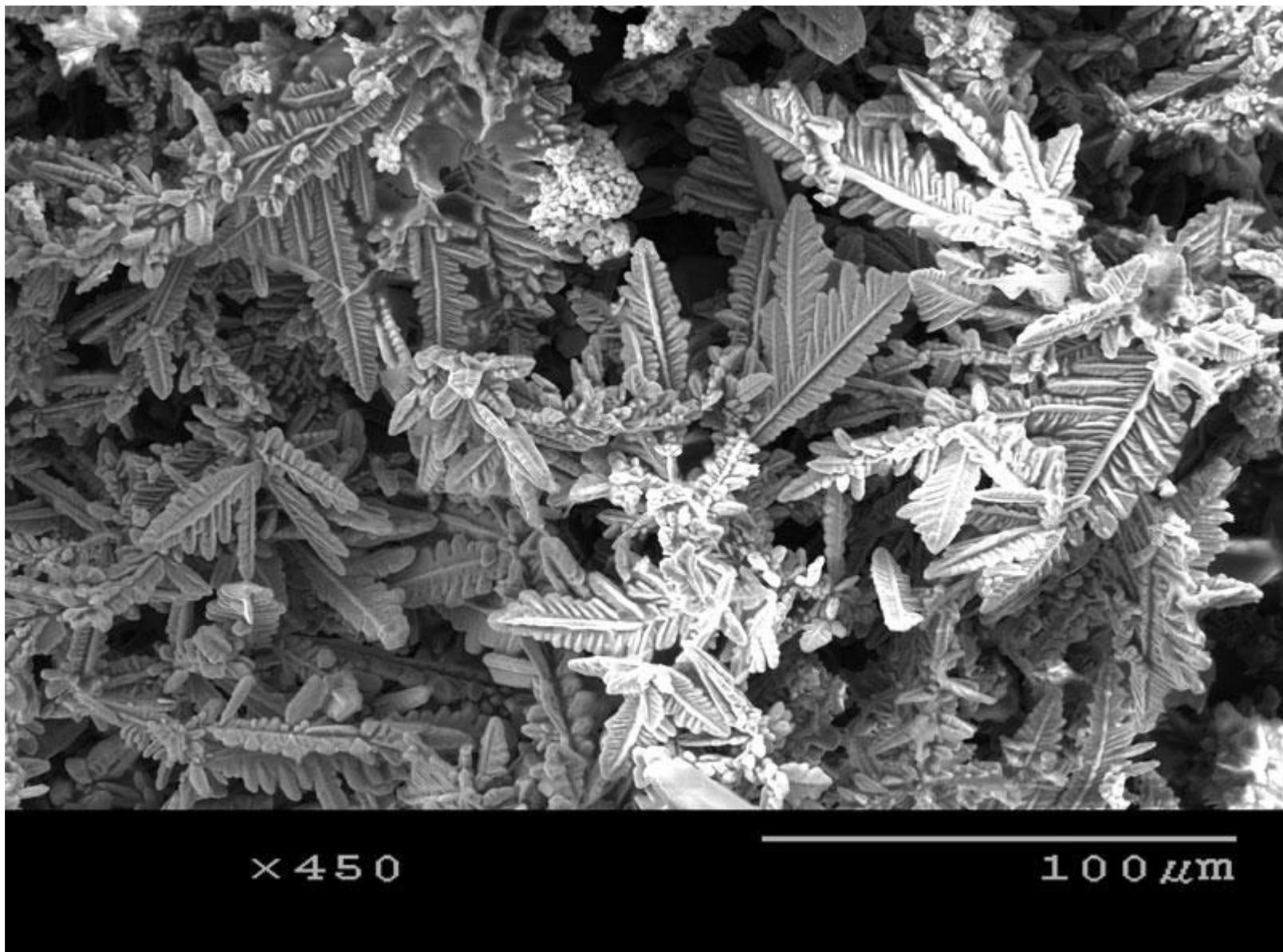
2 – зона столчатых кристаллов (дендритов);

3 – зона равноосных кристаллов

# КРИСТАЛЛ Д.К. ЧЕРНОВА (ДЕНДРИТ)



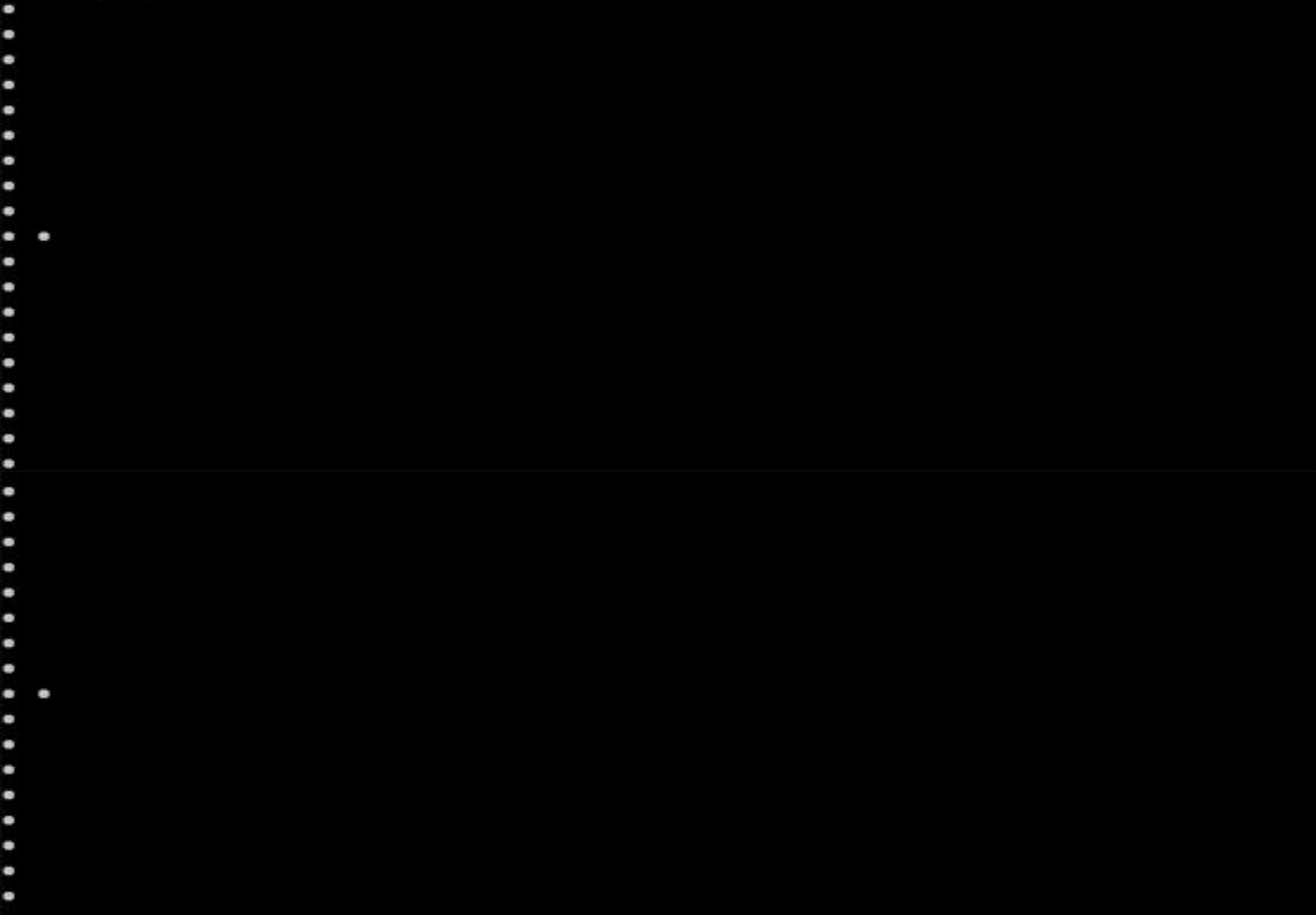
# ДЕНДРИТНЫЕ КРИСТАЛЛЫ МЕДИ



Время

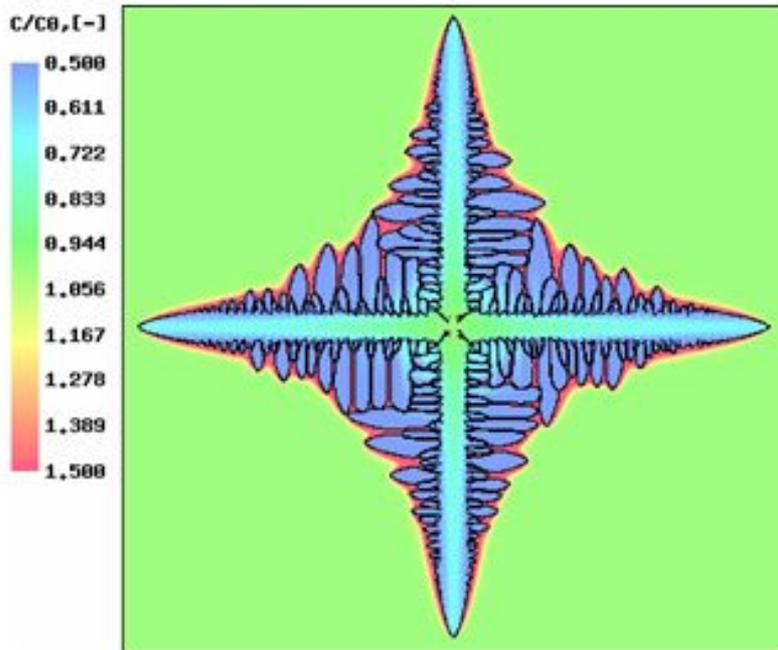
# МОДЕЛИРОВАНИЕ РОСТА ДЕНДРИТА

$t = 30 \text{ c}$

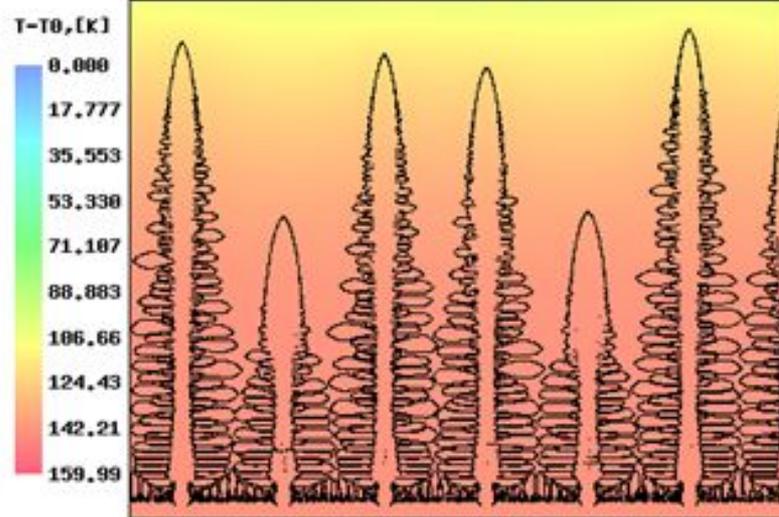
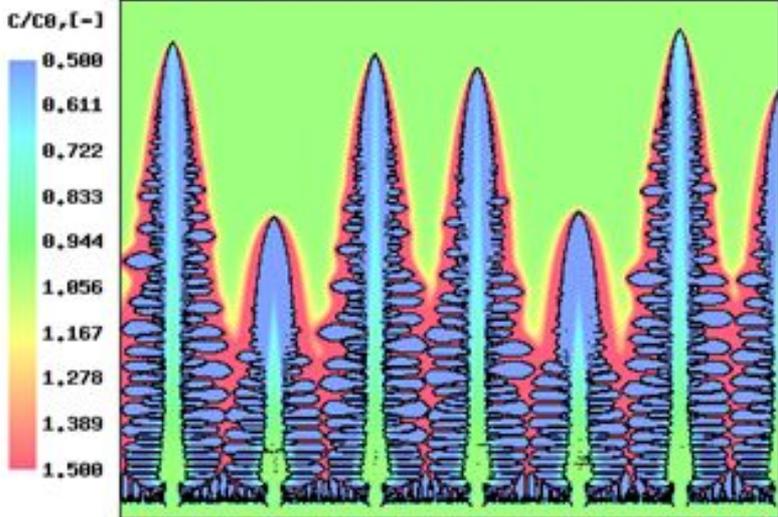
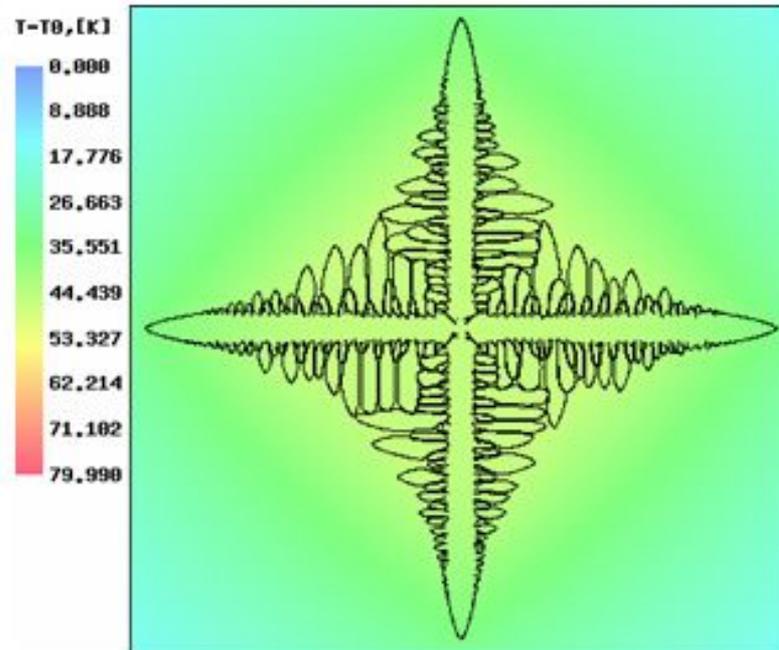


# МОДЕЛИРОВАНИЕ РОСТА ДЕНДРИТА

распределение концентрации



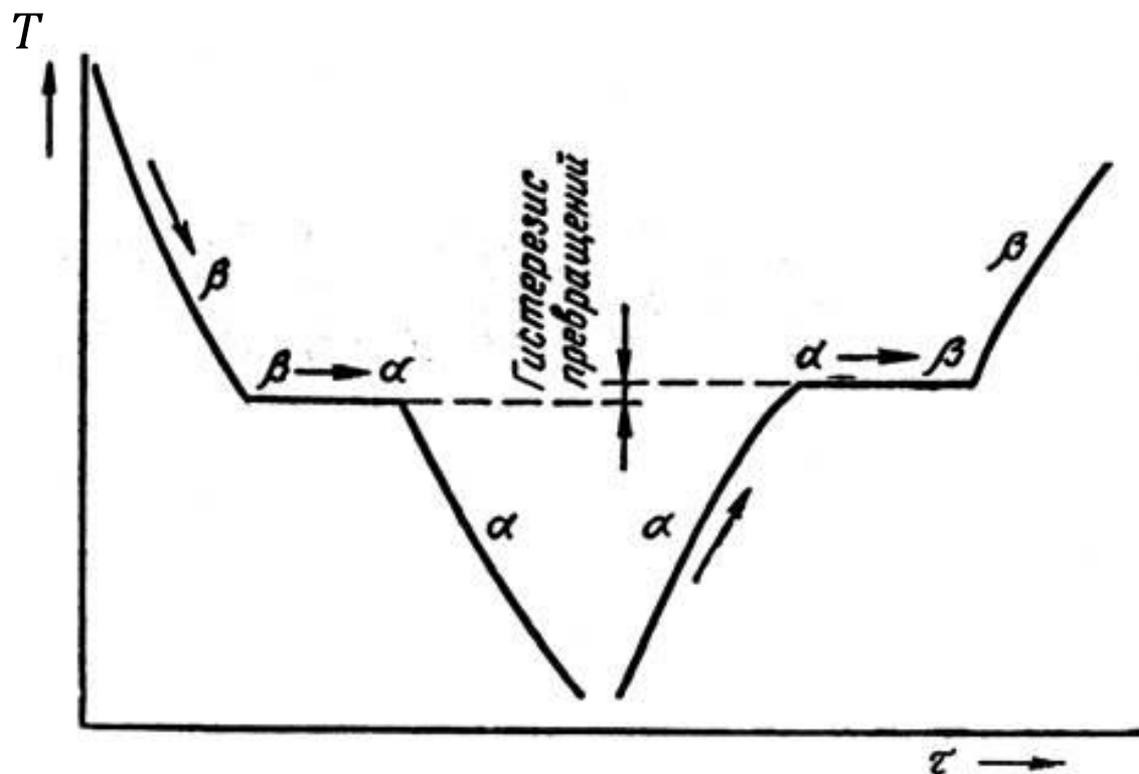
распределение температуры



# ПРЕВРАЩЕНИЯ В ТВЕРДОМ СОСТОЯНИИ

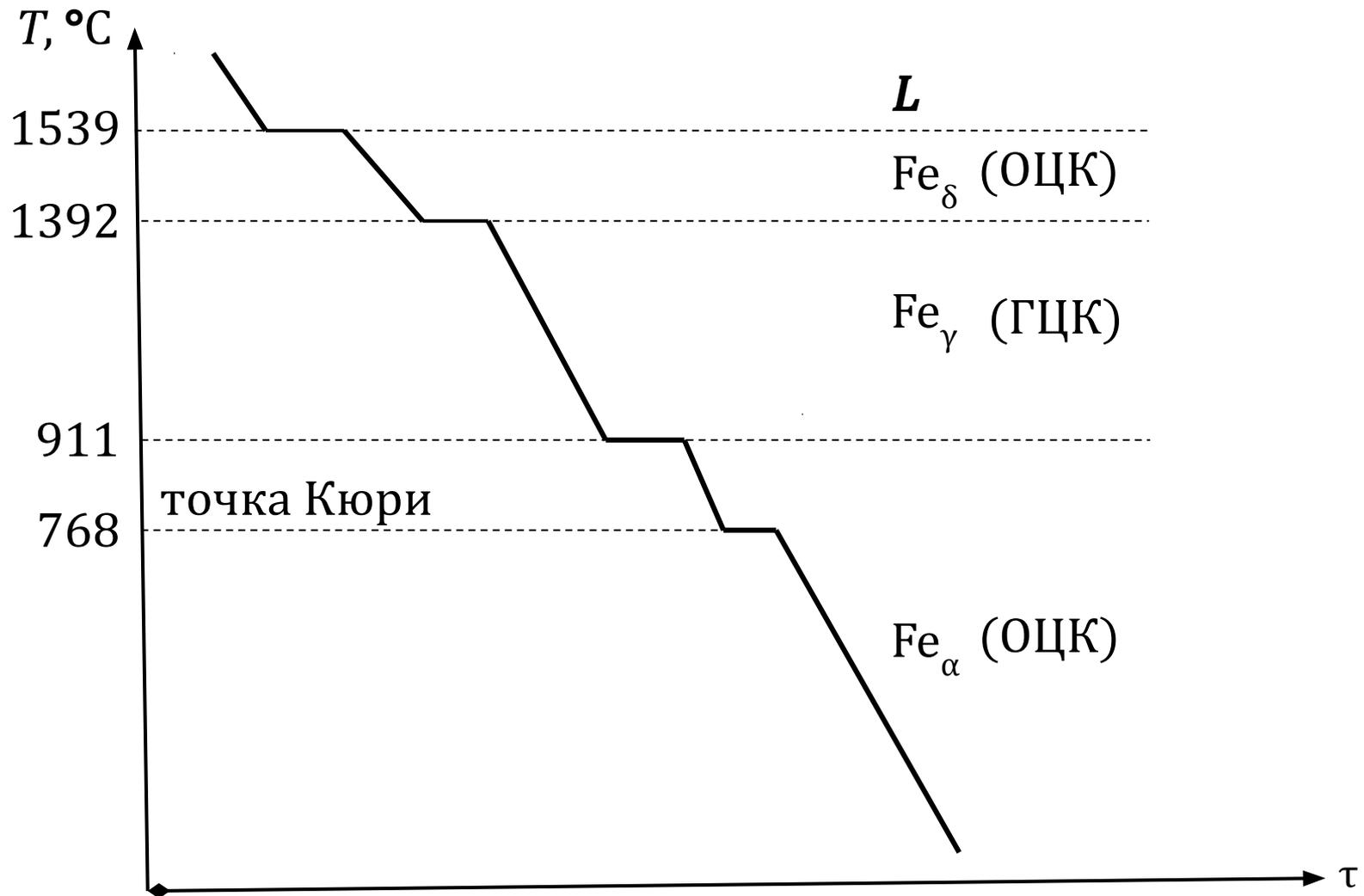
## Полиморфизм (аллотропия) –

способность одного металла существовать в нескольких кристаллических формах.

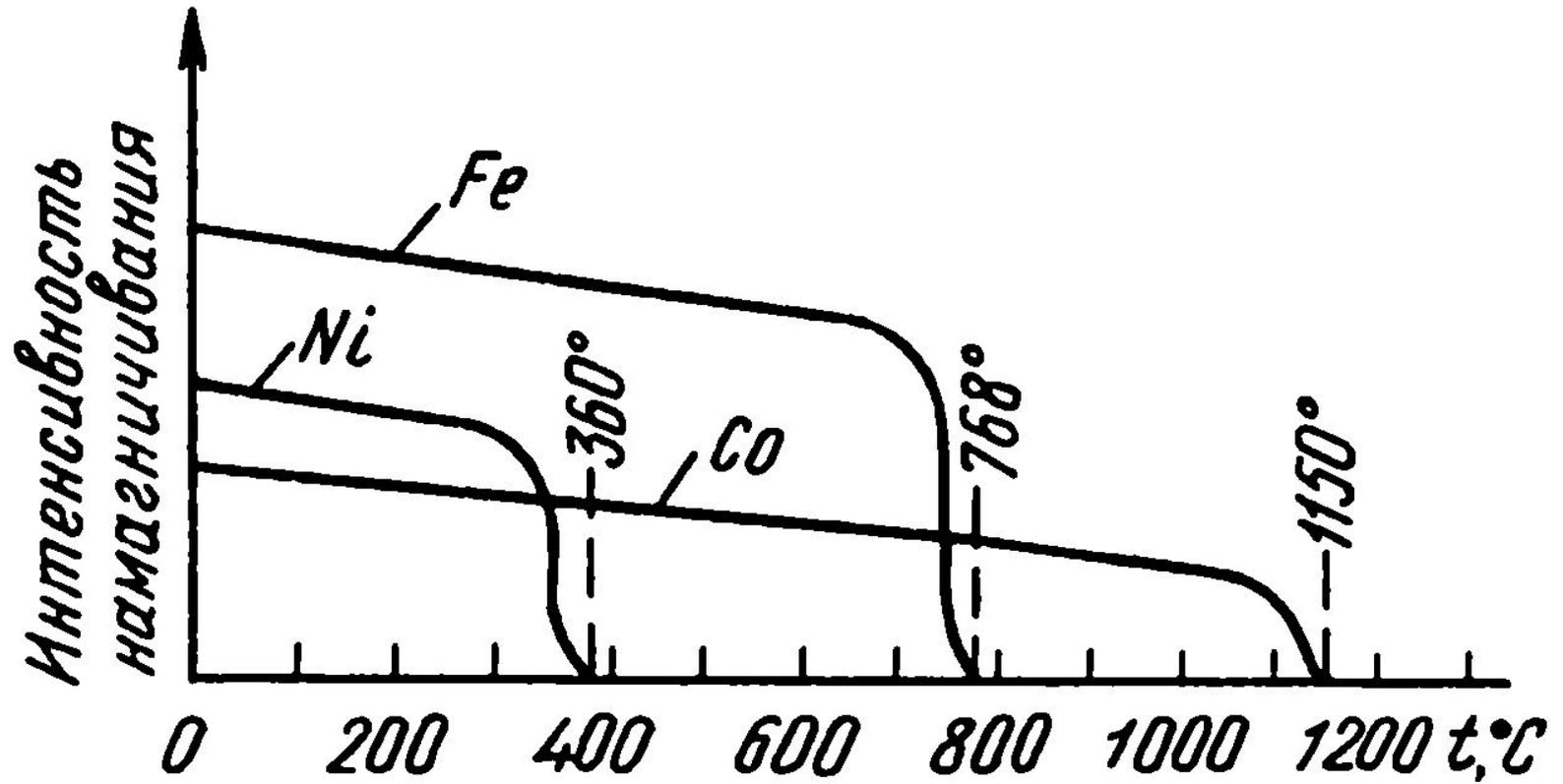


Для полиморфных превращений характерны: изменение кристаллической решетки, перекристаллизация и тепловой гистерезис превращения. Полиморфные модификации обозначаются греческими буквами  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  и т.д. – по возрастанию температурного интервала их существования.

# АЛЛОТРОПИЯ ЖЕЛЕЗА



# МАГНИТНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ



# СПЛАВЫ

**Сплав** – вещество, получаемое сплавлением двух или более компонентов.

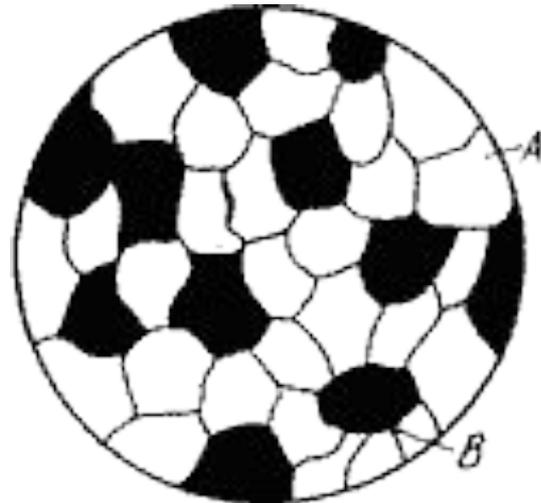
**Система** – группа тел выделяемых для наблюдения и изучения. В металловедении системами являются металлы и металлические сплавы. Чистый металл является простой однокомпонентной системой, сплав – сложной системой, состоящей из двух и более компонентов.

**Компоненты** – вещества, образующие систему. В качестве компонентов выступают чистые вещества и химические соединения, если они не диссоциируют на составные части в исследуемом интервале температур.

**Фаза** – однородная часть системы, отделенная от других частей системы поверхностного раздела, при переходе через которую структура и свойства резко меняются.

# СПЛАВЫ МЕХАНИЧЕСКИЕ СМЕСИ

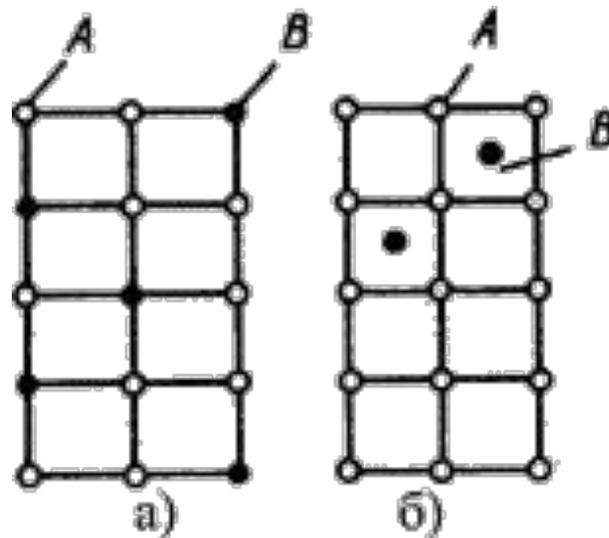
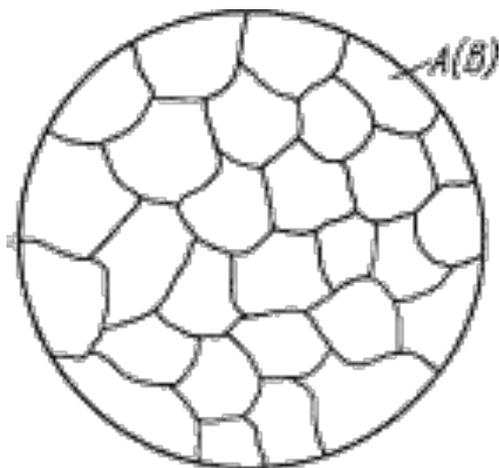
- Компоненты, образующие сплав, не способны к взаимному растворению и не образуют химического соединения.
- Кристаллы А и В имеют различные кристаллические решетки, значительно различающиеся по строению и свойствам.
- Образуются, когда сила взаимодействия между однородными атомами больше, чем между разнородными.



# СПЛАВЫ ТВЕРДЫЕ РАСТВОРЫ

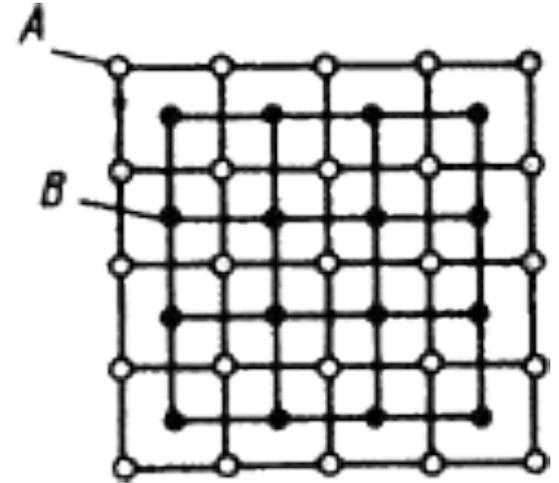
- Образуются в сплавах, сохраняющих однородность жидкого расплава при кристаллизации.
- Существует в интервале концентраций.
- Состоит из одного вида кристаллов и имеет одну кристаллическую решетку.

Различают твердые растворы замещения (а) и внедрения (б).



# СПЛАВЫ ХИМИЧЕСКИЕ СОЕДИНЕНИЯ

- Соотношение чисел атомов элементов соответствует стехиометрической пропорции и может быть выражено простой формулой ( $A_n B_m$ ).
- Образуется специфическая (отличная от элементов, составляющих химическое соединение) кристаллическая решетка с упорядоченным расположением в ней атомов компонентов.
- Характеризуется постоянной температурой плавления (как у чистых компонентов).

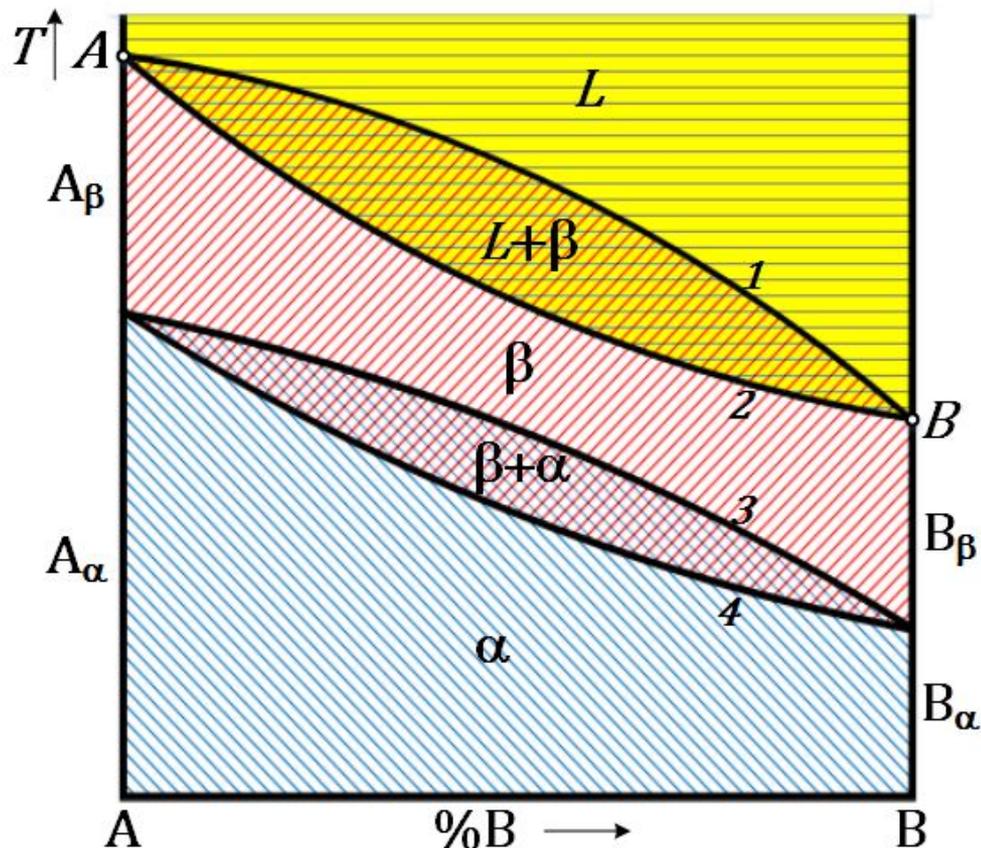


# ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ

- **Диаграмма состояния** показывает изменение состояния в зависимости от температуры и концентрации (давление постоянно для всех рассматриваемых случаев).
- Для построения диаграмм состояния пользуются результатами термического анализа: строят кривые охлаждения и по остановкам и перегибам на этих кривых, определяют температуры фазовых превращений. Линиями соединяют точки аналогичных превращений.
- Каждая точка на диаграмме состояния показывает состояние сплава данной концентрации при данной температуре.

# ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ

Температуры, соответствующие фазовым превращениям, называют **критическими точками**.



Основные линии:

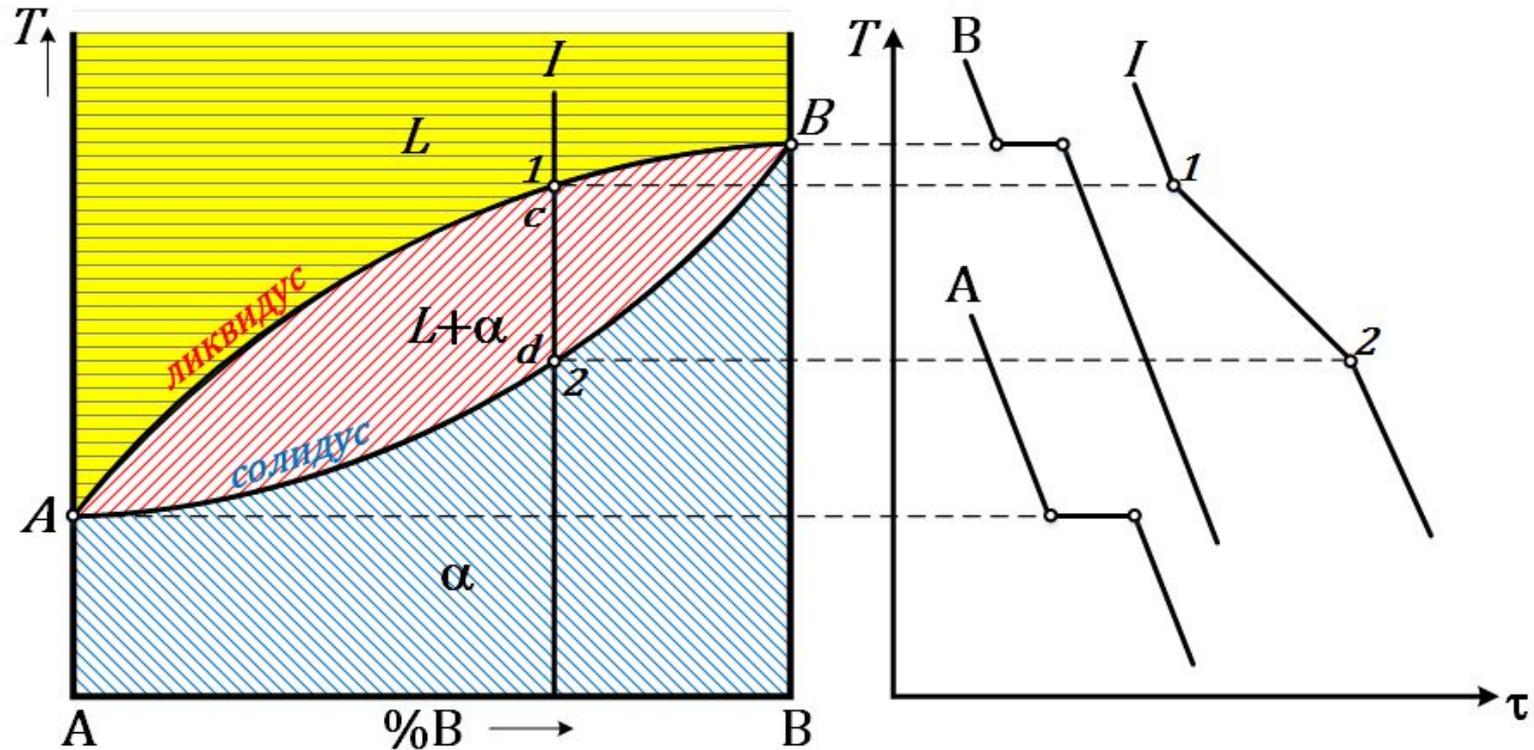
1 – **ликвидус** (1);

2 – **солидус** (2)

3, 4 – линии фазовых превращений в твердом состоянии.

По диаграмме состояния можно определить температуры фазовых превращений, изменение фазового состава, приблизительно, свойства сплава, виды обработки, которые можно применять для сплава.

# Неограниченная растворимость в твердом состоянии (твердые растворы)



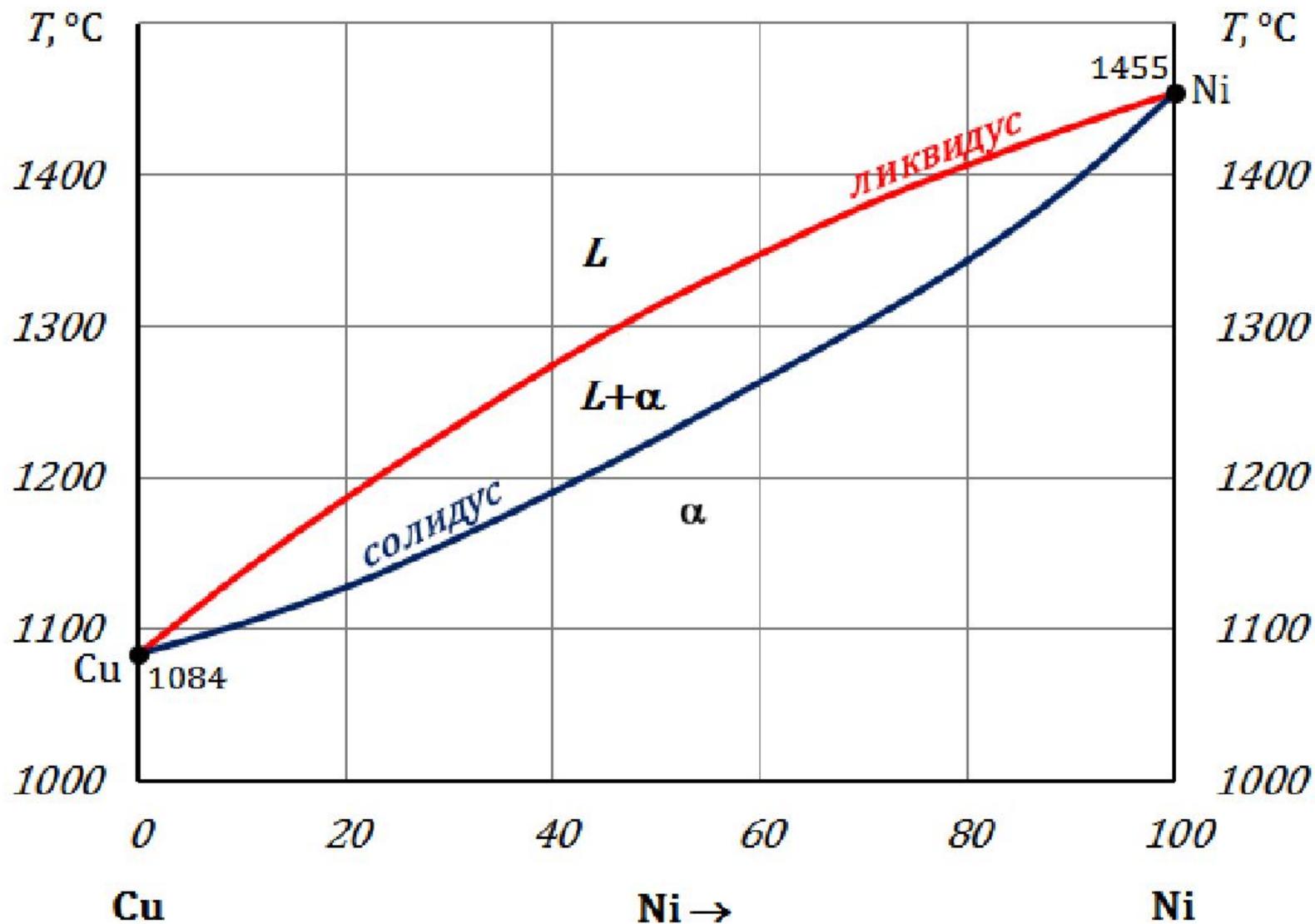
## Анализ диаграммы:

- 1) Количество компонентов:  $k = 2$  (компоненты A и B).
- 2) Число фаз:  $f = 2$  (жидкая фаза  $L$ , кристаллы твердого раствора  $\alpha$ ).
- 3) Основные линии диаграммы:
  - $AcB$  – линия **ликвидус**;  $AdB$  – линия **солидус**.
- 4) Характерные сплавы системы:
  - чистые компоненты A и B кристаллизуются при постоянной температуре;
  - остальные сплавы кристаллизуются аналогично сплаву  $I$ .

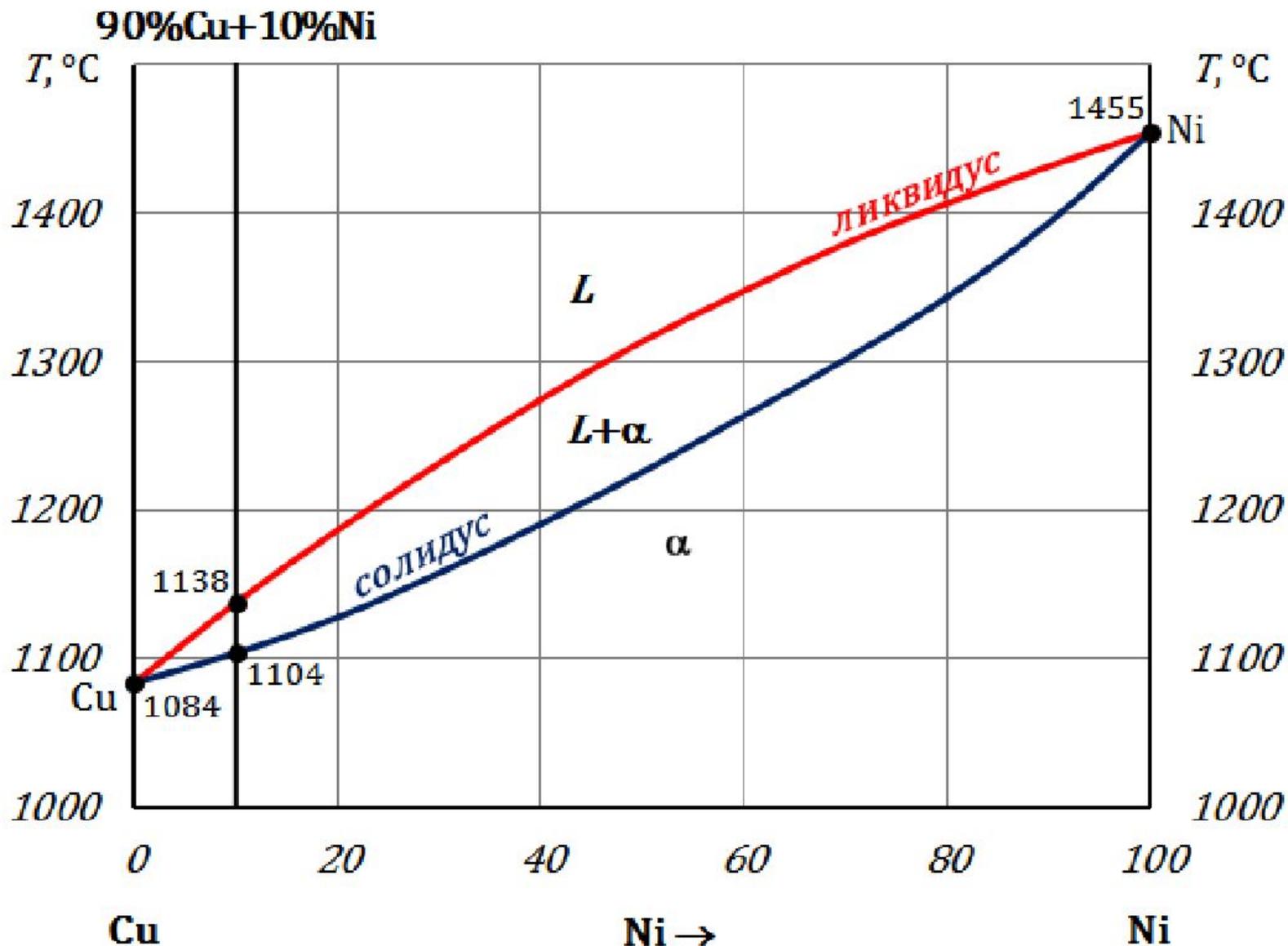
# Процесс кристаллизации сплава I

- До точки 1 охлаждается сплав в жидком состоянии.
- При температуре, соответствующей точке 1, начинают образовываться центры кристаллизации твердого раствора  $\alpha$ . На кривой охлаждения отмечается перегиб (критическая точка), связанный с уменьшением скорости охлаждения вследствие выделения скрытой теплоты кристаллизации.
- На участке 1–2 идет процесс кристаллизации, протекающий при понижающейся температуре.
- При достижении температуры соответствующей точке 2, сплав затвердевает, при дальнейшем понижении температуры охлаждается сплав в твердом состоянии, состоящий из однородных кристаллов твердого раствора  $\alpha$ .

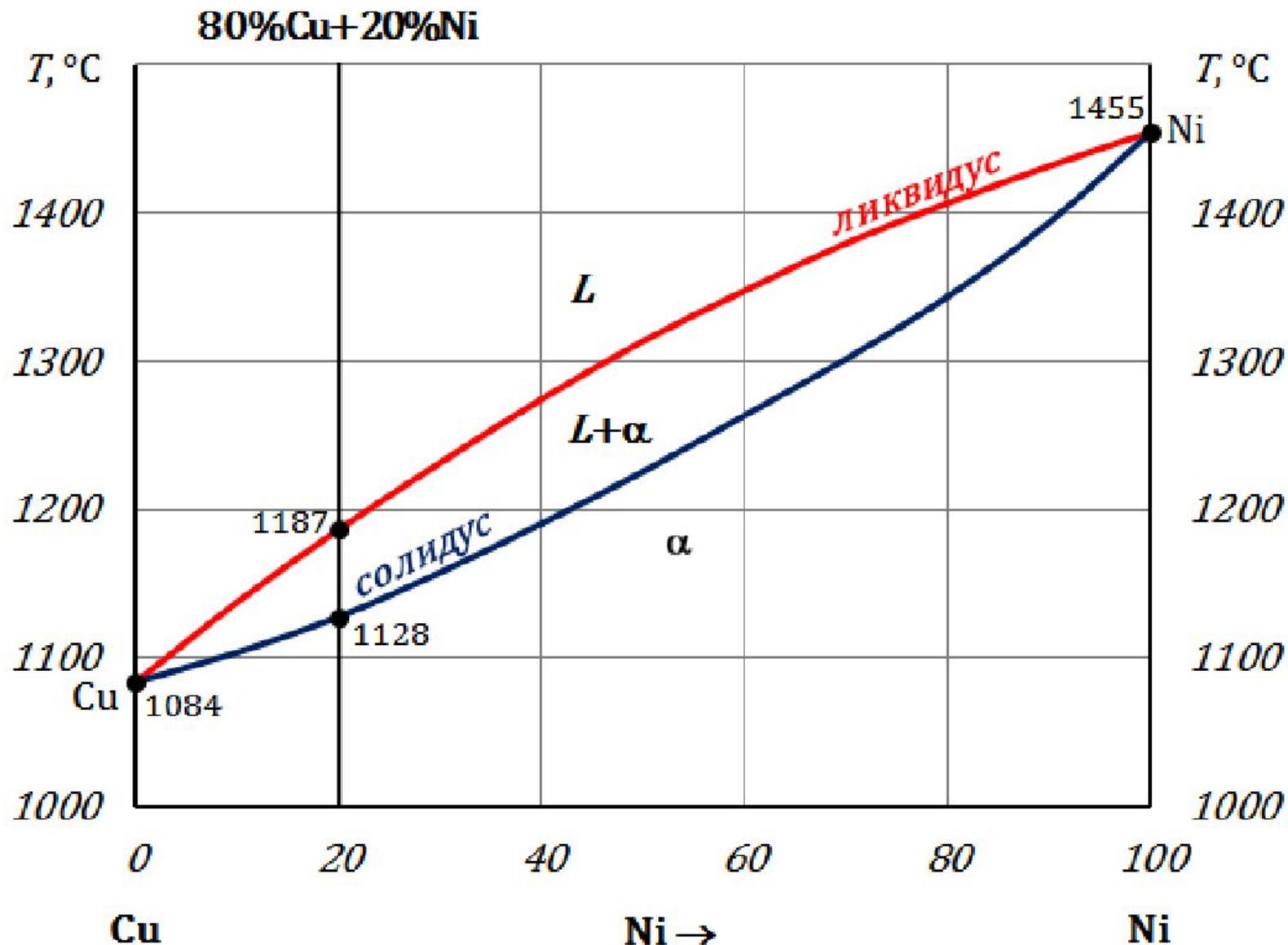
# ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ Cu-Ni



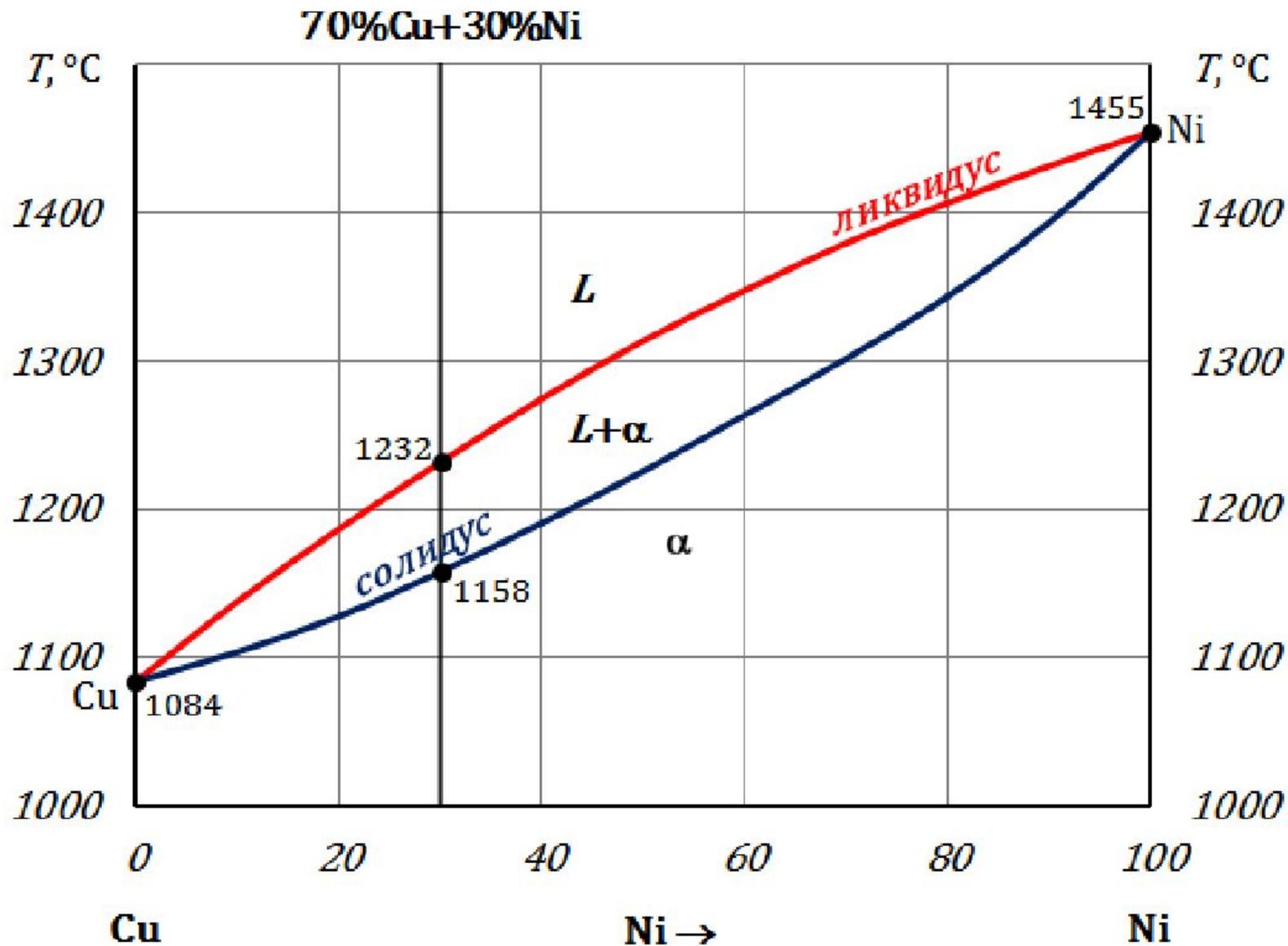
# ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ Cu-Ni



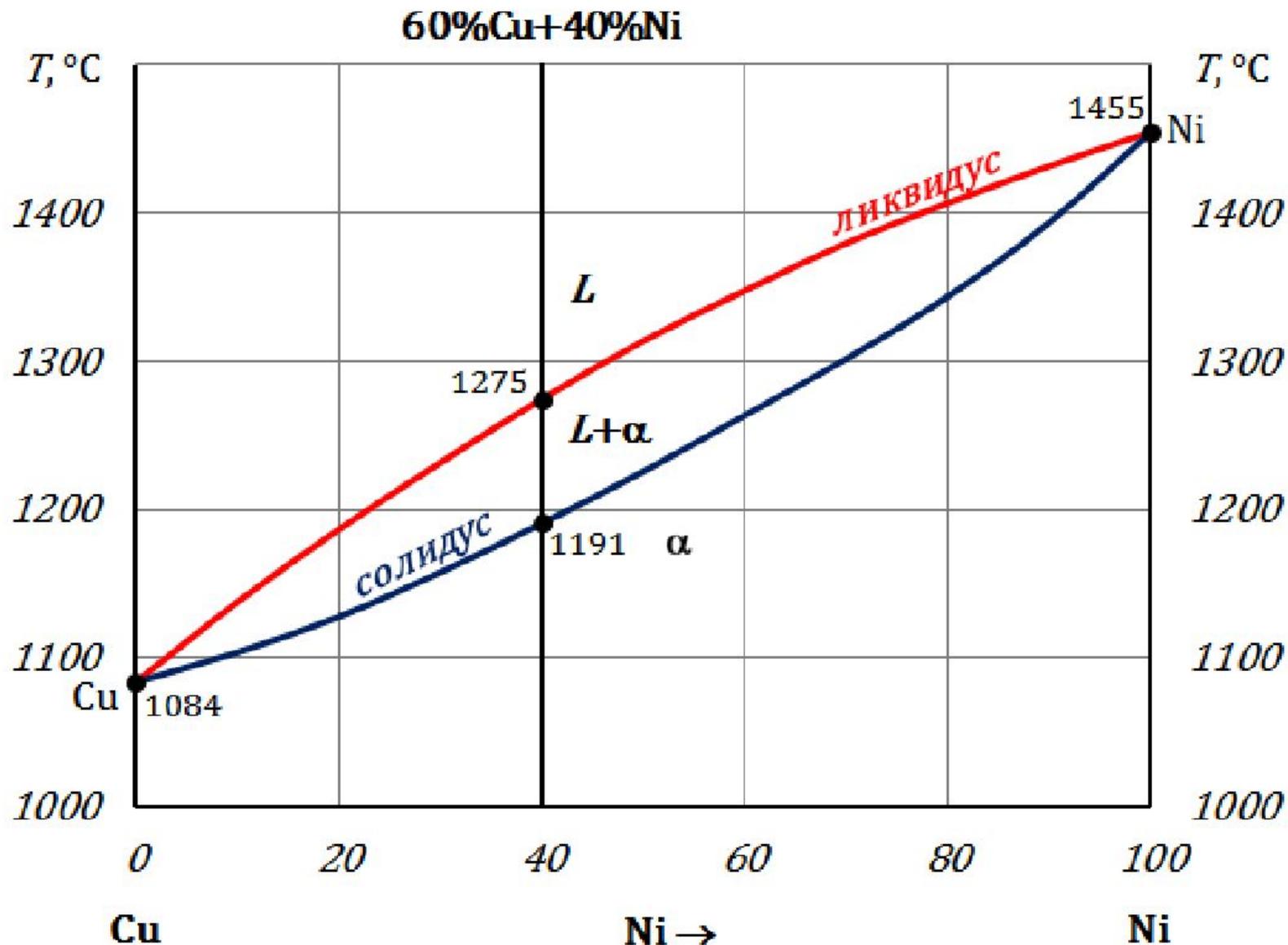
# ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ Cu-Ni



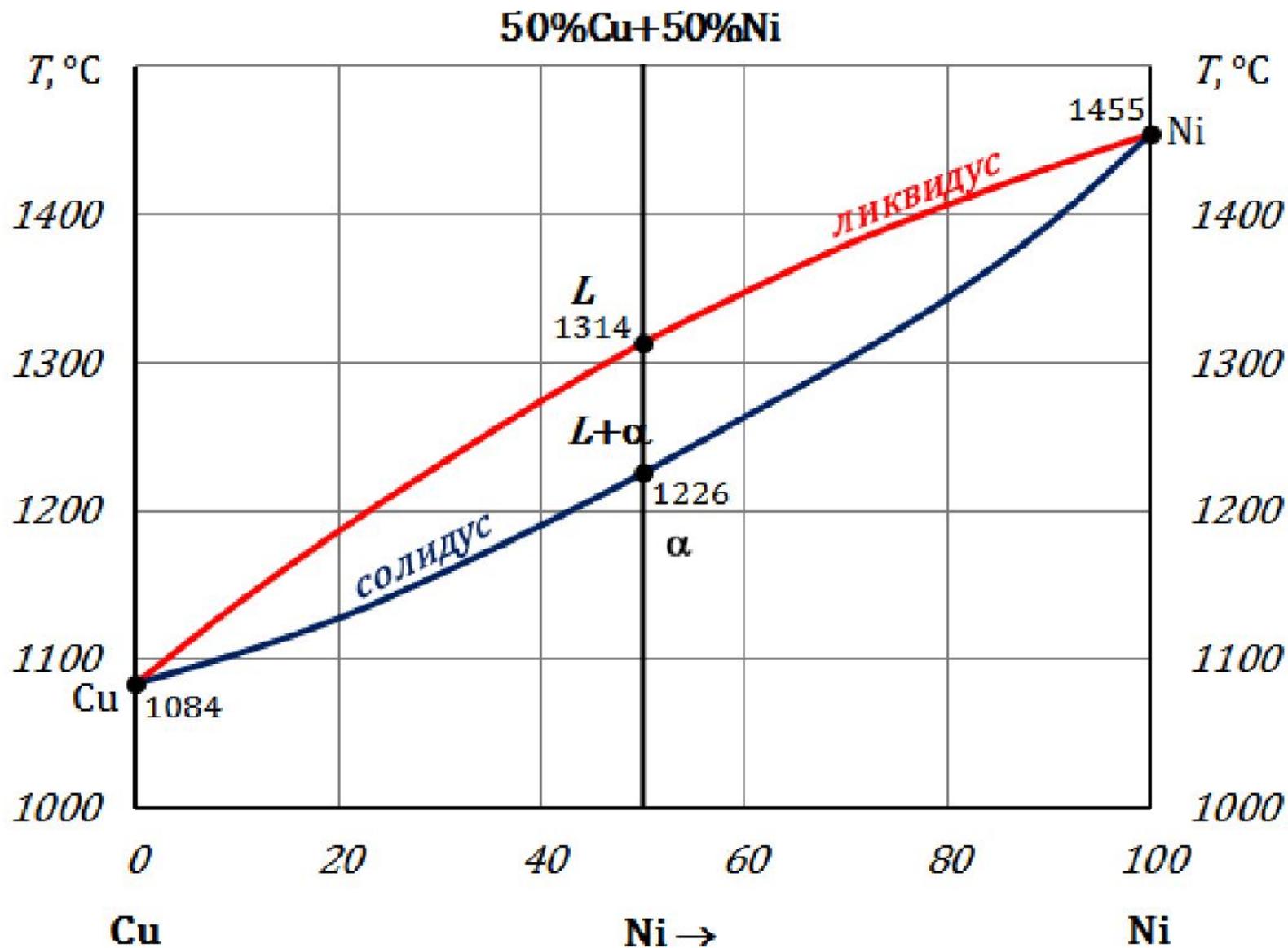
# ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ Cu-Ni



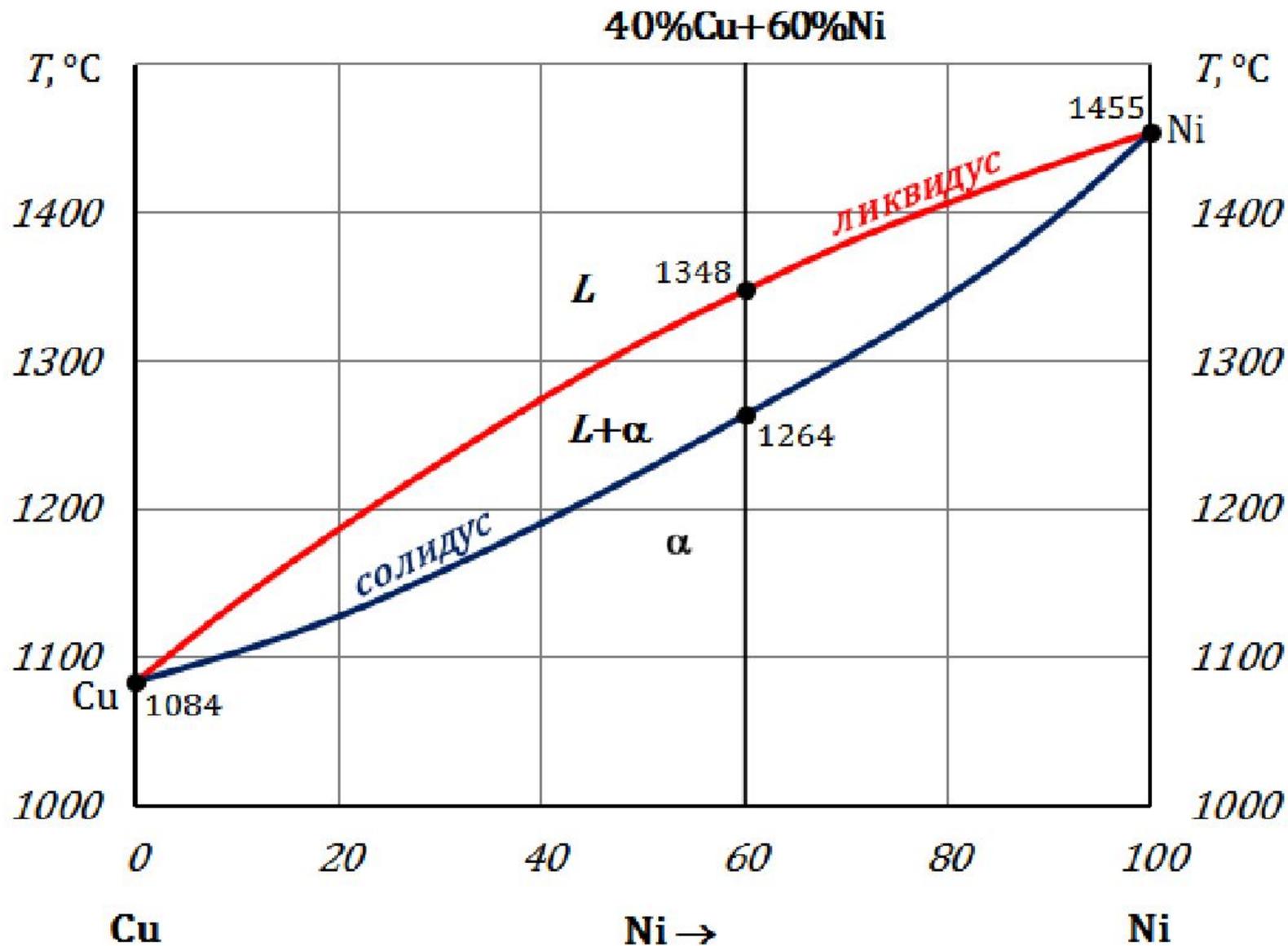
# ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ Cu-Ni



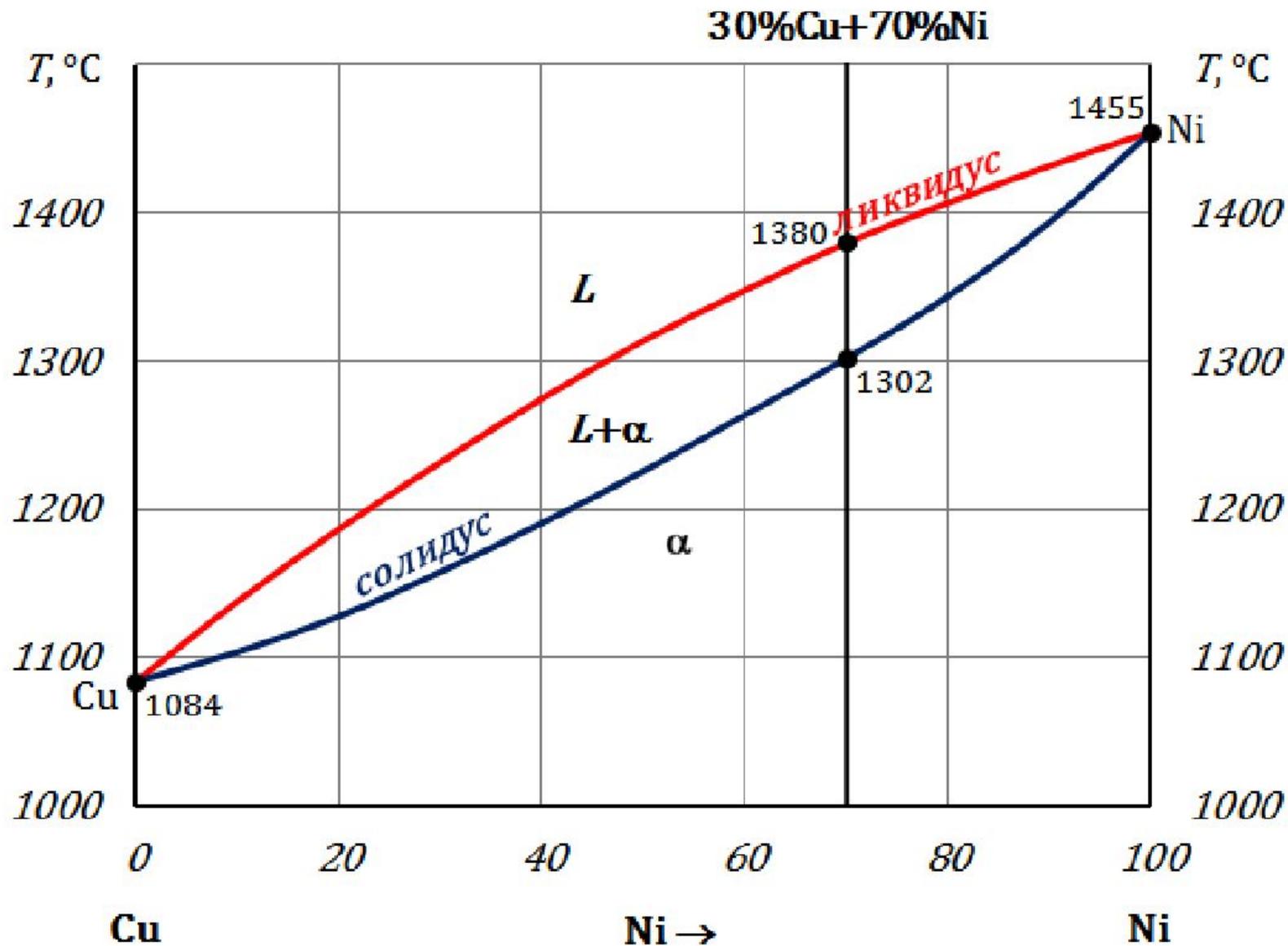
# ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ Cu-Ni



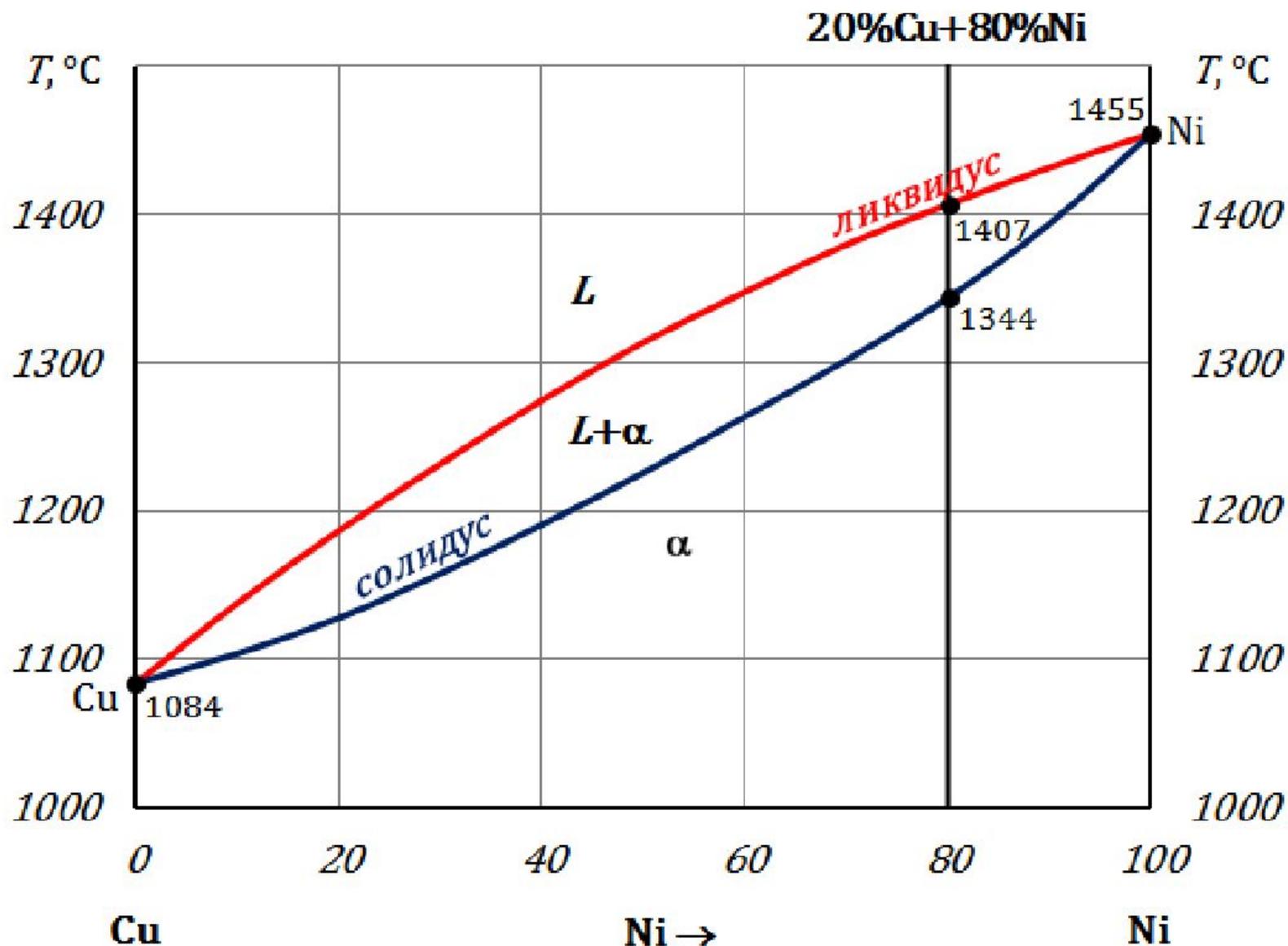
# ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ Cu-Ni



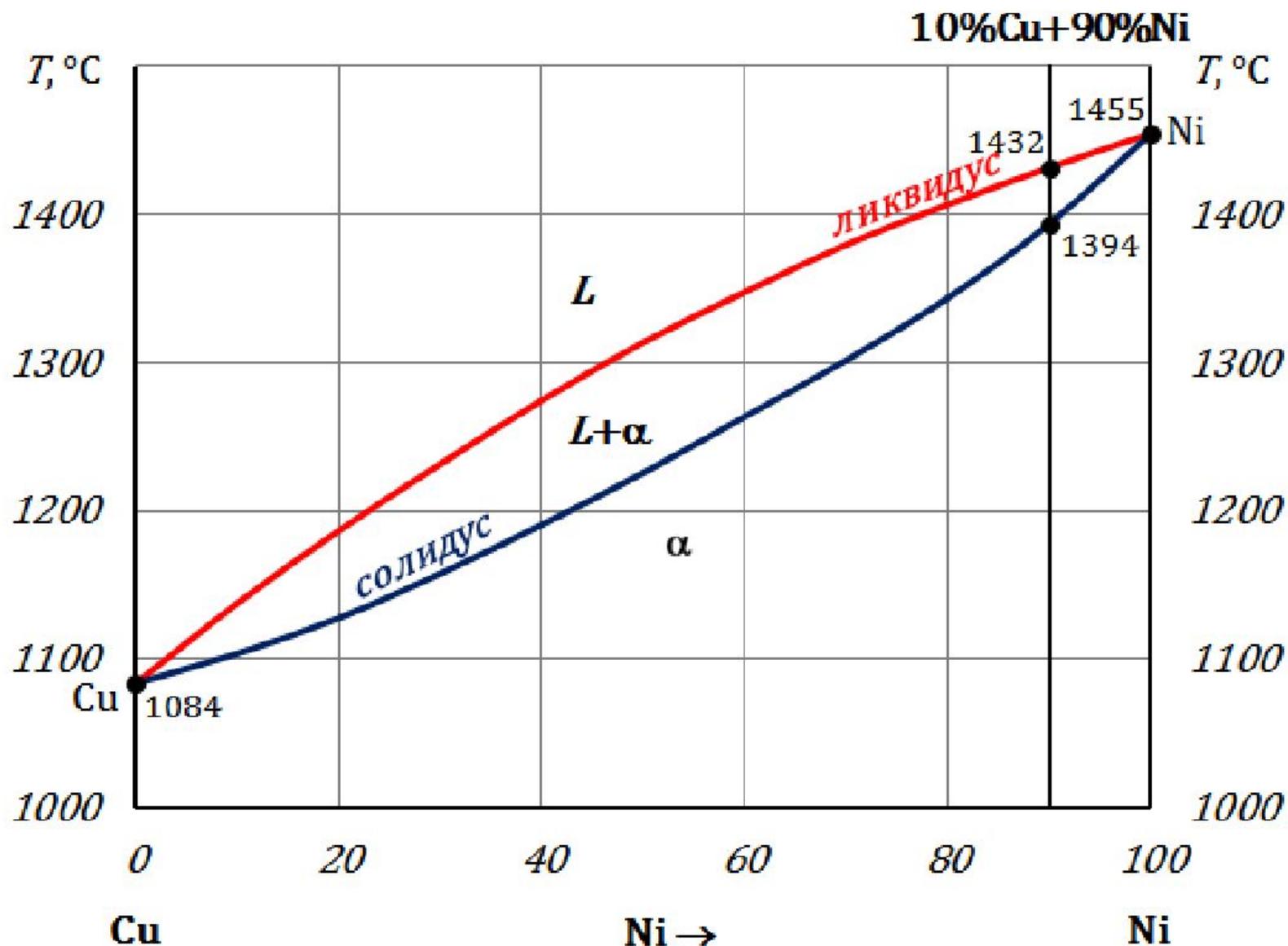
# ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ Cu-Ni



# ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ Cu-Ni



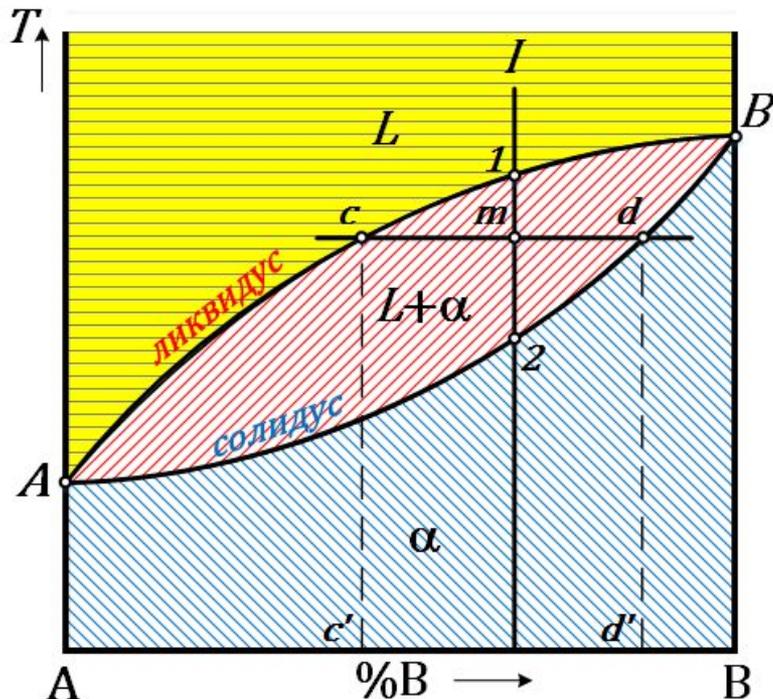
# ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ Cu-Ni



# ПРАВИЛО ОТРЕЗКОВ

Чтобы определить концентрацию компонентов в фазах, через данную точку ( $m$ ) характеризующую состояние сплава, проводят горизонтальную линию до пересечения с линиями, ограничивающими данную область, при этом:

- проекции точек пересечения на ось концентраций ( $c'$  и  $d'$ ) показывают состав фаз;
- количественная масса фаз обратно пропорциональна отрезкам проведенной горизонтали.



В сплаве  $I$ :

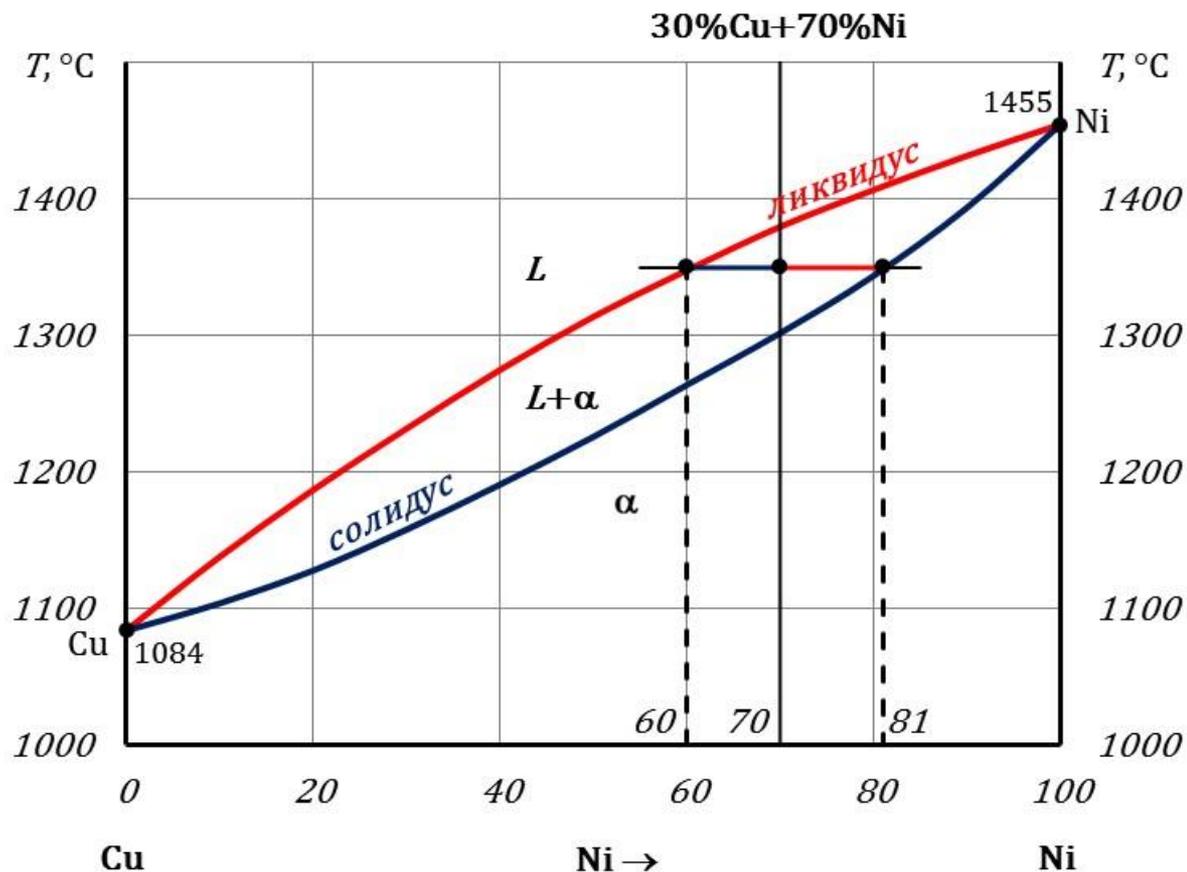
$cd$  – все количество сплава ( $Q_{\text{СП}}$ );  
 $md$  – определяет количество жидкой фазы ( $Q_{\text{Ж}}$ );

$cm$  – количество твердой фазы ( $Q_{\text{ТВ}}$ ).

$$Q_{\text{Ж}} = \frac{md}{cd} \cdot 100\%;$$

$$Q_{\text{ТВ}} = \frac{cm}{cd} \cdot 100\%$$

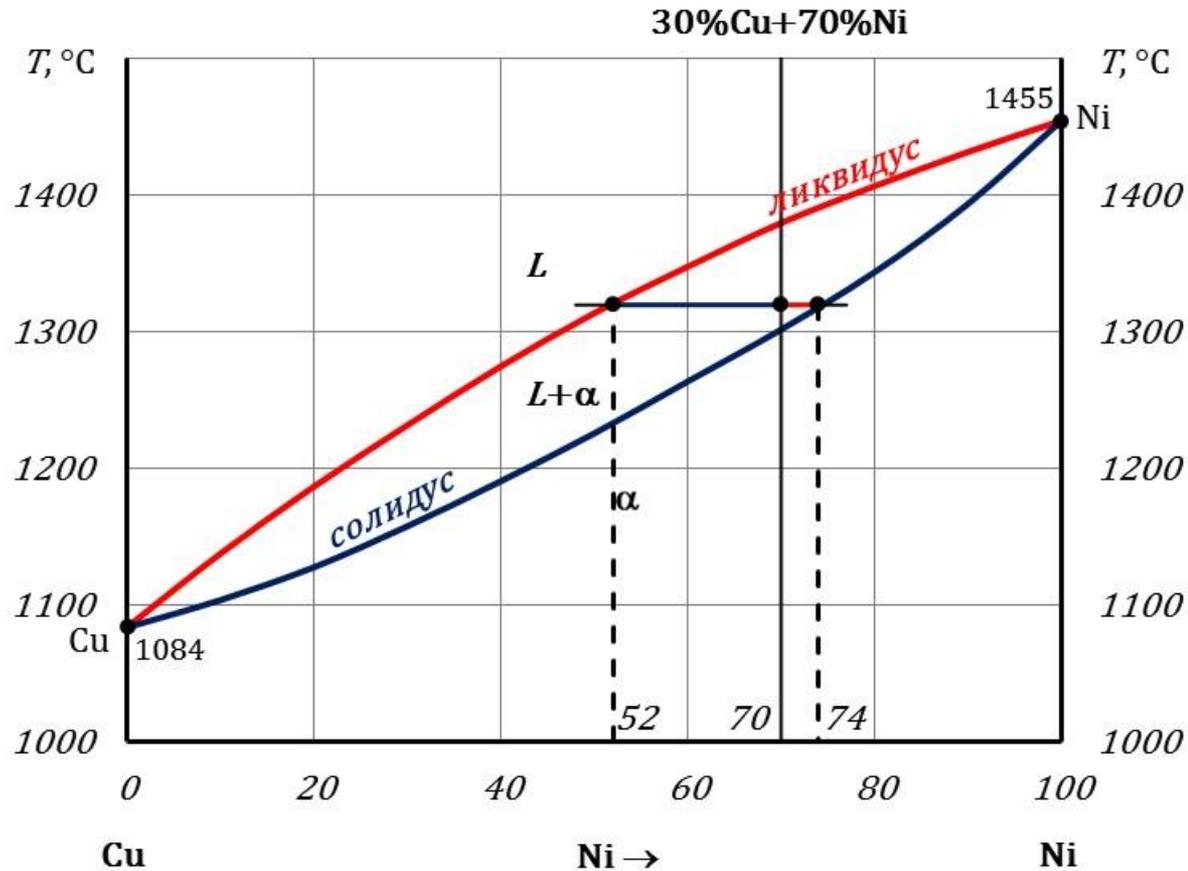
# ПРАВИЛО ОТРЕЗКОВ ДЛЯ ДИАГРАММЫ Cu-Ni



$T = 1350 \text{ }^\circ\text{C}: Q_{\text{ж}} = \frac{81-70}{81-60} \cdot 100\% = 52,38\%;$

$Q_{\alpha} = \frac{70-60}{81-60} \cdot 100\% = 47,62\%$

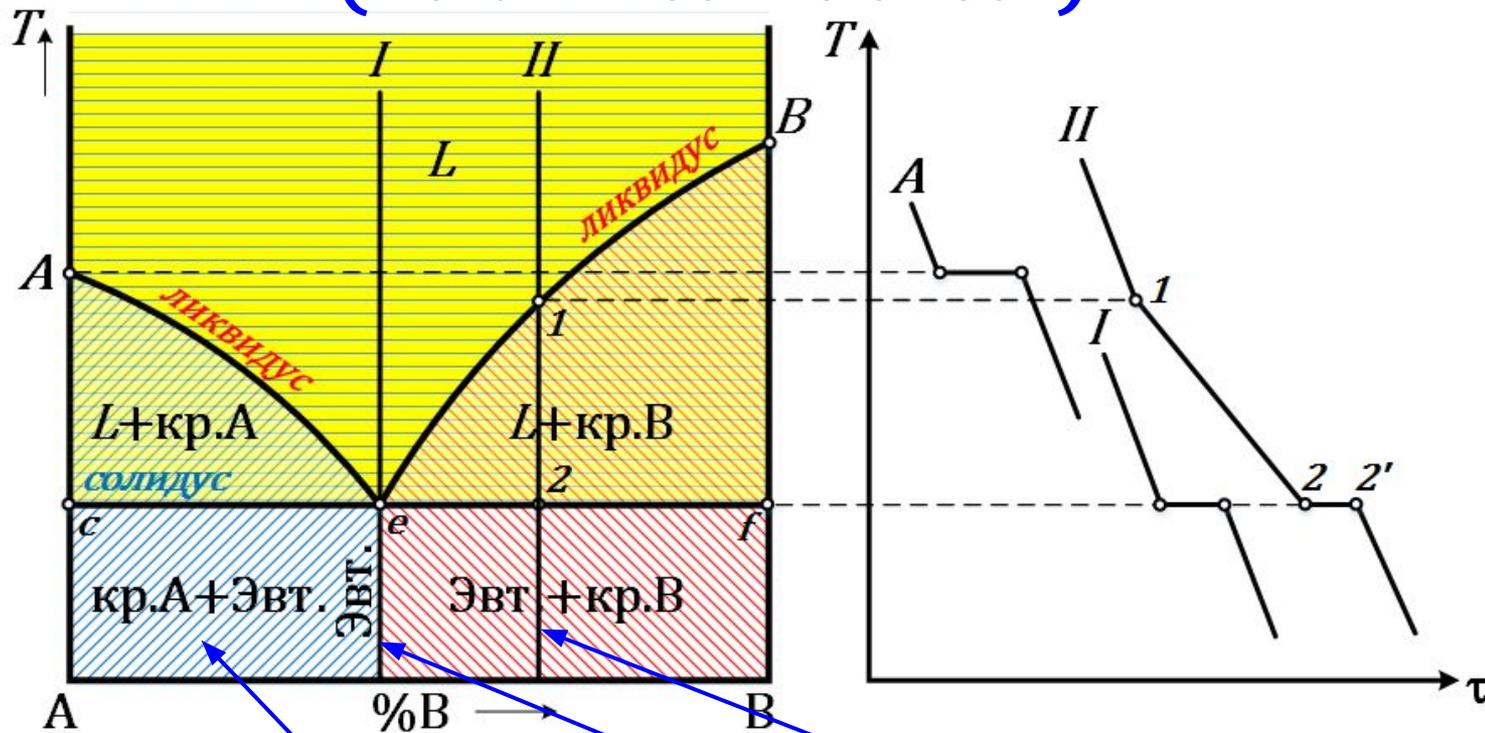
# ПРАВИЛО ОТРЕЗКОВ ДЛЯ ДИАГРАММЫ Cu-Ni



$T = 1320\text{ }^{\circ}\text{C}: Q_{\text{ж}} = \frac{74-70}{74-52} \cdot 100\% = 18,18\%;$

$Q_{\alpha} = \frac{70-52}{74-52} \cdot 100\% = 81,82\%$

# Диаграмма состояния сплавов с отсутствием растворимости компонентов в твердом состоянии (механические смеси)



# Анализ диаграммы состояния сплавов с отсутствием растворимости компонентов в твердом состоянии (механические смеси)

- 1) Количество компонентов:  $k = 2$  (компоненты А и В);
- 2) Число фаз:  $f = 3$  (кристаллы А, кристаллы В, жидкая фаза  $L$ ).
- 3) Основные линии диаграммы:
  - линия **ликвидус**  $AeB$ , состоит из двух ветвей, сходящихся в одной точке;
  - линия **солидус**  $cef$ , стремится к осям компонентов, но не достигает их;
- 4) Типовые сплавы системы:
  - а) Чистые компоненты, кристаллизуются при постоянной температуре;
  - б) **Эвтектический сплав** – сплав, соответствующий концентрации компонентов в точке  $e$  (сплав I).

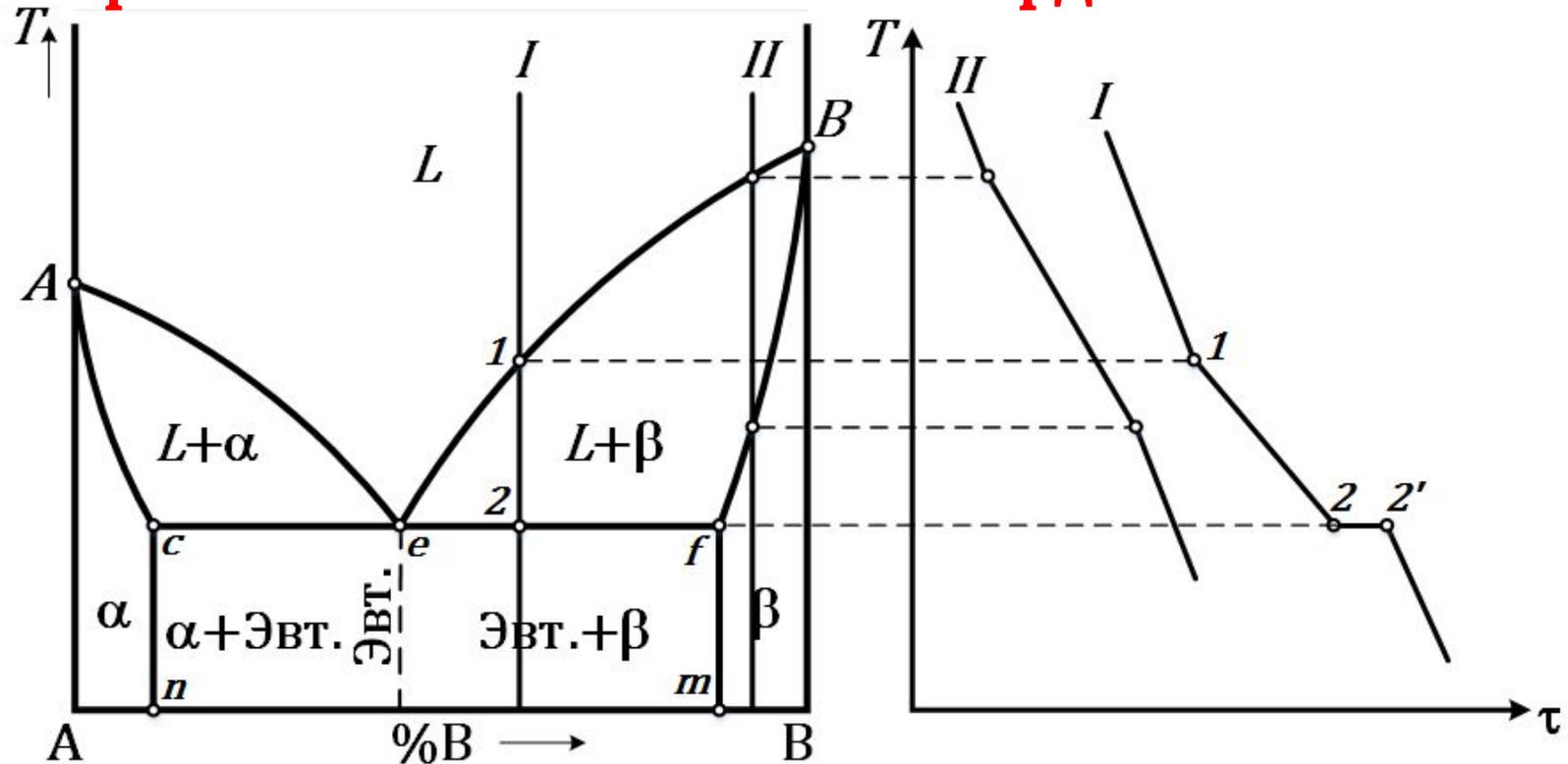
**Эвтектика** – мелкодисперсная механическая смесь разнородных кристаллов, кристаллизующихся одновременно при постоянной, самой низкой для рассматриваемой системы, температуре.

в) Другие сплавы системы аналогичны сплаву II.

Процесс кристаллизации заэвтектического сплава II:

до точки 1 охлаждается сплав в жидком состоянии. При  $T$  в точке 1 начинают образовываться центры кристаллизации избыточного компонента В. На кривой охлаждения отмечается перегиб (критическая точка), связанный с уменьшением скорости охлаждения вследствие выделения скрытой теплоты кристаллизации. На участке 1–2 идет процесс кристаллизации, протекающий при понижающейся температуре. При охлаждении состав жидкой фазы изменяется по линии ликвидус до эвтектического. На участке 2–2' кристаллизуется эвтектика. Ниже точки 2' охлаждается сплав, состоящий из кристаллов первоначально закристиализовавшегося избыточного компонента В и эвтектики

# Диаграмма состояния сплавов с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии



Проведем анализ диаграммы состояния.

- 1) Количество компонентов:  $k = 2$  (компоненты  $A$  и  $B$ );
- 2) Число фаз:  $f = 3$  (жидкая фаза и кристаллы твердых растворов  $\alpha=A(B)$  и  $\beta=B(A)$ );
- 3) Основные линии диаграммы:
  - линия ликвидус  $AeB$ , состоит из двух ветвей, сходящихся в одной точке;
  - линия солидус  $AcfB$ , состоит из трех участков;
  - $cn$  - линия предельной концентрации компонента  $B$  в компоненте  $A$ ;
  - $fm$  - линия предельной концентрации компонента  $A$  в компоненте  $B$ .

# Типовые сплавы системы с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии

При концентрации компонентов, не превышающей предельных значений (на участках  $An$  и  $mB$ ), сплавы кристаллизуются аналогично сплавам твердым растворам с неограниченной растворимостью.

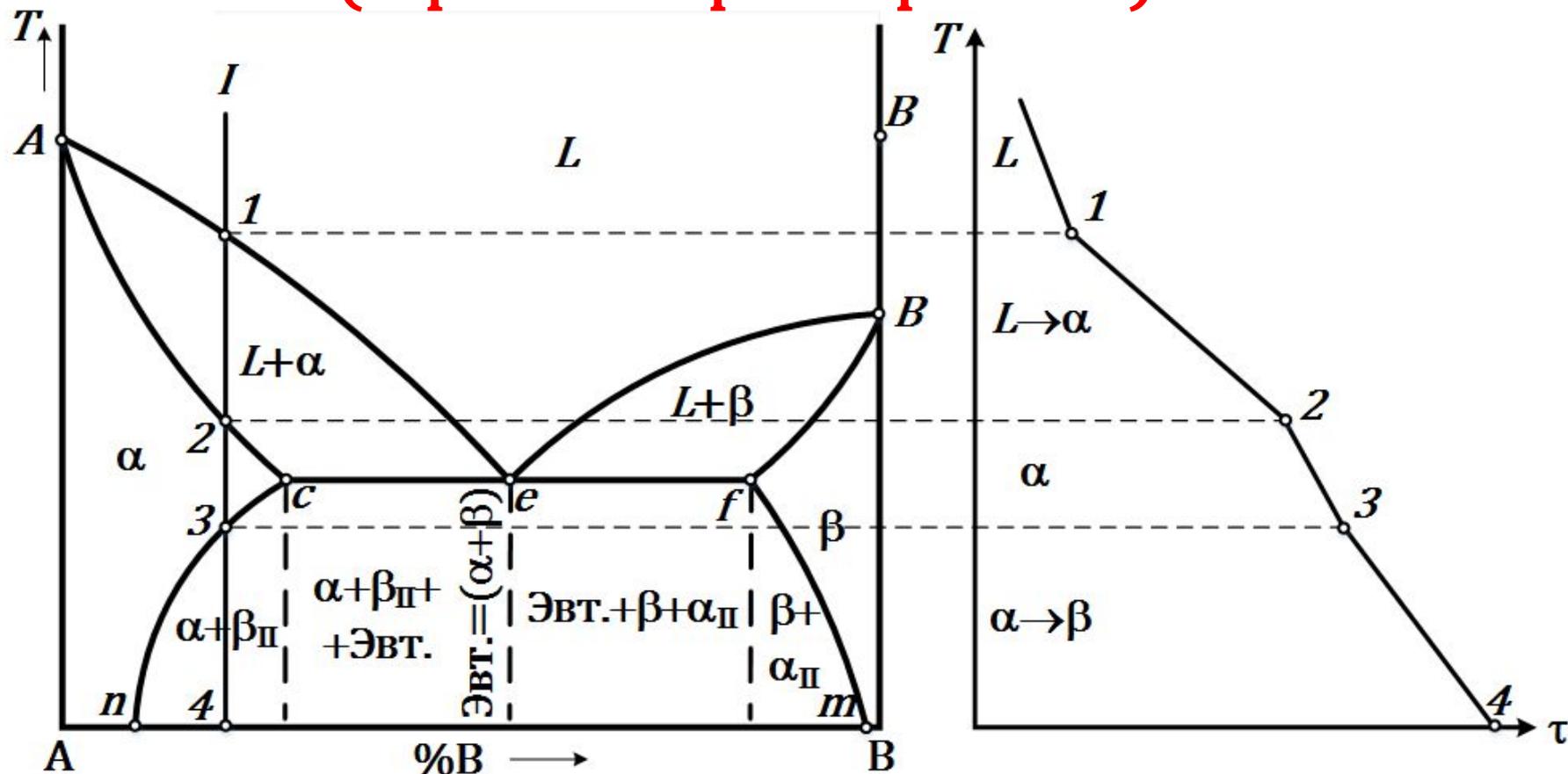
При концентрации компонентов, превышающей предельные значения (на участке  $cef$ ), сплавы кристаллизуются аналогично сплавам механическим смесям.

Сплав с концентрацией компонентов, соответствующей точке  $e$ , является эвтектическим сплавом. Сплав состоит из мелкодисперсных кристаллов твердых растворов  $\alpha$  и  $\beta$ ,

Эвт. = (кр. тв. р-ра  $\alpha$  + кр. тв. р-ра  $\beta$ ).

Кристаллы компонентов в чистом виде ни в одном из сплавов не присутствуют.

# Диаграмма состояния сплавов, испытывающих фазовые превращения в твердом состоянии (переменная растворимость)

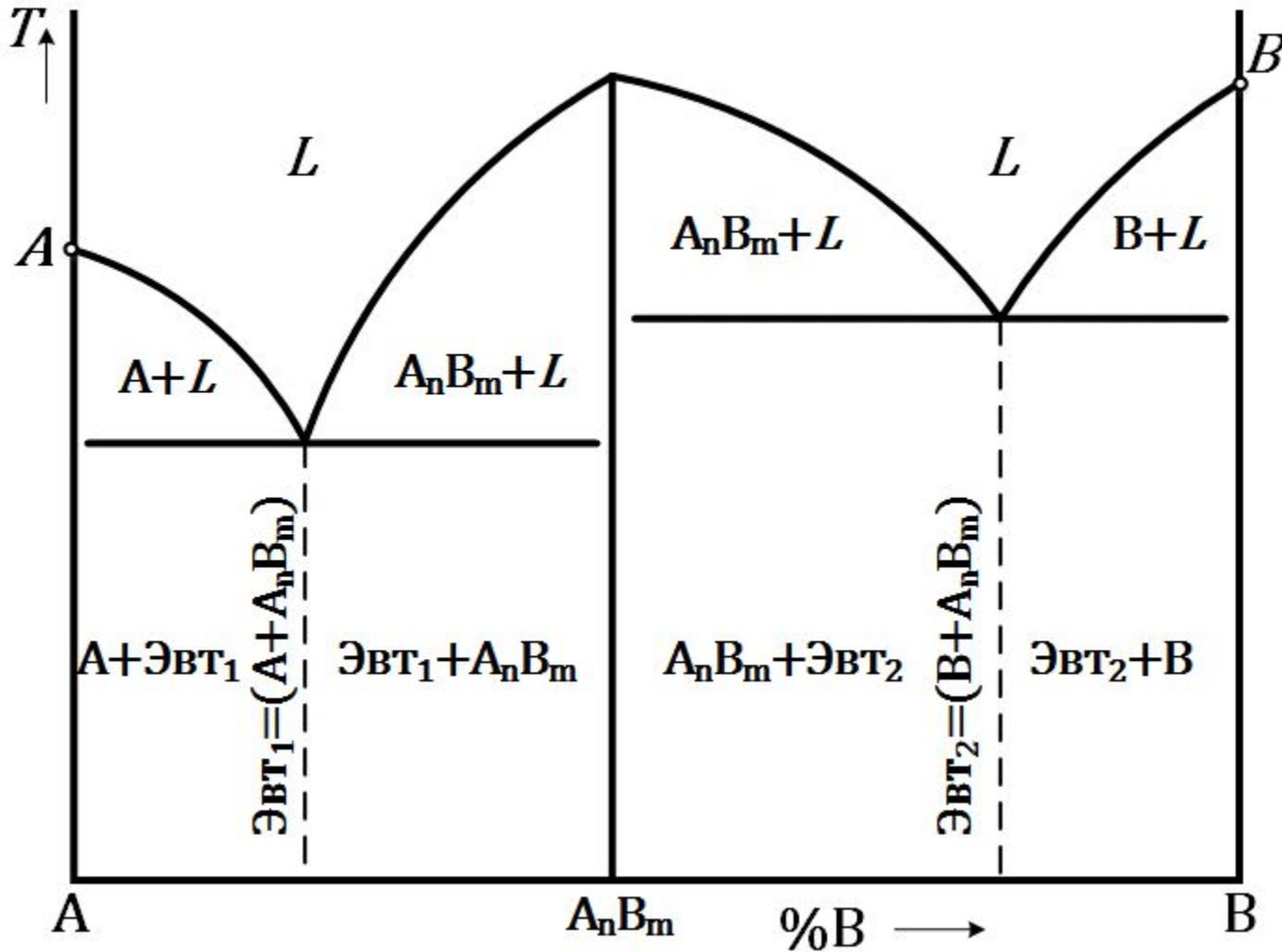


- $sp$  - линия переменной предельной растворимости компонента В в А;
- $fm$  - линия переменной предельной растворимости компонента А в В.

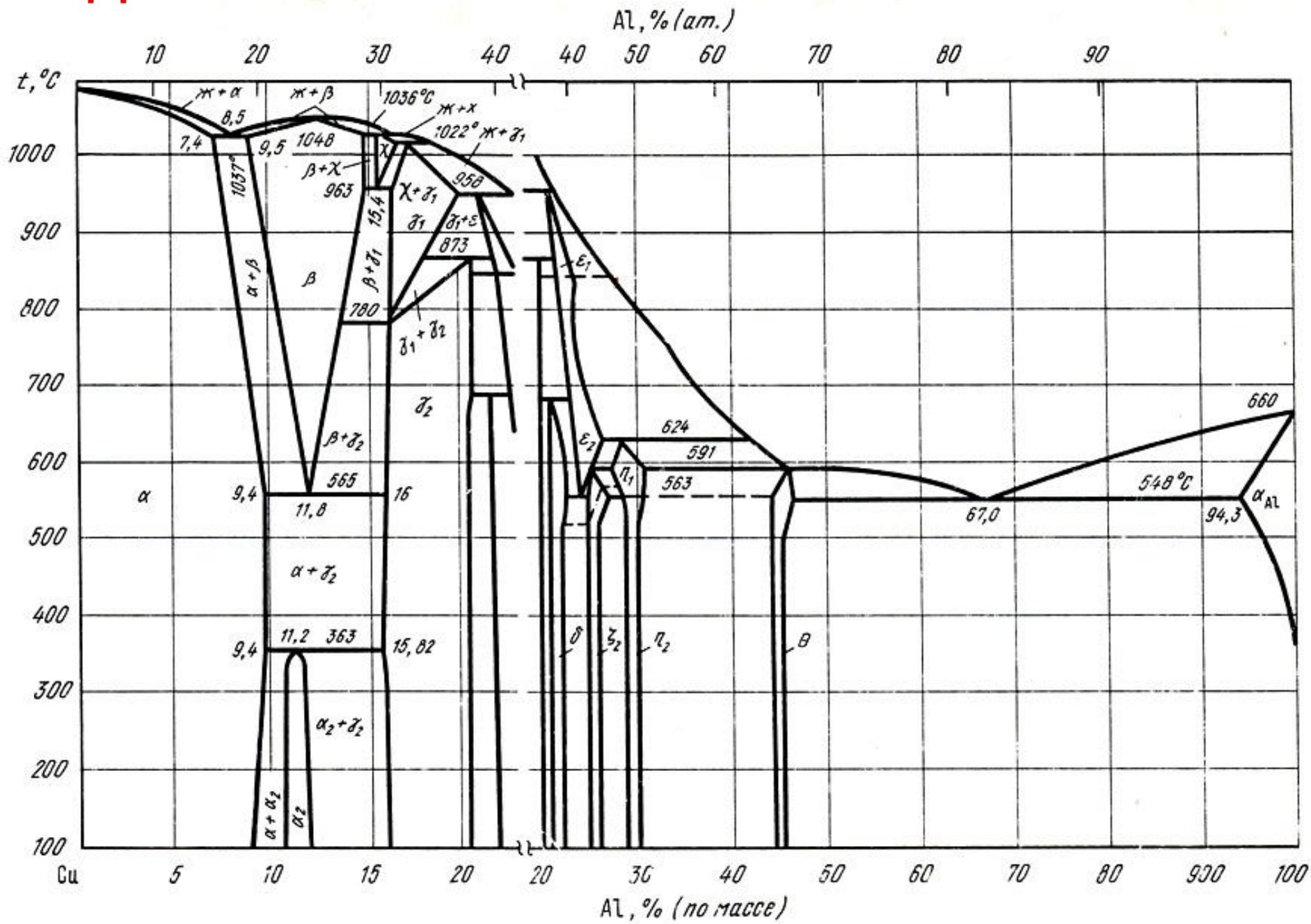
# Процесс кристаллизации сплава I

- До точки 1 охлаждается сплав в жидком состоянии.
- При температуре, соответствующей точке 1, начинают образовываться центры кристаллизации твердого раствора  $\alpha$ .
- На участке 1–2 идет процесс кристаллизации, протекающий при понижающейся температуре.
- При достижении температуры соответствующей точке 2, сплав затвердевает, при дальнейшем понижении температуры охлаждается сплав в твердом состоянии, состоящий из однородных кристаллов твердого раствора  $\alpha$ .
- При достижении температуры, соответствующей точке 3, твердый раствор  $\alpha$  оказывается насыщенным компонентом В, при более низких температурах растворимость второго компонента уменьшается, поэтому из  $\alpha$ -раствора начинает выделяться избыточный компонент в виде кристаллов  $\beta_{II}$ .
- За точкой 3 сплав состоит из двух фаз: кристаллов твердого раствора  $\alpha$  и вторичных кристаллов твердого раствора  $\beta_{II}$ .

# Диаграмма состояния сплавов, компоненты которых образуют химические соединения

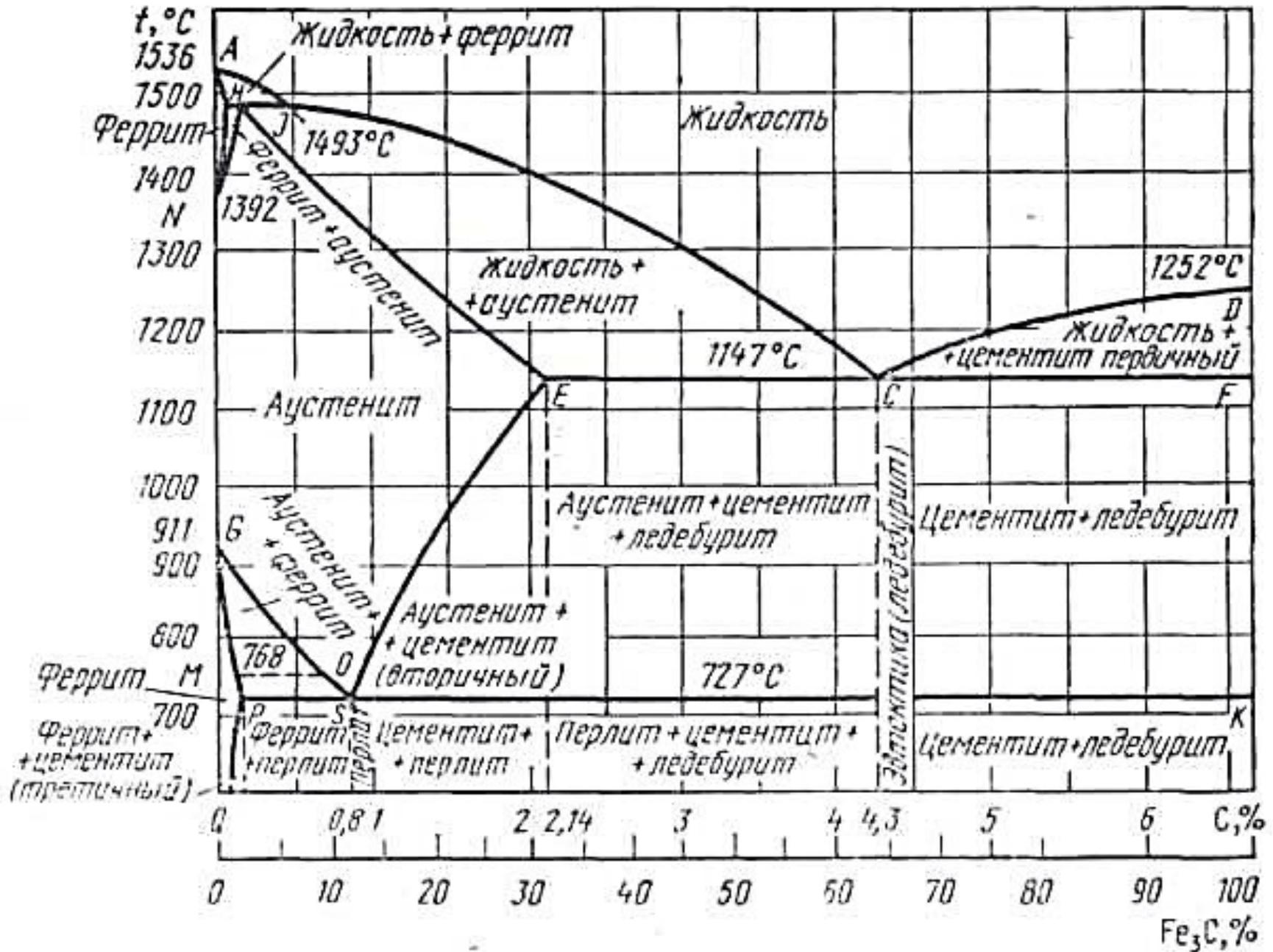


# ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ Cu-Al





# ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ Fe-Fe<sub>3</sub>C



# ЛИНИИ ДИАГРАММЫ СОСТОЯНИЯ Fe-Fe<sub>3</sub>C

*ABCD* – линия начала кристаллизации сплава (**ликвидус**)

*AHNJECF* – линия конца кристаллизации сплава (**солидус**)

*HJB* – линия перитектического превращения

*GS* – линия верхних критических точек

*PS* – ... нижних критических точек

*MO* – линия магнитного превращения

*PSK* – линия окончания распада аустенита

*DFKL* – линия образования цементита Fe<sub>3</sub>C

*ES* – линия переменной растворимости углерода в Fe<sub>γ</sub>

*PQ* – линия переменной растворимости углерода в Fe<sub>α</sub>

# СВОЙСТВА И СТРОЕНИЕ КОМПОНЕНТОВ ДИАГРАММЫ ЖЕЛЕЗО-УГЛЕРОД

**Железо (Fe):**  $T_{\text{пл}} = 1539^{\circ}\text{C}$ ; в твердом состоянии может находиться в двух модификациях:  $\alpha$  ( $\delta$  – высокотемпературная модификация) – решетка ОЦК и  $\gamma$  – решетка ГЦК; при  $768^{\circ}\text{C}$  происходит магнитное превращение; с углеродом железо образует твердые растворы внедрения.

**Цементит (обозначают Ц)** — карбид железа (почти постоянного состава)  $\text{Fe}_3\text{C}$ , содержит 6,69 % С и имеет сложную ромбическую решетку, твёрд (800 НВ) и хрупок, слабо ферромагнитен и теряет ферромагнетизм при  $210^{\circ}\text{C}$ . Температуру плавления цементита трудно определить в связи с его распадом при нагреве. При нагреве лазерным лучом она установлена равной  $1260^{\circ}\text{C}$ . Выделяющийся из жидкости цементит называют первичным, из аустенита — вторичным, из феррита — третичным.

**Графит** — углерод, выделяющийся в железоуглеродистых сплавах в свободном состоянии. Имеет гексагональную кристаллическую решетку. Графит электропроводен, химически стоек, малопрочен, мягок.

# СВОЙСТВА И СТРОЕНИЕ КОМПОНЕНТОВ ДИАГРАММЫ ЖЕЛЕЗО-УГЛЕРОД

**Феррит (обозначают  $\Phi$  или  $\alpha$ )** — твердый раствор внедрения углерода в  $Fe_\alpha$ . Различают низкотемпературный и высокотемпературный феррит. Предельная концентрация углерода в низкотемпературном феррите составляет 0,02 %, в высокотемпературном — 0,1 %. Столь низкая растворимость углерода в  $Fe_\alpha$  обусловлена малым размером межатомных пор в ОЦК решетке. Значительная доля атомов углерода вынуждена размещаться в дефектах (вакансиях, дислокациях). Феррит — мягкая, пластичная фаза со следующими механическими свойствами:  $\sigma_B = 300$  МПа;  $\delta = 40$  %;  $KCU = 2,5$  МДж/м<sup>2</sup>; твердость — 80-100 НВ.

**Аустенит (обозначают  $A$  или  $\gamma$ )** — твердый раствор внедрения углерода в  $Fe_\gamma$ . Он имеет ГЦК решетку, межатомные поры в которой больше, чем в ОЦК решетке, поэтому растворимость углерода в  $Fe_\gamma$  значительно больше и достигает 2,14 %. Аустенит пластичен, но прочнее феррита (160-200 НВ) при 20-25 °С. 77

# СВОЙСТВА И СТРОЕНИЕ КОМПОНЕНТОВ ДИАГРАММЫ ЖЕЛЕЗО-УГЛЕРОД

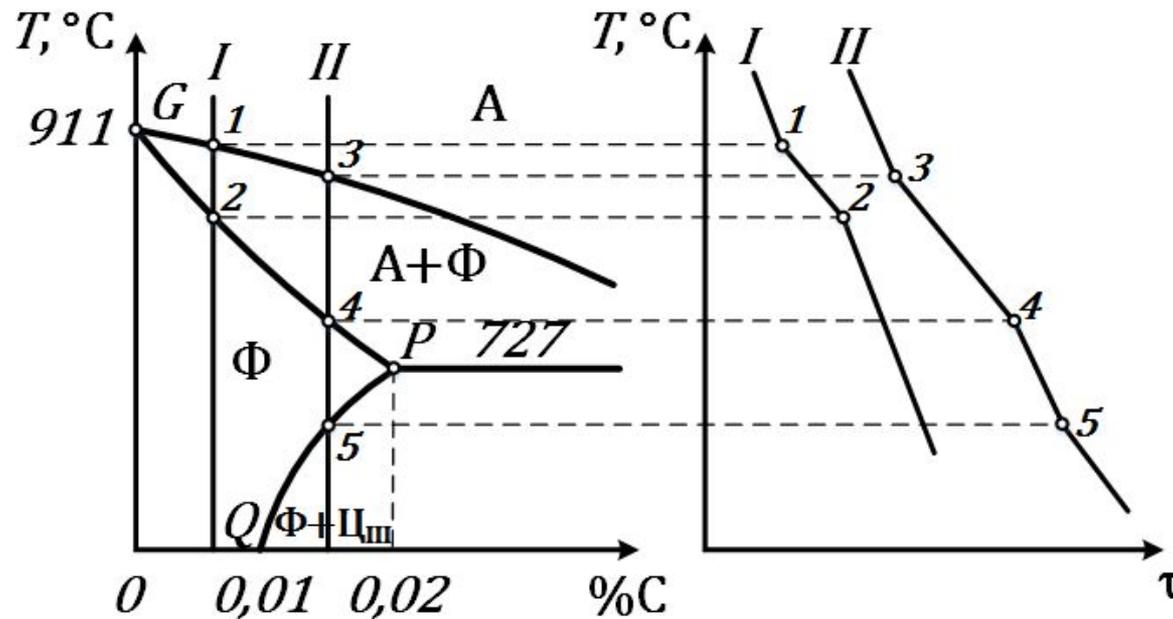
**Перлит (П)** – механическая смесь, состоящая из мелких зерен или пластинок цементита, расположенных в ферритной основе. Перлит – **эвтектоид** ( $\text{П} = (\text{Ф} + \text{Ц})$ ).

**Ледебурит (Л)** – смесь двух фаз ( $\text{А} + \text{Ц}$ ), образующихся при  $1130\text{ }^\circ\text{С}$  в сплавах, содержащих от 2,14 до 6,67 % С, и наблюдается визуально как структурная составляющая железоуглеродистых сплавов, главным образом, чугунов. Ледебурит обладает достаточно высокими прочностью ( $\text{НВ} > 600$ ) и хрупкостью. Ледебурит – **эвтектика** ( $\text{Л} = (\text{А} + \text{Ц})$ ).

# Нонвариантные реакции на диаграмме

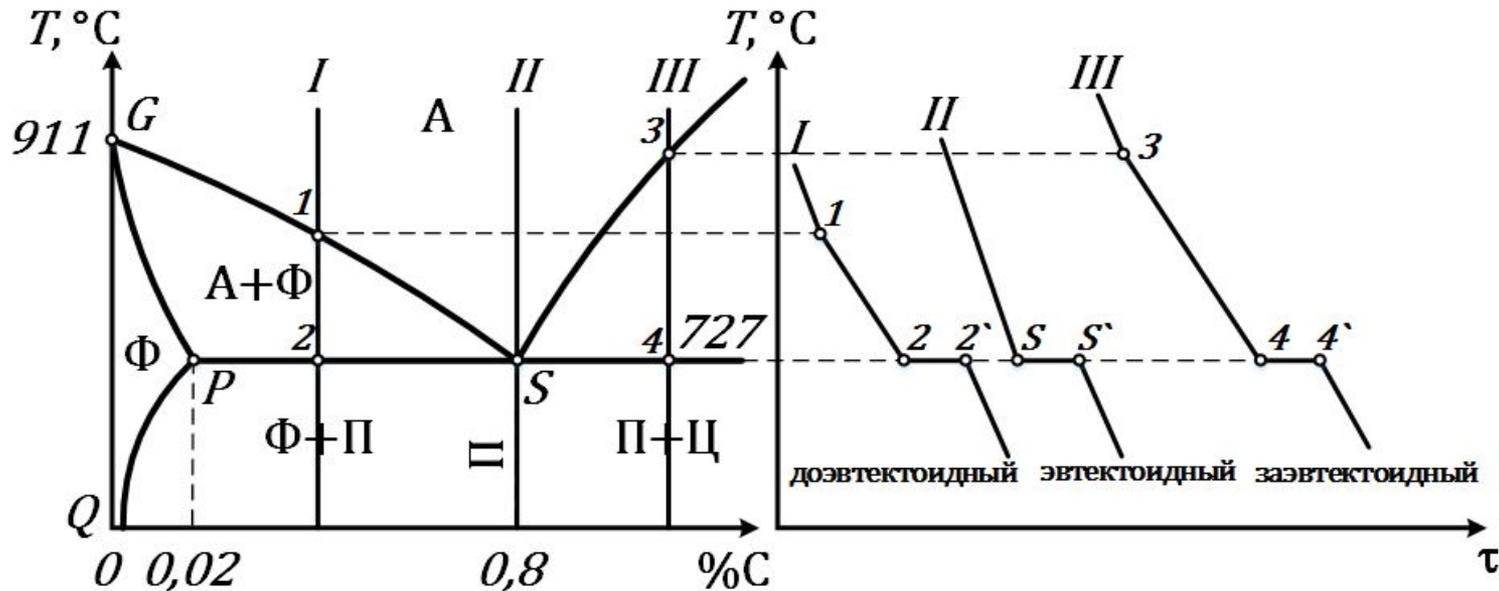
1.  $T=1499^{\circ}\text{C}$  (линия HJB):  $L(B)+\Phi(H)\rightarrow A(J)$  - перетектическая реакция, наблюдается только у сплавов с содержанием углерода от 0,1 % до 0,5%.
2.  $T=1147^{\circ}\text{C}$  (линия ECF):  $L(C)\rightarrow A(H)+\Psi$  - эвтектическая реакция, наблюдается у сплавов с содержанием углерода более 2,14% C, образовавшуюся в результате реакции эвтектическую смесь называют ледебуритом.
3.  $T=727^{\circ}\text{C}$  (линия PSK):  $A(S)\rightarrow\Phi(P)+\Psi$  - эвтектоидная реакция, наблюдается у всех сплавов с содержанием углерода более 0,02%, образовавшуюся в результате реакции эвтектоидную смесь называют перлитом.

# Вторичная кристаллизация весьма малоуглеродистых сплавов



1. **Сплав типа I ( $C < 0,01 \%$ ):** при охлаждении в интервале температур **1-2** происходит превращение  $A \rightarrow \Phi$ ; ниже точки **2** сплав состоит из однородного  $\alpha$ -твердого раствора **феррита ( $\Phi$ )**.
2. **Сплав типа II ( $0,01 < C\% < 0,02$ ):** отличается от сплава I тем, что вертикаль данного сплава пересекает линию  $PQ$  в точке **5**. Ниже точки **5** происходит выделение из сплава высокоуглеродистой фазы – **цементита ( $Ц_{III}$ )**, который называют **третичным цементитом** в отличие от **первичного цементита**, выделяющегося из жидкости, и **вторичного цементита**, выделяющегося из аустенита ( $A$ ).

# Вторичная кристаллизация сталей



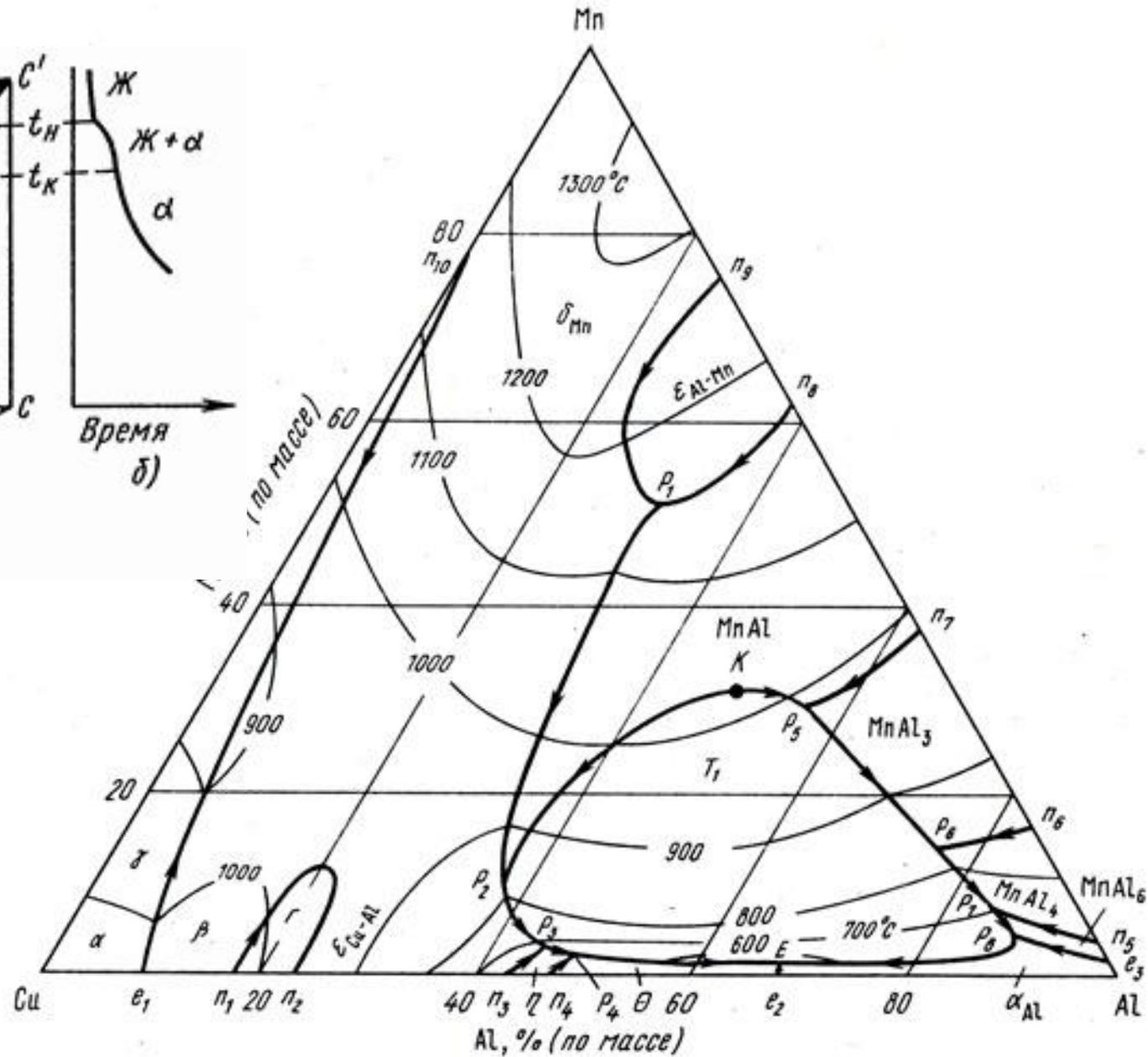
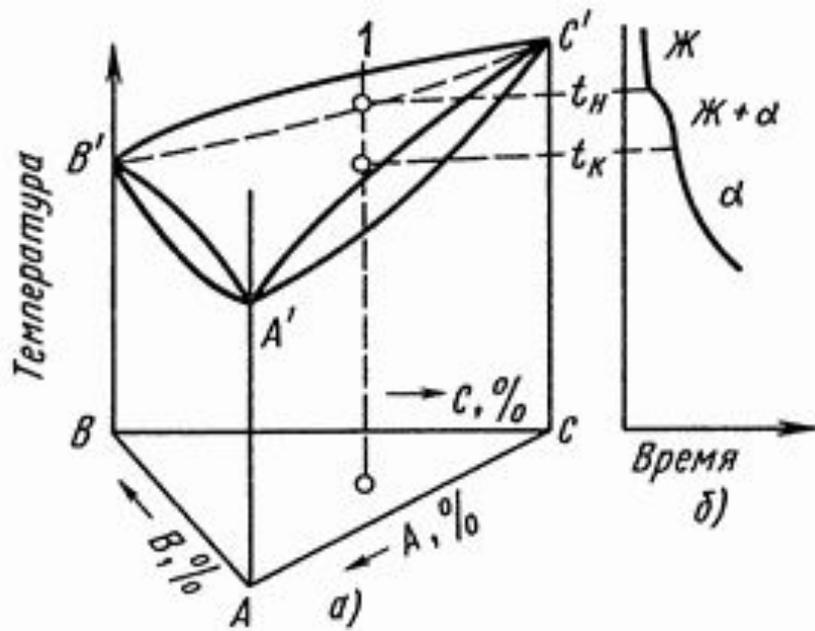
1. **Сплав I (доэвтектоидный):** имеет избыток Fe по сравнению с эвтектоидной концентрацией  $0,8\%C$ ; выделение Ф при охлаждении обогащает А углеродом и при  $727^\circ\text{C}$  (т. 2) происходит эвтектоидная реакция; после окончания превращения структура будет состоять из П и зерен Ф.
2. **Сплав II (эвтектоидный):** в точке S ( $727^\circ\text{C}$ ) происходит эвтектоидная реакция -  $A \rightarrow \Phi + \text{Ц}$ ; образуется перлит (П) – не фаза, а структурная составляющая, представляющая собой чередующиеся пластинки феррита и цементита.
3. **Сплав III (заэвтектоидный):** при охлаждении в интервале 3–4 из А выделяется Ц, при этом А обедняется углеродом и при  $727^\circ\text{C}$  происходит эвтектоидная реакция; в результате получается структура, состоящая из Ц, выделяющегося по границам зерен в виде сетки, и П.

# Преобразования при вторичной кристаллизации в высокоуглеродистых сплавах (чугунах)



1. **Сплав I (доэвтектический):** первичные кристаллы **A** изменяют свою концентрацию при охлаждении от точки **2** до точки **3** от 2,14 до 0,8%с и в точке **3** происходит перлитное превращение; структура такого чугуна ниже 727°С состоит из **перлита, ледебурита** и вторичного **Ц**.
2. **Эвтектический сплав II (4,3%С):** после затвердевания сплав имеет чисто ледебуритную структуру; при охлаждении от 1147°С до 727°С из **A**, входящего в состав эвтектики, выделяется **вторичный Ц**, который обычно структурно не обнаруживается; при 727°С **A** эвтектики имеет концентрацию 4,3%С и происходит перлитное превращение **A**→**Ф+Ц**; следовательно ниже 727°С **ледебурит** – это смесь **перлита и цементита**.
3. **Сплав III (заэвтектический):** первичный **Ц** в заэвтектических чугунах не имеет превращений, поэтому в нем происходят превращения как в эвтектическом сплаве; структура ниже 727°С состоит из **ледебурита и Ц**

# ДИАГРАММЫ СОСТОЯНИЯ ТРОЙНЫХ СИСТЕМ



# КЛАССИФИКАЦИЯ СТАЛЕЙ

1. По химсоставу: углеродистые и легированные (никелевые, хромистые, хромоникелевые и т.д.).
2. По равновесной структуре: доэвтектоидные, эвтектоидные, заэвтектоидные.
3. По качеству (по способу производства и содержанию вредных примесей (S и P)): обыкновенного качества (рядовые), качественные, высококачественные и особовысококачественные;
4. По структуре после охлаждения на воздухе: перлитные, мартенситные, аустенитные и т. д.
5. По назначению: конструкционные инструментальные, стали и сплавы с особыми свойствами.

# Классификация сталей по химическому составу

## Углеродистые стали:

- малоуглеродистые –  $< 0,3\% \text{ C}$ ;
- среднеуглеродистые –  $0,3...0,7\% \text{ C}$ ;
- высокоуглеродистые –  $> 0,7\% \text{ C}$ .

## В легированных сталях (по суммарному процентному содержанию легирующих элементов):

- низколегированные –  $< 2,5\%$ ;
- среднелегированные –  $2,5...10\%$ ;
- высоколегированные –  $> 10\%$ .

Легированной называется сталь, в которой, кроме обычных примесей, содержатся специально вводимые в определенных сочетаниях легирующие элементы (Cr, Ni, Mo, W, V, Al, B, Ti и др.), а также Mn и Si в количествах, превышающих их обычное содержание как технологических примесей (1% и выше). Как правило, лучшие свойства обеспечивает комплексное легирование.

# УГЛЕРОДИСТЫЕ СТАЛИ

- Основной металлический материал промышленности – углеродистая сталь.
- Технологические примеси: марганец, кремний.
- Постоянные примеси: сера, фосфор, кислород, азот, водород.
- Случайные примеси: хром, никель, медь и др.

# Конструкционная углеродистые стали обыкновенного качества общего назначения

## Химический состав

Марка стали	%C	%S ≤	%P ≤
Ст0	≤0,23	0,07	0,055
Ст1	0,06-0,12	0,045	0,055
Ст2	0,09-0,15	0,045	0,055
Ст3	0,14-0,22	0,045	0,055
Ст4	0,18-0,27	0,045	0,055
Ст5	0,28-0,37	0,045	0,055
Ст6	0,38-0,49	0,045	0,055
Ст7	0,50-0,62	0,045	0,055

# Маркировка различных групп углеродистых сталей обыкновенного качества

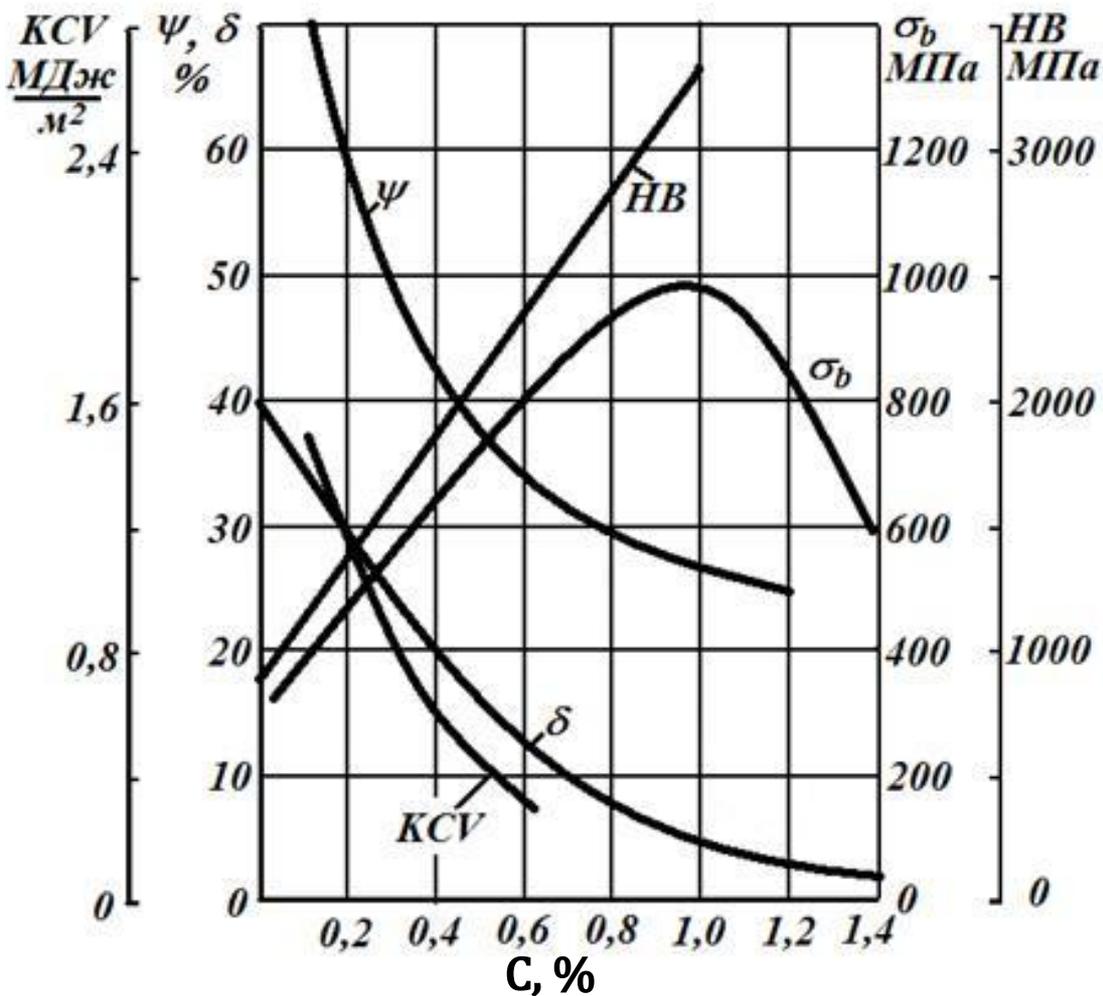
1. **Группа А** – с гарантируемыми механическими свойствами (сталь не подвергается горячей обработке у потребителя): маркируется буквами Ст и цифрами от 1 до 7, являющимися порядковым номером. Например, Ст 3.
2. **Группа Б** – с гарантируемым химическим составом (подвергается горячей обработке у потребителя): маркируется аналогично группе А, но с дополнительными буквами М, К, Б, что характеризует способ производства – мартеновский, конверторный, бессемеровский соответственно. Например, МСт3, БСт4, КСт5.
3. **Группа В** – с гарантируемыми механическими свойствами и химическим составом (подвергается сварке у потребителя) маркируется аналогично группе А, но с добавлением буквы В. Например, ВСт5.

# Маркировка углеродистых сталей обычного качества разных способов раскисления

В зависимости от способа раскисления (с целью удаления кислорода) предлагаемые стали маркируют следующим образом:

1. **Кипящая сталь** – раскисленная только марганцем, содержит в марке буквы **кп**. Например, **Ст1кп**. Кипящие стали имеют наиболее низкое качество.
2. **Спокойная сталь** – раскисленная марганцем, кремнием и алюминием, содержит в марке буквы **сп**. Например, **ВСт3сп**. Спокойные стали имеют наиболее высокое качество.
3. **Полуспокойная сталь** – раскисленная марганцем и алюминием, содержит в марке буквы **пс**. Например, **Ст4пс**. Промежуточный вариант качества между кипящей и спокойной сталью.

# ВЛИЯНИЕ УГЛЕРОДА НА СВОЙСТВА СТАЛЕЙ



$\sigma_b$  – временное сопротивление разрыву;

HB – твердость по Бринелю;

KCV – ударная вязкость (характеристика надежности);

$\delta$  – относительное удлинение;

$\psi$  – относительное сужение

**Увеличение содержания углерода приводит к повышению прочности и снижению пластичности стали.**

# ВЛИЯНИЕ ПОСТОЯННЫХ ПРИМЕСЕЙ НА СВОЙСТВА СТАЛИ

- **Марганец** – вводится в любую сталь для раскисления, поэтому его влияние на сталь различного состава остается примерно одинаковым; оказывает положительное воздействие на свойства стали (прежде всего повышает прочность).
- **Кремний** – вводится в сталь для раскисления, структурно не обнаруживается.
- **Фосфор** – попадает в сталь из руды, топлива и флюсов; вызывает **хладноломкость стали** (склонность к хрупкому разрушению при понижении температуры); облегчает обрабатываемость стали резанием (в автоматных сталях содержание фосфора до 0,15%).
- **Сера** – попадает в сталь из руды и печных газов; вызывает явление **красноломкости стали** (охрупчивание стали при температуре красного каления  $\approx 800^\circ\text{C}$ ); облегчает обрабатываемость стали резанием (в автоматных сталях содержание серы до 0,3%).
- **Газы** – содержание в стали зависит от способа производства; при большом количестве **водорода** могут образоваться опасные флокены; **кислород** и **азот** образуют неметаллические включения (соответственно оксиды и нитриды).

# Применение конструкционных углеродистых сталей обыкновенного качества

Марка стали	Применение
<b>Ст0;</b> <b>Ст1</b>	Второстепенные элементы конструкций и неответственные детали, : настилы, арматура, шайбы, перила, кожухи и т. д.
<b>Ст2</b>	Неответственные детали, требующие повышенной пластичности, малонагруженные элементы сварных конструкций, работающие при постоянных нагрузках и <b>положительных температурах</b> .
<b>Ст3</b>	<b>КП</b> – малонагруженные элементы <b>сварных</b> конструкций, работающие в интервале температур Т°С от -10 до +400°С; <b>СП</b> – фасонный и листовой прокат – <b>несущие элементы сварных</b> конструкций, работающие при переменных нагрузках в интервале температур от -40 до +425°С
<b>Ст4</b>	<b>ПС</b> – сварные, клепаные, болтовые конструкции повышенной прочности в виде сортового проката, а также для малонагруженных валов, осей, втулок и др.
<b>Ст5</b>	<b>ПС, СП</b> - детали клепаных конструкций, <b>болты, гайки</b> , втулки, упоры, штыри, пальцы и т.д., работающие в интервале температур от 0 до +425°С.
<b>Ст6,</b> <b>Ст7</b>	<b>ПС, СП</b> – детали повышенной прочности – оси, валы, пальцы, поршни, <b>шпонки</b> и т. д.

# КОНСТРУКЦИОННЫЕ УГЛЕРОДИСТЫЕ КАЧЕСТВЕННЫЕ СТАЛИ ОБЩЕГО НАЗНАЧЕНИЯ

**08; 10; 15; 20; 25; 30; 35; 40; 45; 50; 55; 60**

Цифры в обозначении марки стали показывают среднее содержание углерода в сотых долях процента.

Химический состав,  
%

Марка стали	C	Mn	Si	P ≤	S ≤	Cr ≤	Ni ≤	Cu ≤	As ≤
ВСт5сп	0,28-0,37	0,50-0,80	0,15-0,35	0,04	0,05	0,3	0,3	0,3	0,08
Сталь 30	0,27-0,35	0,50-0,80	0,17-0,37	0,035	0,04	0,25	0,25	0,25	0,08

# Применение конструкционных углеродистых качественных сталей общего назначения

Марка стали	Применение
Сталь 15	Заменитель: стали 10, 20. Болты, винты, крюки и др. детали, к которым предъявляются требования высокой пластичности и работающие при температуре от -40 до 450°С. После ХТО – кулачки, гайки и др. детали с высокой поверхностной твердостью.
Сталь 30	Заменитель: стали 25 и 35. Рычаги, валы, соединительные муфты и др. детали невысокой прочности.
Сталь 40	Заменитель: стали 35 и 45. После ТО: коленчатые валы, шатуны, зубчатые колеса, оси и др. После ТВЧ: средних размеров валики, зубчатые колеса и др.
Сталь 50	Заменитель: стали 45 и 55. После ТО: зубчатые колеса, прокатные валки, тяжело нагруженные валы и оси, мало нагруженные пружины и рессоры и т.д.
Сталь 60	Заменитель: сталь 55. Цельнокатаные колеса вагонов, рабочие валки листовых станов для горячей прокатки, диски сцепления и др, т.е. детали с высокой прочностью и износостойкостью.

# УГЛЕРОДИСТЫЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СТАЛИ

У7; У7А; У8; У8А; У9; У9А; У10; У10А; У12; У12А

Цифра в марке – содержание С в десятых долях %.

Марка стали	C%	Mn%	Si%	S% ≤	P% ≤	Cr% ≤	Ni% ≤	Cu% ≤
У7А	0,66-0,73	0,17-0,28	0,17-0,33	0,018	0,025	0,20	0,20	0,20
У7	0,66-0,73	0,17-0,38	0,17-0,33	0,028	0,030	0,20	0,25	0,25

## Применение:

- инструмент, работающий в условиях, не вызывающих разогрев рабочей кромки – зубила, молотки, ножницы по металлу... (У7);
- фрезы, пилы продольные и дисковые, отвертки, стамески... (У8);
- слесарно-монтажный инструмент... (У9);
- метчики ручные, матрицы для холодной штамповки... (У10);
- метчики машинные, измерительный инструмент простой формы... (У12).

*Твердость углеродистых инструментальных сталей резко уменьшается при нагреве выше 200°С.*

# БЫСТРОРЕЖУЩИЕ СТАЛИ

- Стали, предназначенные для изготовления режущего инструмента, работающего при высоких скоростях резания, должны обладать горячей твердостью и **красностойкостью** (устойчивым сохранением твердости в нагретом состоянии при 500-600°C). **Красностойкость** создается легированием стали элементами, образующими специальные карбиды, которые не растворяются до высоких температур.
- **Износостойкость** режущего инструмента в первом приближении характеризуется твердостью в нагретом состоянии. Быстрорежущие стали – износостойкий материал.
- Буква Р в марке стали от слова рапид (скорость).

Марка стали	C%	Cr%	W%	V%	Mo%	Вид карбидной фазы
Р18	0,7	4	18	1	-	M <sub>6</sub> C
Р9	0,9	4	9	2	-	M <sub>6</sub> C; MC
Р6М5	0,9	4	6	2	5	M <sub>6</sub> C; MC
У7	0,7					Fe <sub>3</sub> C

# КОНСТРУКЦИОННЫЕ ЛЕГИРОВАННЫЕ СТАЛИ.

## СИСТЕМА МАРКИРОВКИ ПО ГОСТУ

1. Обозначения состоят из цифр и букв, указывающих на примерный состав стали.
2. Каждый легирующий элемент обозначается буквой. Например: Н – никель, Х – хром, М – молибден, Г – марганец, С – кремний, Ю – алюминий и т.д.
3. Первые цифры в обозначении показывают среднее содержание углерода **в сотых долях процента** (у высокоуглеродистых инструментальных сталей в десятых долях процента).
4. Цифры, идущие после буквы, указывают на примерное содержание данного легирующего элемента **в процентах** (при содержании элемента менее 1% цифра отсутствует).
5. Примеры: 30ХМА; 10ГН2МФА; 20Х2Н4; 30ГСЛ и т.д.
6. **Буква А** в конце марки стали показывает, что в ней ограничено содержание **серы** и **фосфора**, а в середине марки – азот; **буква Л** в конце марки стали – литейная сталь (точнее – с улучшенными литейными свойствами).

# Примеры применения конструкционных легированных сталей

Стали	Применение
30X; 35X; 35ХРА	Оси, рычаги, болты, гайки и др. некрупные изделия.
40X; 45X;38ХА; 40ХН; 50X	Оси, валы, валы-шестерни, коленчатые и кулачковые валы, зубчатые колеса и др улучшаемые детали повышенной прочности.
30ХМ; 30ХМА; 35ХМ; 40ХН; 30ХМ; 30ХГСА	Валы, шестерни; шпильки; фланцы и др. ответственные детали, работающие при высоких нагрузках и при $T = 450 - 500^{\circ}\text{C}$
30ХН2МФА; 30ХН2ВФА	Валы, цельнокованные роторы, детали редукторов, шпильки и др. детали турбин и компрессорных машин, работающие при повышенных температурах.
ШХ15; ШХ9; ШХ12	Шарики $d \leq 150$ мм, ролики $d \leq 23$ мм, кольца подшипников с толщиной стенки до 14 мм, ролики толкателей и др. детали от которых требуется высокая твердость, износостойкость и контактная прочность. В стали ШХ15: С – 1%; Мn – 0,3%; Si – 0,25; <b>Cr – 1,5%.</b>
70; 65Г; 60С2А; 9ХС;60С2; 55С2;50ХФА	<b>Пружины, рессоры</b> , фрикционные диски и др. детали, к которым предъявляются требования повышенной износостойкости и работающие без ударных нагрузок.

# ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА СВОЙСТВА

## СТАЛИ

Элемент	Величина зерна	Прокаливаемость	Температура отжига, нормализации, закалки	Ударная вязкость и прочность	Пластичность	Сопротивление окислению при высоких температурах	Прочность при высоких температурах
Ni	Мало влияет	Увеличивает	Понижает	Повышает	Несколько повышает	Несколько повышает	Мало влияет
Cu	Мало влияет	Несколько увеличивает	Несколько повышает	повышает	Повышает при содержании до 0,5 %, затем понижается	Слабо влияет	Мало влияет
Al	Уменьшает при содержании до 0,1 %	Мало влияет	Заметно повышает	Повышает	Повышает при низких содержаниях	Увеличивает	Мало влияет
Co	Мало влияет	Уменьшает	Мало влияет	Слабо повышает	Понижает	Несколько повышает	Незначительно повышает
Si	Уменьшает при низком содержании и увеличивает при содержании 2 %	Увеличивает	Повышает	Повышает	Понижает	Увеличивает	Несколько повышает
Mn	Несколько увеличивает	Увеличивает	Понижает	Повышает	Не снижает до 1,5 % в малоуглеродистой стали. Снижает в средне- и высокоуглеродистой стали	Мало влияет	Мало влияет
Cr	Уменьшает	Увеличивает	Повышает	Повышает	Не снижает до 1,5 %	Увеличивает	Повышает
V	Значительно уменьшает	Сильно увеличивает	Повышает	Повышает	Повышает	Слабо влияет	Мало влияет
Mo	Уменьшает	Сильно увеличивает	Повышает	Повышает	Повышает при содержании до 0,6 %	Мало влияет	Повышает
W	Уменьшает	Увеличивает	Повышает	Повышает	Несколько повышает при содержании < 1 %	Мало влияет	Значительно повышает
Nb	Уменьшает	Увеличивает	Повышает	Повышает для низколегированной стали	Несколько повышает	Заметно увеличивает	Повышает
Ti	Сильно уменьшает	Сильно увеличивает при малых содержаниях. Уменьшает при больших содержаниях	Значительно повышает	Несколько повышает	Несколько повышает	Слабо повышает	Мало влияет
Zr	Несколько уменьшает, делает равномерным	Несколько увеличивает	Мало влияет	Мало влияет	Повышает в автоматной стали даже при содержании серы до 0,32 % не влияет при отсутствии серы	Не влияет	Мало влияет

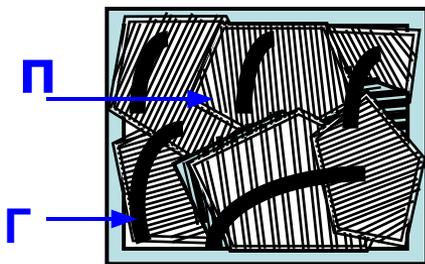
# ЧУГУНЫ

**Белый чугун** – название получил по матово-белому цвету излома;

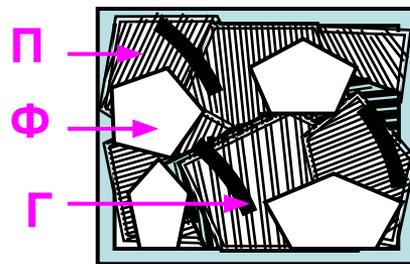
- структура в не нагретом состоянии:  $\text{Ц} + \text{П}(\text{Ф} + \text{Г})$ ; т.е. весь углерод находится в форме цементита;
- свойства: высокая твердость и износостойкость, хрупкость, практически не поддается обработке режущим инструментом;
- марки: ИЧХ3, ИЧХ5, ИЧХ15... (износостойкий хромистый чугун с содержанием хрома 3%, 5%, 15% соответственно...);
- применение: детали, работающие в условиях интенсивного износа без ударных нагрузок (например, линейки направляющих, детали шаровых мельниц).

# СЕРЫЕ ЧУГУНЫ

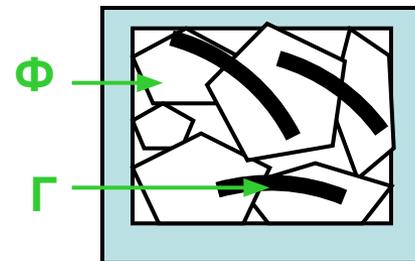
- Излом имеет серый цвет. Обладает хорошими литейными свойствами. В структуре присутствует графит, количество, форма и размеры которого изменяются в широких пределах.
- По строению металлической основы серые чугуны разделяют на: серый перлитный чугун (1); серый феррито-перлитный чугун (2); серый ферритный чугун (3). В **обычном сером чугуне** графит имеет пластинчатую форму (1–3).



1



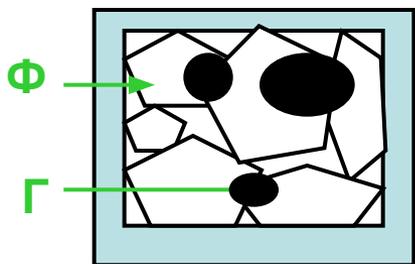
2



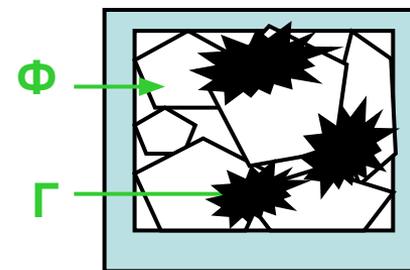
3

# СЕРЫЕ ЧУГУНЫ

- В **высокопрочном сером чугуна** графит находится в форме шаровидного графита, который принимает такую форму благодаря присадке магния или церия (модификаторов) (1). В **ковком сером чугуна** углерод находится в форме хлопьевидного графита (углерода отжига) (2), который образуется в процессе отжига белого чугуна.



1



2

# МАРКИ СЕРЫХ ЧУГУНОВ

$\sigma_B$  - предел прочности при растяжении;  $\delta\%$  - относительное удлинение после разрыва;  
 $\sigma_H$  — предел прочности при изгибе.

Вид чугуна	Примеры маркировки	Свойства	Применение
Обычный серый	СЧ12-28 СЧ18-36	$\sigma_B = 12 \text{ кгс/мм}^2 = 120 \text{ МПа}$ $\sigma_H = 28 \text{ кгс/мм}^2 = 280 \text{ МПа}$ $\sigma_B = 18 \text{ кгс/мм}^2; \sigma_H = 36 \text{ кгс/мм}^2$	Станины; корпуса редукторов; тракторные отливки, поршневые кольца и др.
Высокопрочный чугун	ВЧ50-1,5 ВЧ45-5	$\sigma_B = 50 \text{ кгс/мм}^2 = 500 \text{ МПа}$ $\delta\% = 1,5\%$ $\sigma_B = 45 \text{ кгс/мм}^2; \delta\% = 5\%$	Коленчатые валы; арматура тоннелей метро; канализационные трубы; и др.
Ковкий чугун	КЧ35-10 КЧ45-6	$\sigma_B = 35 \text{ кгс/мм}^2 = 350 \text{ МПа}$ $\delta\% = 10\%$ $\sigma_B = 45 \text{ кгс/мм}^2; \delta\% = 6\%$	Литые детали машин, не испытывающие значительных растягивающих и ударных нагрузок.

*Килограмм-сила на квадратный миллиметр (кгс/мм<sup>2</sup>) — внесистемная единица измерения давления, механического напряжения и модуля Юнга (модуля упругости), равная давлению (механическому напряжению), вызываемому силой, равной одному килограмму, равномерно распределённой по перпендикулярной к ней поверхности площадью один квадратный миллиметр.*

$$1 \text{ кгс/мм}^2 = 9806650 \text{ Па}$$

# СПЛАВЫ МЕДИ. ЛАТУНИ

- Латунь – сплавы меди с цинком – при содержании цинка до 45%.

## Свойства латуней:

- Высокая пластичность (достигает максимального значения при 30% Zn). Латунь легко поддается пластической деформации.
- Литейные свойства: малая склонность к ликвации; хорошая жидкотекучесть; склонность к образованию концентрированной усадочной раковины.
- Механические свойства: невысокая прочность –  $\sigma_{\text{в}} = 300 - 350$  МПа при  $\delta\% = 40\% - 20\%$ .

## Марки латуней:

- Двойные латуни: Л62 (62%Cu; 38% Zn) Л68; Л70; в том числе ювелирные латуни (томпаки): Л80; Л85; Л96.
- Специальные латуни: ЛС59-1 – автоматная латунь (59%Cu; 1% Pb; 40% Zn); морская латунь – ЛО60-1 (60%Cu; 1%Sn; 39% Zn); латунь с повышенной прочностью – ЛАН59-3-2 (59%Cu; 3%Al; 2%Ni; 36%Zn).

# СПЛАВЫ МЕДИ. БРОНЗЫ

- **Оловянистые бронзы** – сплавы меди с оловом.

## **Свойства оловянистых бронз:**

- Бронзы, содержащие более 5% – 6% Sn обладают низкой пластичностью, их не куят и не прокатывают, а применяют в литом виде.
- Высокие литейные свойства бронз определяются прежде всего малой усадкой (менее 1%) при довольно низкой жидкотекучести.
- Бронзы обеспечивают высокую стойкость против истирания; бронза с 10% олова - наилучший антифрикционный материал.
- Высокая химическая стойкость.

## **Применение:**

- Отливки сложной формы, в т.ч. художественное литье.
- Вкладыши подшипников качения.
- Арматура (паровая, водяная и др.)

# СПЛАВЫ МЕДИ. БРОНЗЫ

- Сплавы меди с алюминием, кремнием, бериллием и др. элементами также называют **бронзами: алюминиевыми, кремнистыми, бериллиевыми и т.д.**
- Эти бронзы не имеют такой низкой усадки как оловянистая бронза, но превосходят ее по механическим свойствам (алюминиевая, кремнистая), по химической стойкости (алюминиевая), по жидкотекучести (кремнистая), по твердости и упругости (бериллиевая).

## Марки бронз

<b>Бр</b> О10	90%Cu; 10%Sn
<b>Бр</b> ОЦСН 3-7-5-1	84%Cu; 3%Sn; 7%Zn; 5%Pb; 1%Ni
<b>Бр</b> <b>АЖН</b> 10-4-4	82%Cu; 10%Al; 4%Fe; 4%Ni

# МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Аспекты выбора материалов для изготовления деталей машин и механизмов:

## **1. Механические (конструкционные) свойства материалов**

(твёрдость, прочность, пластичность, ударная вязкость и др.).

**2. Технологические свойства материалов.** Это часть общих физико-химических свойств, по которым на основании практического опыта проектируют и реализуют процесс получения узлов и деталей машин с наилучшими служебными свойствами. К числу важнейших относятся: свариваемость, паяемость, упрочняемость, обрабатываемость резанием, литейные свойства и технологическая деформируемость.

**3. Экономические параметры,** связанные с изготовлением деталей.

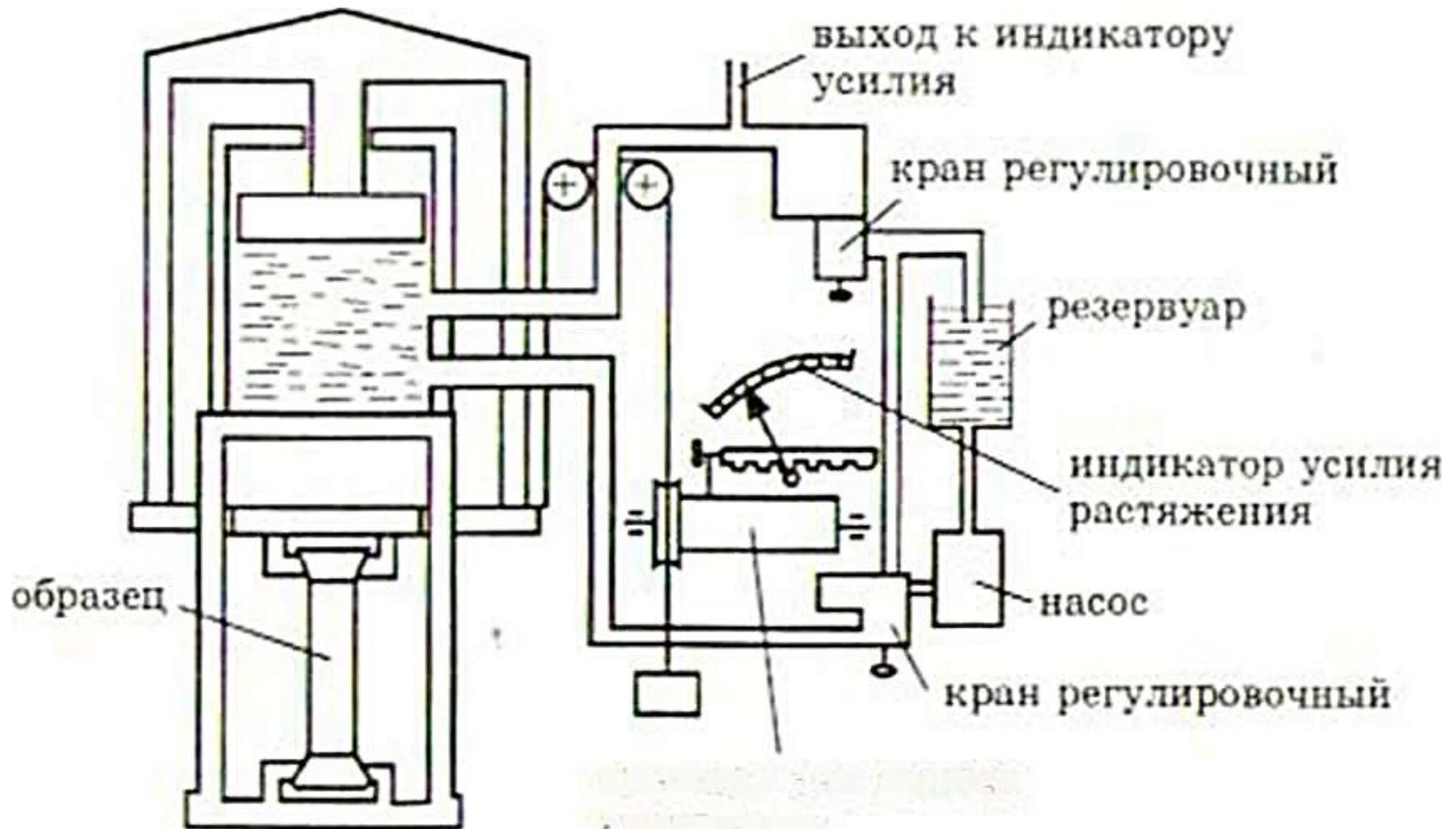
# МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ И МЕТОДЫ ИХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

- Способность материала в конструкции сопротивляться внешним воздействиям, (**т.е. свойства материала**), **принято оценивать механическими характеристиками.** Один и тот же материал при различных внешних условиях (температура, скорость нагружения и т.д.) может иметь различные механические свойства.
- Количественная оценка механических свойств материалов производится путем испытаний образцов в специальных испытательных машинах при определенных условиях. Размеры образцов и методики проведения испытаний стандартизованы.

# МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

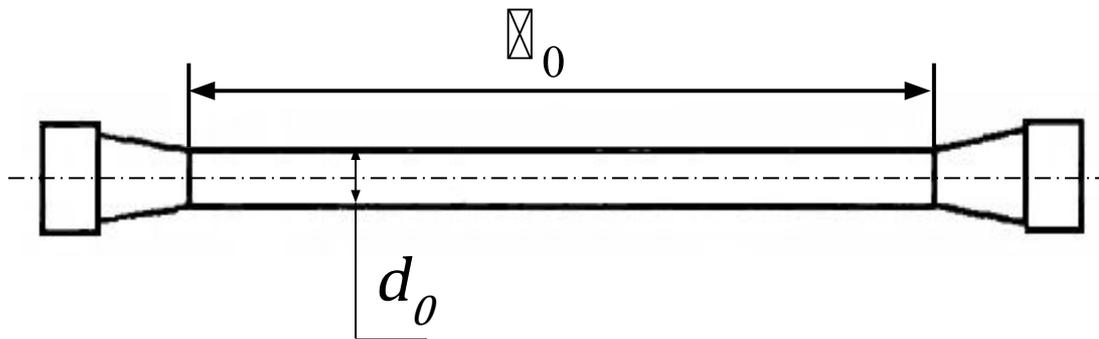
- **Твердость** характеризуется способностью металла противостоять проникновению в него другого, более твердого тела.
- **Пределом прочности** при растяжении  $\sigma_b$  (кгс/мм<sup>2</sup>) называют величину, численно равную наибольшей нагрузке, отмеченной во время испытания образца на растяжение, разделенной на площадь первоначального поперечного сечения образца.
- **Относительным удлинением** при разрыве  $\delta$  называют остающееся приращение длины образца, отнесенное к первоначальной расчетной длине.
- **Относительным сужением** при разрыве  $\psi$  называется уменьшение поперечного сечения образца в месте разрыва, выраженное в процентах от первоначального сечения.
- **Пределом текучести (физический)  $\sigma_t$**  (кгс/мм<sup>2</sup>) называется напряжение, при котором, несмотря на деформацию образца, указатель нагрузки на разрывной машине остается неподвижным или указывает ее падение. В случае отсутствия явно выраженной текучести применяется понятие условного предела текучести при пластической деформации 0,2%— $\sigma_{0,2}$ , при котором впервые появляется остаточное удлинение 0,2%.
- **Ударной вязкостью** (кгс/мм<sup>2</sup>) называется работа, затраченная на разрушение образца ударом, отнесенная к 1 см<sup>2</sup> площади образца в месте излома (**KCV, KCU, KCT** – третий символ показывает вид надреза: острый (V), с радиусом закругления (U), трещина (T)).

# Испытание на растяжение



# Испытание на растяжение

Образец до испытаний



Относительное

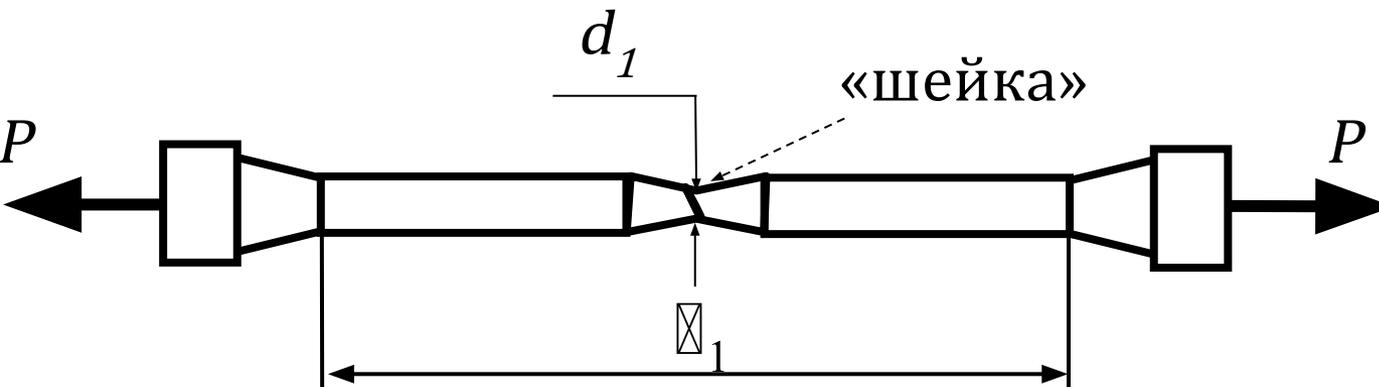
- удлинение

$$\delta = \frac{\lambda_1 - \lambda_0}{\lambda_0} \cdot 100\%$$

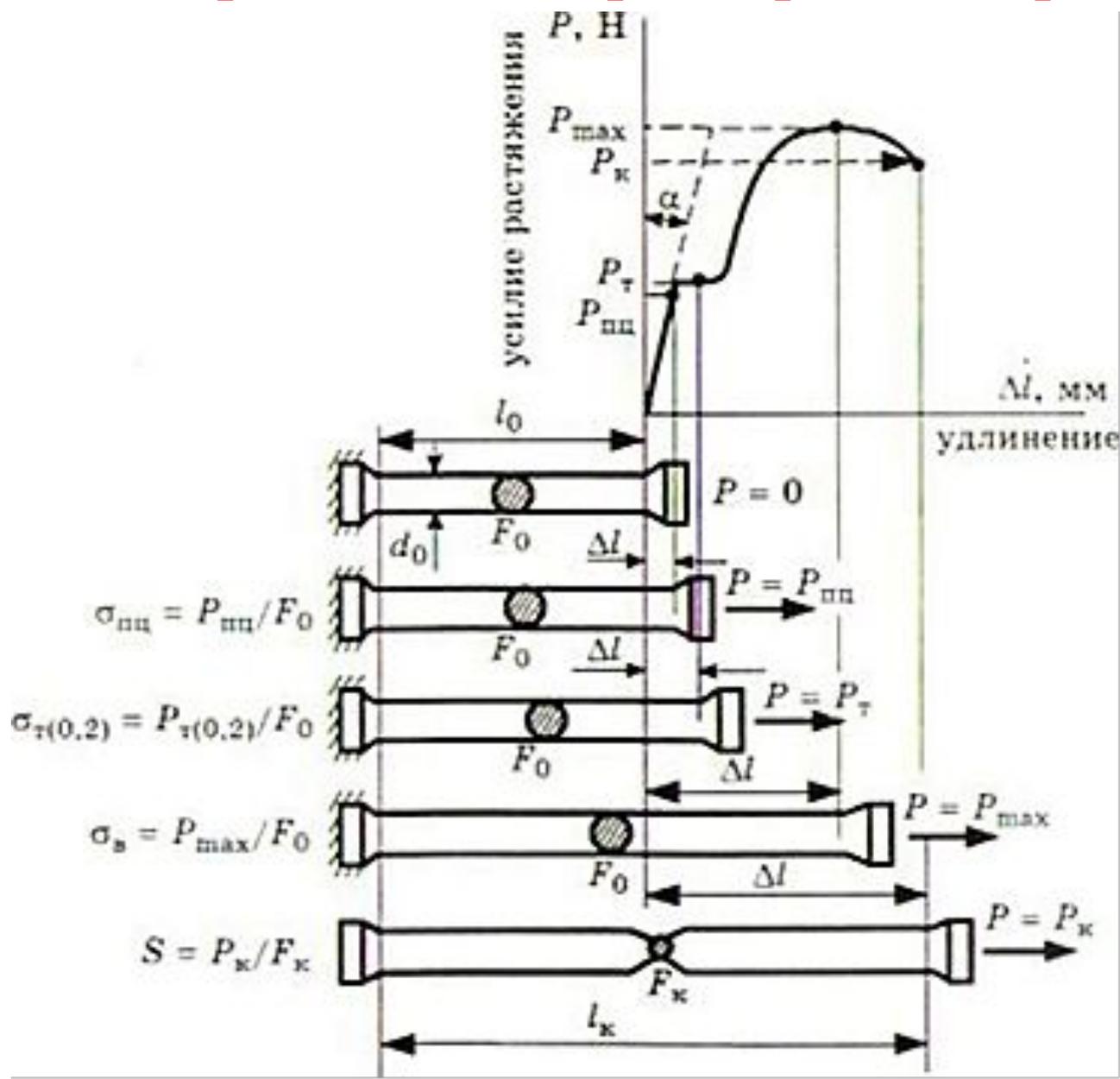
- сужение

$$\psi = \frac{F_0 - F_1}{F_0} \cdot 100\%$$

Разрушение образца из  
пластичного материала

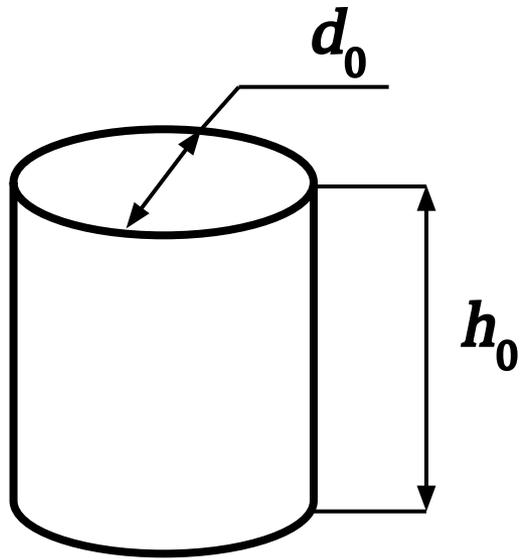


# Диаграмма растяжения низкоуглеродистой стали и схемы определения характеристик прочности



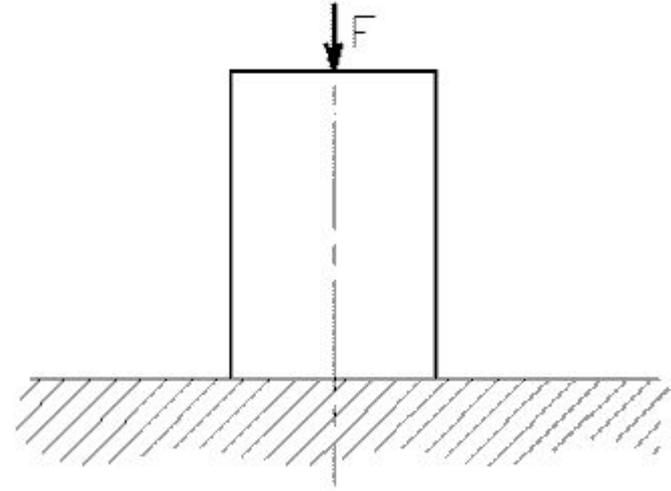
# Испытание на сжатие

Образец для  
испытаний

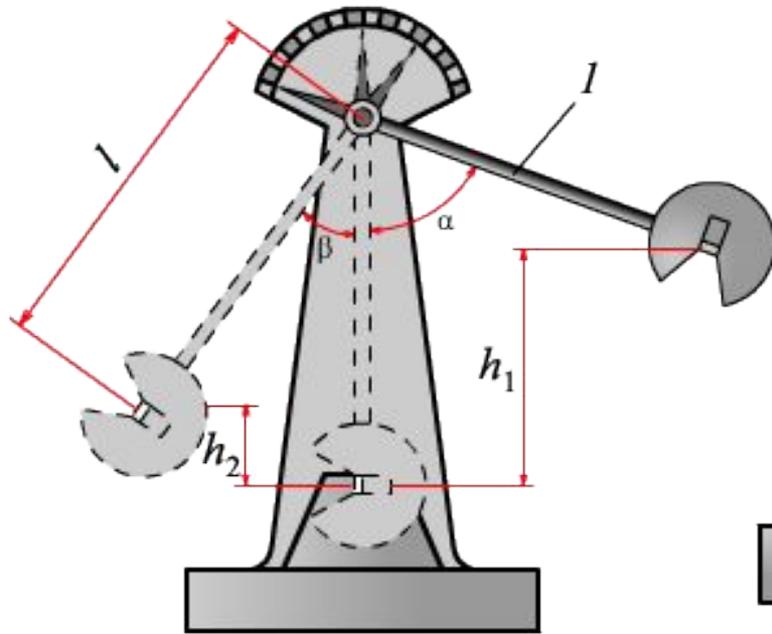


$$\frac{h_0}{d_0} = 1 \div 3$$

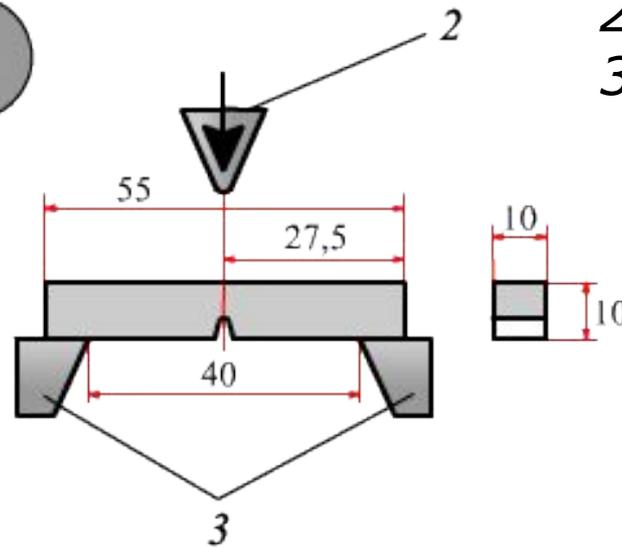
Деформация образца из  
пластичного материала



# Испытание на ударную вязкость

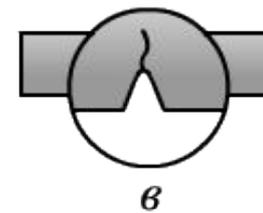
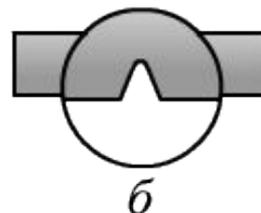
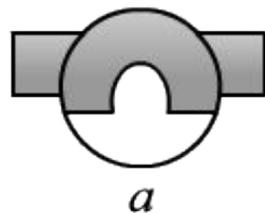


- 1 — маятник;
- 2 — нож маятника;
- 3 — опоры



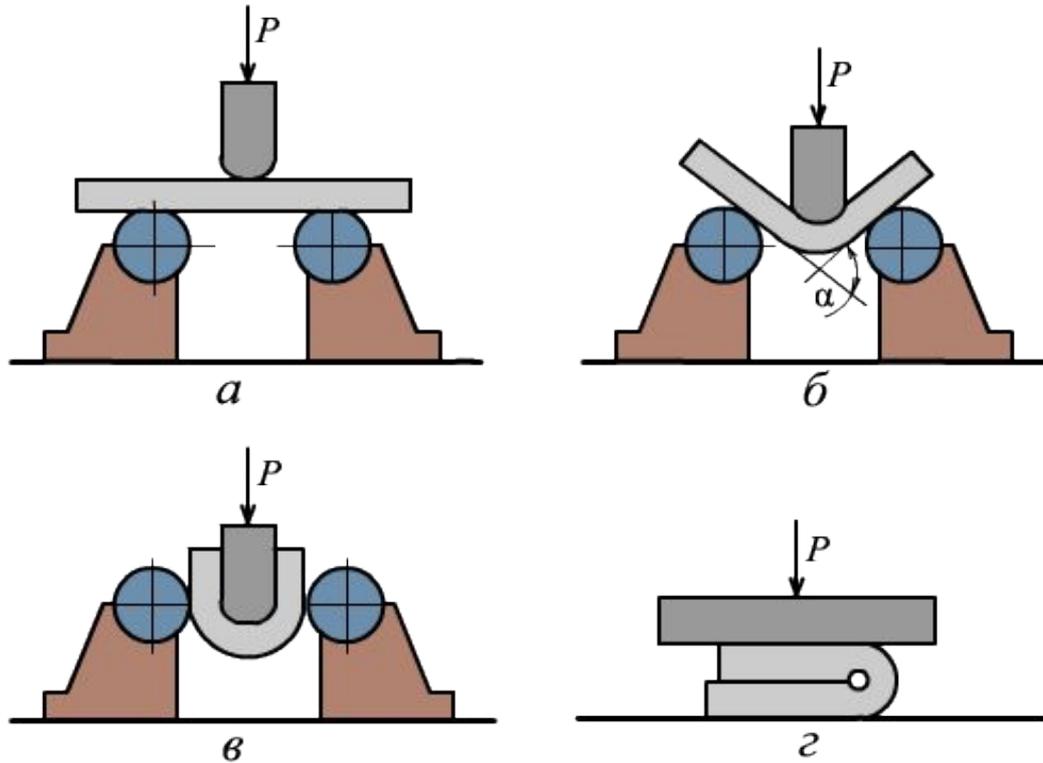
**Ударная вязкость**, т. е. работа, затраченная на разрушение образца и отнесенная к поперечному сечению образца в месте надреза:

$$K_C = \frac{K}{F}$$



а — U-образный надрез (ККУ); б — V-образный надрез (ККВ); в — надрез с трещиной (ККТ)

# Испытания на изгиб



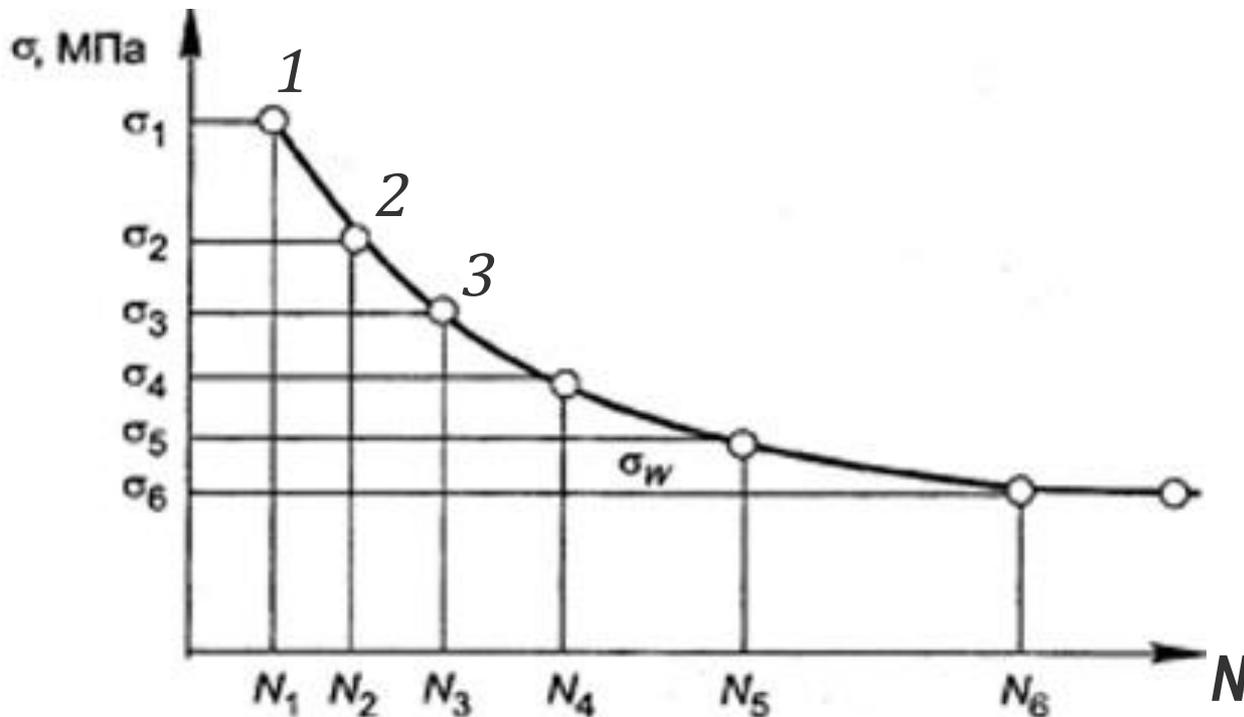
*a* — образец до испытания; *б* — загиб до определенного угла ( $\alpha$ );  
*в* — загиб до параллельности сторон; *г* — загиб до соприкосновения  
сторон

Предел прочности при изгибе:

$$\sigma_{\text{и}} = P / F$$

# Кривая усталости

Отображает зависимость между максимальными напряжениями цикла и продолжительностью (количеством циклов до разрушения образца).



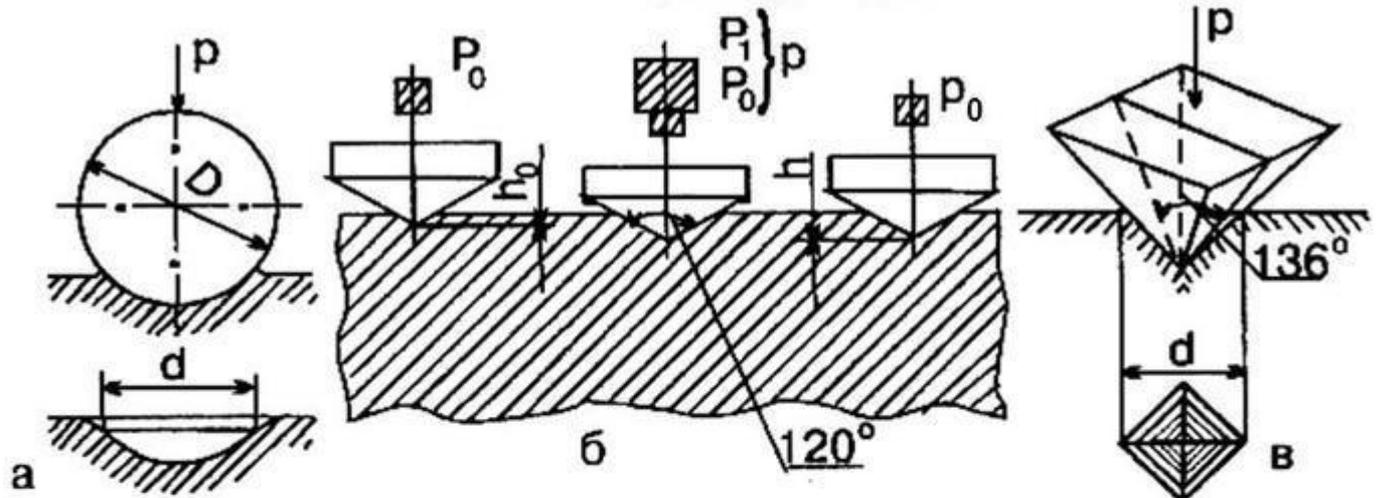
- **Цикл изменения напряжений** – совокупность последовательных значений переменных напряжений за один период их изменения.
- $\sigma_w$  – предел выносливости – максимальное значение напряжения цикла, при котором разрушение не происходит после практически неограниченного числа циклов изменения напряжений.

# МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТВЕРДОСТИ МАТЕРИАЛОВ

- Измерение твердости – упрощенный метод определения прочности. Твердость – одна из характеристик сопротивления деформации.
- **Метод Бринелля:** в испытуемый материал под действием силы  $P$  внедряется шарик (индентор) диаметром  $D$ ; число твердости по Бринеллю –  $HB = P / S$ , где  $S$  – сферическая поверхность отпечатка с диаметром  $d$ .
- **Метод Роквелла:** индентор – алмазный конус или стальной шарик; числом твердости считают величину обратную глубине вдавливания  $h$ ; прибор имеет три шкалы: **HRB** – при вдавливании стального шарика; **HRA** и **HRC** при вдавливании алмазного конуса (с различной нагрузкой).
- **Метод Виккерса:** индентор – алмазная пирамида; критерий числа твердости **HV** – диагональ отпечатка  $d$ .

# ИЗМЕРЕНИЕ ТВЕРДОСТИ МАТЕРИАЛОВ

Пресс  
Бринелля



а – по Бринеллю; б – по Роквеллу; в – по Виккерсу

Твердомер по  
Роквеллу  
(переносной)



Твердомер по  
Роквеллу  
(стационарный)



# СООТНОШЕНИЕ ЧИСЕЛ ТВЕРДОСТИ ПО БРИНЕЛЛЮ, РОКВЕЛЛУ И ВИККЕРСУ

Твердость по Виккерсу	Твердость по Бринеллю $D_{10}$ мм, $P=3000$ кг		Твердость по Роквеллу		
			Шкал		
	Диаметр отпечатка, мм	Число твердости	С (150 кг)	В (100 кг)	А (60 кг)
1224	2,2	780	72	-	84
1116	2,25	745	70	-	83
1022	2,3	712	68	-	82
941	2,35	682	66	-	81
868	2,4	653	64	-	80
804	2,45	627	62	-	79
746	2,5	601	60	-	78
694	2,55	578	58	-	78
650	2,6	555	56	-	77
606	2,65	534	54	-	76
587	2,7	514	52	-	75
551	2,75	495	50	-	74

# МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТВЕРДОСТИ МАТЕРИАЛОВ

- Методы **HB** и **HRB** применяют для мягких материалов; **HRC** – для твердых материалов (например, закаленных сталей); методы **HV** и **HRA** - для тонких слоев (листов).
- Между различными методами существует примерная корреляция. По соответствующим таблицам можно перевести значение твердости, полученное одним из методов в значения твердости соответствующие другим методам.
- Число твердости по Бринеллю приблизительно в три раза больше чем предел прочности:  $HB \approx \sigma_B / 3$ .
- Метод определения микротвердости **H** применим для определения твердости отдельных структурных составляющих. Индентор – алмазная пирамида при очень небольшой нагрузке (до 100 г).
- Метод Шора - экспресс-метод определения твердости (**HSD**) крупных изделий в условиях производства по отскоку стального шарика

# ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

Термическая обработка – получение заданных свойств.

Параметры термической обработки:

1. Максимальная температура нагрева –  $T_{\max}$
2. Время выдержки сплава при температуре нагрева –  $\tau_{\text{в}}$ .
3. Скорость нагрева –  $V_{\text{нагр}}$ .
4. Скорость охлаждения –  $V_{\text{охл}}$ .

Режим термической обработки можно представить в виде графика в координатах температура – время

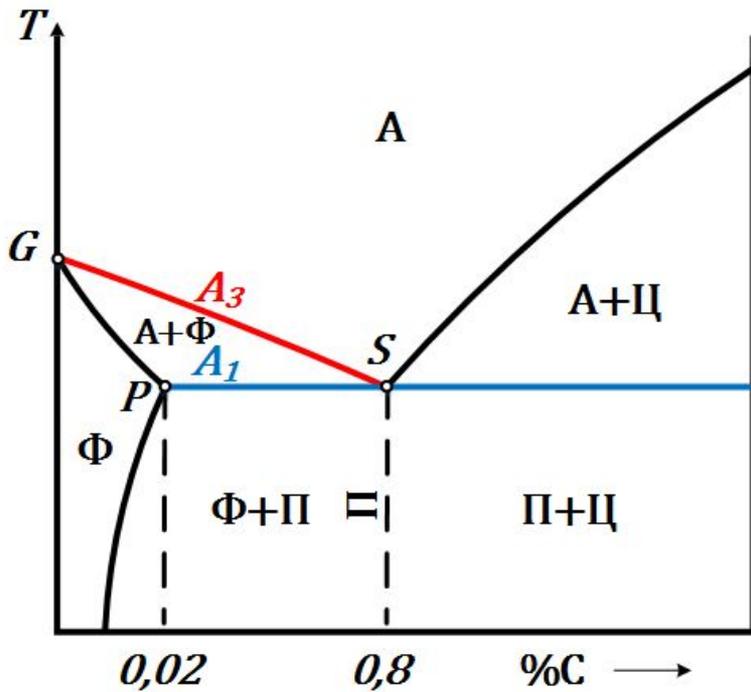
# ОСНОВНЫЕ ВИДЫ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

1. **Отжиг (первого рода)** – термическая операция, состоящая в нагреве металла, имеющего неустойчивое состояние в результате предшествующей обработки, и приводящая металл в более устойчивое состояние.
2. **Отжиг (второго рода)** – нагрев металла выше температуры превращения с последующим достаточно медленным охлаждением для получения структурно устойчивого состояния сплава.
3. **Закалка** – нагрев металла выше температуры превращения с последующим достаточно быстрым охлаждением для получения структурно неустойчивого состояния сплава.
4. **Отпуск** – нагрев закаленного сплава ниже температуры превращения для получения более устойчивого структурного состояния .

# СЛОЖНЫЕ ВИДЫ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

- **Химико-термическая обработка** – нагрев сплава в соответствующих химических реагентах для изменения состава и структуры поверхностных слоев. В данном случае используется способность металлов растворять различные, окружающие их поверхность элементы, атомы которых, при повышенных температурах, могут диффундировать в металлы.
- **Термомеханическая (термопластическая) обработка** – деформация и последующая термическая обработка, сохраняющая в той или иной форме результаты наклепа

# ВИДЫ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ

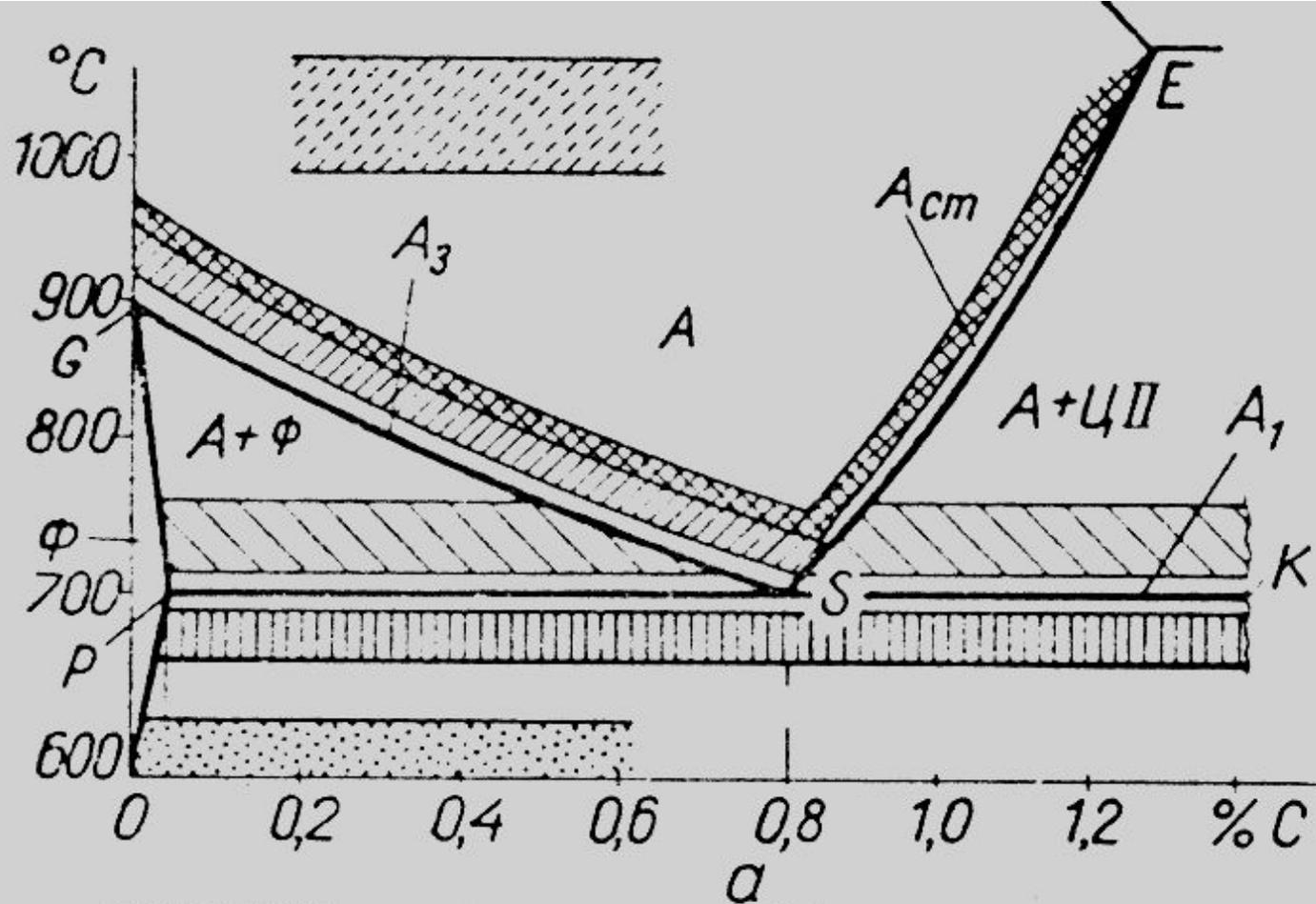


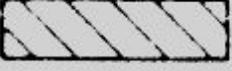
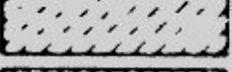
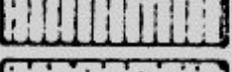
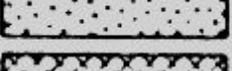
Основа изучения термообработки стали – диаграмма железо – углерод.

Общепринятые обозначения критических точек:

- $A_1$  – линия PSK – соответствует превращению  $A \leftrightarrow П$ ;
- $A_3$  – линия GSE – соответствует началу выпадения или концу растворения  $\Phi$  (в доэвтектоидных сталях) или  $\Psi$  (в заэвтектоидных сталях);
- $A_{c1}$  и  $A_{c3}$  – обозначение критических точек при нагреве;
- $A_{r1}$  и  $A_{r3}$  – обозначение критических точек при охлаждении.

1. **Отжиг** – нагрев выше  $A_{c3}$  с последующим медленным охлаждением (если охлаждение происходит на воздухе то такой вид термообработки называют **нормализацией**); при охлаждении из межкритического интервала термообработку называют **неполным отжигом**.
2. **Закалка** нагрев выше  $A_{c3}$  с последующим быстрым охлаждением; при охлаждении из межкритического интервала термообработку называют **неполной закалкой**.
3. **Отпуск** – нагрев закаленной стали ниже  $A_{c3}$



-  полный отжиг (1), полная закалка (2)
-  неполный отжиг (1а), неполная закалка (2а)
-  диффузионный отжиг
-  рекристаллизационный отжиг
-  отпуск (3)
-  нормализация (4)

# Основные превращения в стали при термической обработке

1. Превращение перлита в аустенит при нагреве:  $P \rightarrow A$ .
2. Превращение аустенита в перлит при медленном охлаждении:  $A \rightarrow P$ .
3. Превращение аустенита в мартенсит при закалке:  $A \rightarrow M$ . (**Мартенсит** – пересыщенный твердый раствор углерода в  $\alpha$ -железе).
4. Превращение мартенсита в перлит (феррито – карбидную смесь) чаще всего при нагреве:  $M \rightarrow P$ .

*Представленные фазовые превращения используются при термообработке и обусловлены изменением температуры.*

Основные превращения в железоуглеродистых сплавах при медленном нагреве и охлаждении

Линия (рис. 3)	Температура превращения, °C	Сущность превращений	Обозначение критических точек (рис. 3)	
			при нагреве	при охлаждении
<i>PSK</i>	727	Превращение перлита в аустенит Превращение аустенита в перлит	$A_{c1}$	—
—	768	Потери магнитных свойств для сталей, содержащих до 0,5% C Возникновение магнитных свойств для тех же сталей	$A_{c2}$	—
<i>GS</i>	910—727	Окончание растворения феррита в аустените в доэвтектоидных сталях Начало выделения феррита из аустенита в доэвтектоидных сталях	$A_{c3}$	—
<i>SE</i>	727—1147	Окончание растворения цементита в аустените в заэвтектоидных сталях и чугунах Начало выделения цементита из аустенита в заэвтектоидных сталях и чугунах	$A_{cm}$	—
<i>JE</i>	1147—1499	Начало плавления стали при нагреве и окончание затвердевания при охлаждении (линия солидуса)	—	—
<i>ECF</i>	1147	Начало плавления чугуна при нагреве и окончание его затвердевания при охлаждении (эвтектическая линия)	—	—
<i>ABC</i>	1539—1147	Окончание расплавления стали и доэвтектического чугуна при нагреве, начало их затвердевания при охлаждении (линия ликвидуса)	—	—

Продолжение табл. 7

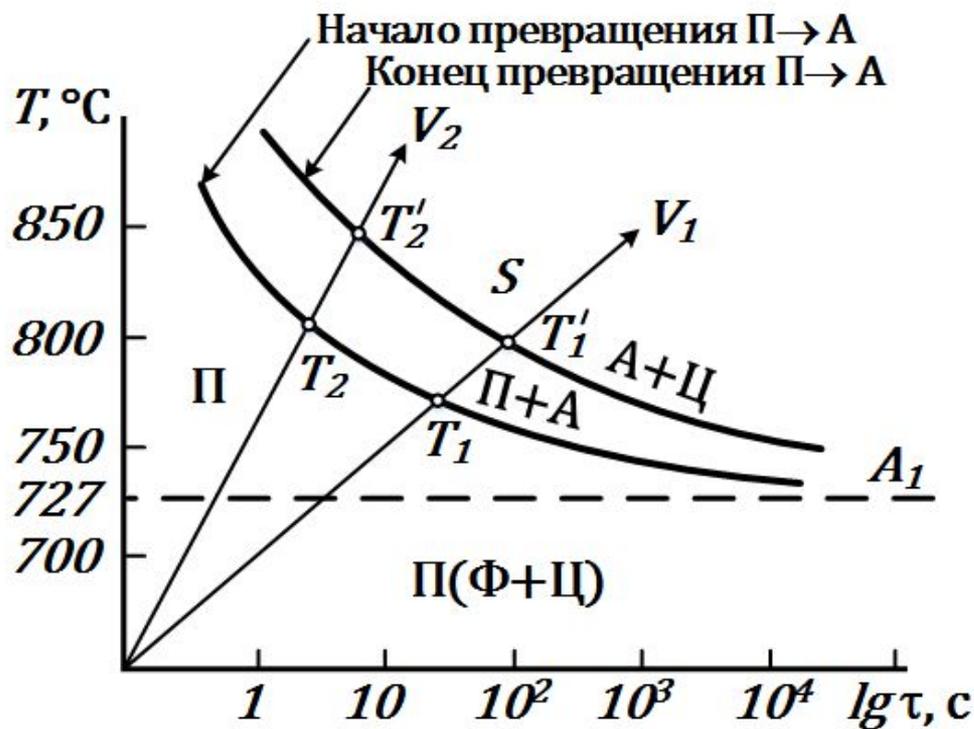
Линия (рис. 3)	Температура превращения, °C	Сущность превращений	Обозначение критических точек (рис. 3)	
			при нагреве	при охлаждении
<i>CD</i>	1147—1260	Окончание расплавления заэвтектического чугуна при нагреве и начало затвердевания его при охлаждении (линия ликвидуса)	—	—

# Практическое значение температуры рекристаллизации

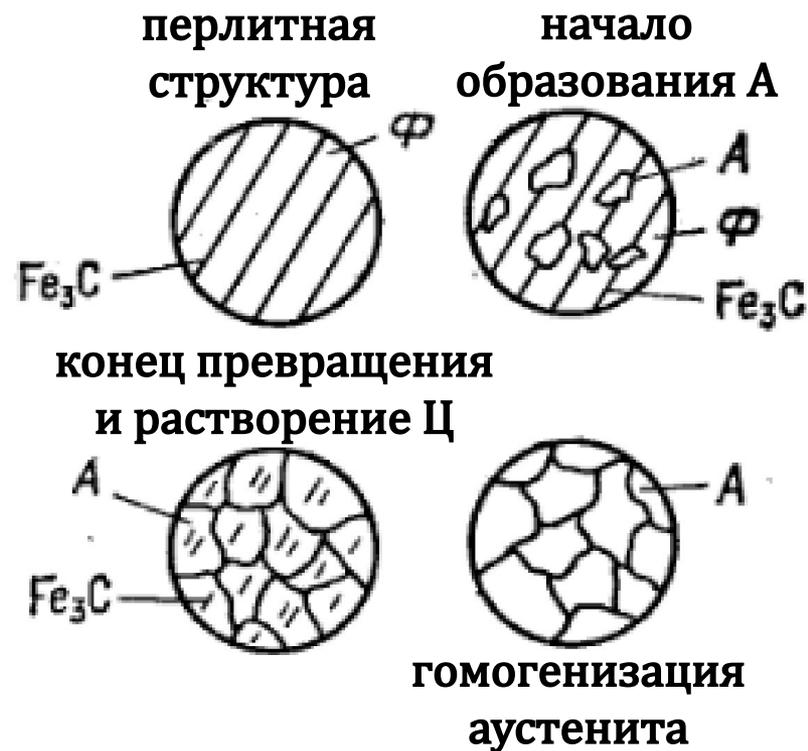
1. **Горячая обработка давлением** – пластическое деформирование выше температуры рекристаллизации. При этом упрочнение металла, если и произойдет, то будет немедленно сниматься процессами рекристаллизации, протекающими при этих температурах.
2. **Холодная обработка давлением** – пластическая деформация ниже температуры рекристаллизации. Такая обработка вызывает наклеп (нагартовку) металла – упрочнение металла под действием пластической деформации.

# ОБРАЗОВАНИЕ АУСТЕНИТА

## Диаграмма изотермического превращения П→А



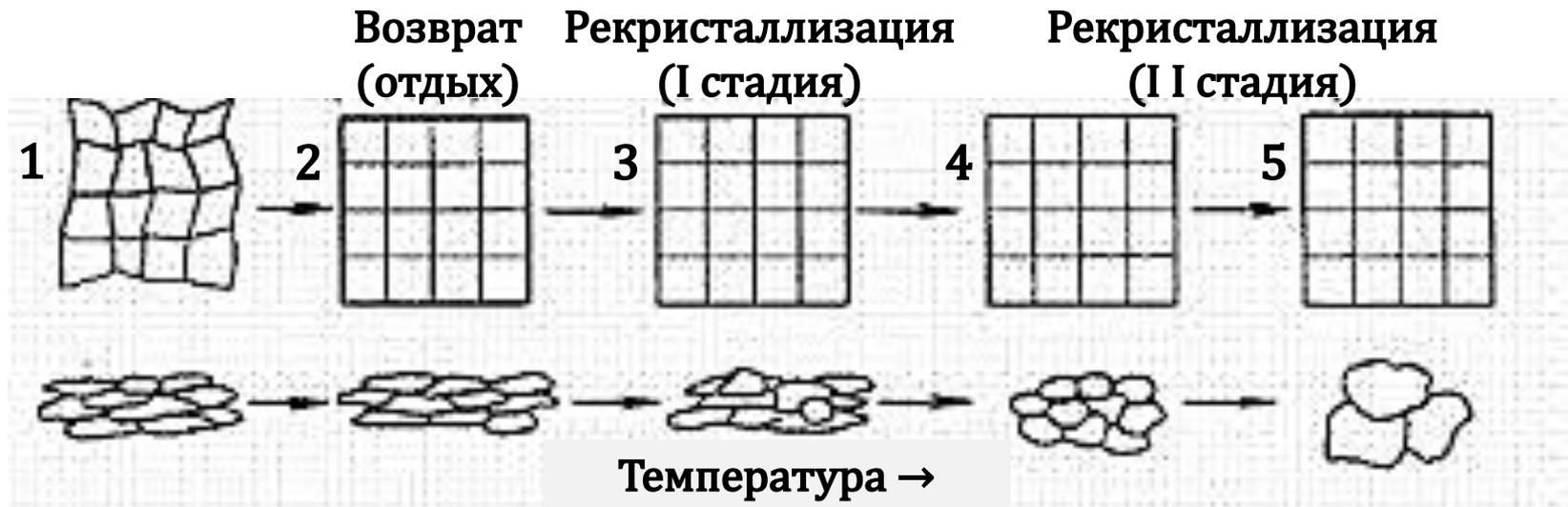
## Схема структурных изменений стали при нагреве



При обычных условиях нагрева:

1. Для начала превращения необходим перегрев выше  $A_1$ .
2. Превращение происходит в интервале температур.
3. Кривые начала и конца превращения асимптотически приближаются к линии  $A_1$ .

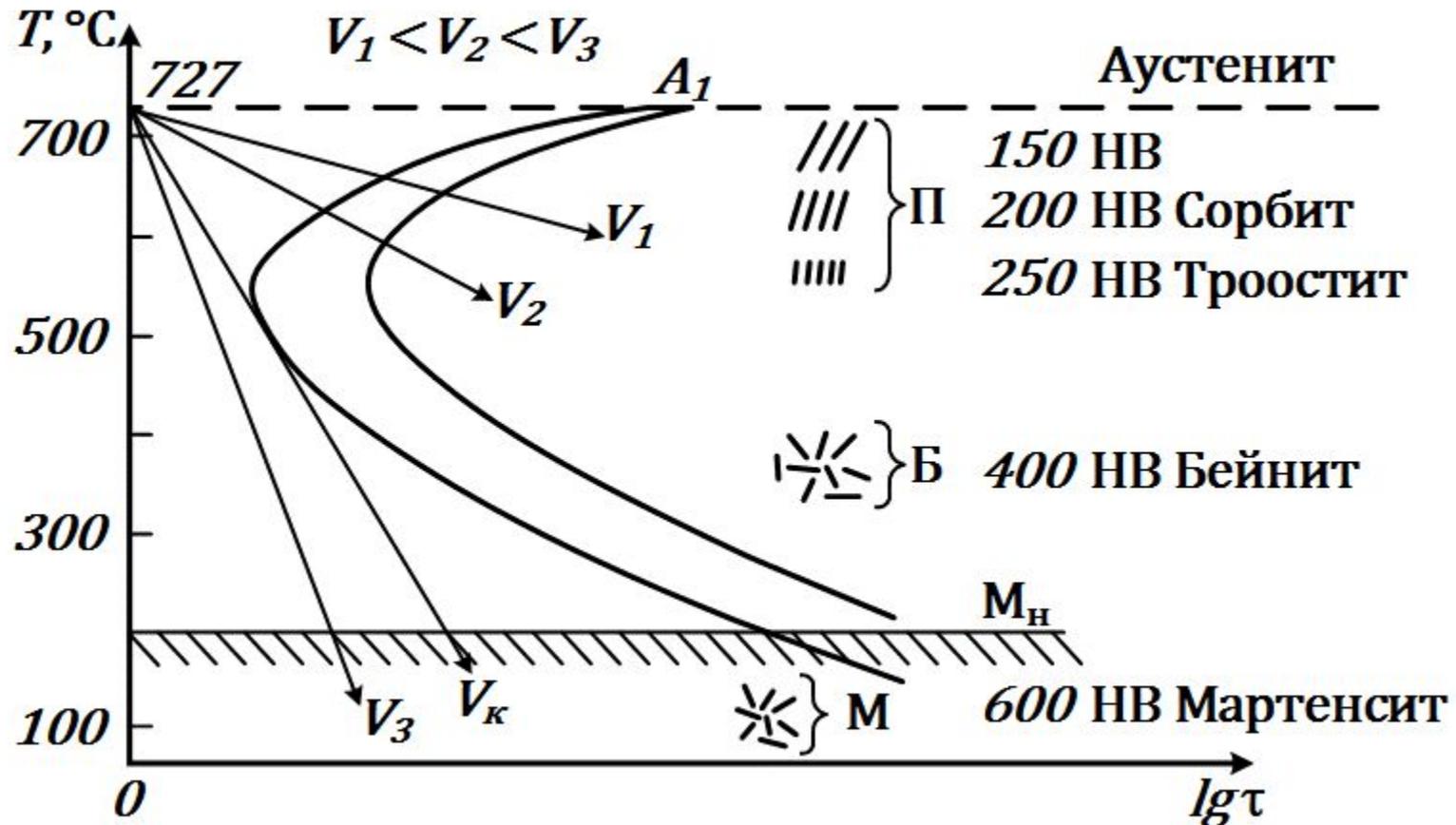
# Отжиг пластически деформированного металла



1. Пластическая деформация приводит металл в структурно неустойчивое состояние. Искажается кристаллическая решетка, появляется текстура (определенная ориентировка зерен).
2. Возврат (отдых) – снятие искажений кристаллической решетки в процессе нагрева до  $300^{\circ} - 400^{\circ}\text{C}$ . Твердость и прочность несколько понижаются, а пластичность возрастает.
3. Рекристаллизация (первая стадия) – образование новых зерен протекает при более высокой температуре (для сплавов  $T$  рекристаллизации  $\approx 0,8T$  плавления). Свойства металла становятся прежними.
- 4, 5. Рекристаллизационный отжиг – вторая стадия рекристаллизации – образование и рост равноосных зерен. Происходит при более высоких температурах. (Вторичная или собирательная рекристаллизация).

# РАСПАД АУСТЕНИТА

Диаграмма изотермического превращения А→П



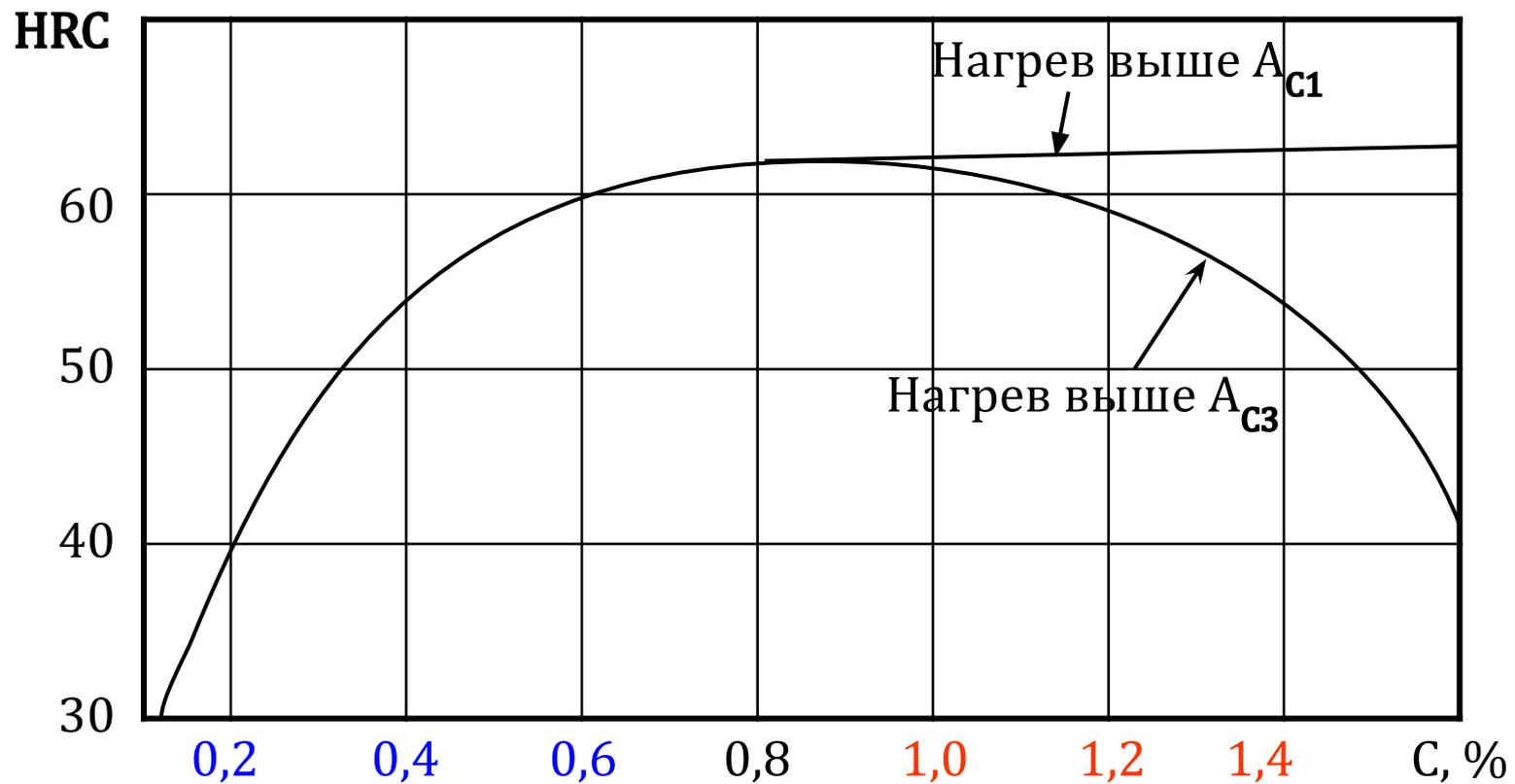
$V_k$  – критическая скорость закалки – минимальная скорость охлаждения, необходимая для переохлаждения аустенита до мартенситного превращения

# ПРЕВРАЩЕНИЯ ПРИ ОТПУСКЕ

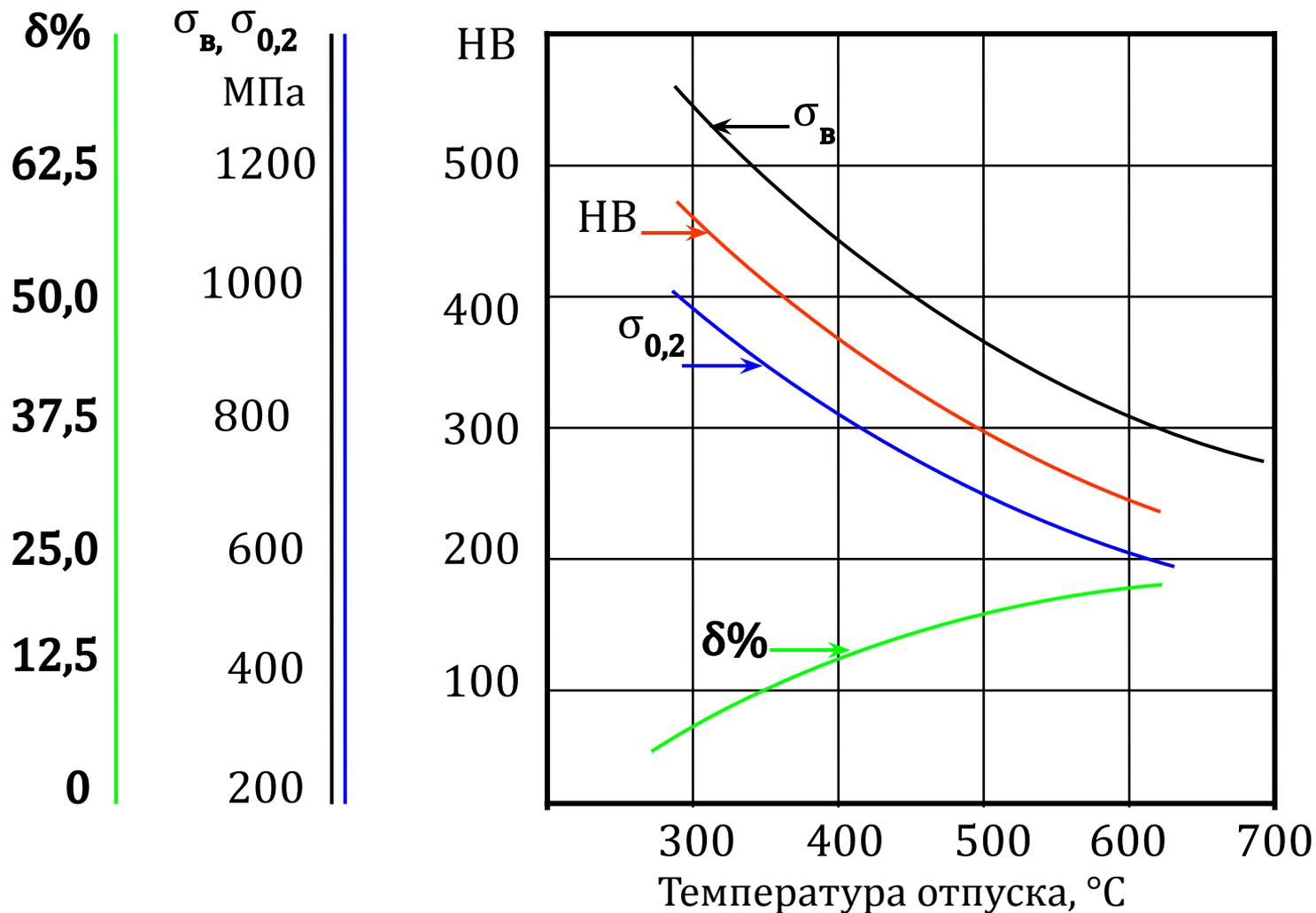
Исходная структура: **мартенсит** – структура закаленной стали, обладающая наибольшим объемом (аустенит – минимальным).

1. **Первое превращение:** в интервале температур  $80^{\circ} - 200^{\circ}\text{C}$  образуется мартенсит отпуска, при этом тетрагональность решетки мартенсита уменьшается вследствие выделения карбидов.
2. **Второе превращение:** в интервале температур  $200^{\circ} - 300^{\circ}\text{C}$  происходит распад остаточного аустенита с образованием мартенсита отпуска, при этом объем увеличивается.
3. **Третье превращение:** в интервале температур  $300^{\circ} - 400^{\circ}\text{C}$  происходит снятие внутренних напряжений, возникающих в результате предыдущих превращений, сопровождавшимися объемными изменениями.
4. **Четвертое превращение:** выше  $400^{\circ}\text{C}$  происходит интенсивная коагуляция карбидов, образуется смесь  $\Phi + \Psi$  в виде тростита ( $350^{\circ} - 500^{\circ}\text{C}$ ) или сорбита ( $500^{\circ} - 600^{\circ}\text{C}$ ).

# Влияние параметров закалки на твердость стали



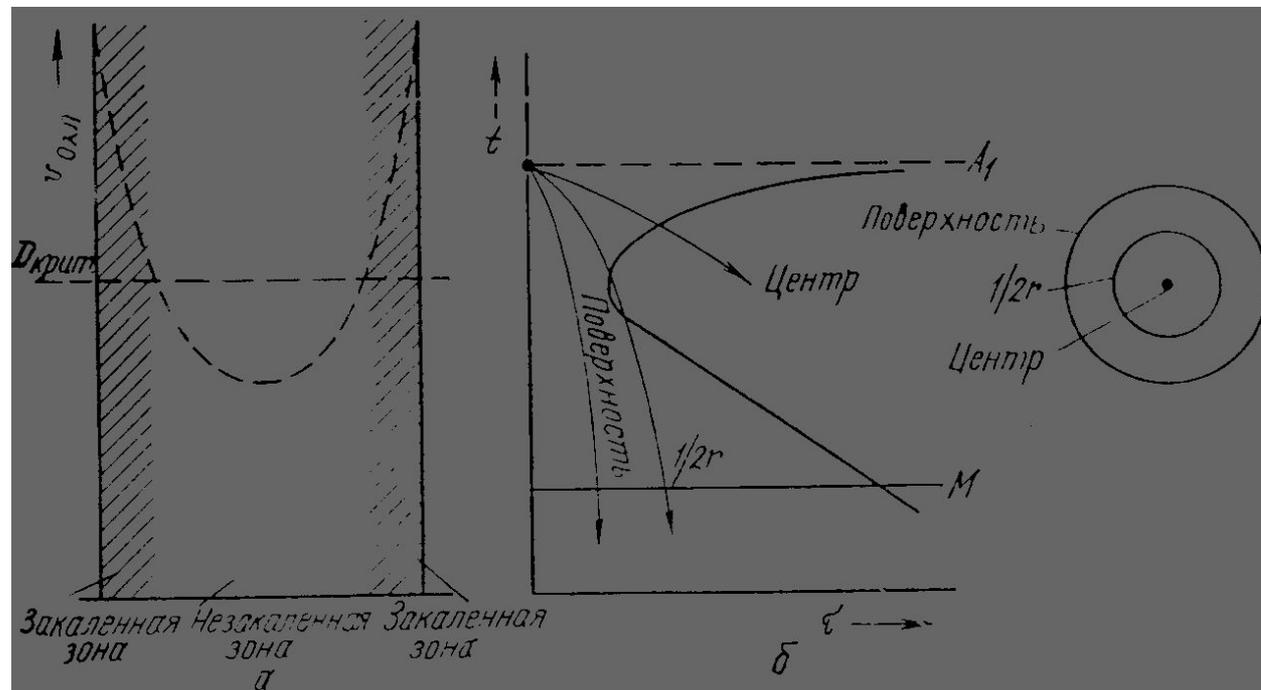
# Влияние температуры отпуска на свойства закаленной стали 40



# ПРАКТИКА ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

## Закалка стали

- **Закаливаемость** – характеризуется максимальным значением твердости, приобретенным сталью в результате закалки.
- **Прокаливаемость** – глубина проникновения закаленной зоны.



**$D_{\text{крит}}$**  – критический диаметр – максимальный диаметр цилиндрического прутка, который прокаливается насквозь в данном охладителе.

# ВНУТРЕННИЕ НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ЗАКАЛКЕ

1. **Внутренние напряжения первого рода (термические):** зональные внутренние напряжения, возникающие между отдельными зонами сечения и различными частями детали. Чем больше градиент температур по сечению, тем больше напряжения первого рода.
2. **Внутренние напряжения второго рода (структурные):** возникают внутри зерна или между соседними зернами. Эти напряжения возникают между различными фазами вследствие того, что у них разные коэффициенты линейного расширения, или из-за образования новой фазы с иным объемом.
3. **Остаточные напряжения** – напряжения, которые сохранилась в детали в результате охлаждения. Отпуск – необходимое и радикальное средство уменьшения остаточных напряжений.

# ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

- **Преимущества по сравнению с закалкой ТВЧ:**

1. Независимость от внешней формы изделия.
2. Большое различие между свойствами сердцевины и поверхности.
3. Последствия перегрева могут быть устранены последующей термической обработкой.

- **Виды ХТО:**

1. **Цементация** – насыщение поверхности детали углеродом с последующей закалкой, при которой на поверхности получается высокоуглеродистый мартенсит, а в сердцевине сохраняется низкая твердость и высокая вязкость.
2. **Азотирование** – насыщение поверхности детали азотом, которое осуществляют на готовых деталях, т.к. азотированный слой обладает высокой твердостью, а размеры изделий изменяются после азотирования крайне мало.
3. **Цианирование** – процесс диффузионного насыщения поверхностного слоя стали одновременно углеродом и азотом при температурах 820-950° С в расплаве цианида натрия или других солей с тем же анионом.
4. **Диффузионная металлизация** – процесс диффузионного насыщения поверхности деталей металлами. Например: хромирование или <sup>137</sup>алитирование для повышения жаростойкости изделий.