



**«МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»
Кафедра «Материаловедение и технология обработки материалов»**



**Дисциплины: «Материаловедение-1»,
«Материаловедение и технологии конструкционных материалов»**

**Раздел -1
Общие вопросы материаловедения**

**Лекция-2
ОСНОВЫ ТЕОРИИ СПЛАВОВ**

Гвоздева О.Н.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕОРИИ СПЛАВОВ

Компоненты системы:

- химические вещества (Al, Cu, Ti)
- химические соединения (Fe_3C , TiAl_3)



Сплавами называют твердые вещества, полученные путем диффузии элементов в твердом, жидком или газообразном состояниях. Сплавы получают путем расплавления двух или более элементов (металлов и неметаллов) и последующей кристаллизации (затвердевания в разного типа формах и кристаллизаторах).

Сплавы:

- двухкомпонентные (AK12 – Al+12%Si),
- трехкомпонентные (BT6 – Ti+6Al+4V)
- многокомпонентные (30XГСА – 0,3%C+по 1% Cr, Mn, Si)



Между компонентами при образовании сплава существует диффузия, т.е. взаимное проникновение их атомов с образованием новых однородных веществ, называемых **фазами** сплава.

Фазой называется однородная часть системы, отделенная от других поверхностью раздела, при переходе через которую свойства меняются скачкообразно.

Фазы:

- чистые металлы (Fe, Al, Cu, Ti) и неметаллы (C, H),
- аллотропические модификации металлов (δ -Fe, α -Ti).
- жидкие (L) и твердые растворы (α -твёрдый раствор),
- химические соединения (Fe_3C , TiAl_3),



Структурные составляющие – различные однотипные элементы структуры. Они могут представлять либо одну фазу, либо совокупность фаз (макро- и микроструктура), либо характеризовать строение отдельной фазы (субструктура)

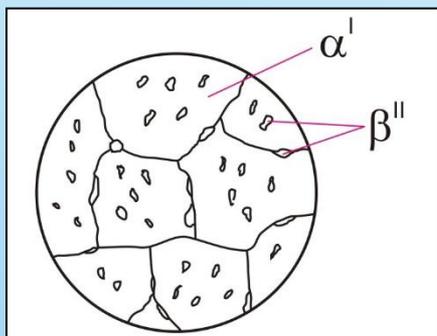
ПОНЯТИЕ ФАЗОВЫЙ И СТРУКТУРНЫЙ СОСТАВ



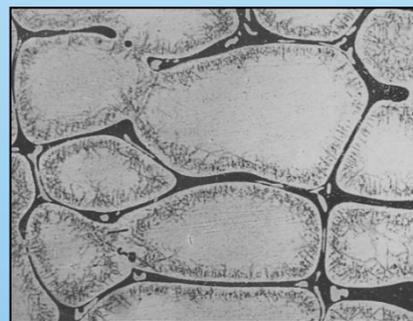
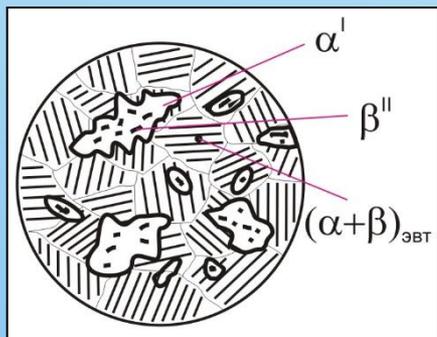
Фаза



Структурные составляющие



Фазы: 2 шт. (α ; β)
 Структурны
 составляющие: 2 шт. (α' ; β'')

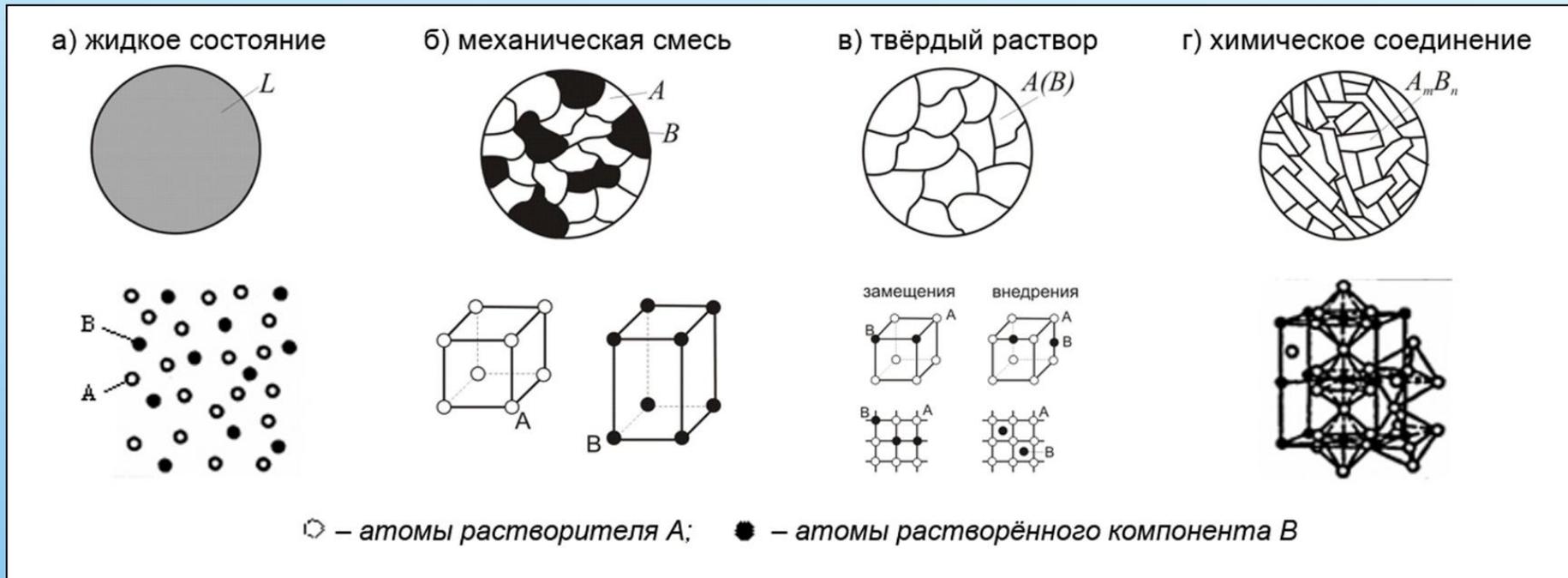


Фазы: 2 шт. (α ; β)
 Структурны
 составляющие: 2 шт. (α' ; β'' ; ($\alpha+\beta$)_{эвт})

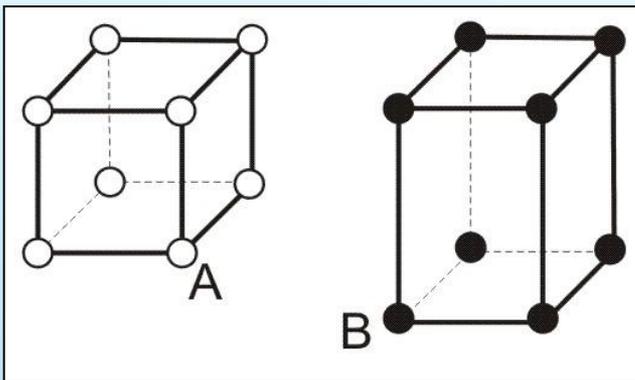
ТИПЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОМПОНЕНТОВ ПРИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ

- В зависимости от природы компонентов их атомы по-разному взаимодействуют друг с другом, как в жидком, так и в твердом состояниях.
- В расплавленном состоянии все компоненты обычно находятся в атомарном состоянии, образуя неограниченный жидкий однородный раствор, в любой точке которого химический состав одинаков ([рис. а](#)).
- При затвердевании расплава атомы компонентов укладываются в порядке кристаллической решетки, образуя твердое кристаллическое вещество – сплав.

При этом существуют три типа взаимосвязи компонентов сплава ([рис. б, в, г](#)):



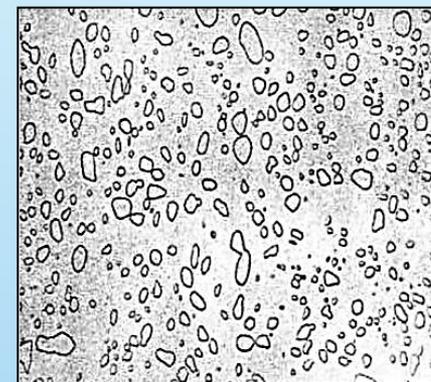
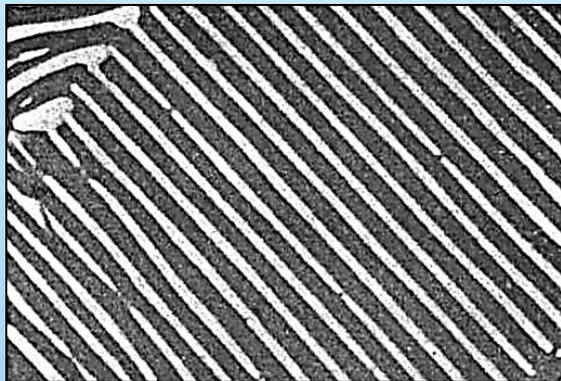
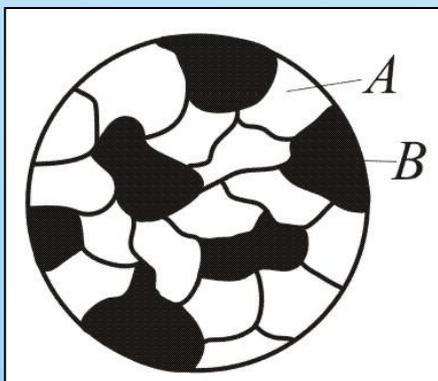
Механическая смесь



При образовании **механической смеси** компонентов в сплаве атомы каждого компонента укладываются в свои собственные кристаллические решетки, состоящие только из своих собственных идентичных атомов.

Механическая смесь не является фазой, это **смесь двух фаз**.

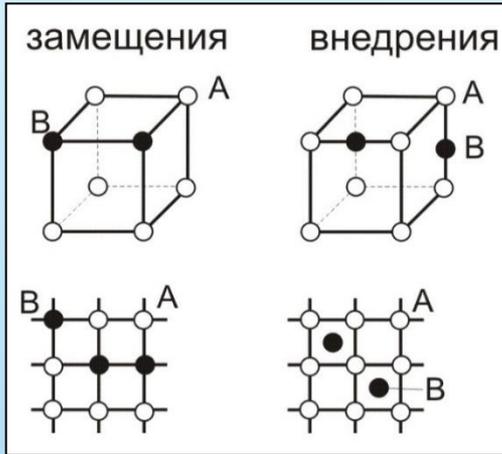
Перлит $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$



При образовании механической смеси **свойства сплава будут средними из свойств элементов**, которые его образуют. Так, если в сплаве один элемент с высокой твердостью, а другой с низкой, то чем больше будет твердого элемента, тем выше будет твердость сплава.

Твёрдые растворы

При образовании **твёрдого раствора** атомы компонентов образуют кристаллическую решетку одного из элементов, являющегося растворителем, а атомы других (растворенных) элементов располагаются в решетке растворителя, изменяя её размеры.



Атомы основного металла-растворителя занимают узлы решетки.

Атомы растворенных компонентов:

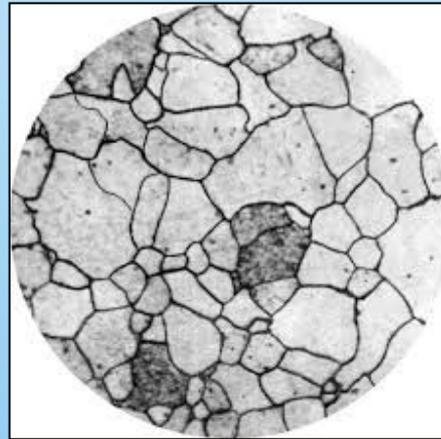
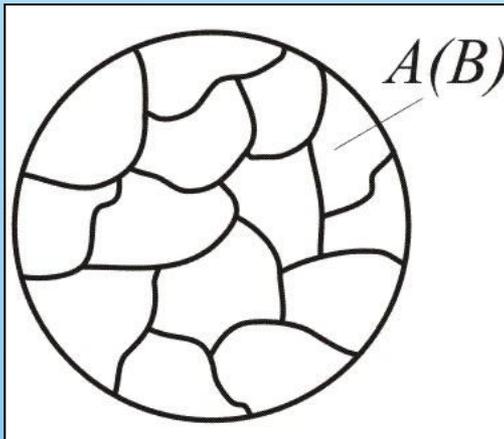
частично замещают
атомы основного металла

внедряются
в межузельные пространства

твёрдый раствор замещения

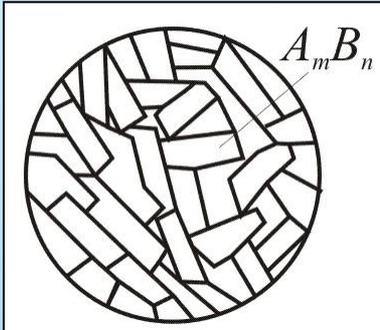
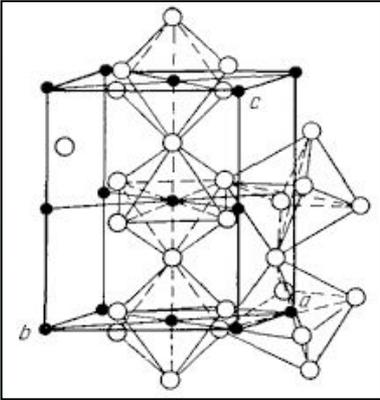
твёрдый раствор внедрения

Феррит α



Свойства сплавов – твёрдых растворов отличаются от свойств элементов, из которых они состоят, так как при образовании сплава происходит искажение кристаллической решетки.

Химические соединения



Разнородные атомы соединяются в определенной пропорции, образуя **новый тип решетки**, отличающийся от решеток компонентов сплава.

Образование химического соединения - процесс, при котором **создается новое вещество с новыми качествами**.

Решетки соединений имеют более сложное строение, поэтому химические соединения:

- Теряют способность к пластической деформации,
- Имеют высокую хрупкость,
- Твердость намного больше твердости элементов, входящих в них. Пример: CuAl_2 HB 400, Cu HB 35, Al HB 20.
- Обычно температура плавления отличается от температур плавления элементов, входящих в него.

Химическое соединение имеет следующие принципиальные отличия от твёрдых растворов:

– соединение имеет строго определенное соотношение между числом атомов элементов А и В, соответствующее стехиометрическому составу, выраженному формулой $A_m B_n$;

– соединение имеет специфическую решетку, отличную от решеток исходных компонентов;

– соединения имеют постоянную температуру плавления;

– свойства соединения существенно отличаются от свойств исходных компонентов.

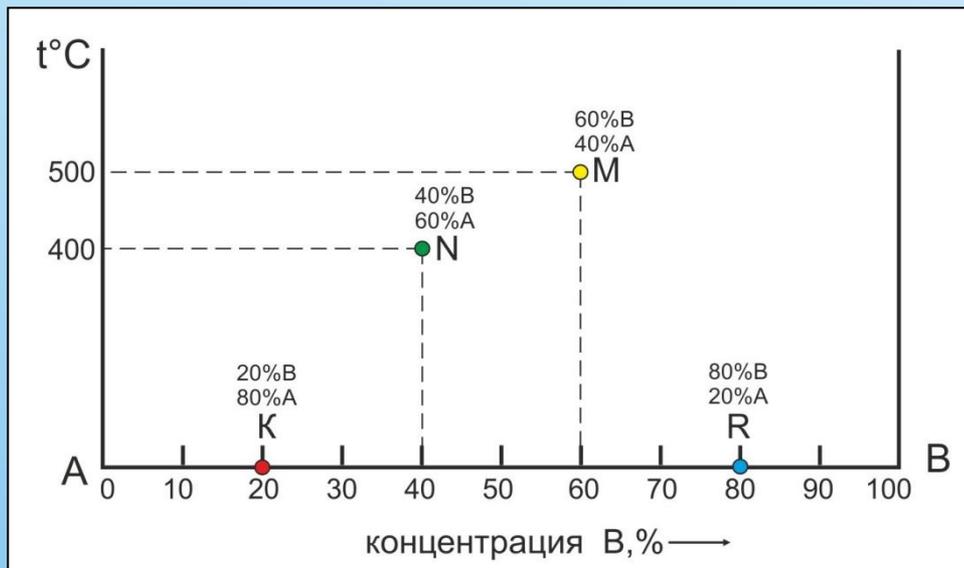
ОБЩЕЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ О ДИАГРАММЕ СОСТОЯНИЯ И КРИВОЙ ОХЛАЖДЕНИЯ

Диаграмма состояния — графическое изображение фазового состава сплава в состоянии равновесия или близком к нему в зависимости от химического состава и от температуры при постоянном давлении ($p = \text{const} = 1 \text{ атм}$)

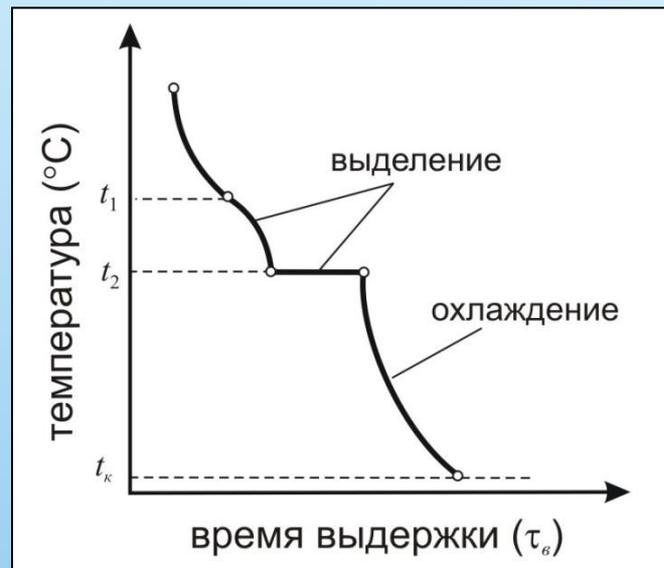
Анализ диаграмм состояния позволяет определить:

- Фазовый и структурный состав сплавов при заданной температуре;
- Химический состав фаз и их количественное соотношение при заданной температуре;
- Температурный интервал и темп кристаллизации;
- Технологические свойства сплавов;
- Способность сплавов к упрочняющей термической обработке.

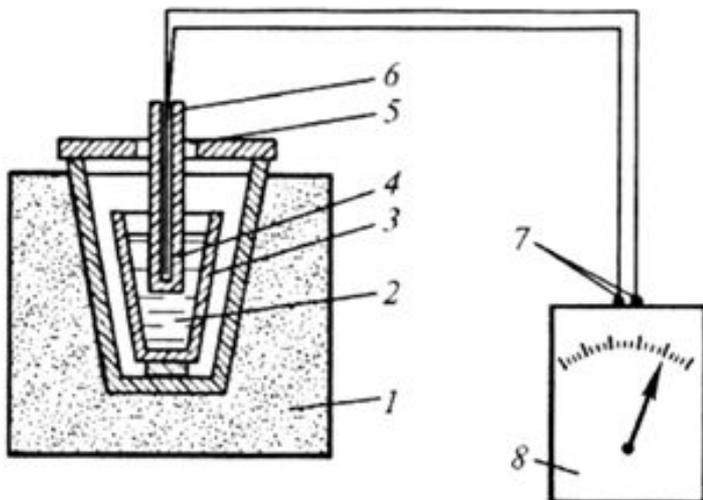
Диаграмма состояния



Кривая охлаждения



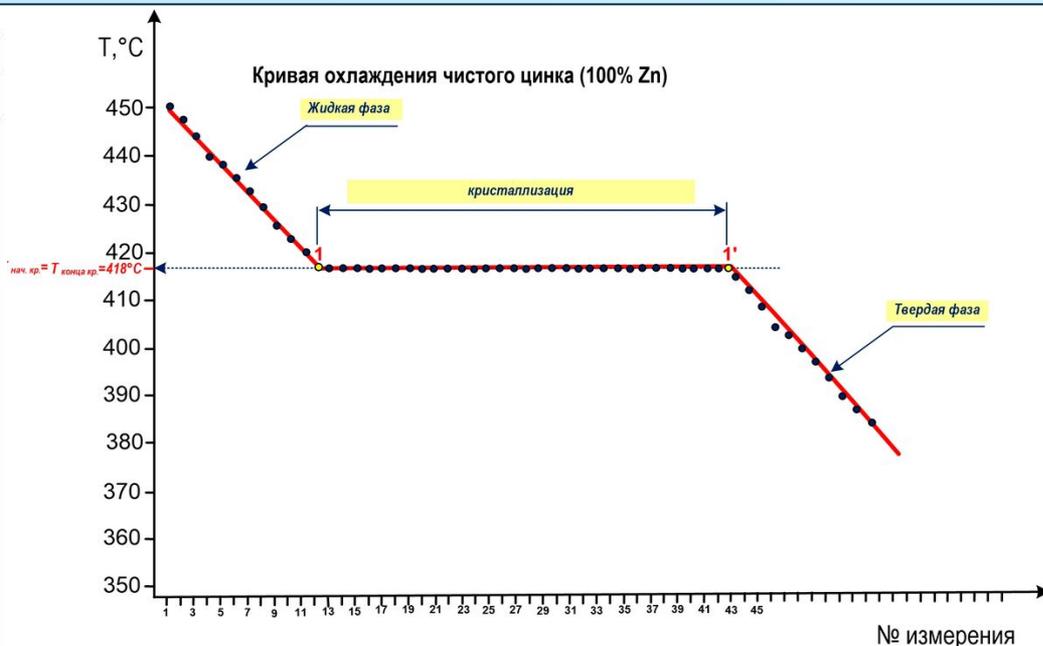
ТЕРМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ



- 1 - печь;
- 2 - тигель;
- 3 - расплавленный металл;
- 4 - горячий спай;
- 5 - термопара;
- 6 - колпачок;
- 7 - холодный спай;
- 8 - гальванометр



t, °C	ЭДС, мВ										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
-20	-1,27	-1,35	-1,39	-1,46	-1,52	-1,58	-1,64	-1,70	-1,77	-1,83	
-10	-0,64	-0,70	-0,77	-0,83	-0,89	-0,96	-1,02	-1,08	-1,14	-1,21	
0	0	-0,06	-0,13	-0,19	0,26	-0,32	-0,38	0,45	-0,51	-0,58	
+0	0	0,07	0,13	0,20	0,26	0,33	0,39	0,46	0,52	0,59	
10	0,65	0,72	0,78	0,85	0,91	0,98	1,05	1,11	1,18	1,24	
20	1,31	1,38	1,44	1,51	1,57	1,64	1,70	1,77	1,84	1,91	
30	1,98	2,05	2,12	2,18	2,25	2,32	2,38	2,45	2,52	2,59	
40	2,66	2,73	2,80	2,87	2,94	3,00	3,07	3,14	3,21	3,28	
50	3,35	3,42	3,49	3,56	3,63	3,70	3,77	3,84	3,91	3,98	
60	4,05	4,12	4,19	4,26	4,33	4,41	4,48	4,55	4,62	4,69	
70	4,76	4,83	4,90	4,98	5,05	5,12	5,20	5,27	5,34	5,41	
80	5,48	5,56	5,63	5,70	5,78	5,85	5,92	5,99	6,07	6,14	
90	6,21	6,29	6,36	6,43	6,51	6,58	6,65	6,73	6,80	6,87	
100	6,95	7,03	7,10	7,17	7,25	7,32	7,40	7,47	7,54	7,62	
110	7,69	7,77	7,84	7,91	7,99	8,06	8,13	8,21	8,28	8,35	
120	8,43	8,50	8,58	8,65	8,73	8,80	8,88	8,95	9,03	9,10	



Суть термического анализа:

Термический анализ – это совокупность методов, основанные на изучение свойств и процессов материалов, происходящих в них при нагревании или охлаждении по определенной заданной программе.

Последовательность проведения термического анализа:

1. Для построения кривой охлаждения тигель вместе со сплавом помещают в печь и нагревают до температуры, превышающей температуру плавления сплава, т.е. переводят его в жидкое состояние. Затем отключают питание печи и при охлаждении сплава через равные промежутки времени измеряют температуру сплава.
2. Измерение температуры сплава проводят с помощью термопары и гальванометра через равные промежутки времени. Термопара состоит из горячего и холодного спаев. Горячий спай термопары помещают в зону, температуру которой следует измерить, а холодный спай термопары (свободные концы) присоединяют к регистрирующему прибору (гальванометру). Если между холодным и горячим спаем термопары имеется некоторая разность температур (Δt), то на концах термопары возникает термоэлектродвижущая сила (ТЭДС), которая и фиксируется прибором.
3. Перевод значений ТЭДС термопары в градусы Цельсия осуществляют по справочным таблицам.
4. По полученным данным в координатах «Температура - время» строят график. В процессе любого превращения, связанного с образованием или исчезновением фаз сплава, выделяется или поглощается скрытая теплота превращения. В результате выделения теплоты скорость охлаждения сплава уменьшается, и на кривой охлаждения образуется точка перегиба или площадка (критическая точка).
5. Определив критические точки чистых компонентов и сплавов различного химического состава можно построить фазовую диаграмму состояния сплавов.

ПРАВИЛО ФАЗ ГИББСА

Вариантность или **термодинамическая степень свободы** – это число параметров, которые могут в некотором интервале принимать произвольные значения без изменения числа фаз в системе, т.е. без нарушения фазового равновесия.

Состояние сплава зависит от внешних и внутренних параметров и характеризуется числом образовавшихся фаз, их составом и отношением масс. Закономерности изменения числа фаз в гетерогенных системах определяются **правилом фаз Гиббса**

$$C = K - \Phi + 2$$

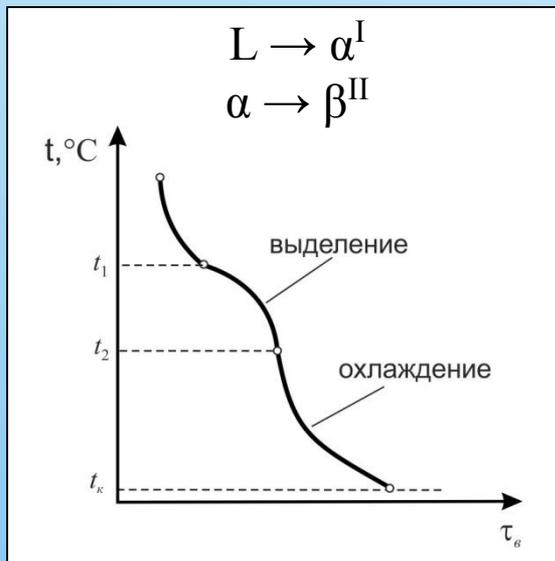
C – число степеней свободы (или вариантность);

K – число компонентов, образующих систему;

2 – число внешних параметров (температура и давление);

Φ – число фаз, находящихся в равновесии.

$C = 1$ – моновариантное равновесие
($n, P = \text{const}$; t – переменная)



$C = 0$ – инвариантное равновесие
($n, P, t = \text{const}$)

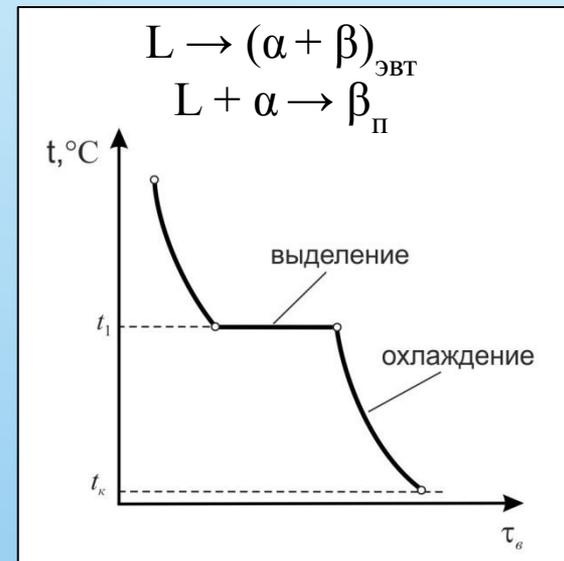
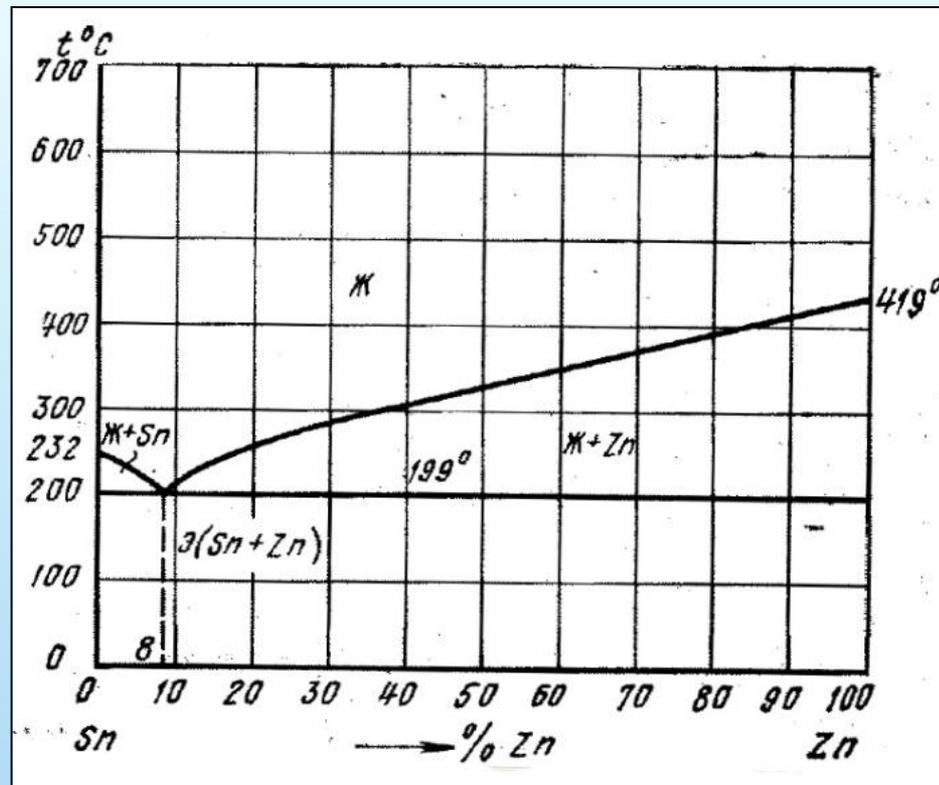
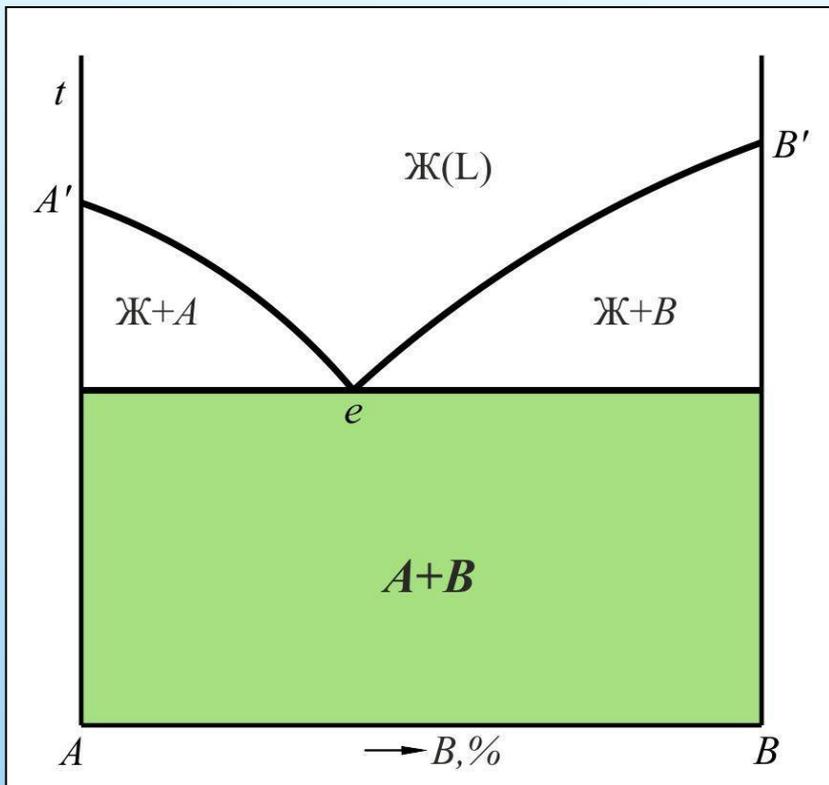


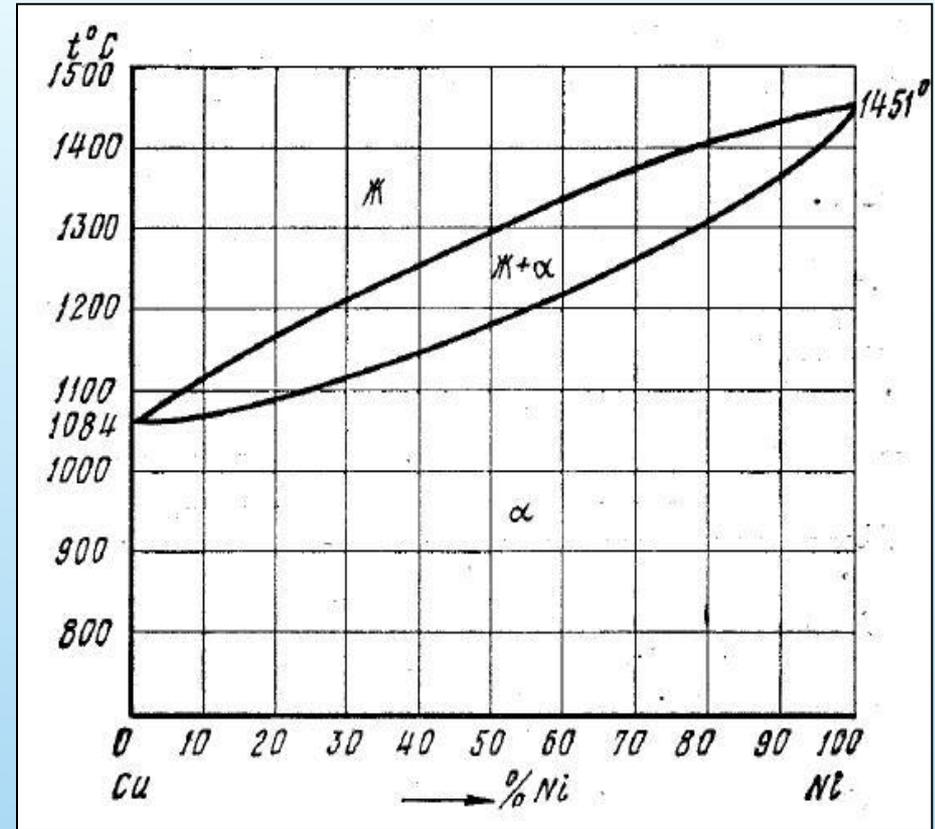
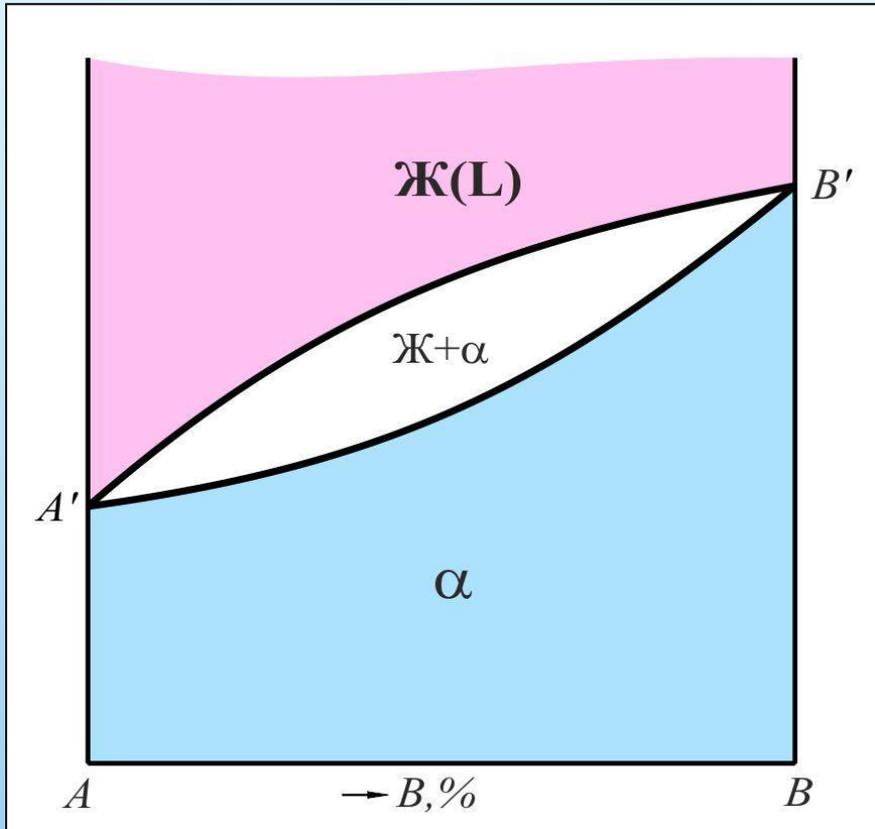
ДИАГРАММА I ТИПА БЕЗ РАСТВОРИМОСТИ В ТВЁРДОМ СОСТОЯНИИ



Растворимость элементов в твердом состоянии зависит от типа кристаллической решетки и ее параметров (атомного радиуса, атомного диаметра), то есть определяется положением элементов в таблице Д.И. Менделеева.

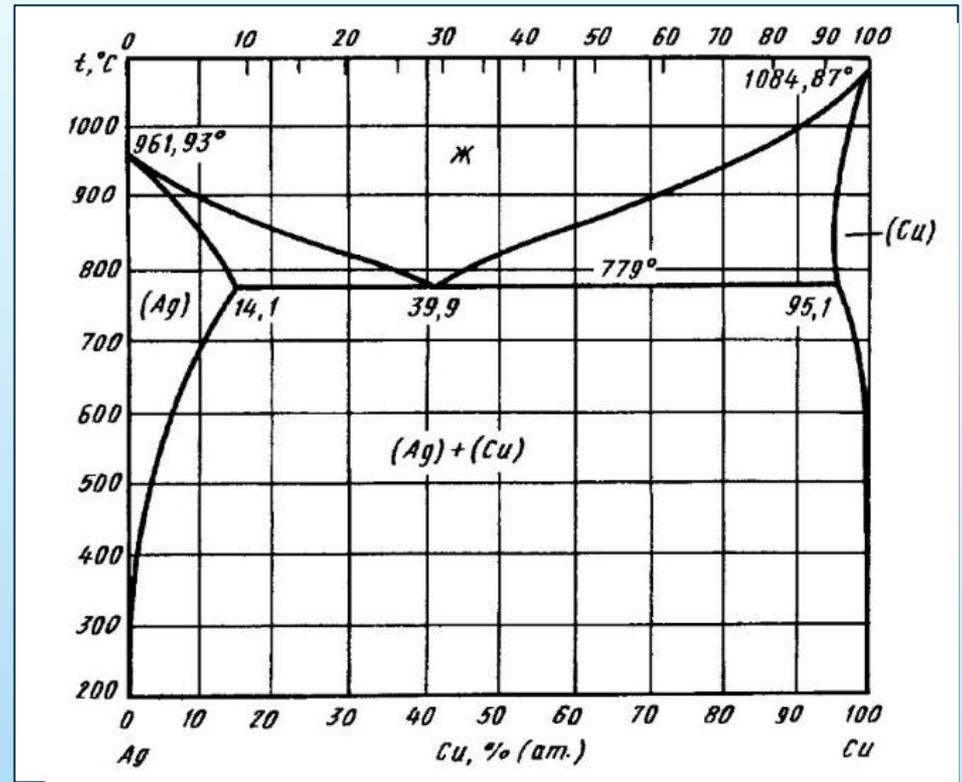
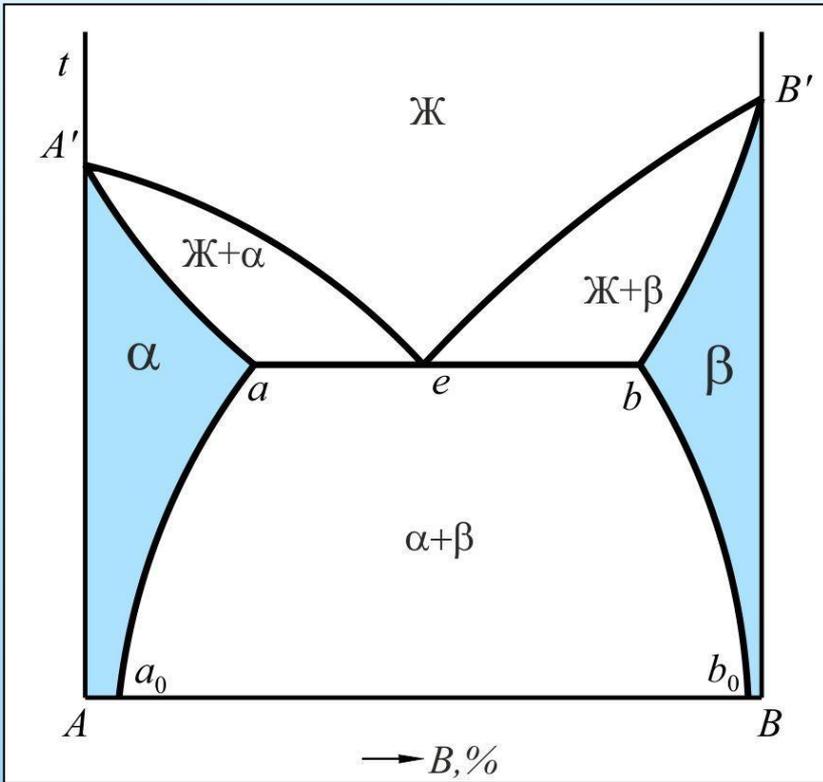
В случае полной нерастворимости элементов в твердом состоянии образуется механическая смесь компонентов ($A+B$).

ДИАГРАММА II ТИПА С НЕОГРАНИЧЕННОЙ РАСТВОРИМОСТЬЮ В ЖИДКОМ И ТВЁРДОМ СОСТОЯНИЯХ



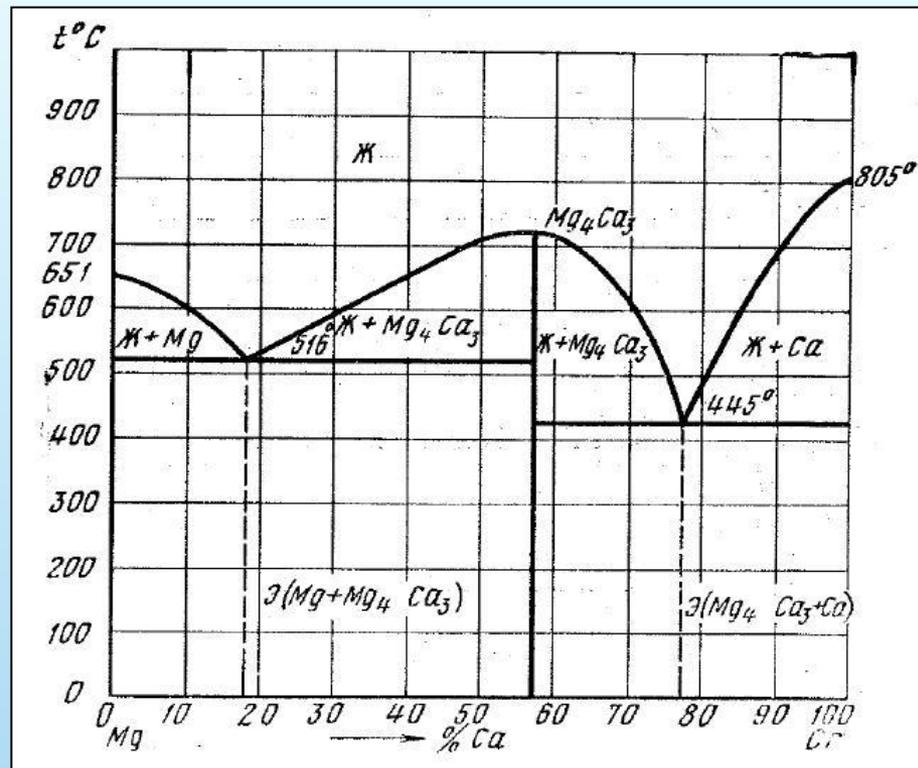
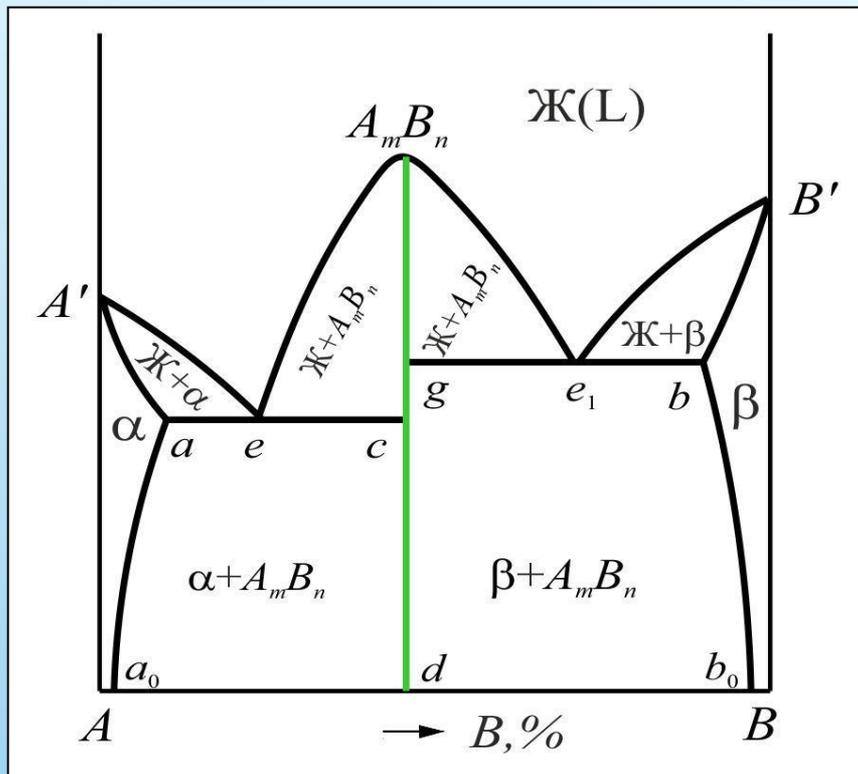
Неограниченную растворимость, т.е. способность образовывать твердые растворы в любых пропорциях, имеют только металлы с кристаллической решеткой одного типа при условии, что параметры их решеток различаются не более чем на 14–15%.

ДИАГРАММА III ТИПА С ОГРАНИЧЕННОЙ РАСТВОРИМОСТЬЮ В ТВЁРДОМ СОСТОЯНИИ



Для элементов с разным типом решетки, если атомы этих элементов близки по размерам, возможна **ограниченная растворимость в твердом состоянии**. Это значит, что они могут образовывать твердые растворы не при любом массовом соотношении элементов, а до определенного предела, при этом, чем больше разница в размерах атомов, тем меньше растворимость в твердом состоянии. С изменением температуры ограниченная растворимость в твердом состоянии обычно меняется.

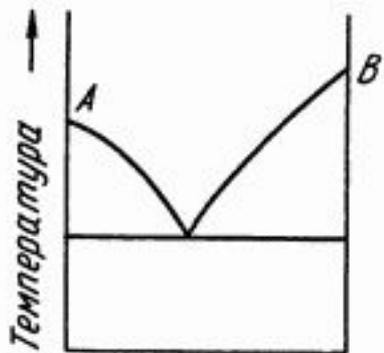
ДИАГРАММА IV ТИПА С ОБРАЗОВАНИЕМ ХИМИЧЕСКОГО СОЕДИНЕНИЯ



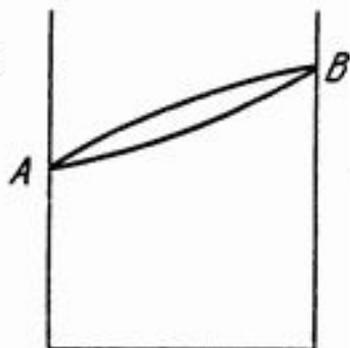
Элементы, образующие **химические соединения**, обычно резко различаются по электронному строению, атомному объему, типу и параметрам кристаллических решеток, т.е. это элементы, далеко расположенные друг от друга в таблице Д.И. Менделеева.

ДИАГРАММЫ СОСТАВ-СВОЙСТВА СПЛАВОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ХАРАКТЕРА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОМПОНЕНТОВ

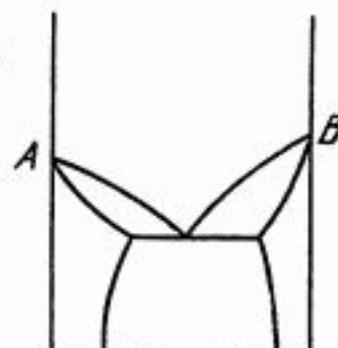
без растворимости
в твёрдом



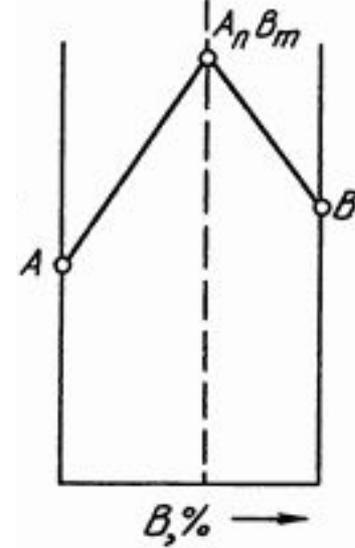
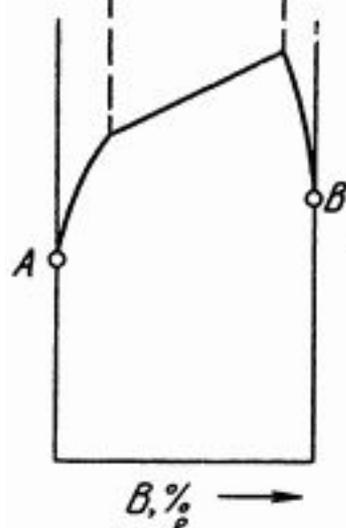
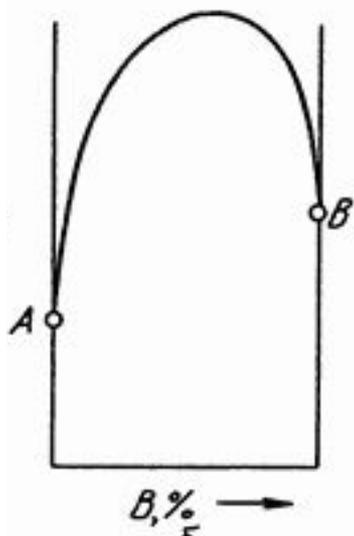
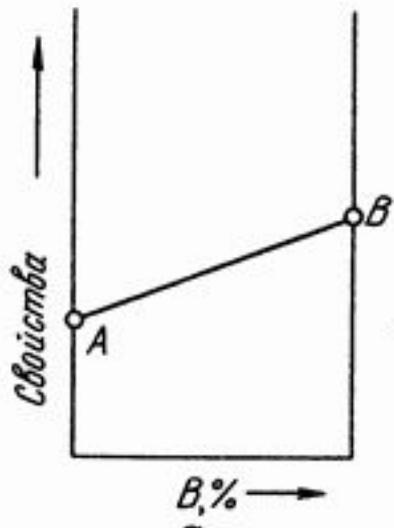
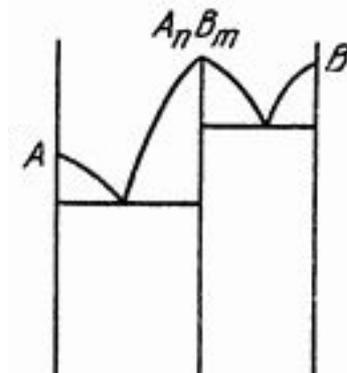
с неограниченной
растворимостью



с ограниченной
растворимостью
в твёрдом состоянии



с образованием
химического
соединения

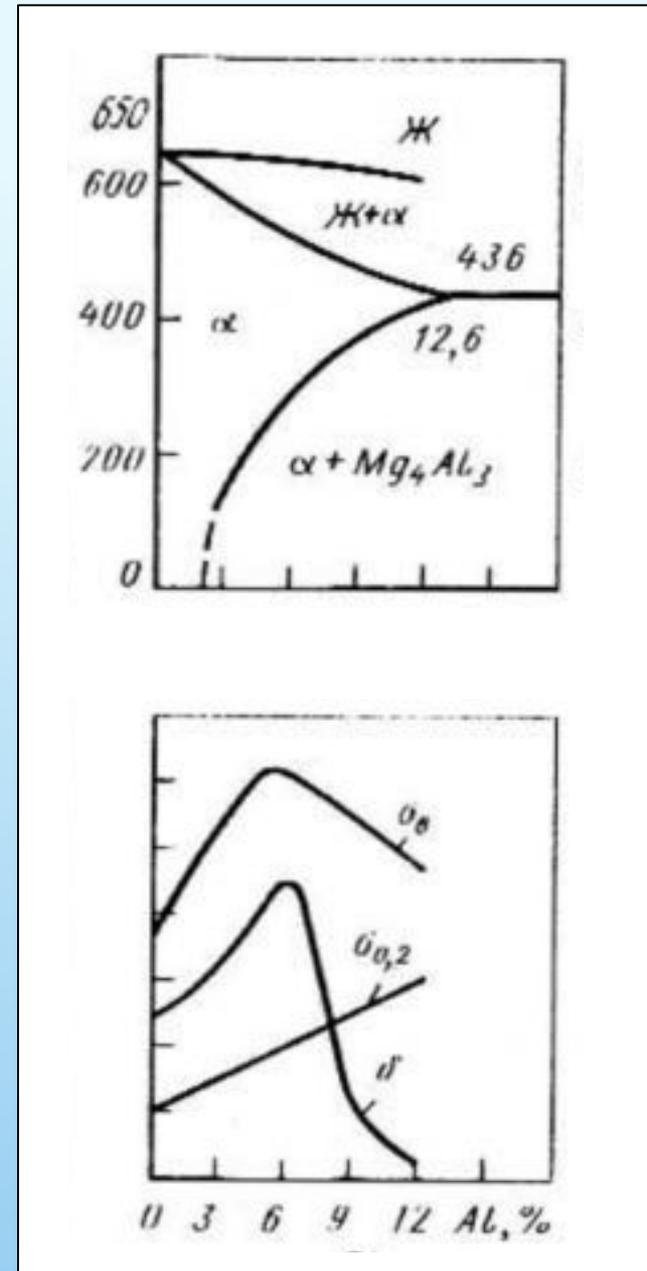
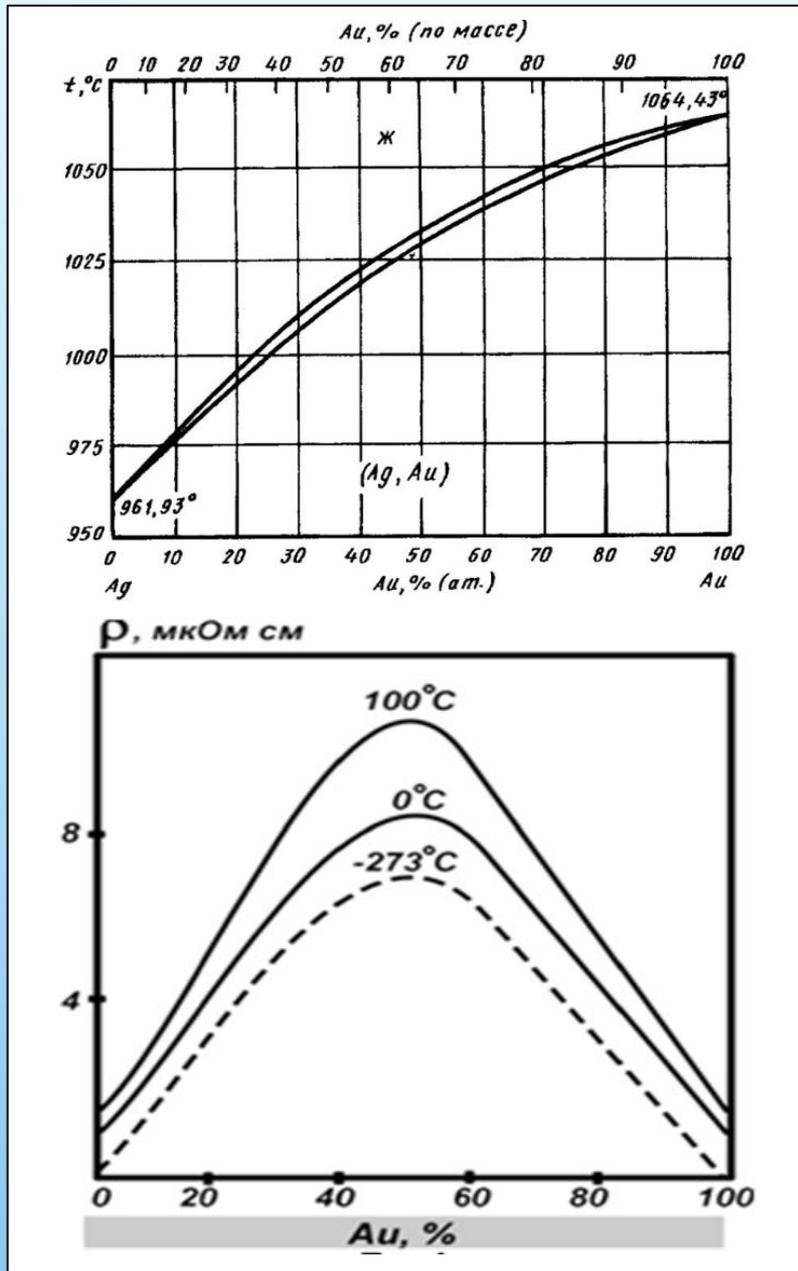


Между типом диаграммы состояния и свойствами сплава существует определенная взаимосвязь. Эту закономерность исследовал Курнаков Н.С. и описал в виде диаграмм «Состав–свойства». На **слайде 15** представлены четыре основных типа диаграмм состояния и соответствующие им зависимости механических свойств (твердость НВ и прочность σ_B) от концентрации компонента. Точки «А» и «В» на ординатах обозначают свойства (твердость, прочность) чистых компонентов.

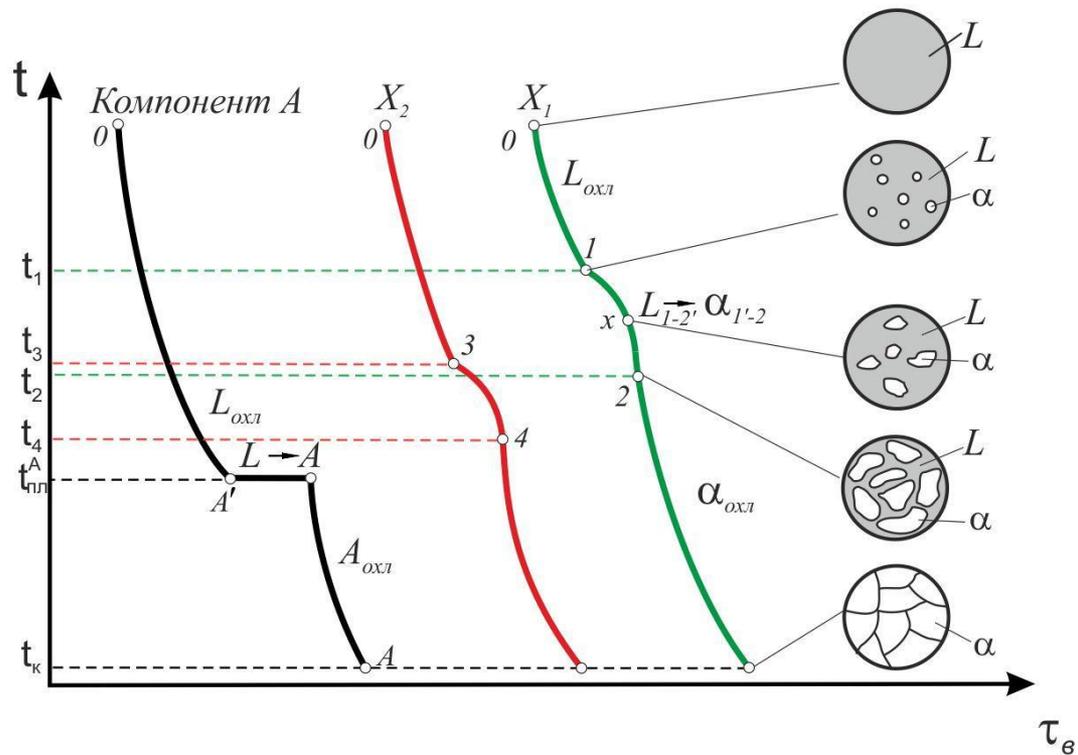
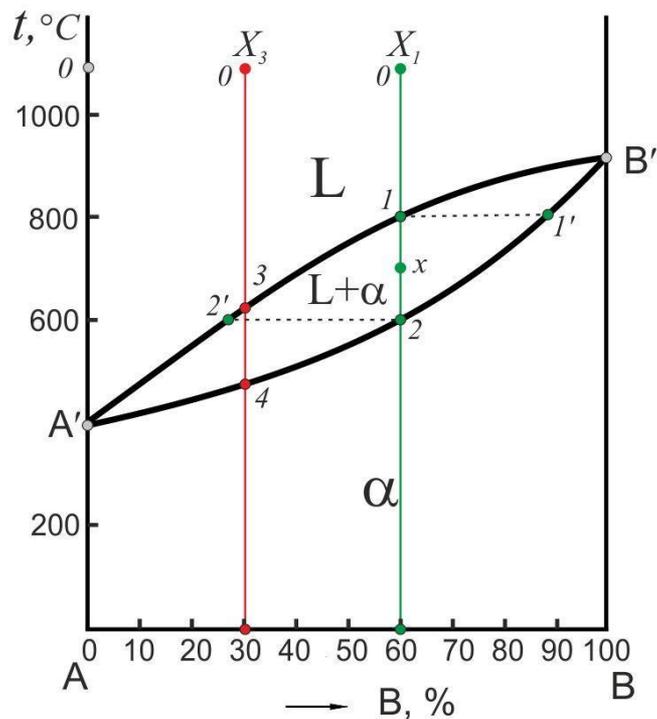
Данные закономерности сводятся к следующему:

1. При образовании **механических смесей (рис. а)** свойства сплава изменяются по линейному закону (аддитивно), т. е. находятся между свойствами чистых компонентов. Отметим, что вблизи эвтектики линейная зависимость сильно нарушается из-за измельчения структуры.
2. В случае **неограниченной растворимости компонентов** в твердом состоянии твердость и прочность изменяются по кривой с максимумом (**рис. б**). Упрочнение связано с искажением решетки и формированием остаточных напряжений (твердорастворное упрочнение).
3. При образовании **ограниченных твердых растворов (рис. в)** свойства в интервалах концентраций, соответствующих однофазным областям существования ограниченных твердых растворов α и β , изменяются по криволинейному закону, как в случае (**рис. б**). В двухфазной области диаграммы свойства изменяются по линейному закону по аналогии со случаем (**рис. а**), реализуемым для механических смесей. Крайние точки на прямой соответствуют свойствам предельно насыщенных твердых растворов α и β .
4. При образовании **химического соединения A_nB_m** свойства этого соединения отмечаются на кривой свойства концентрация особой (сингулярной) точкой (**рис. г**). Сама диаграмма состав–свойства состоит из двух диаграмм, соответствующих сплавам, образующим механические смеси.

ДИАГРАММА «СОСТАВ – СВОЙСТВА» В РЕАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ



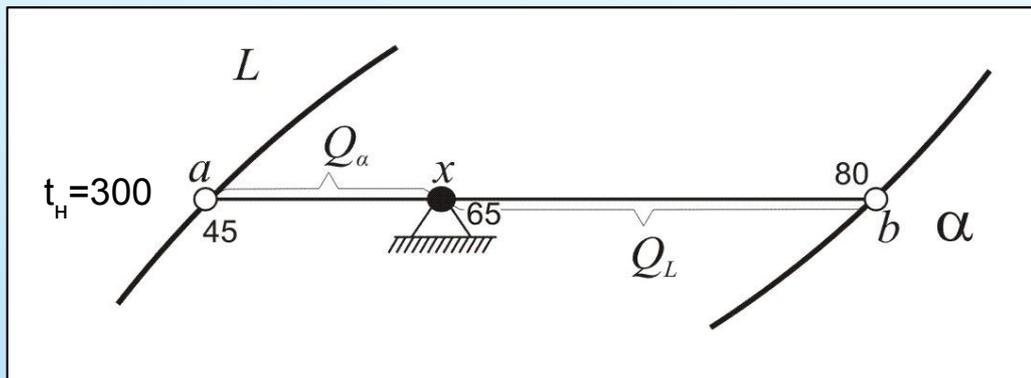
АНАЛИЗ ФАЗОВЫХ И СТРУКТУРНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В СИСТЕМЕ С НЕОГРАНИЧЕННОЙ РАСТВОРИМОСТЬЮ КОМПОНЕНТОВ В ЖИДКОМ И ТВЁРДОМ СОСТОЯНИЯХ



ПРАВИЛО ОТРЕЗКОВ И ПРАВИЛО РЫЧАГА

Правило отрезков позволяет определить концентрацию компонентов в сплаве при заданной температуре

Правило рычага позволяет определить массовую долю фаз в сплаве при заданной температуре



Правило отрезков

Точка «а» показывает концентрацию (состав) компонента «В» в жидком расплаве: $a_L = \text{«a»} = 45\%B$

Точка «b» показывает концентрацию компонента «В» в твёрдом α - растворе: $b_\alpha = \text{«b»} = 80\%B$

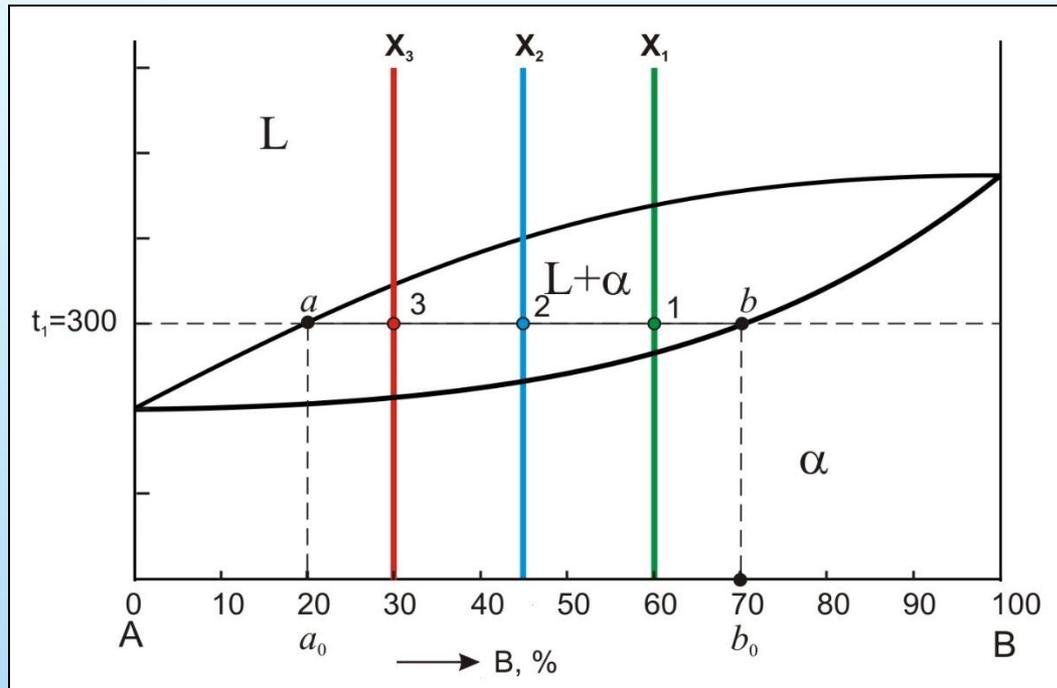
Точка «x» показывает концентрацию компонента «В» в сплаве «X»: $x_0 = \text{«x»} = 65\%B$

Правило рычага

$$Q_L = \frac{xb}{ab} \cdot 100\% \quad \text{или} \quad Q_L = \frac{x-b}{a-b} \cdot 100\%$$

$$Q_\alpha = \frac{xa}{ab} \cdot 100\% \quad \text{или} \quad Q_\alpha = \frac{x-a}{a-b} \cdot 100\%$$

РАСЧЁТ КОЛИЧЕСТВА ФАЗ И СТРУКТУРНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ДЛЯ СПЛАВА «X» ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ 300°C



X = точки 1, 2, 3

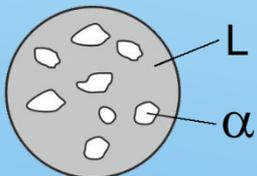
$$Q_L = \frac{X - b}{a - b} \cdot 100\%$$

$$Q_\alpha = \frac{X - a}{a - b} \cdot 100\%$$

Сплав X₃

$$Q_L = \frac{30 - 70}{20 - 70} \cdot 100\% = 80\%$$

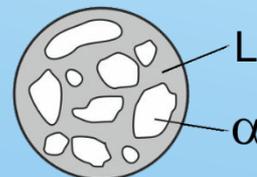
$$Q_\alpha = \frac{30 - 20}{20 - 70} \cdot 100\% = 20\%$$



Сплав X₂

$$Q_L = \frac{45 - 70}{20 - 70} \cdot 100\% = 50\%$$

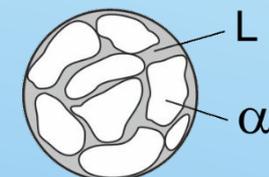
$$Q_\alpha = \frac{45 - 20}{20 - 70} \cdot 100\% = 50\%$$



Сплав X₁

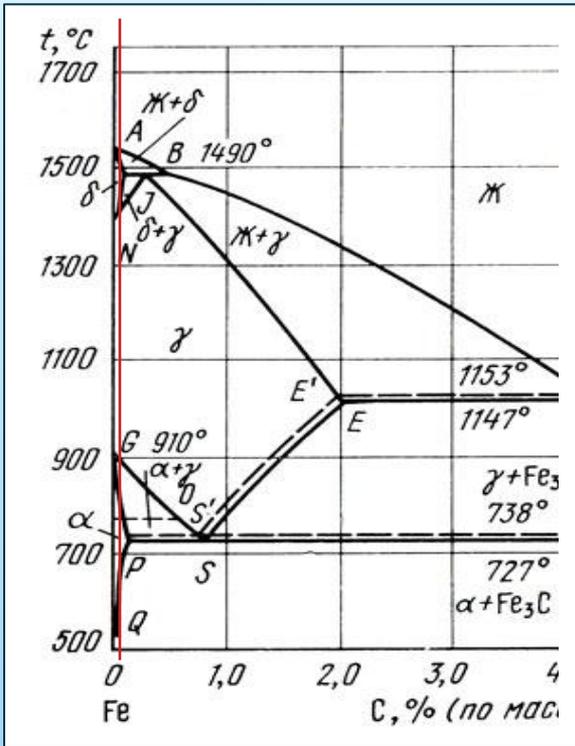
$$Q_L = \frac{60 - 70}{20 - 70} \cdot 100\% = 20\%$$

$$Q_\alpha = \frac{60 - 20}{20 - 70} \cdot 100\% = 80\%$$

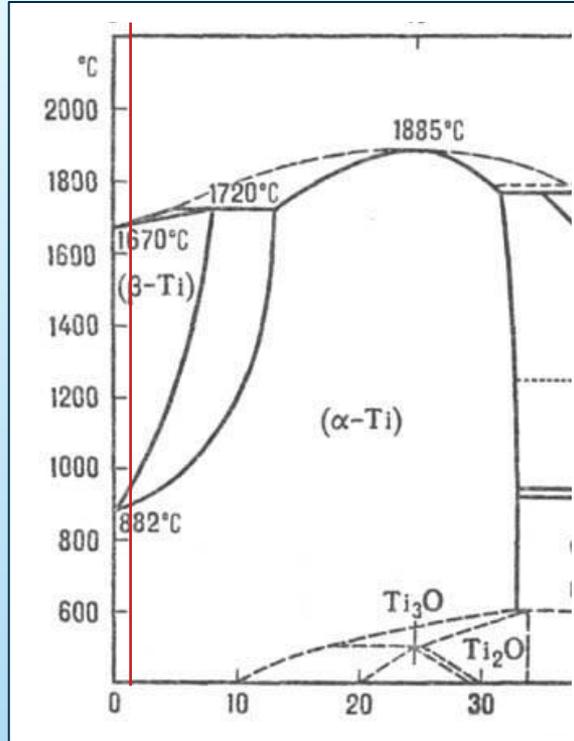


РАЗНООБРАЗИЕ ОДНОФАЗНЫХ СТРУКТУР

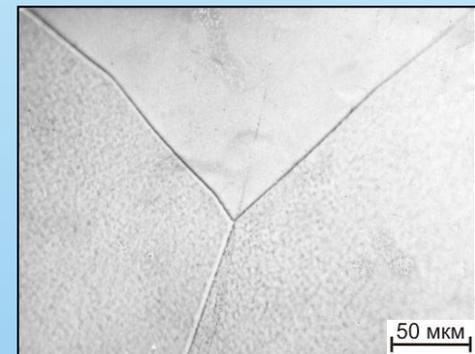
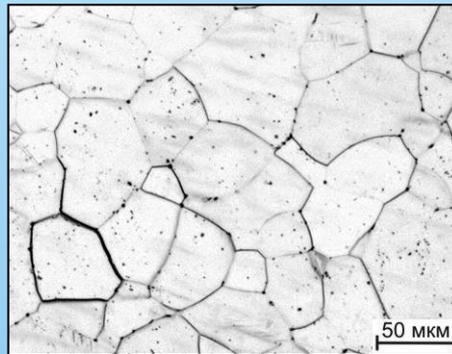
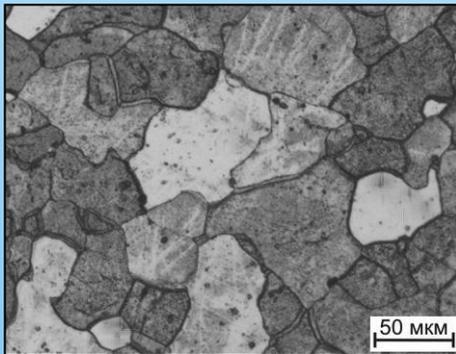
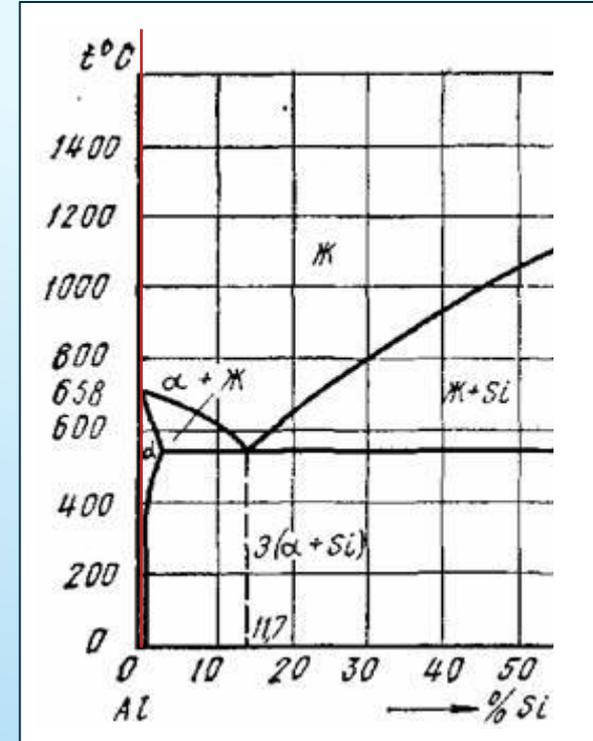
АРМКО-железо
АРМКО-железо(Fe + 0,005%C)



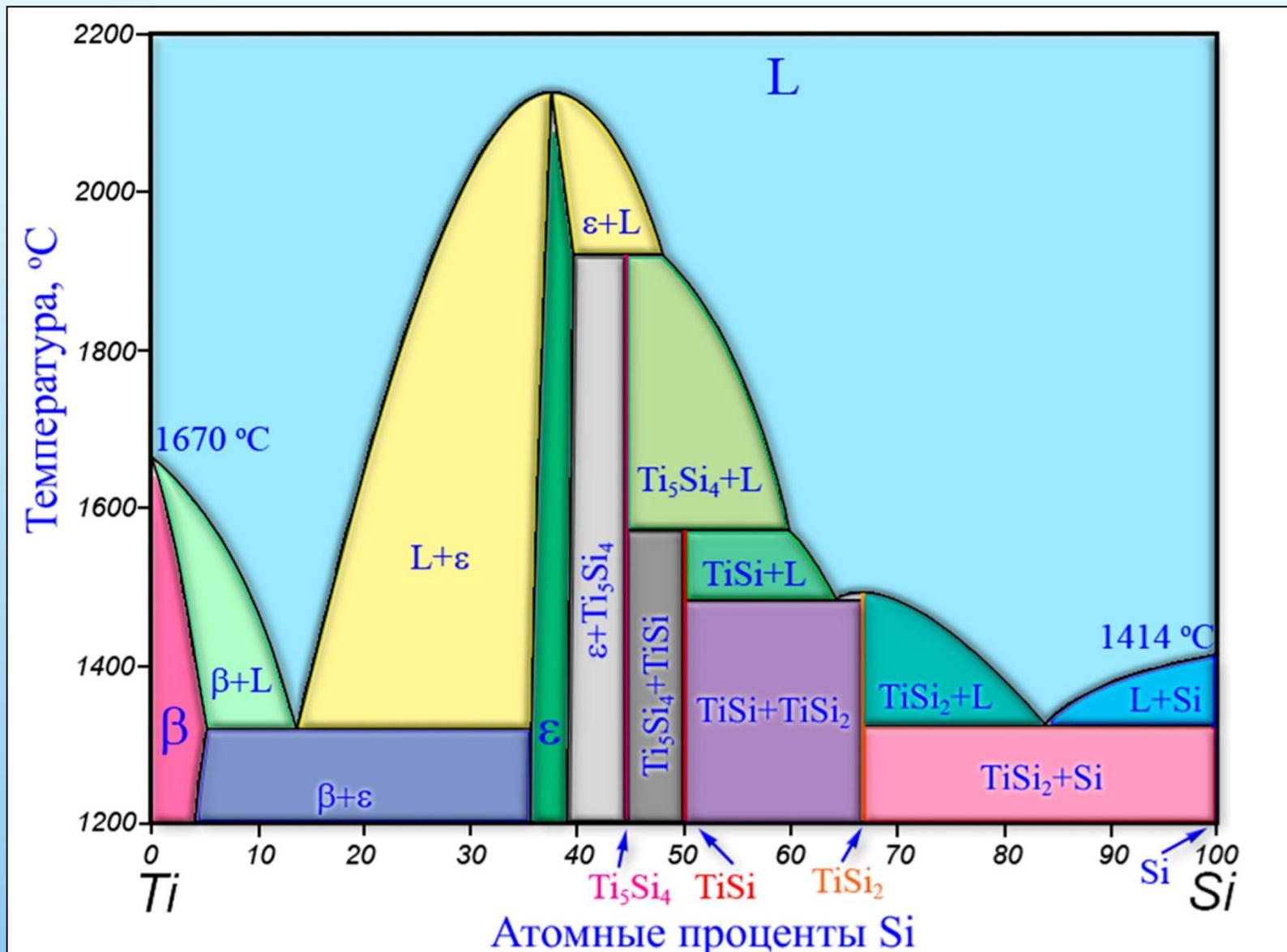
Технический титан
BT1-0 (Ti + 0,12% O)



Технический алюминий
A85 (Al + 0,03%Si)



РАБОТА С ФАЗОВЫМИ ОБЛАСТЯМИ



ВИДЕОСЮЖЕТЫ К САМОСТОЯТЕЛЬНОМУ ПРОСМОТРУ

по лекции – 3 «Теория сплавов»

<https://www.youtube.com/watch?v=BDyvsRoNG08>

Кристаллизация сплавов