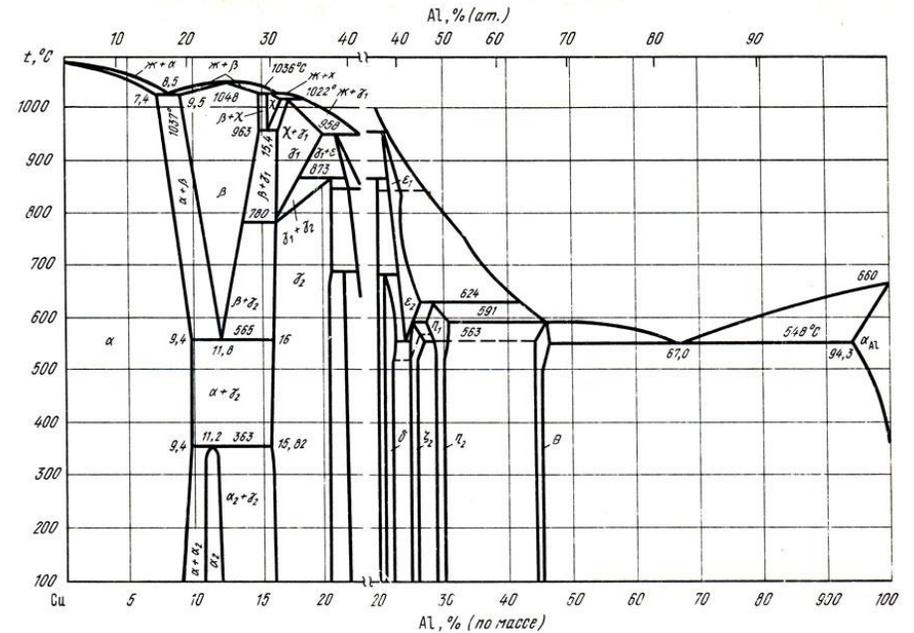
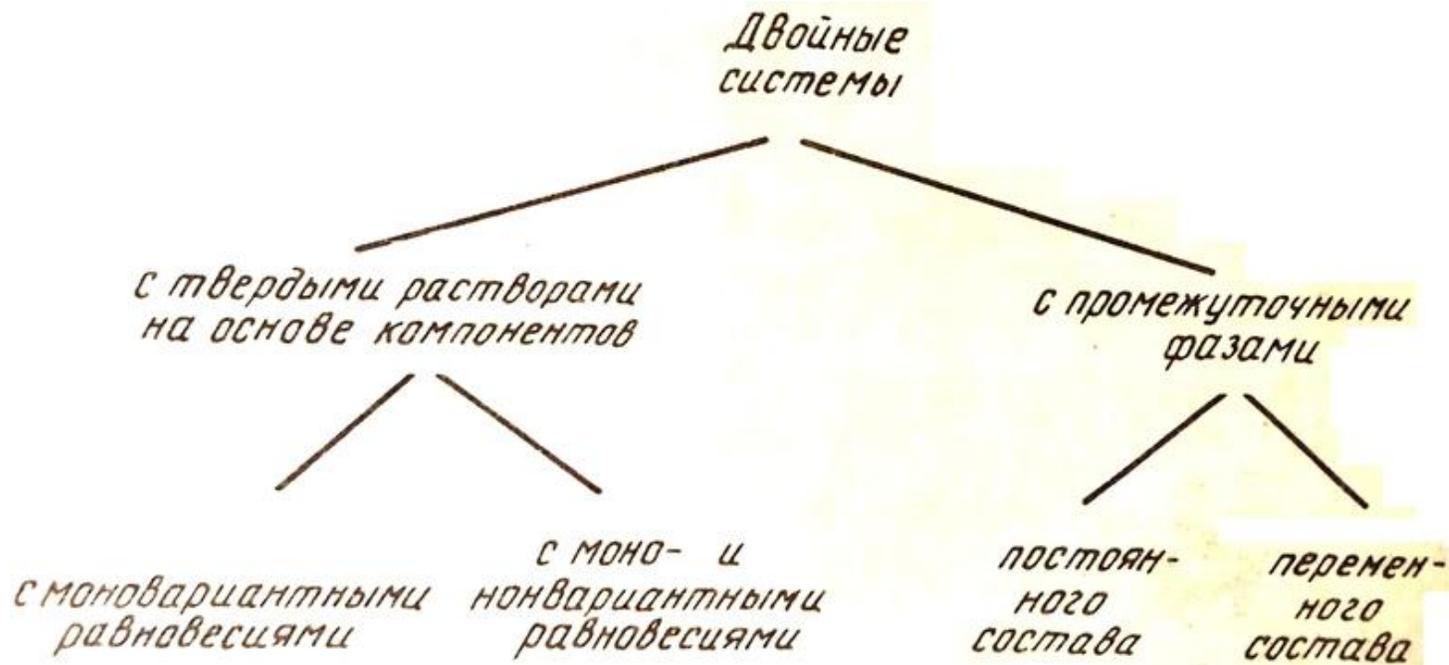


Теоретическое и прикладное материаловедение

Лекция 6

Классификация двойных систем

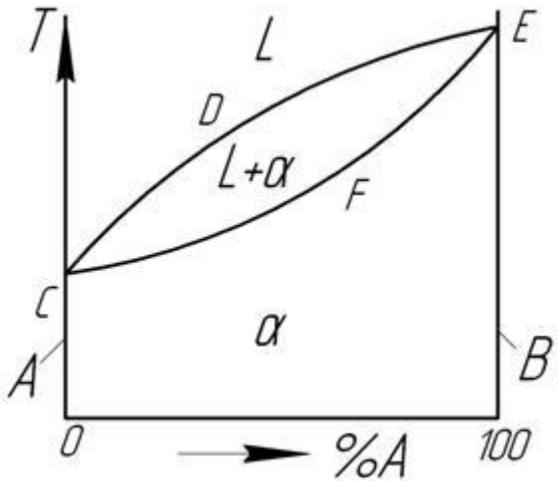


Двойные системы с моновариантными равновесиями

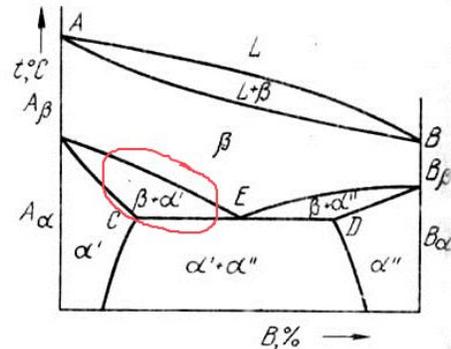
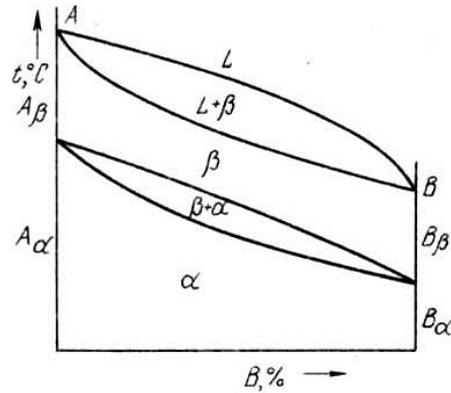
$$C = k - f + 1$$

$$f = 2$$

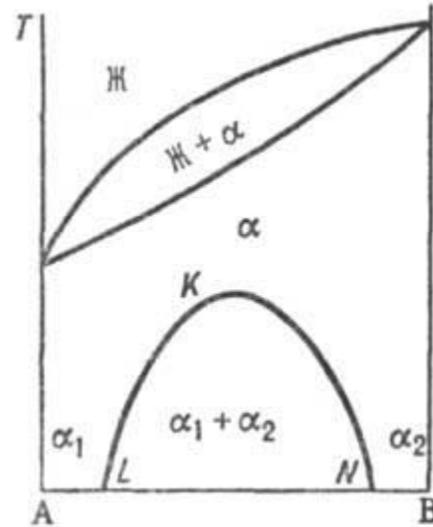
$$L \leftrightarrow \alpha$$



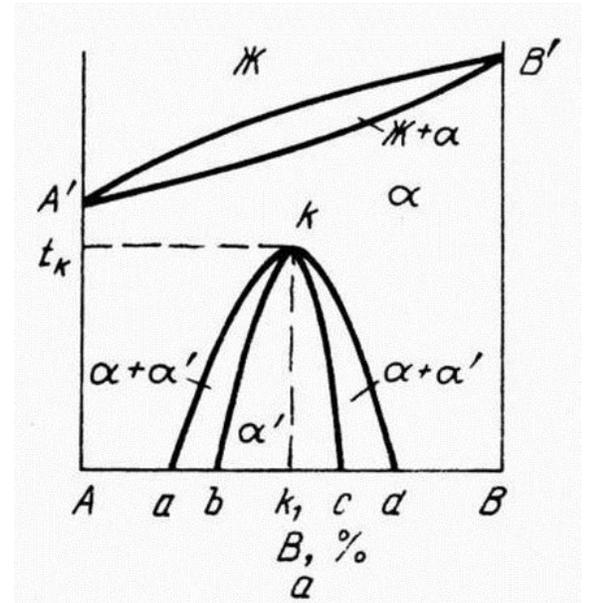
$$\alpha \leftrightarrow$$



$$\alpha_1 \leftrightarrow \alpha_2$$



$$\alpha \leftrightarrow \alpha'$$



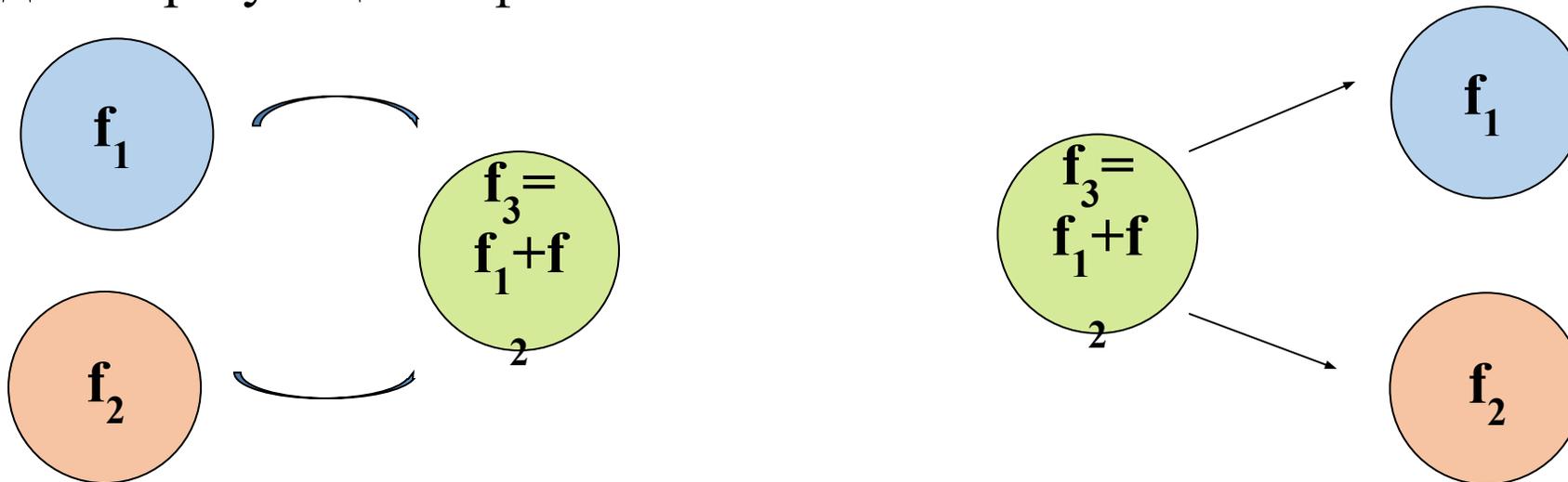
Трехфазные равновесия

При любом фазовом превращении в f фазной системе число превращающихся фаз может быть равно $1, 2, \dots, f-1$, а число образующихся – соответственно $f-1, f-2, \dots, 2, 1$.

$$C = k - f + 1$$

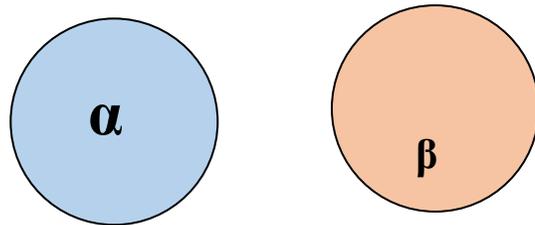
$$f_{\max} = 3$$

Для трехфазной системы может быть максимум две превращающихся фазы, чему отвечает одна образующаяся фаза

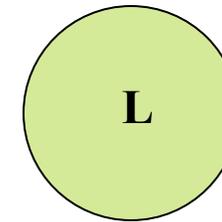


Трехфазные равновесия

При рассмотрении трехфазовых равновесий в двухкомпонентных системах в простейшем случае возможными фазами являются:

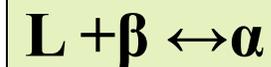
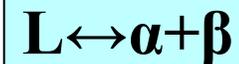


Твердые растворы, образующиеся на основе компонентов А и В или промежуточные фазы

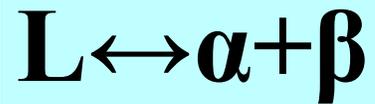


Жидкий раствор на основе компонентов А и В

Можно записать два возможных варианта:



Трехфазные равновесия



Эвтектическое равновесие



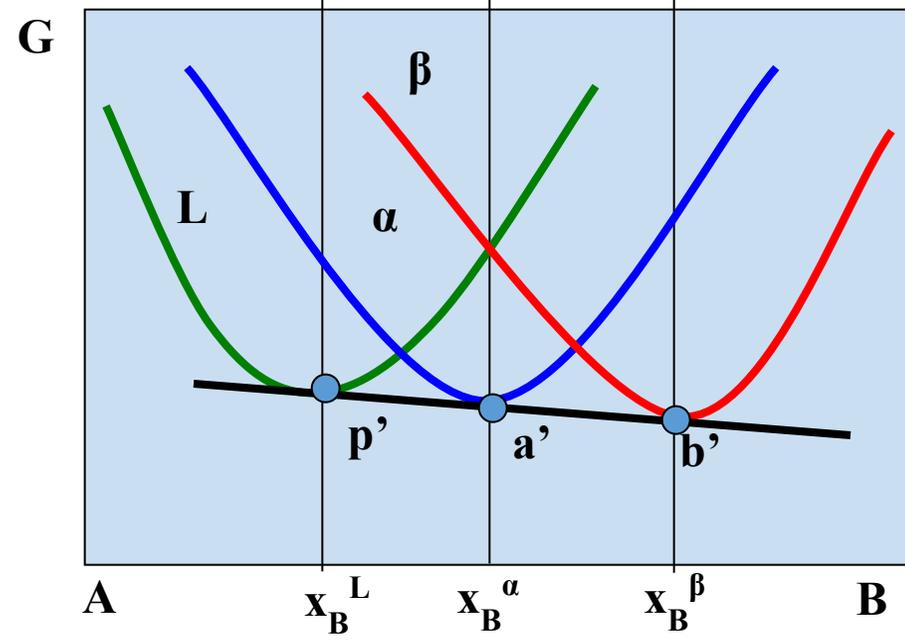
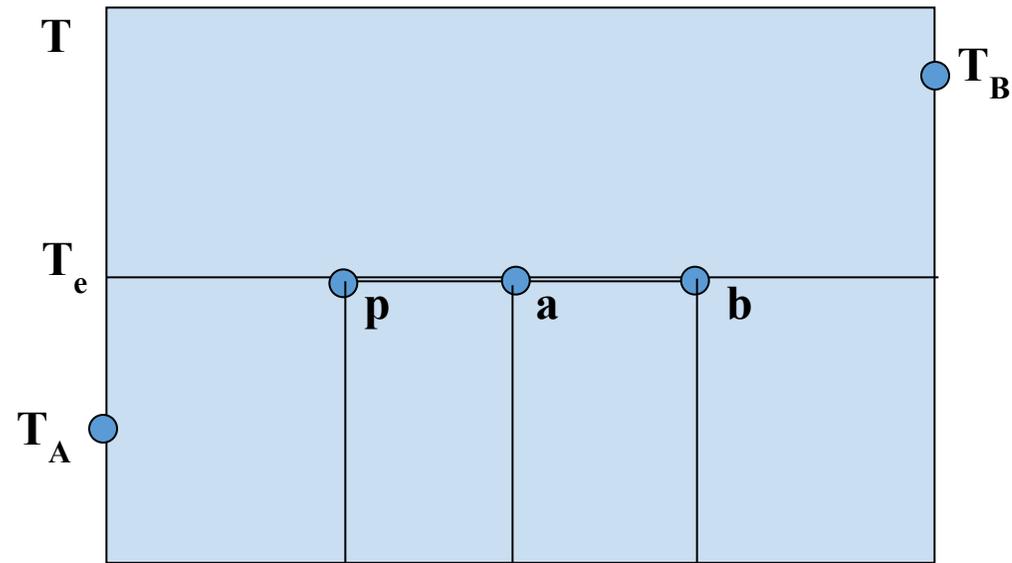
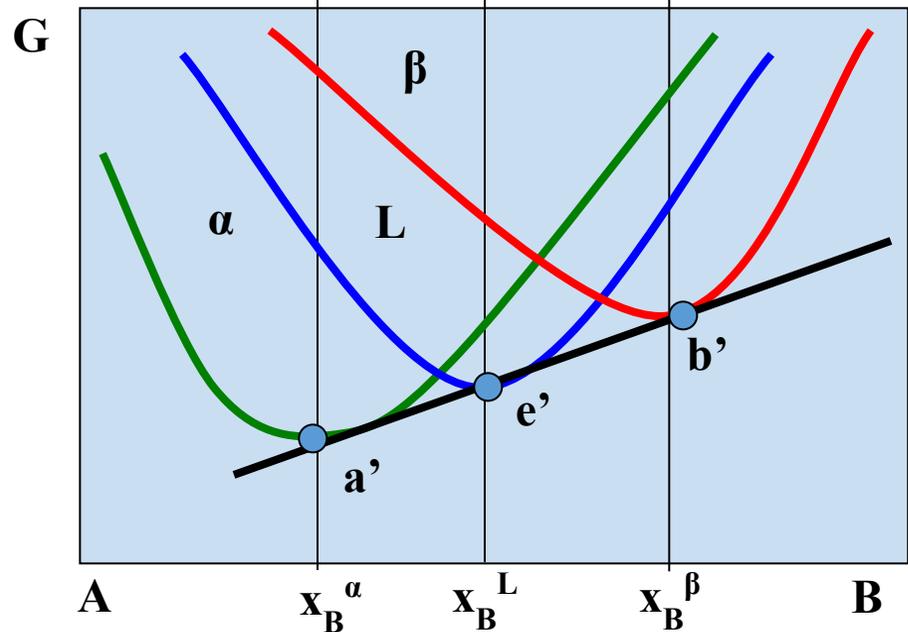
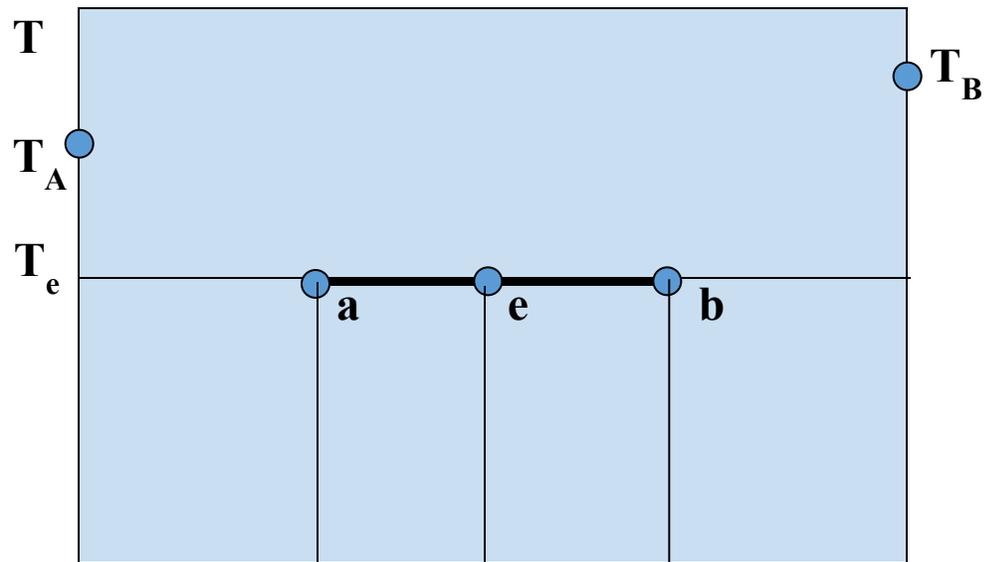
Перитектическое равновесие

Из общего условия фазового равновесия для эвтектического и перитектического превращений в системе А-В имеем:

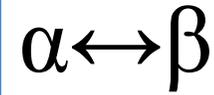
$$\mu_A^\alpha = \mu_A^\beta = \mu_A^L$$

$$\mu_B^\alpha = \mu_B^\beta = \mu_B^L$$

Если взаимодействие атомов одного сорта в твердом растворе сильнее вз-я атомов разного сорта, то непрерывный ряд твердых растворов существовать не может, система относится к эвтектическому или перитектическому типу



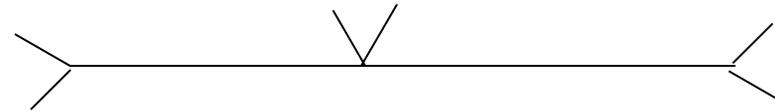
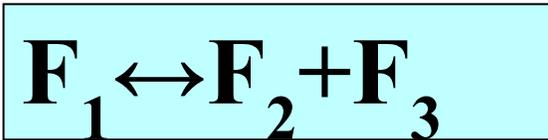
Трехфазное эвтектическое равновесие является сочетанием трех
двухфазных равновесий



Эвтектическую горизонталь можно рассматривать как совокупность
трех **конод**, символизирующих наличие трех указанных двухфазных
равновесий

Трехфазная реакция, в которой участвуют три фазы, всегда протекает при постоянной температуре и постоянном составе фаз. Возможны только два варианта:

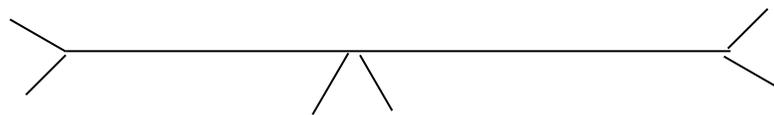
- одна фаза промежуточного состава распадается на две другие фазы крайних на горизонтали составов – это реакция **эвтектического** типа;



К **эвтектическому** типу относятся следующие реакции:

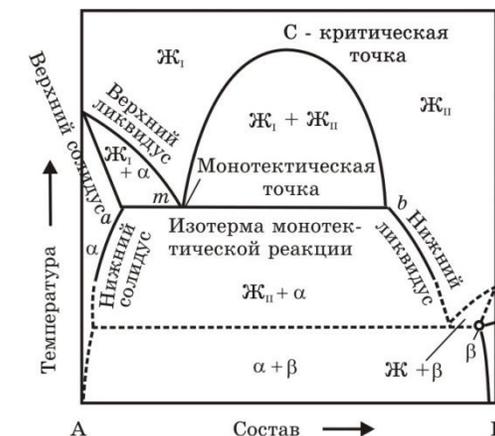
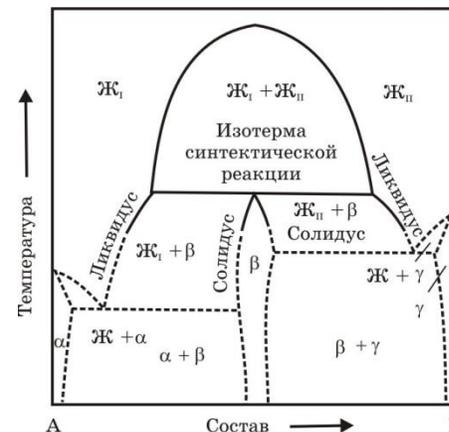
- эвтектическая $L \leftrightarrow \alpha + \beta$;
- эвтектоидная $\gamma \leftrightarrow \alpha + \beta$;
- монотектическая $L_1 \leftrightarrow L_2 + \alpha$;
- монотектоидная $\gamma_1 \leftrightarrow \gamma_2 + \alpha$;
- метатектическая (кататектическая) $\gamma \leftrightarrow \alpha + L$;

- при взаимодействии двух крайних на горизонтали фаз образуется третья, промежуточная по составу фаза – это реакция перитектического типа.



К **перитектическому** типу относятся следующие реакции:

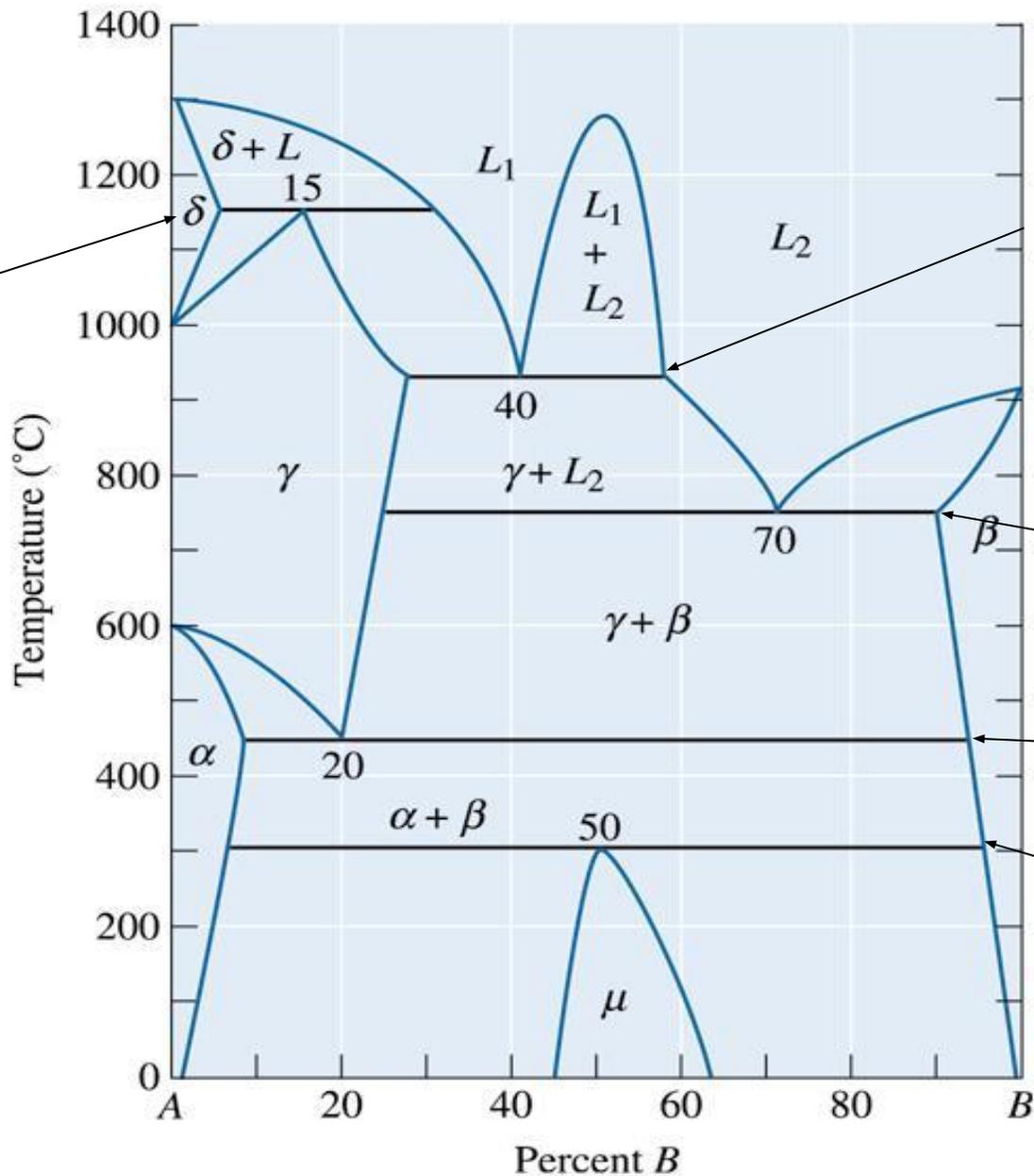
- перитектическая $\alpha + L \leftrightarrow \beta$;
- перитектоидная $\gamma + \alpha \leftrightarrow \beta$;
- синтектическая $L_1 + L_2 \leftrightarrow \alpha$.



Любое из приведенных трехфазных равновесий может рассматриваться как сочетание двухфазных равновесий: $F_1 \leftrightarrow F_2$; $F_1 \leftrightarrow F_3$; $F_2 \leftrightarrow F_3$

Перитектическая реакция

©2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning is a trademark used herein under license.



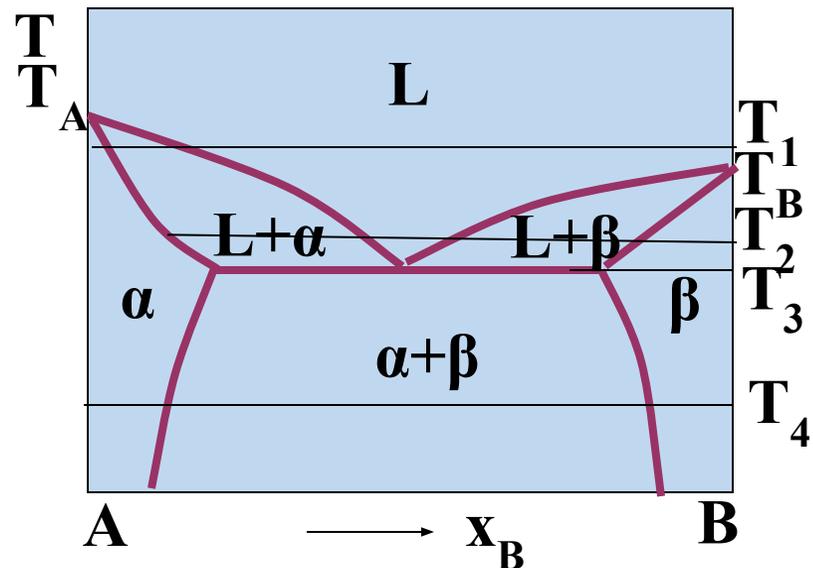
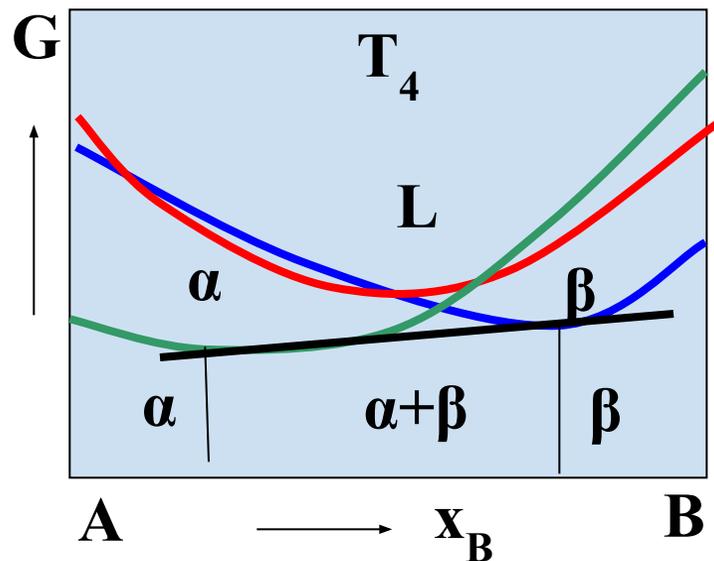
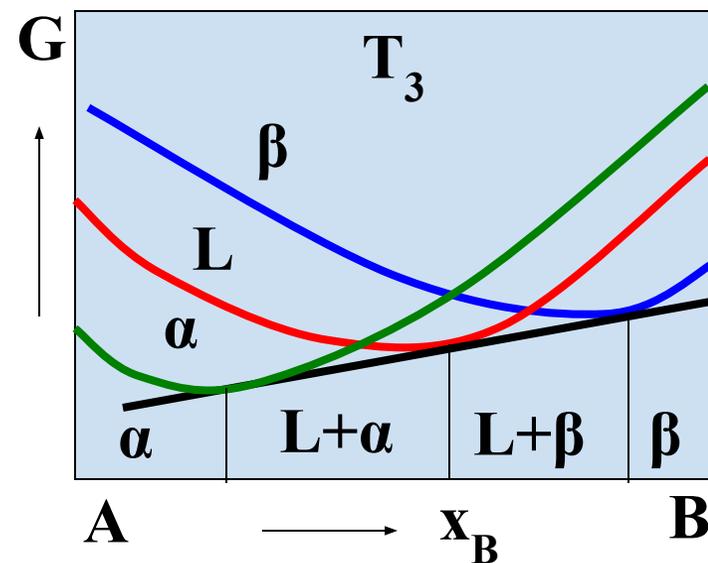
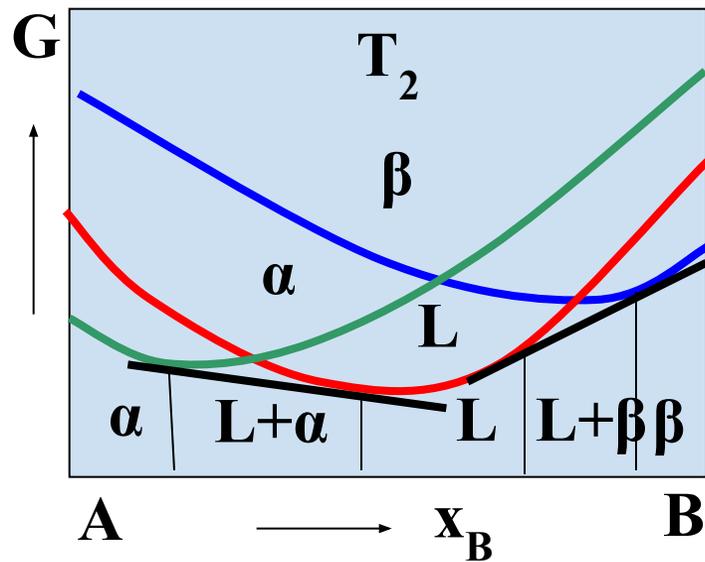
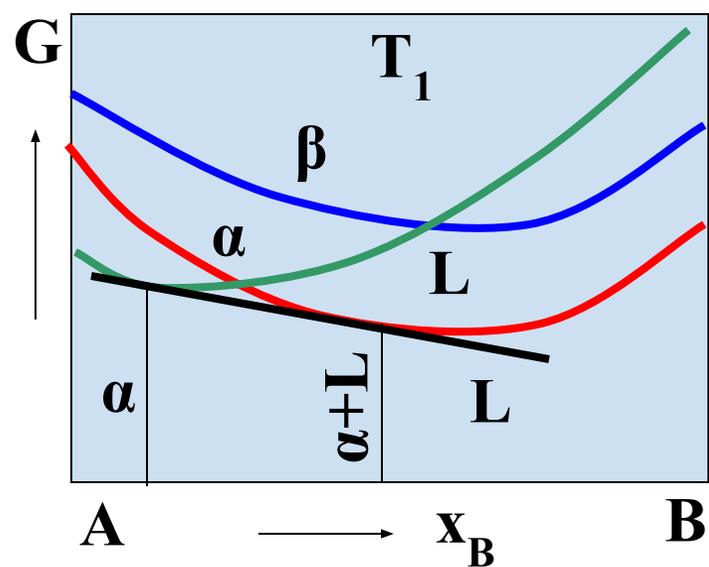
Монотектическая реакция

Эвтектическая реакция

Эвтектоидная реакция

Перитектоидная реакция

ДСС с эвтектическим равновесием

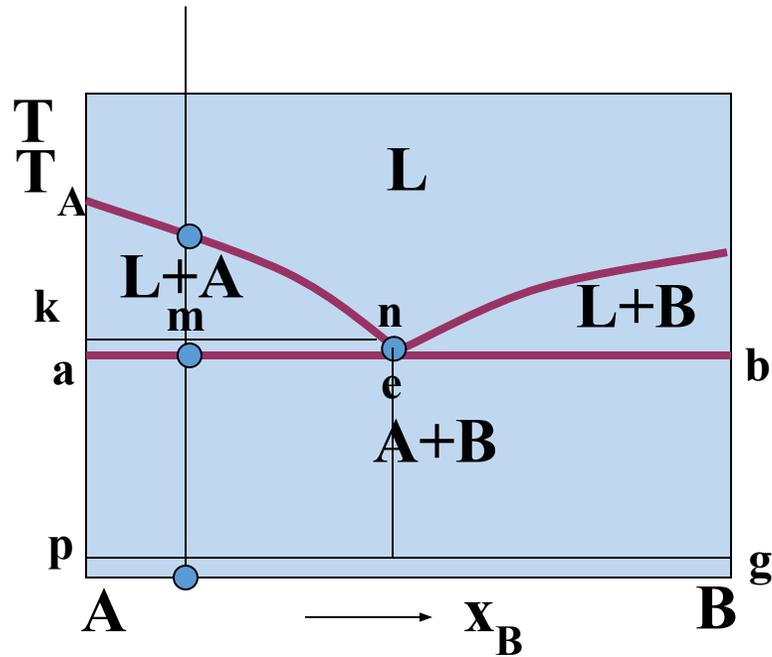


ДСС с эвтектическим равновесием

Рассмотрим диаграмму состояния сплава с эвтектическим равновесием.

Сплав обладает полной взаимной растворимостью в жидком состоянии.

В твердом состоянии растворимость отсутствует.



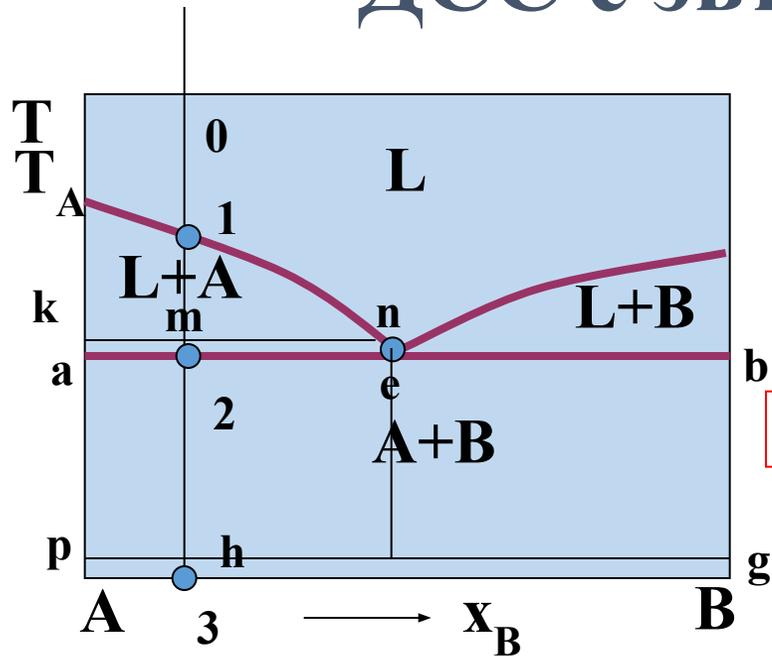
Структурные составляющие - это те структурно однородные элементы, из которых состоит сплав.

T_B

Следует запомнить, что:

1. Состав эвтектики всегда постоянен.
2. Выше линии эвтектики состав жидкой фазы определяется линией ликвидуса, а состав твердой фазы постоянен.
3. Есть отличие между понятиями «фаза» и «структурная составляющая».

ДСС с эвтектическим равновесием



В точке 2 в равновесии находится 3 фазы: L, A, B

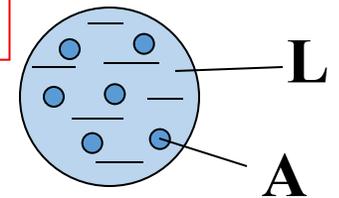
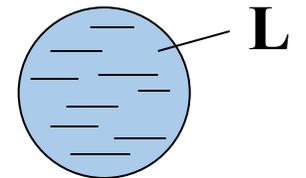
В интервале 2-3 в равновесии находится 2 фазы: A и B

0-1 охлаждение жидкого сплава

1-2 начало кристаллизации с

выделением кристаллов A

Точка m. Каков вес жидкой и твердой фаз?



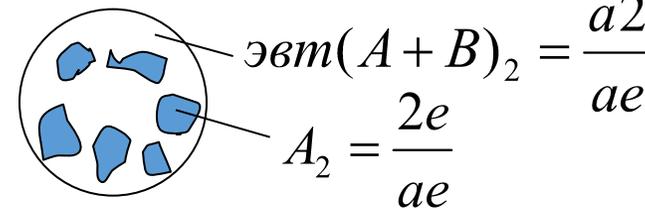
количество фазы L в точке m $L_m = \frac{km}{kn}$

$$A_m = \frac{mn}{kn}$$

т. 2 трехфазное равновесие $L \rightarrow A+B$

жидкость перешла в мелкодисперсную фазу

A+B



количество
структурной
составляющей
эвтектики

2-3 охлаждение твердого сплава

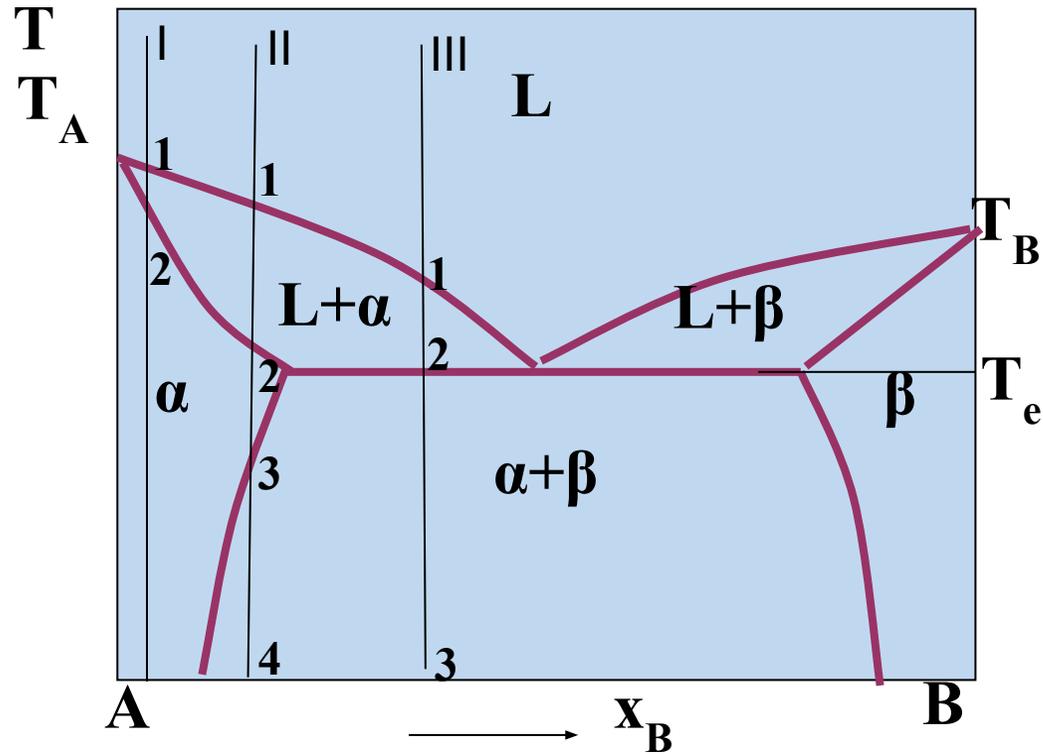
На линии rhg – определяется состав твердого раствора

В т. 3 фазы A и B, структурные составляющие A и эвт(A+B)

Диаграмма состояния эвтектического типа

- СОЛЬВУС – [solvus] — графическое изображение (линия, поверхность) на диаграмме состояния зависимости температуры растворимости элемента в твердом растворе от химического состава
- **Доэвтектические сплавы** — в сплавах, имеющих в своем составе эвтектику, любой сплав, чей состав имеет избыток основного металла по сравнению с составом эвтектики и чья равновесная микроструктура содержит некоторое количество эвтектической структуры.
- **Заэвтектический сплав** - в сплавах, имеющих в своем составе эвтектику, любой сплав, состав которого имеет избыток легирующего элемента по сравнению с составом эвтектики и чья равновесная микроструктура содержит некоторое количество эвтектической структуры.

Диаграмма состояния эвтектического типа с полной взаимной растворимостью в жидком состоянии и ограниченной растворимостью в твердом состоянии



Сплав 1

- 0-1 Охлаждение жидкого сплава;
- т.1 Начало процесса кристаллизации с выделением кристаллов α;
- 1-2 Дальнейшая кристаллизация с выделением кристаллов α;
- т. 2 Конец выделения кристаллов α;
- 2-3 Охлаждение твердого сплава.

Сплав 2

- 0-1 Охлаждение жидкого сплава;
- т.1 Начало процесса кристаллизации с выделением кристаллов α;
- 1-2 Дальнейшая кристаллизация с выделением кристаллов α;
- т. 2 Конец выделения кристаллов α;
- 2-3 Охлаждение твердого сплава.
- т.3 Начало выделения кристаллов β из α - твердого раствора;
- 3-4 α твердый раствор пересыщен и из него выделяются избыточные кристаллы α → β_{II}

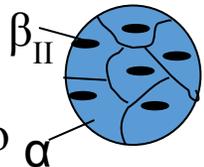
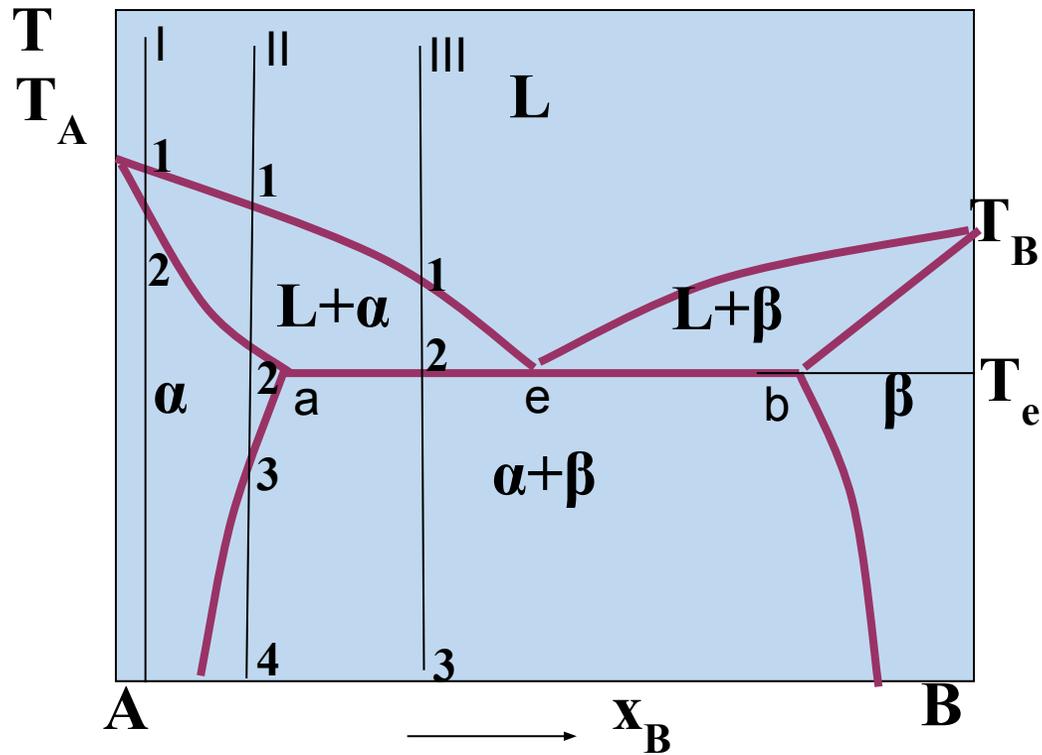
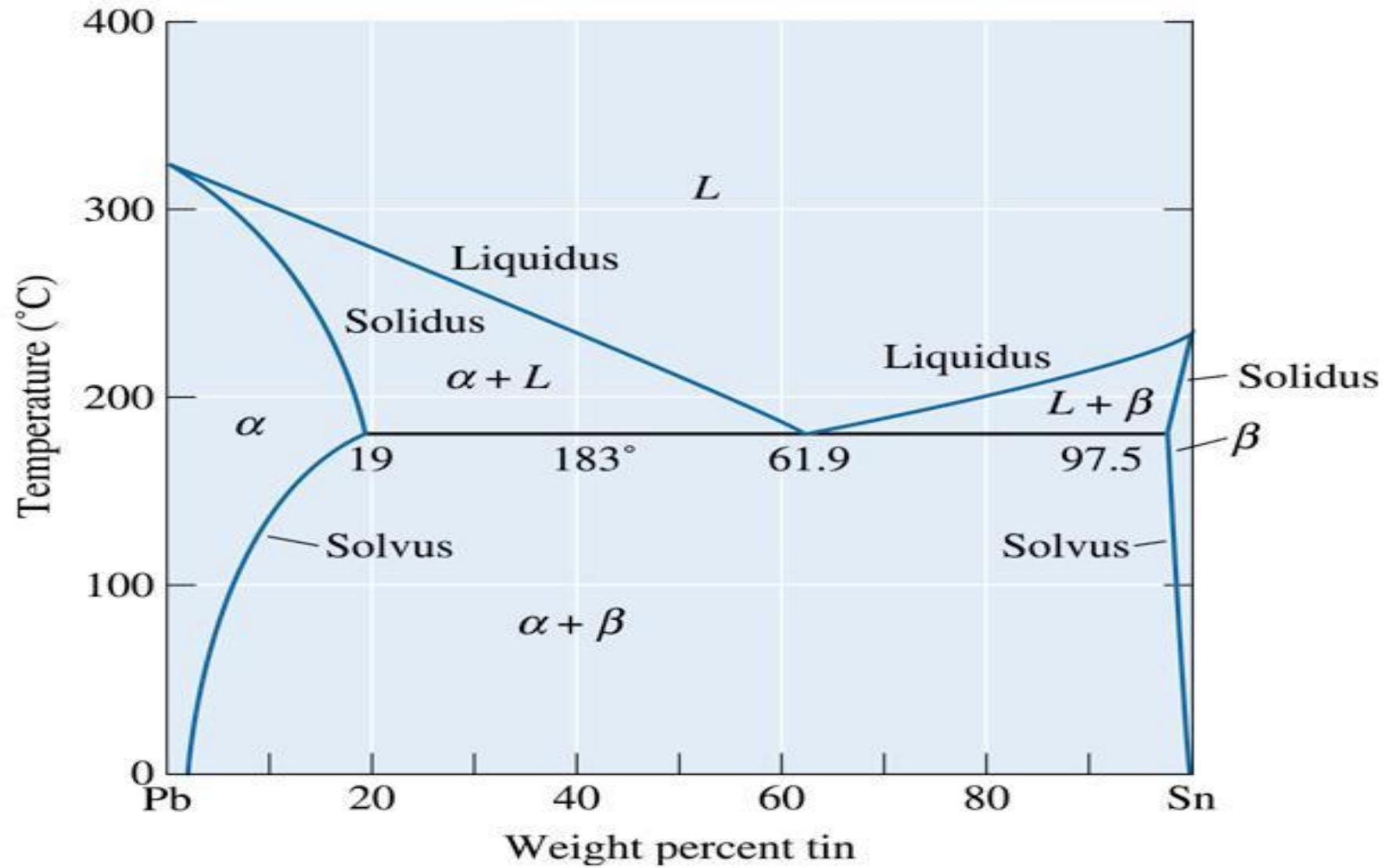


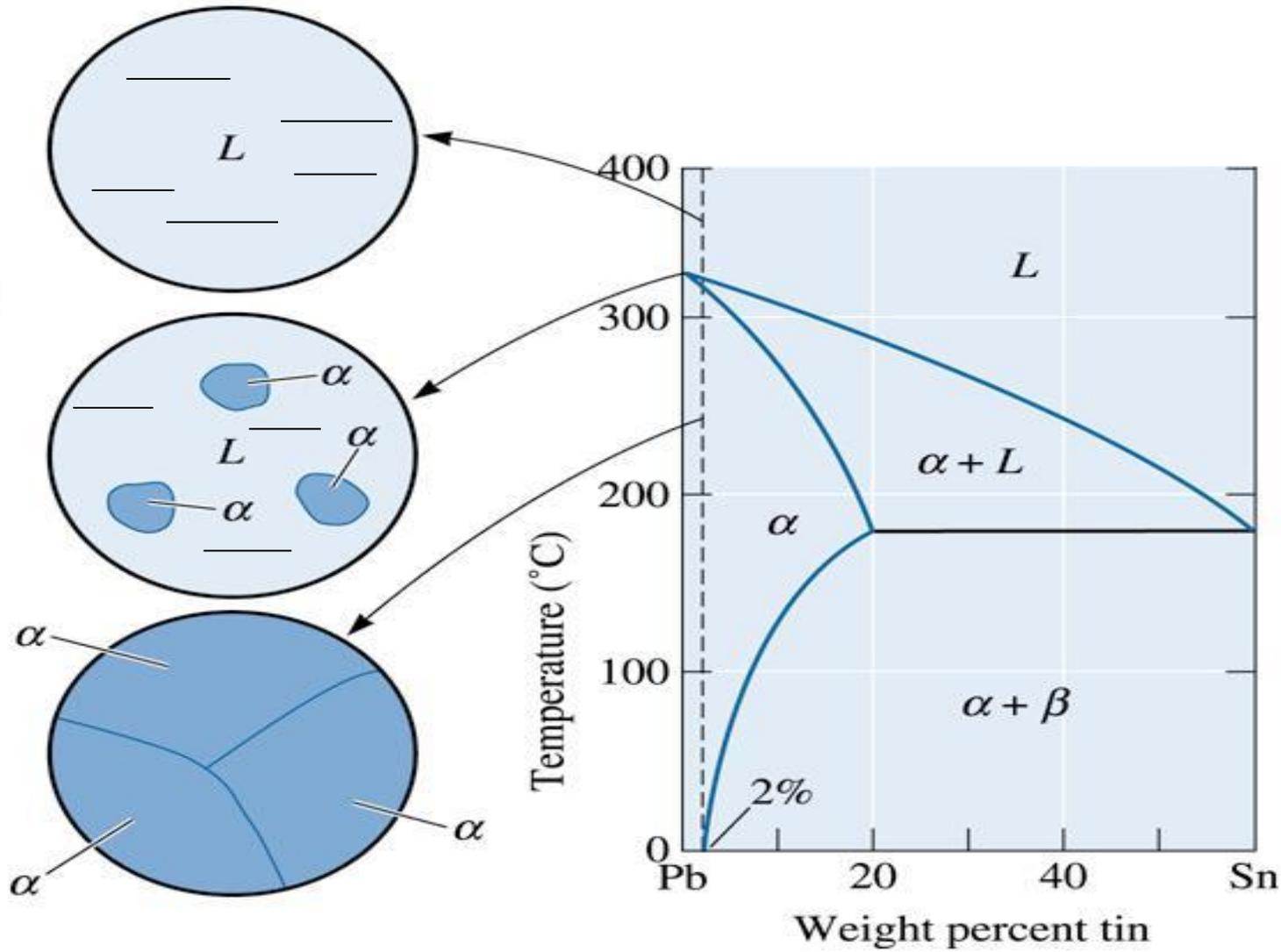
Диаграмма состояния эвтектического типа с полной взаимной растворимостью в жидком состоянии и ограниченной растворимостью в твердом состоянии



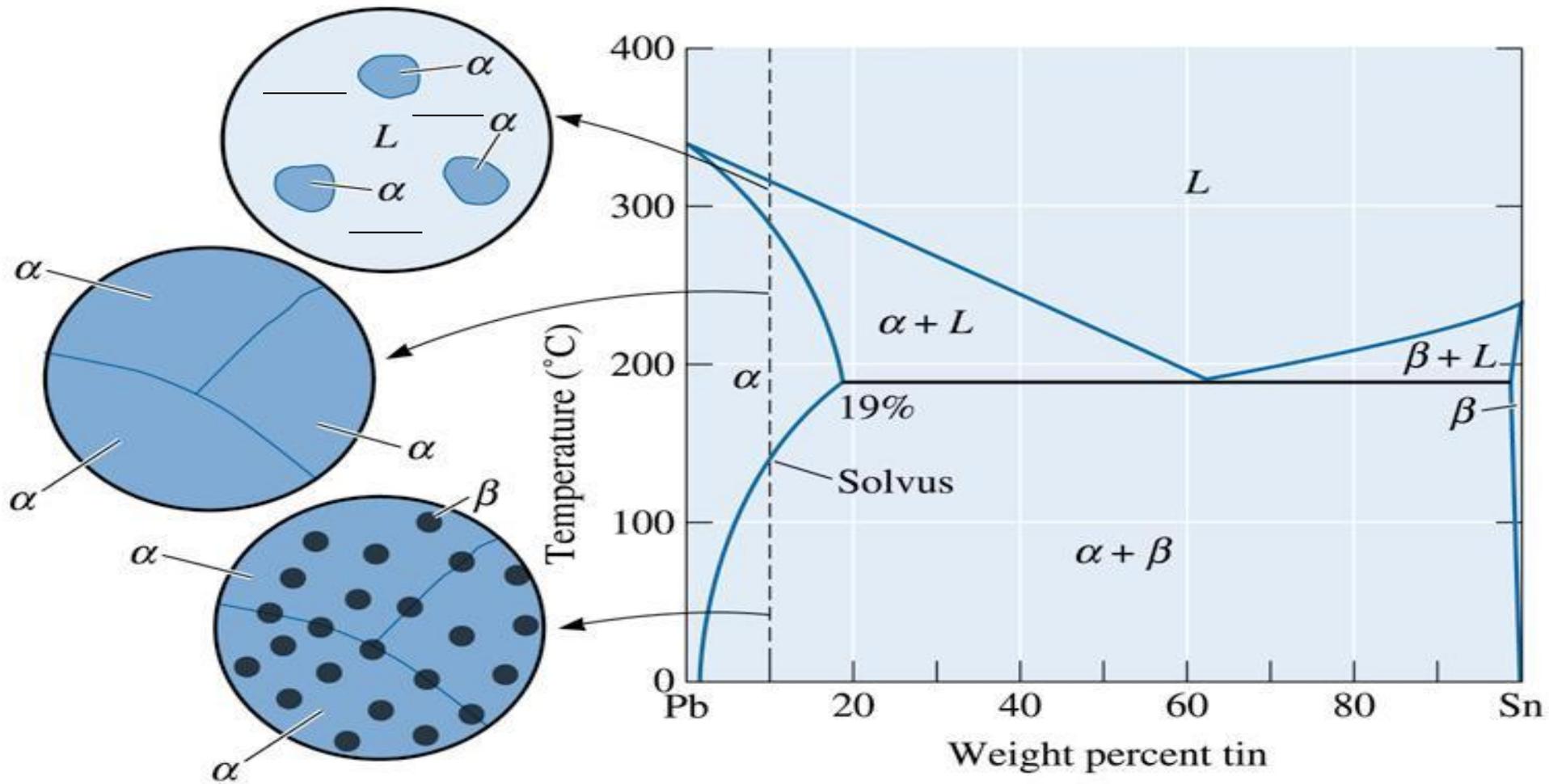
Сплав 3

- 0-1** Охлаждение жидкого сплава;
т.1 Начало процесса кристаллизации с выделением кристаллов α;
1-2 Дальнейшая кристаллизация с выделением кристаллов α;
т. 2 Эвтектическое превращение по реакции $L_e \leftrightarrow \alpha_a + \beta_b$
2-3 Охлаждение твердого сплава с выделением из α кристаллов вторичных кристаллов β_{II}, а из β вторичных кристаллов α_{II}





Кристаллизация и микроструктура сплава Pb-2% Sn. Сплав представляет собой однофазный твердый раствор.



(c)2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning™ is a trademark used herein under license.

Кристаллизация и микроструктура сплава Pb-10% Sn. Наблюдается выделение вторичных β кристаллов.

Задача 1

Фазовая диаграмма Pb-Sn

Определить : (а) растворимость олова в твердом свинце при 100°C , (b) максимальную растворимость свинца в твердом олове, (c) количество бета фазы, которая формируется если сплав Pb-10% Sn охлаждается до 0°C , (d) массу олова, содержащегося в α и β фазе.

Предполагается, что общая масса сплава Pb-10% Sn - 100 грамм.

Решение поставленной задачи:

а) При температуре 100°C линия сольвуса пересекается при 5% Sn. Следовательно, растворимость олова (Sn) в свинце (Pb) при 100°C составляет 5% .

б) Максимальная растворимость свинца (Pb) в олове (Sn), которая определяется по стороне фазовой диаграммы богатой оловом, наблюдается при эвтектической температуре 183°C и составляет $97,5\%$ Sn.

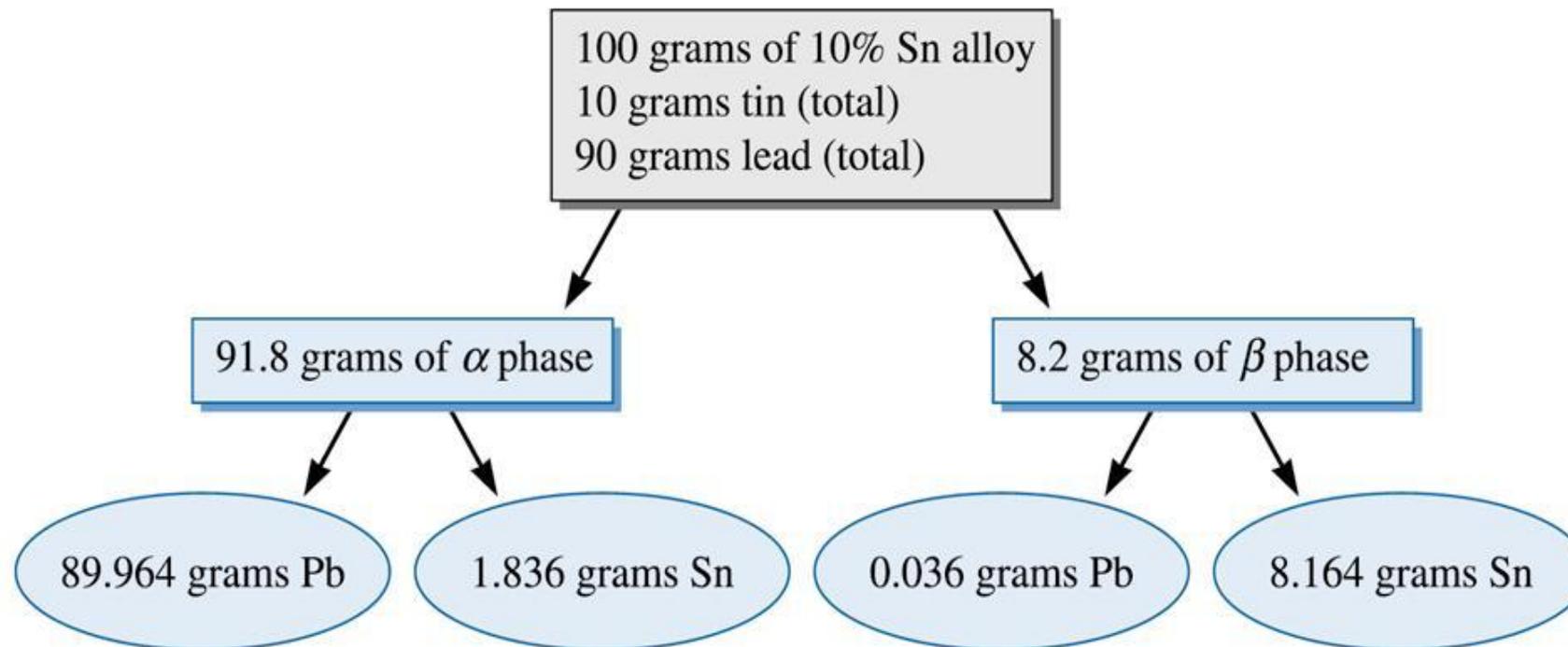
в) При температуре 0°C , сплав с 10% олова находится в двухфазной области $\alpha+\beta$ фазовой диаграммы. Если нарисовать коноду при 0°C и применить правило рычага, мы можем найти, что:

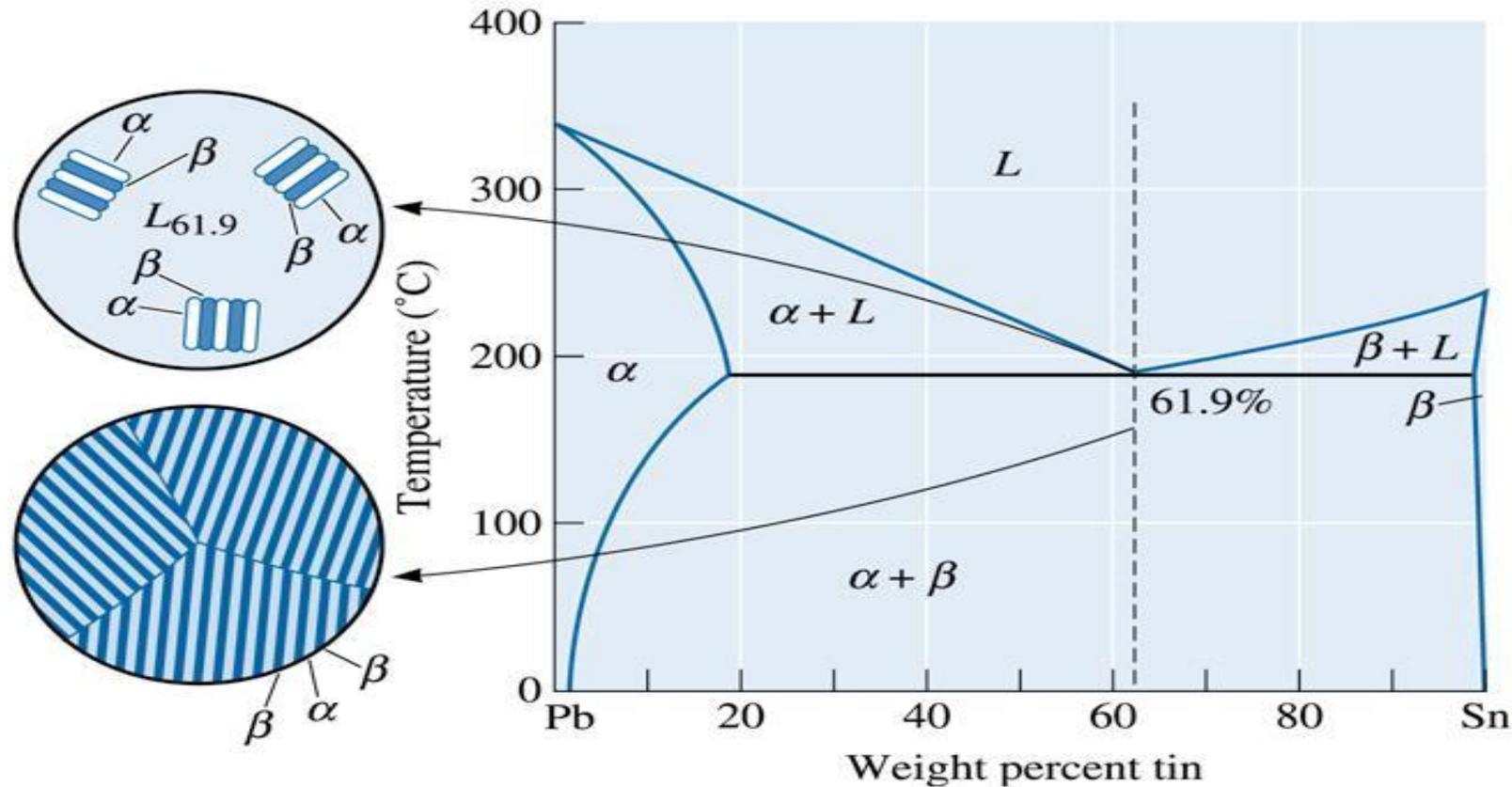
$$\% \beta = \frac{10 - 2}{100 - 2} \times 100 = 8.2\%$$

Продолжение решения

(d) масса Sn в α -фазе = 2% Sn x 91.8 г α -фазы = 0.02 x 91.8 г = 1,836 г. Поскольку олово (Sn) появляется в обеих фазах α и β , масса Sn в β -фазе будет = (10 – 1,836) г = 8,164 г.

(e) Масса свинца (Pb) в α -фазе = 98% Sn x 91,8 г α -фазы = 0,98 x 91,8 г = 89,964 г
Масса свинца (Pb) в β -фазе = 90 – 89,964 = 0.036 г.

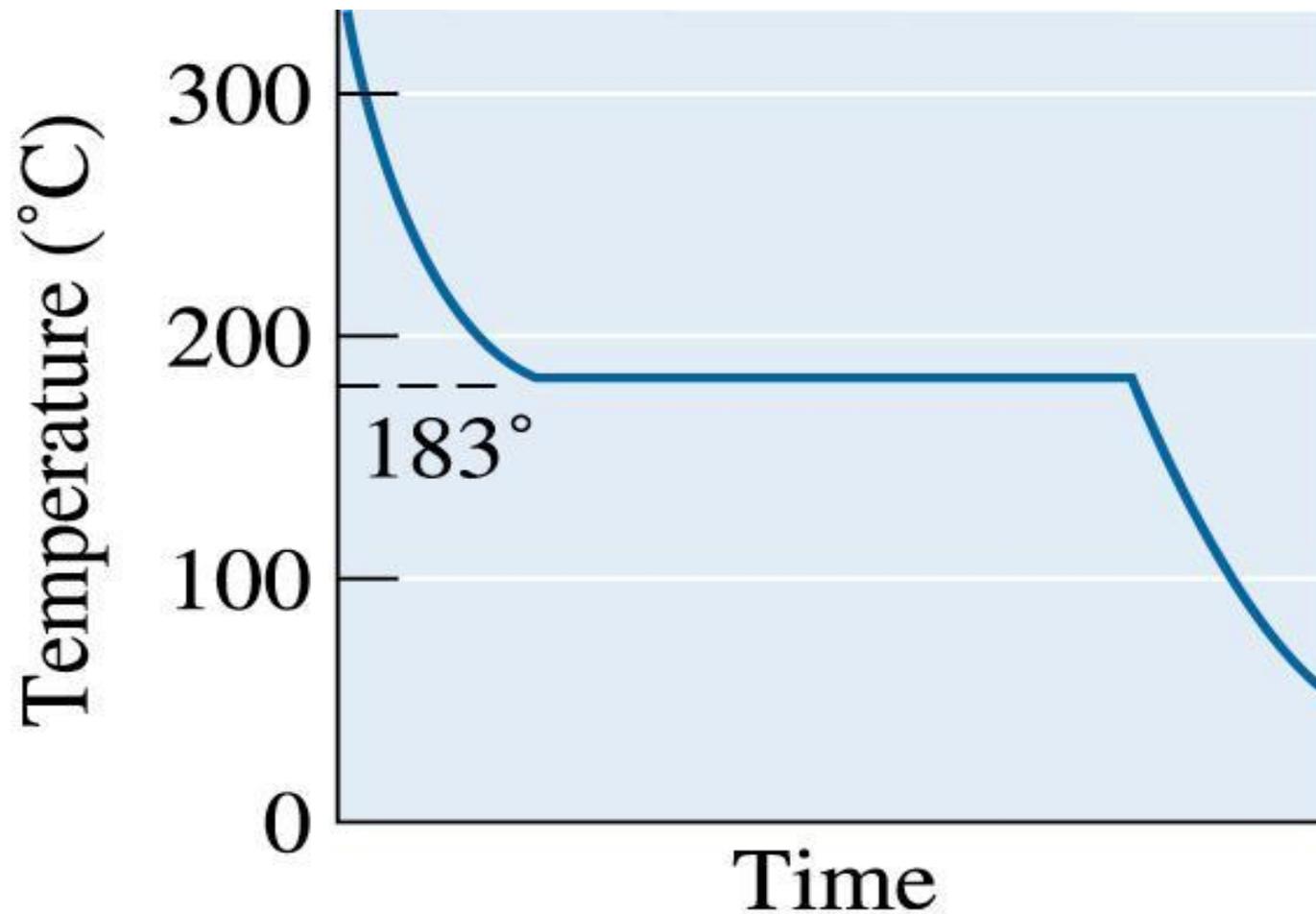




(c)2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning,™ is a trademark used herein under license.

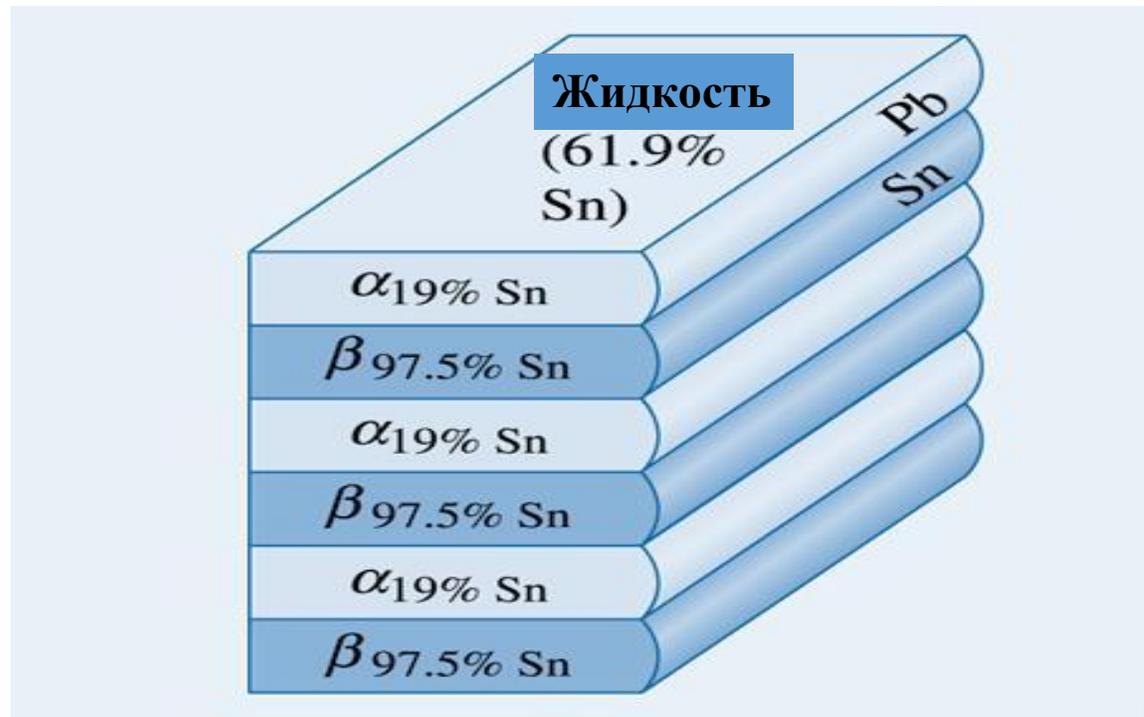
Кристаллизация и микроструктура эвтектического сплава Pb-61,9% Sn.

- При охлаждении эвтектики количество фаз в ней изменяется!
- Состав фаз тоже и изменяется!
- Но химический состав эвтектики постоянен!

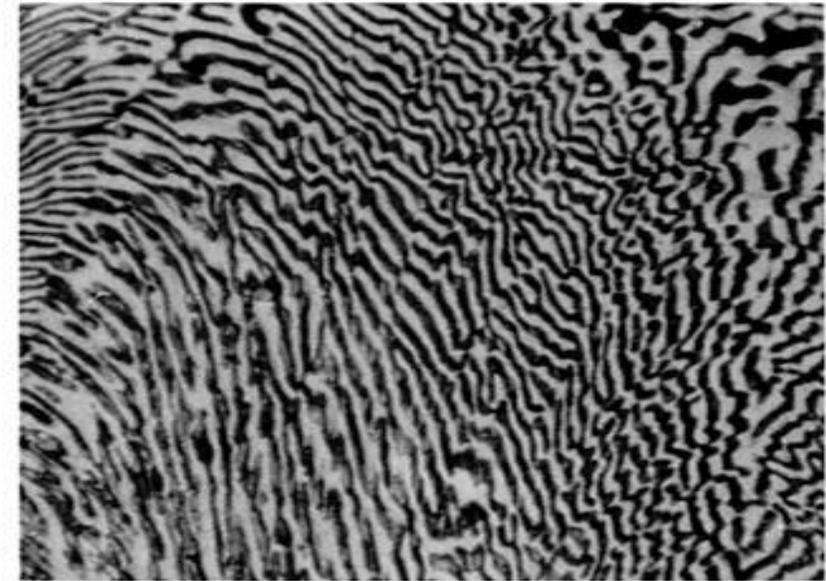


(c)2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning[®] is a trademark used herein under license.

Кривые охлаждения для эвтектического сплава с простой термической остановкой, при охлаждении или плавлении эвтектики при одной и той же температуре.



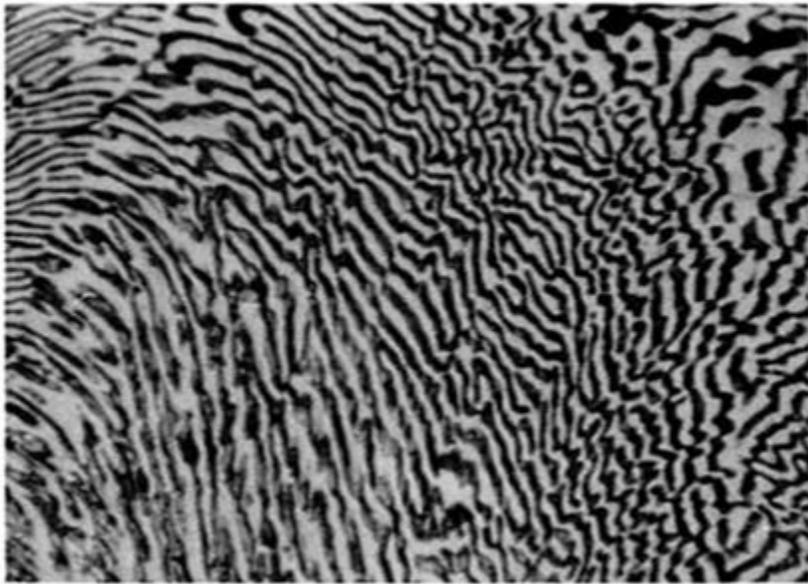
(a)



(b)

(c)2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning[™] is a trademark used herein under license.

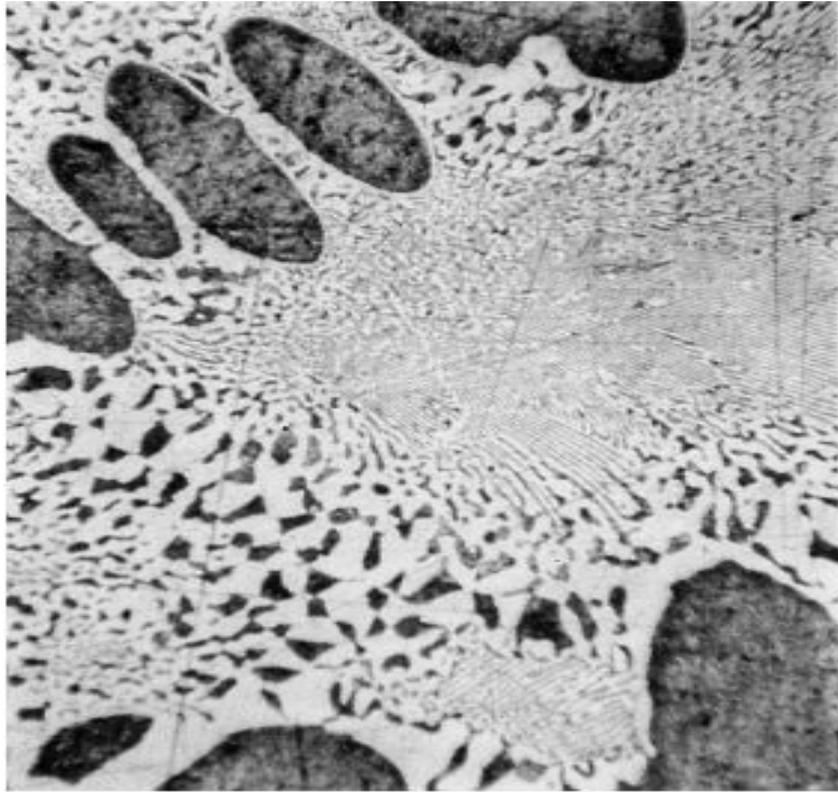
(a) Перераспределение атомов в ходе роста пластин эвтектики свинец-олово. Атомы олова из жидкости, предпочтительно диффундируют к площадке β -фазы, а атомы свинца диффундируют к площадке α -фазы. (b). Микрофотография структуры эвтектики свинец-олово (x400).



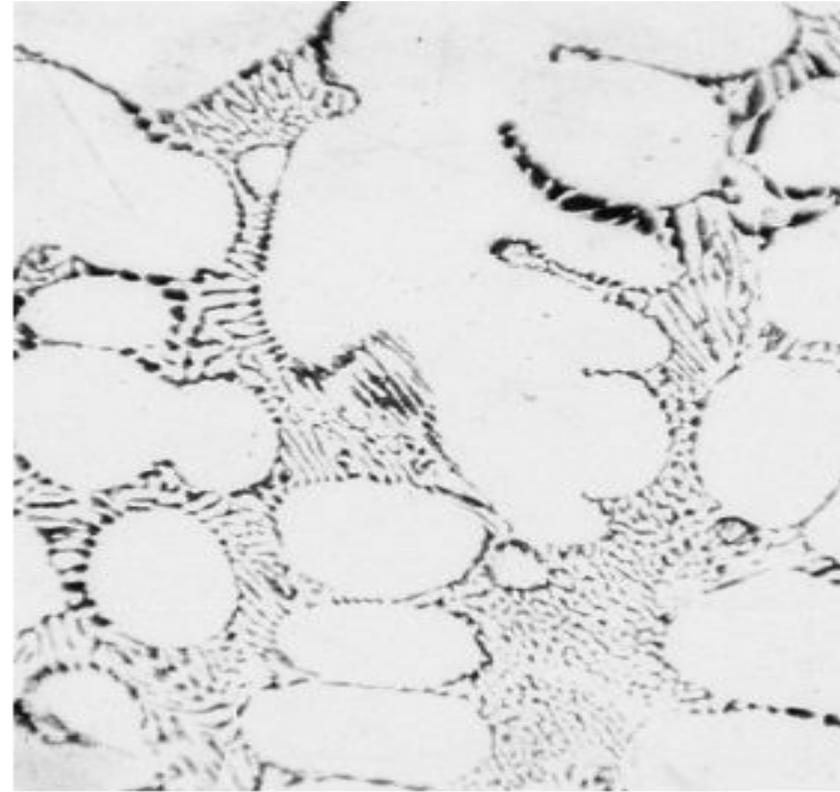
Рост эвтектики – совместный кооперативный рост двух взаимопереплетенных кристаллов разных фаз

1. Эвтектическая колония – это взаимно проросшие, сильно разветвленные кристаллы разных фаз. Каждая колония представляет собой двухфазный бикристалл, то есть сросток двух разветвленных кристаллов разных фаз.
2. Каждая колония растет из своего центра.
3. Зарождение колонии инициирует базовая фаза, характеризующаяся большей долей направленных межатомных связей. Вторая фаза растет на базовой как на подкладке.

В жидкости перед растущим бикристаллом очень быстро протекает разделительная диффузия: перемещение атомов к разным фазам.



(a)



(b)

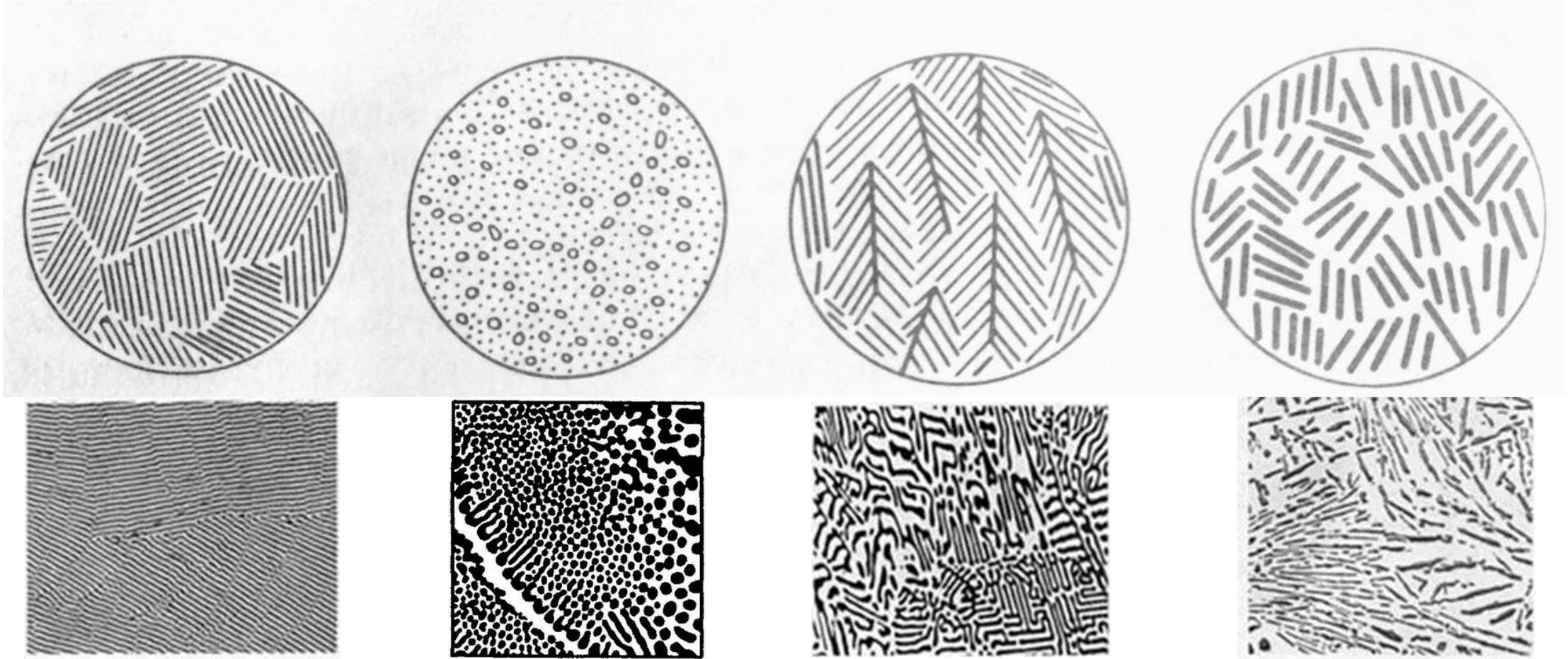
(a) Доэвтектический сплав свинец-олово. (b) Заэвтектический сплав свинец-олово. Темная составляющая является богатой свинцом твердой α -фазой, а светлая составляющая богатая оловом твердая β -фаза. Показана тонкопластинчатая структура эвтектики (x400).

Пластинчатая

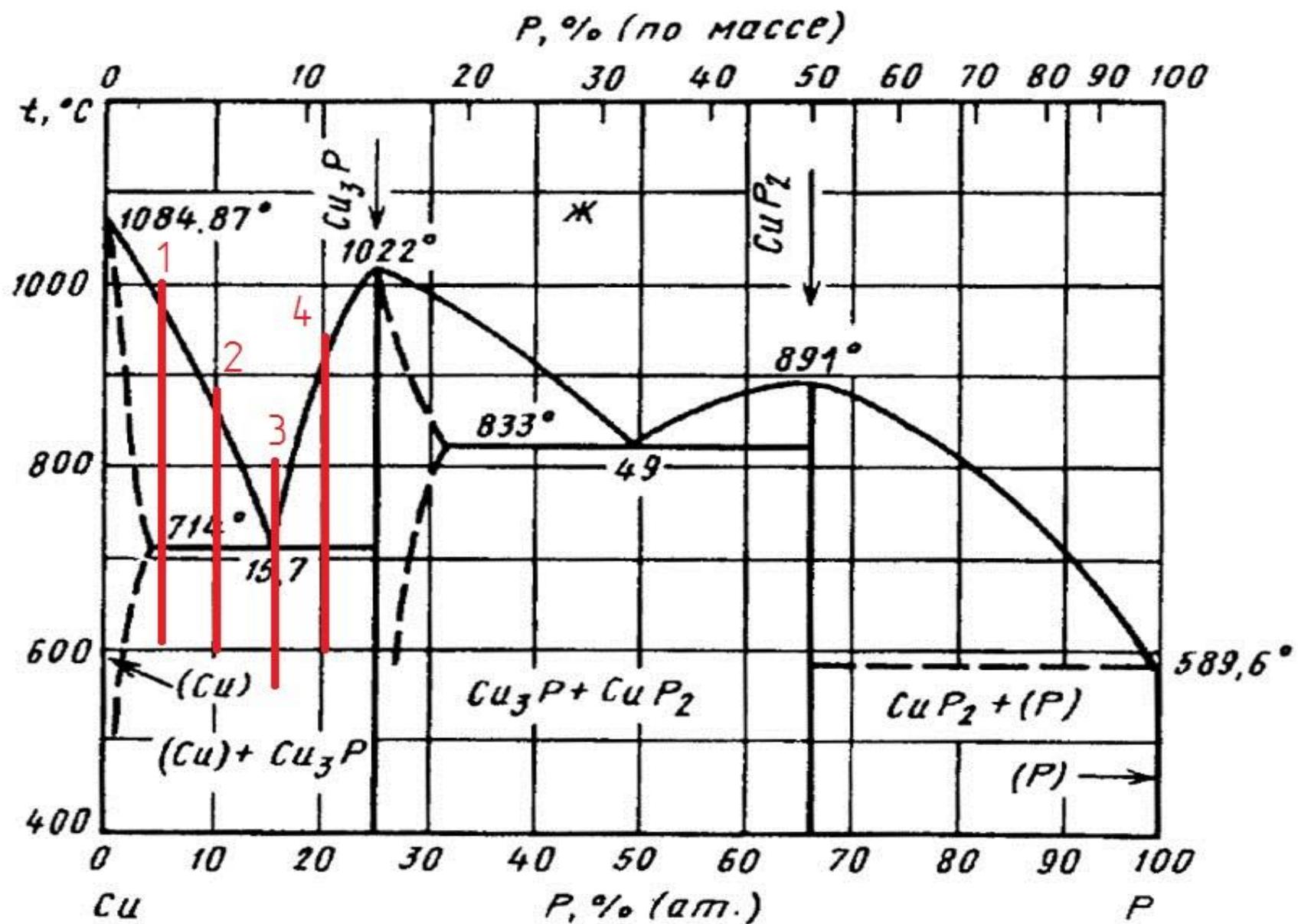
Зернистая

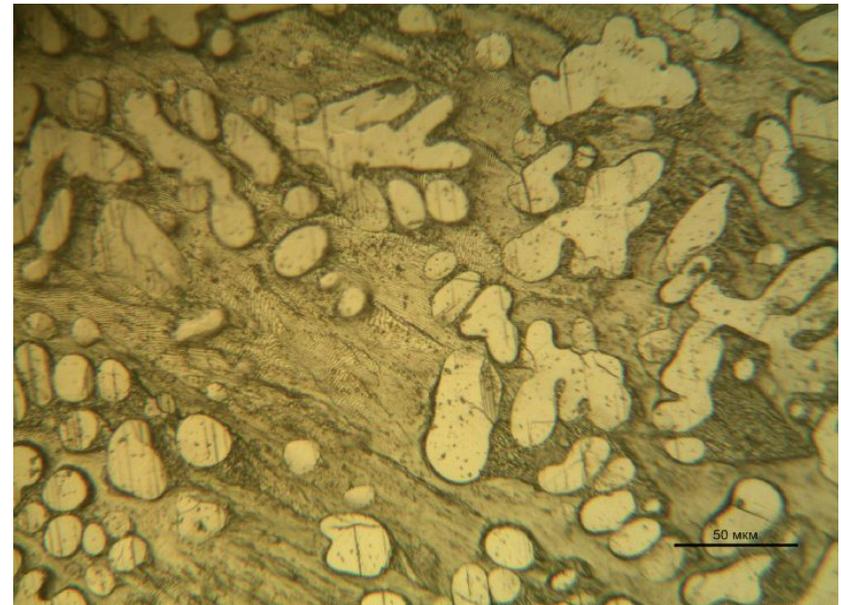
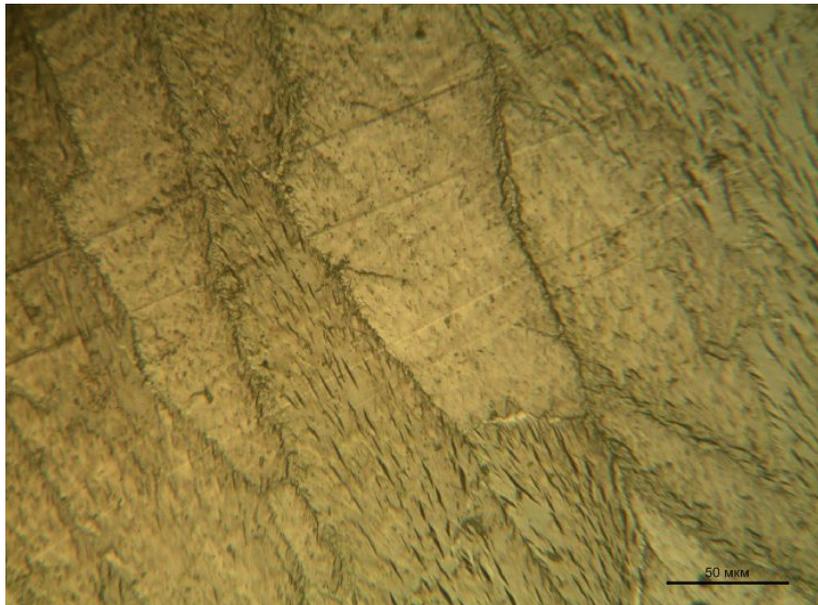
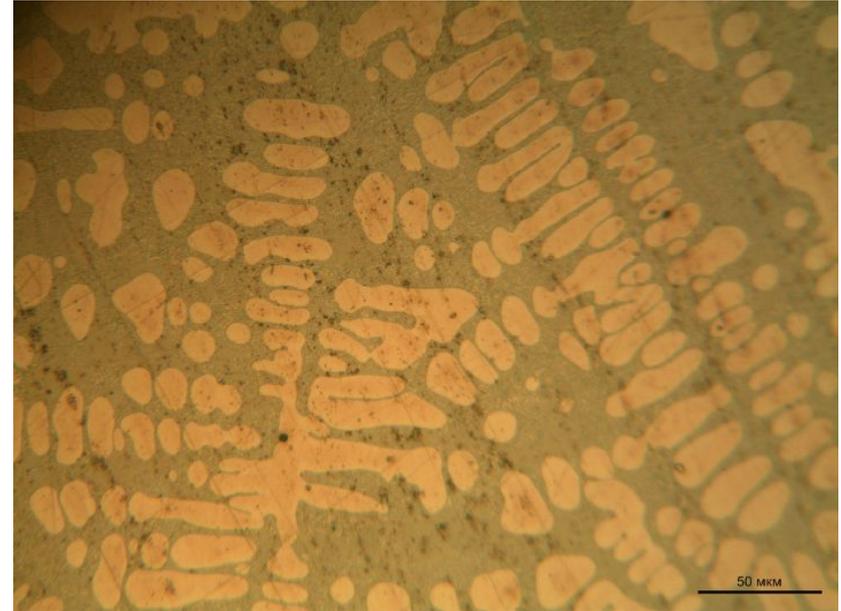
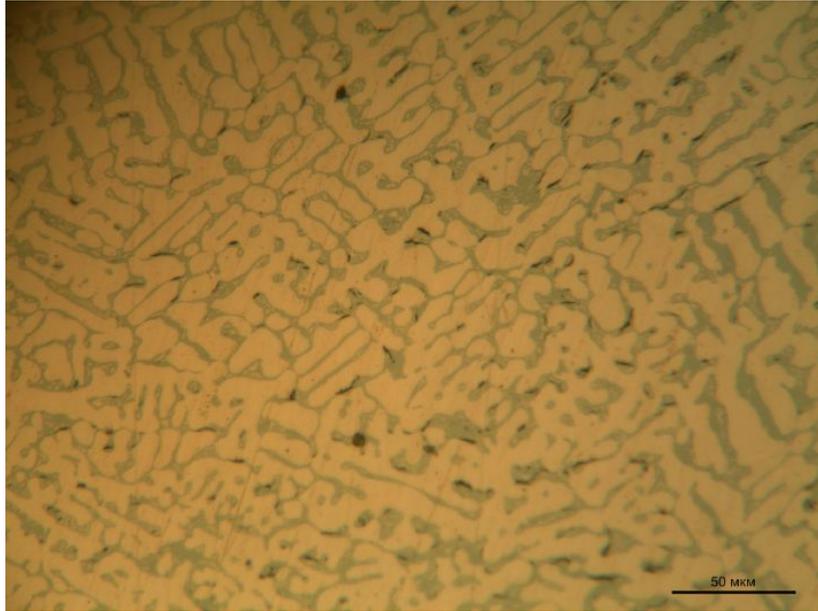
Скелетная

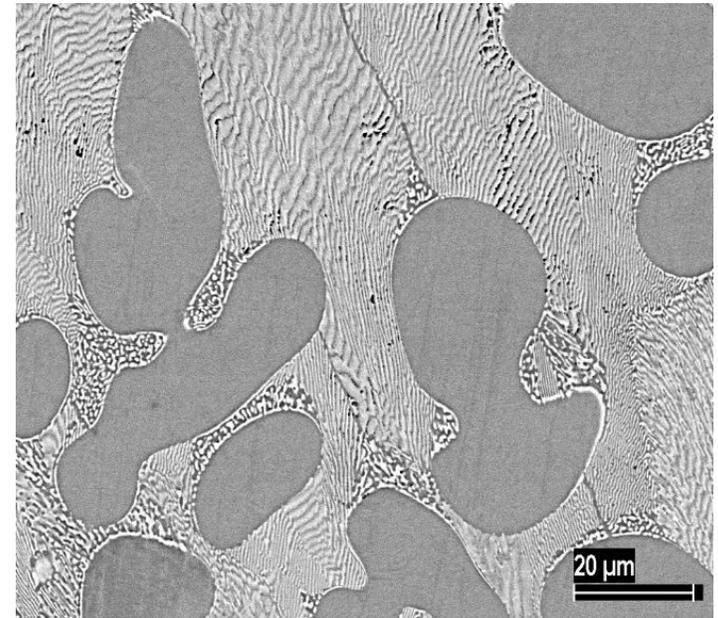
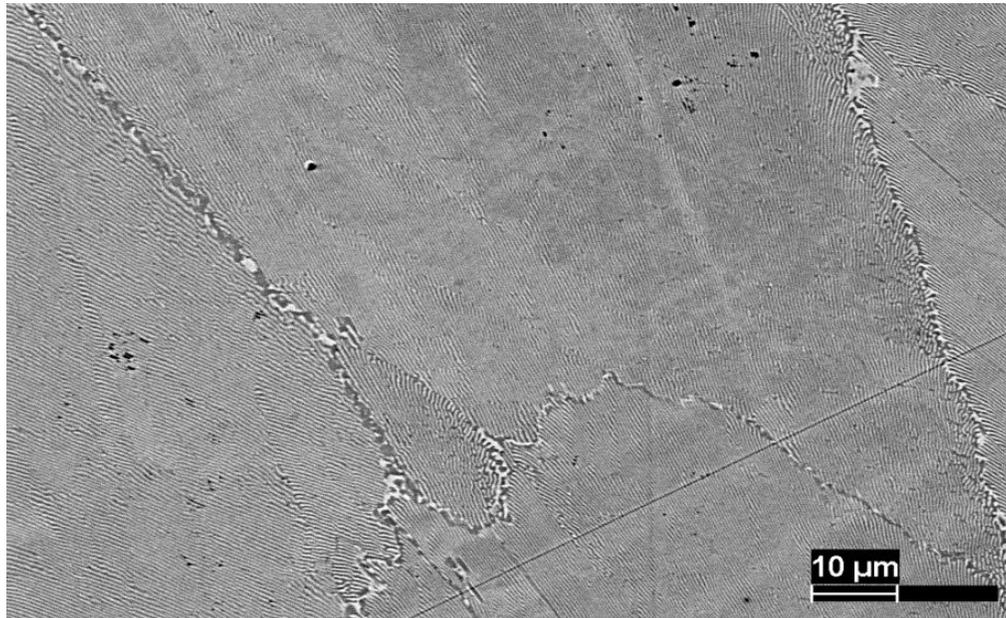
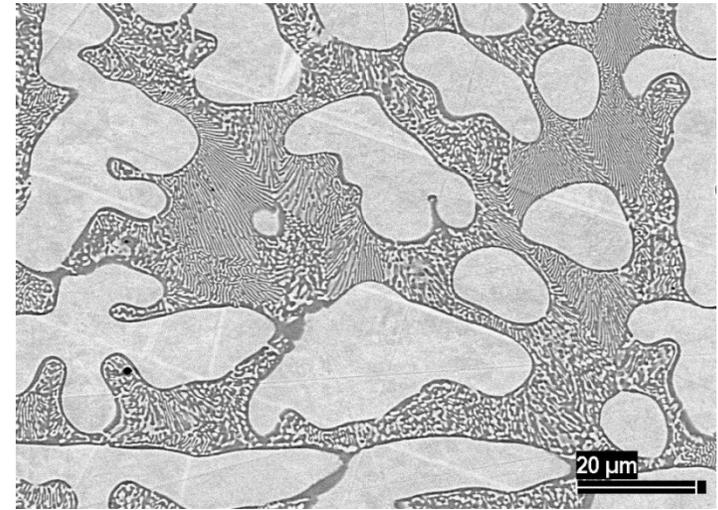
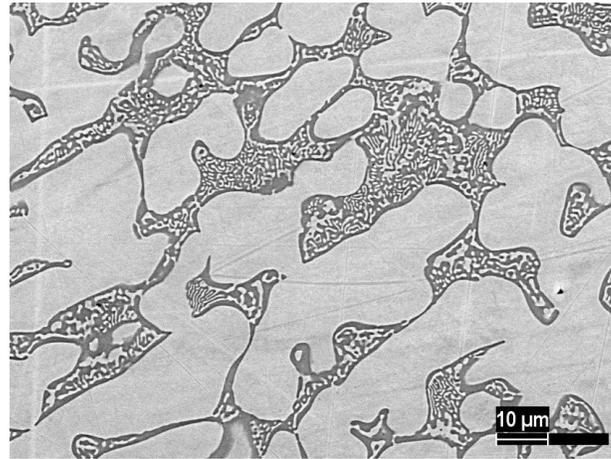
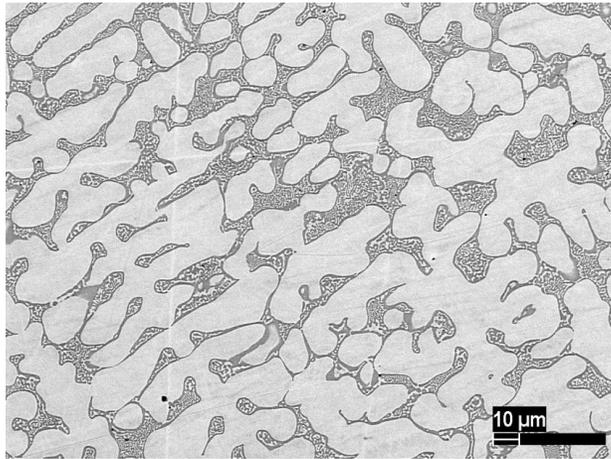
Игольчатая



Шлиф – это произвольное плоское сечение объемной структуры. Нужно делать осторожно выводы о реальной пространственной структуре эвтектики по единичным сечениям!







Задача 2. Определение количества фаз в эвтектическом сплаве

- (а) Определите количество и состав каждой фазы в сплаве свинец-олово эвтектического состава. (б) Рассчитайте массу фаз.
(с) Рассчитайте количество свинца и олова в каждой фазе, предполагая, что у вас есть по 200 г сплава.

Решение

(а) эвтектический сплав содержит 61,9% Sn.

$$\alpha : (Pb - 19\% Sn) \% \alpha = \frac{97.5 - 61.9}{97.5 - 19.0} \times 100 = 45.35\%$$

$$\beta : (Pb - 97.5\% Sn) \% \beta = \frac{61.9 - 19.0}{97.5 - 19.0} \times 100 = 54.65\%$$

Продолжение решения

(b) При температуре чуть ниже эвтектической:

Масса α -фазы в 200 г сплава

$$= \text{масса сплава} \times \text{часть } \alpha \text{ фазы} = 200 \text{ г} \times 0,4535 = 90,7 \text{ г}$$

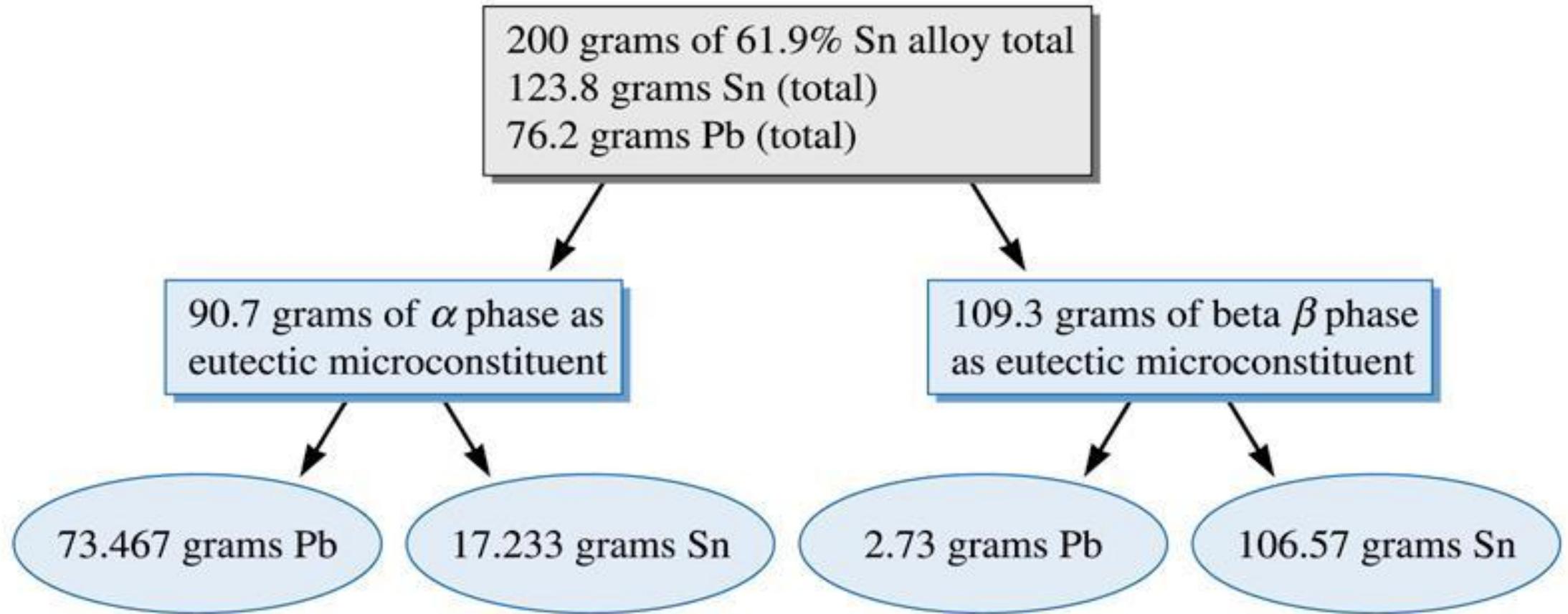
Количество β -фазы в 200 г сплава (масса сплава \times масса α фазы) =
 $200,0 \text{ г} \times 90,7 \text{ г} = 109,3 \text{ г}$

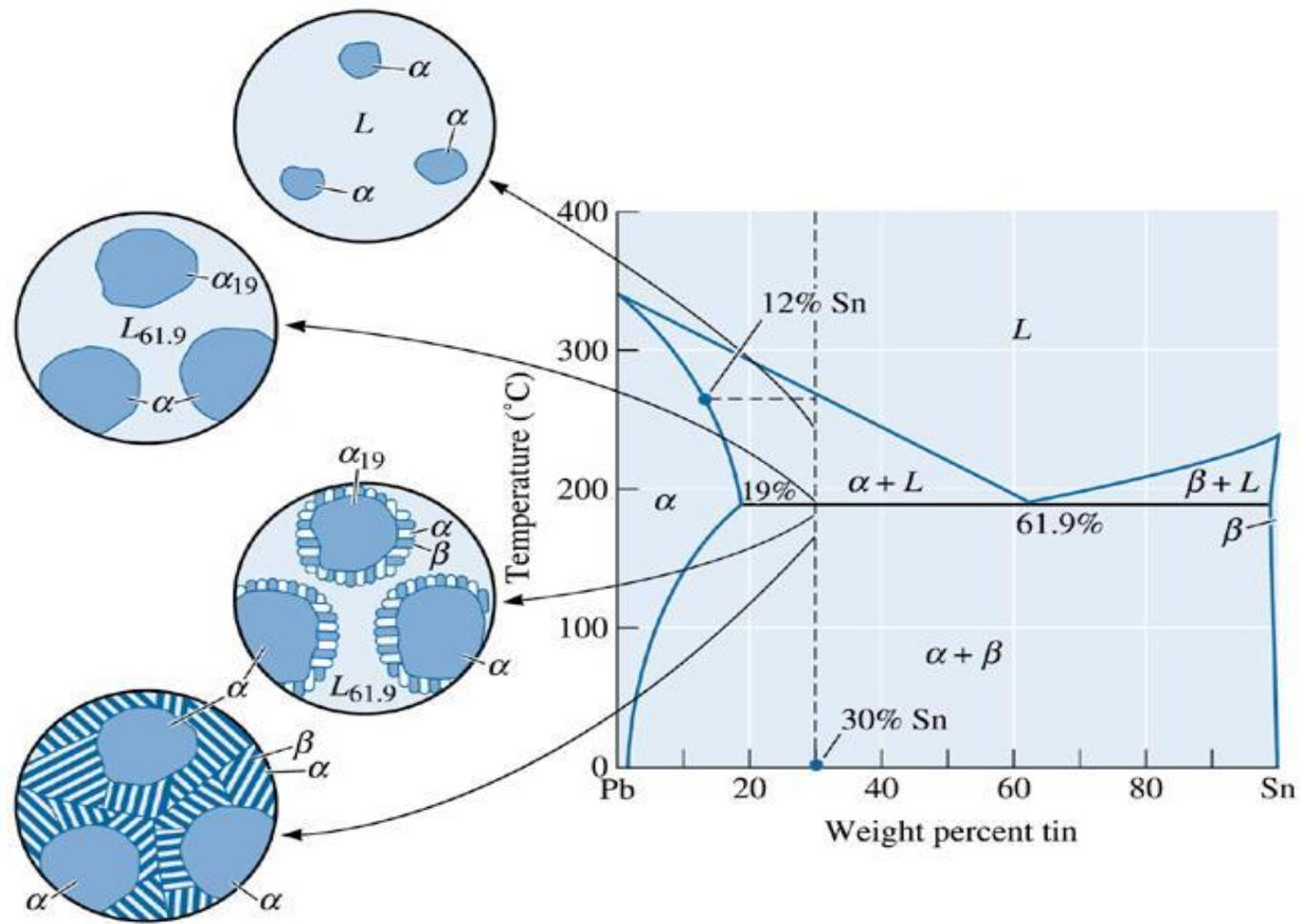
(c) Масса Pb в α фазе = масса α фазы в 200 г \times (концентрация Pb в α) = $(90,7 \text{ г}) \times (1 - 0,190) = 73,467 \text{ г}$

Масса Sn в α фазе = масса α фазы – масса Pb в α фазе = $(90,7 - 73,467 \text{ г}) = 17,233 \text{ г}$

Масса Pb в β фазе = масса β фазы в 200 г \times (весовое количество Pb в β) = $(109,3 \text{ г}) \times (1 - 0,975) = 2,73 \text{ г}$

Масса Sn в β фазе = полная масса Sn – масса Sn в α фазе = $123,8 \text{ г} - 17,233 \text{ г} = 106,57 \text{ г}$





(c)2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning is a trademark used herein under license.

Кристаллизация и микроструктура доэвтектического сплава Pb-30% Sn.

Задача 3. Определение фаз и их количества в доэвтектическом сплаве Pb-30% Sn

Для сплава Pb-30%Sn, определите представленные фазы, их количество и их состав при следующих температурах: 300°C, 200°C, 184°C, 182°C, и 0°C.

Temperature (°C)	Phases	Compositions	Amounts
300	L	L : 30% Sn	$L = 100\%$
200	$\alpha + L$	L : 55% Sn	$L = \frac{30 - 18}{55 - 18} \times 100 = 32\%$
		α : 18% Sn	$\alpha = \frac{55 - 30}{55 - 18} \times 100 = 68\%$
184	$\alpha + L$	L : 61.9% Sn	$L = \frac{30 - 19}{61.9 - 19} \times 100 = 26\%$
		α : 19% Sn	$\alpha = \frac{61.9 - 30}{61.9 - 19} \times 100 = 74\%$
182	$\alpha + \beta$	α : 19% Sn	$\alpha = \frac{97.5 - 30}{97.5 - 19} \times 100 = 86\%$
		β : 97.5% Sn	$\beta = \frac{30 - 19}{97.5 - 19} \times 100 = 14\%$
0	$\alpha + \beta$	α : 2% Sn	$\alpha = \frac{100 - 30}{100 - 2} \times 100 = 71\%$
		β : 100% Sn	$\beta = \frac{30 - 2}{100 - 2} \times 100 = 29\%$

Задача 4. Определение количества микрокомпонентов и их состава для доэвтектоидного сплава

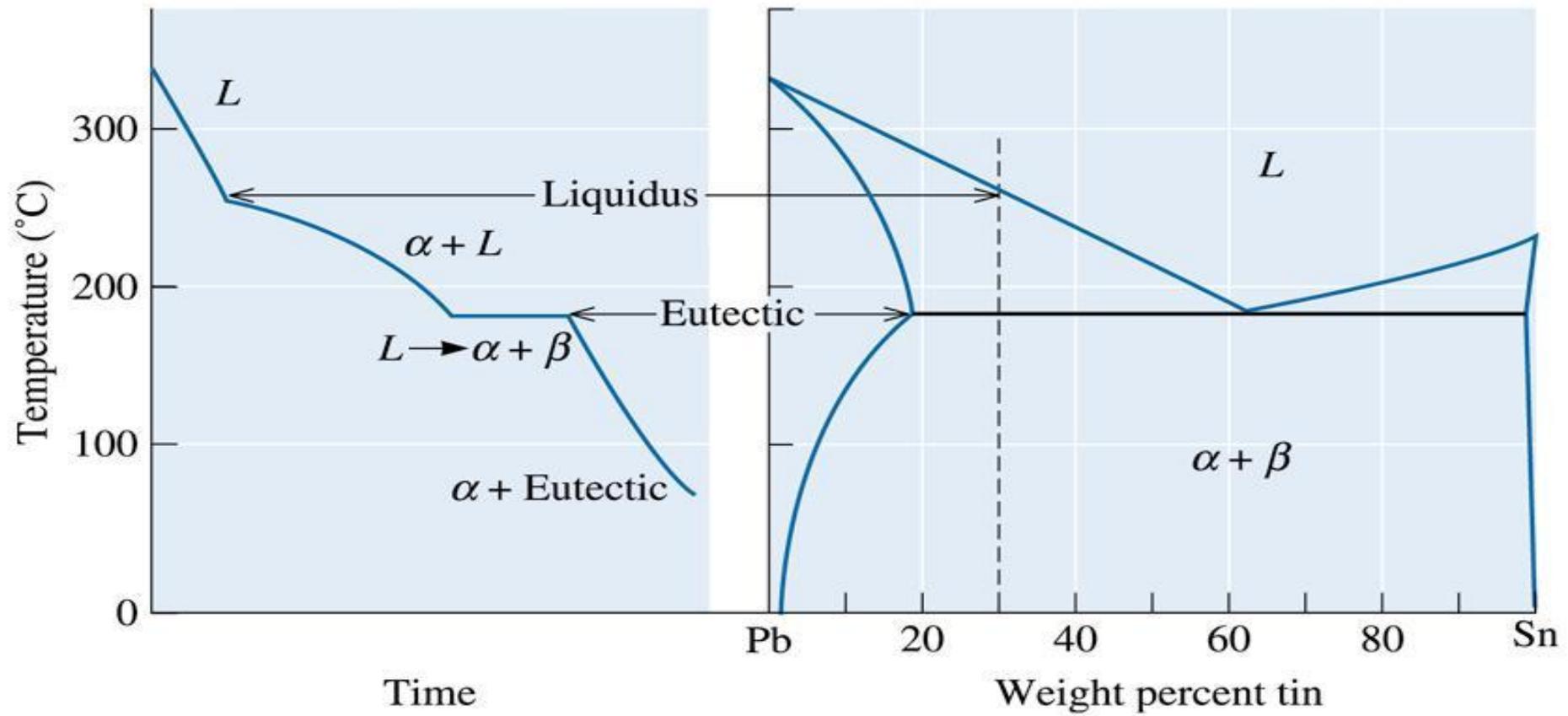
Определить количество и состав каждого микрокомпонента в сплаве Pb-30% Sn до того, как была завершена эвтектическая реакция.

Решение

При температуре чуть выше эвтектической 184°C - количество и состав двух фаз:

$$\alpha : 19\% \text{ Sn} \quad \% \alpha = \frac{61.9 - 30}{61.9 - 19} \times 100 = 74\% = \% \text{ первичные } \alpha$$

$$L : 61.9\% \text{ Sn} \quad \% L = \frac{30 - 19}{61.9 - 19} \times 100 = 26\% = \% \text{ эвтектика при } 182^{\circ}\text{C}$$



(c)2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning... is a trademark used herein under license.

Кривые охлаждения для доэвтектического сплава Pb-30% Sn.

Вырожденная эвтектика

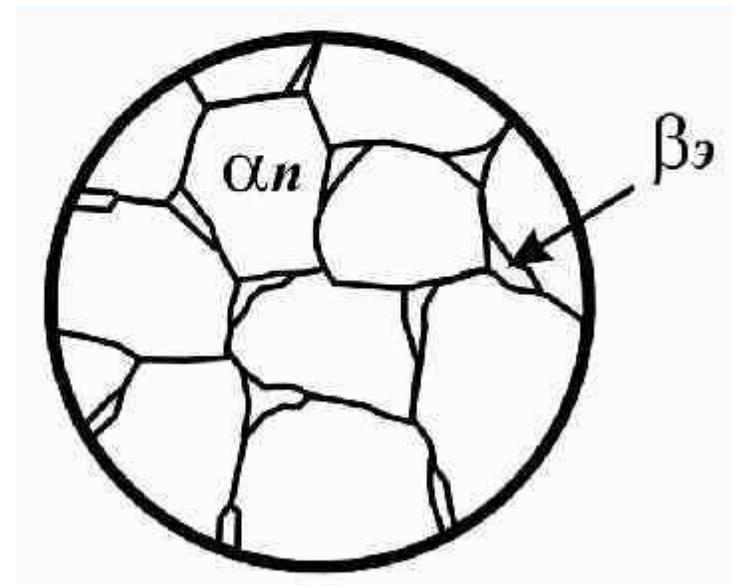
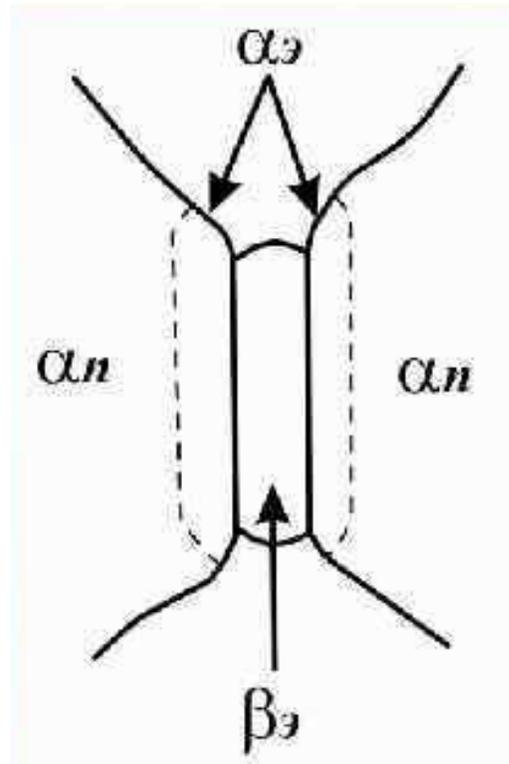
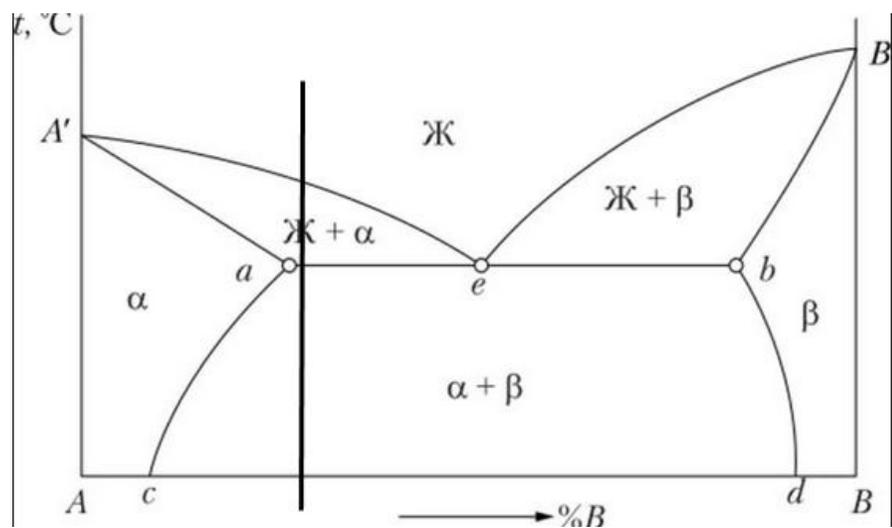
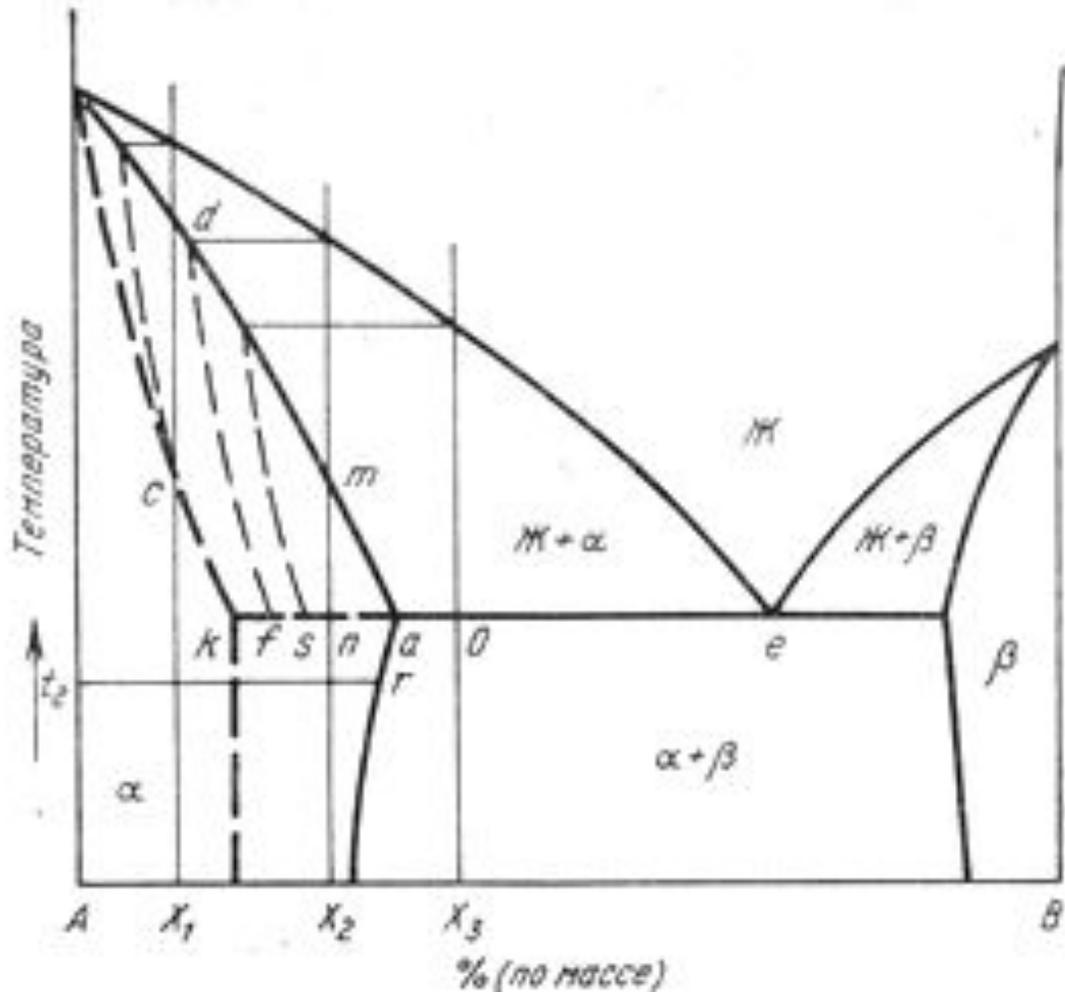


Схема образования вырожденной эвтектики :
 α_n - первичные кристаллы, $\alpha_э$ - фаза из эвтектики,
наросшая на первичные кристаллы,
 $\beta_э$ - эвтектика, вырожденная в прослойку β -фазы.

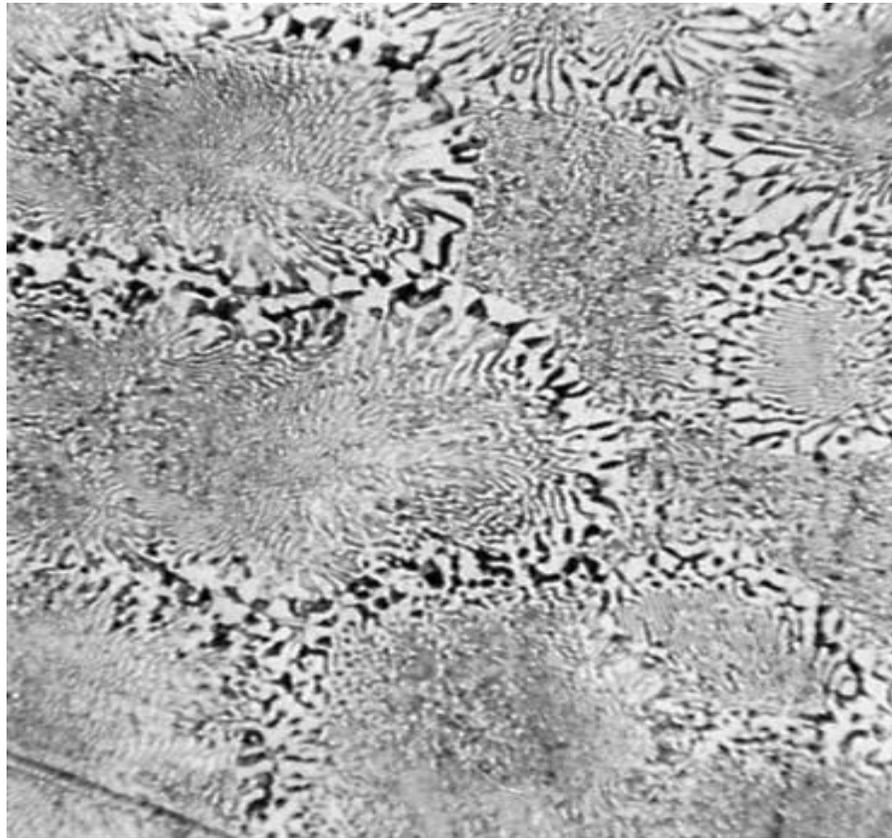
Дендритная ликвация в системах эвтектического типа



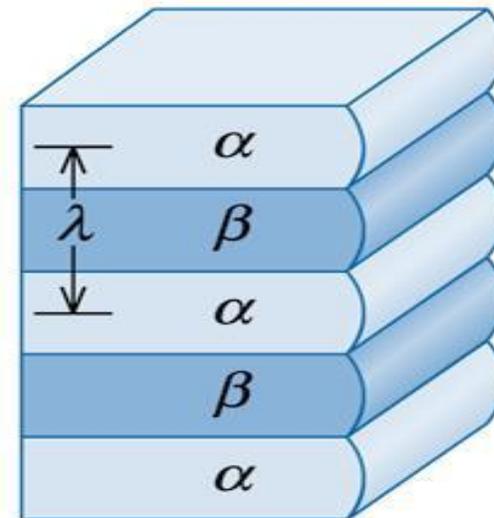
- В сплаве X_2 средний состав твердого раствора при неравновесной кристаллизации изменяется по кривой df .
- Равновесная кристаллизация должна закончиться в точке m .
- В неравновесных условиях ниже температуры точки m состав жидкого раствора изменяется вплоть до эвтектической точки e , а состав периферийного слоя первичных α -кристаллов - до точки a .
- В сплаве X_2 кристаллизуется эвтектика и неравновесная кристаллизация закончится при температуре точки n .
- В итоге в сплавах с концентрацией B больше k кристаллизуется эвтектика в неравновесных условиях.

Прочность эвтектических сплавов

- Размер эвтектических колоний
- Межпластинчатое расстояние
- Количество эвтектики
- Микроструктура эвтектики



(a)



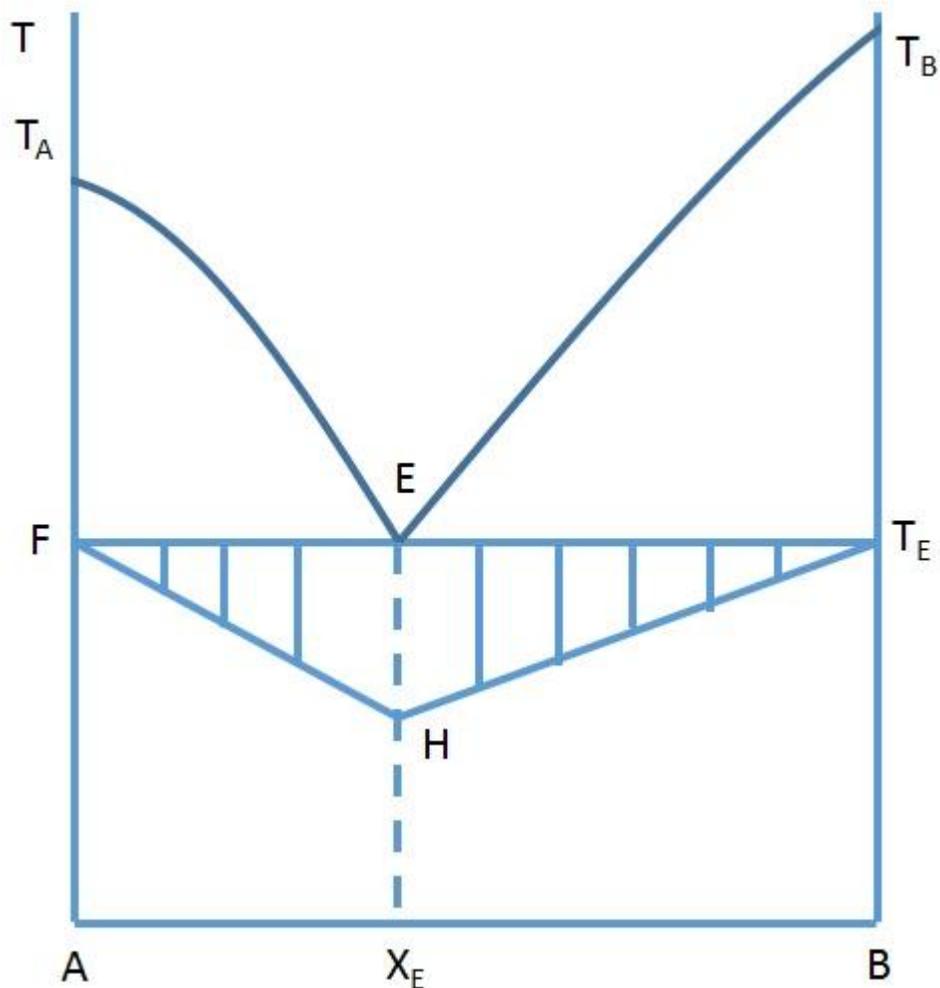
(b)

(c)2003 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc. Thomson Learning, is a trademark used herein under license.

(a) Колонии в эвтектике свинец-олово(x300).

(b) Межпластинчатое расстояние в эвтектической микроструктуре.

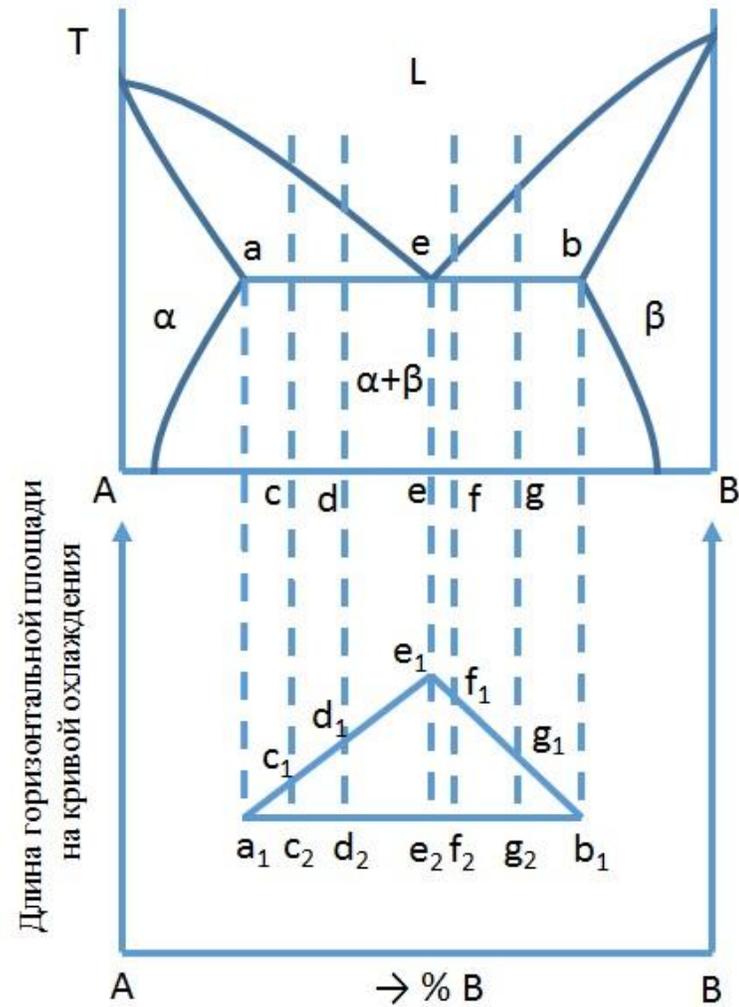
Треугольник Таммана



При одинаковом условии охлаждения всех сплавов можно воспользоваться особым приемом, основанным на том, что длина горизонтальных отрезков кривых охлаждения пропорциональна времени кристаллизации эвтектики.

Треугольник HT_EF называется треугольником Таммана

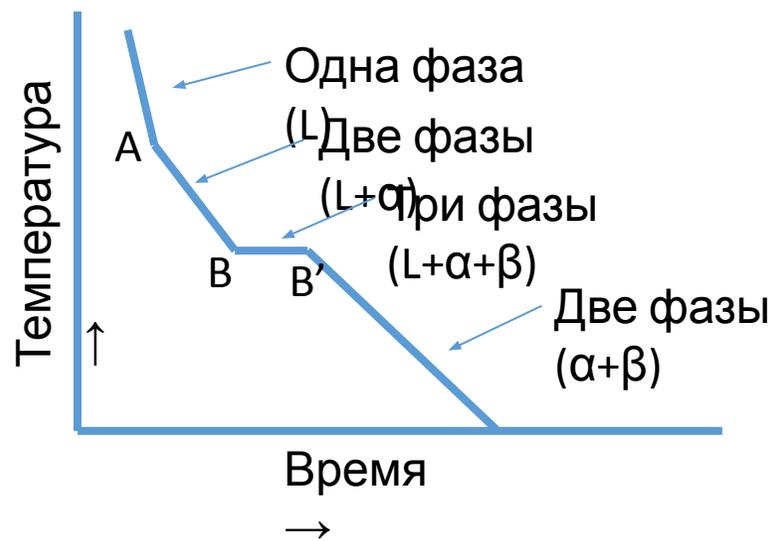
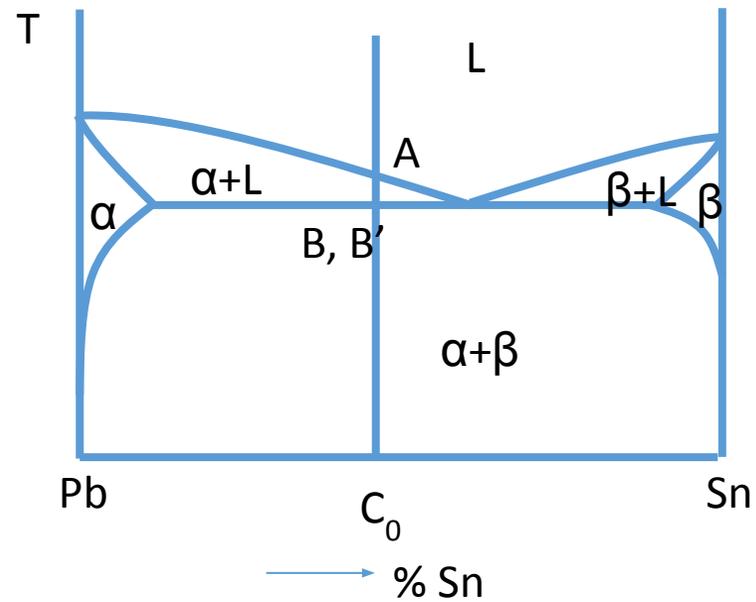
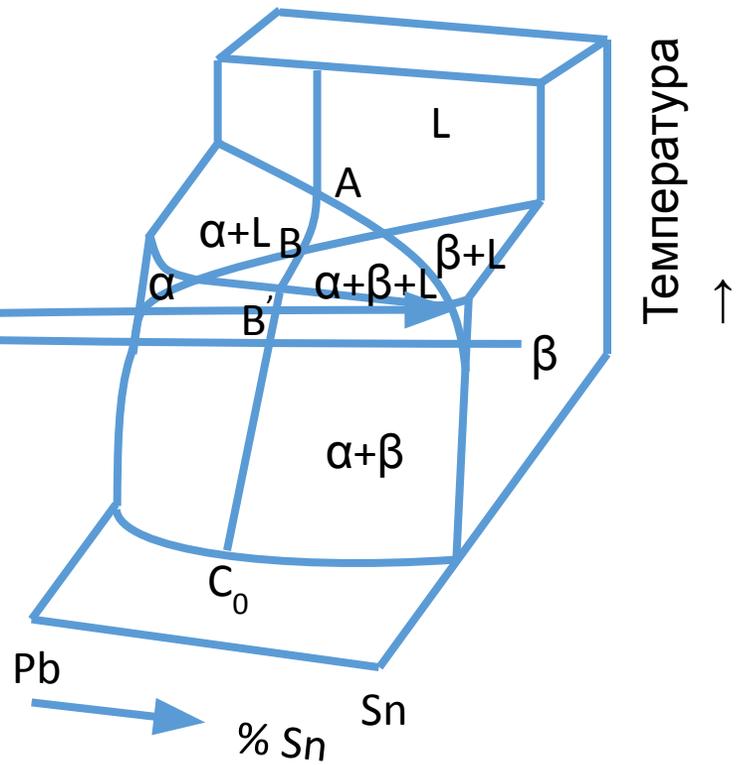
Построение треугольника Таммана



Для чего нужен треугольник Таммана?

Построение этого треугольника можно использовать для ускоренного определения положения эвтектической точки e на горизонтали ab и концов горизонтали a и b .

Точность построения зависит прежде всего от количества исследованных сплавов и аппаратурных условий снятия их кривых охлаждения.



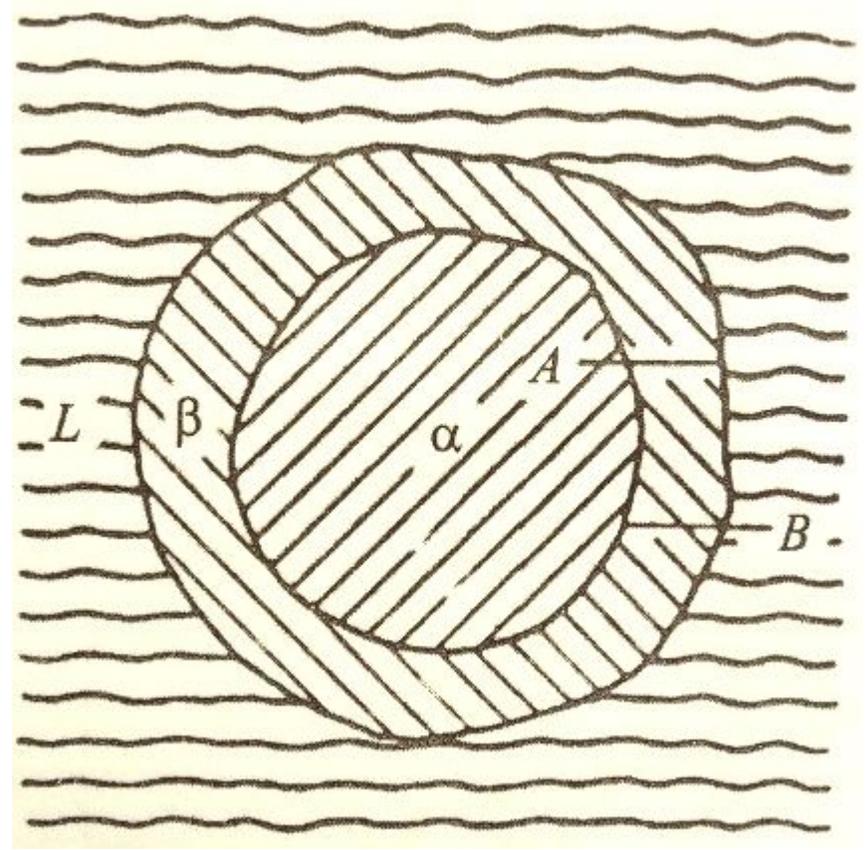
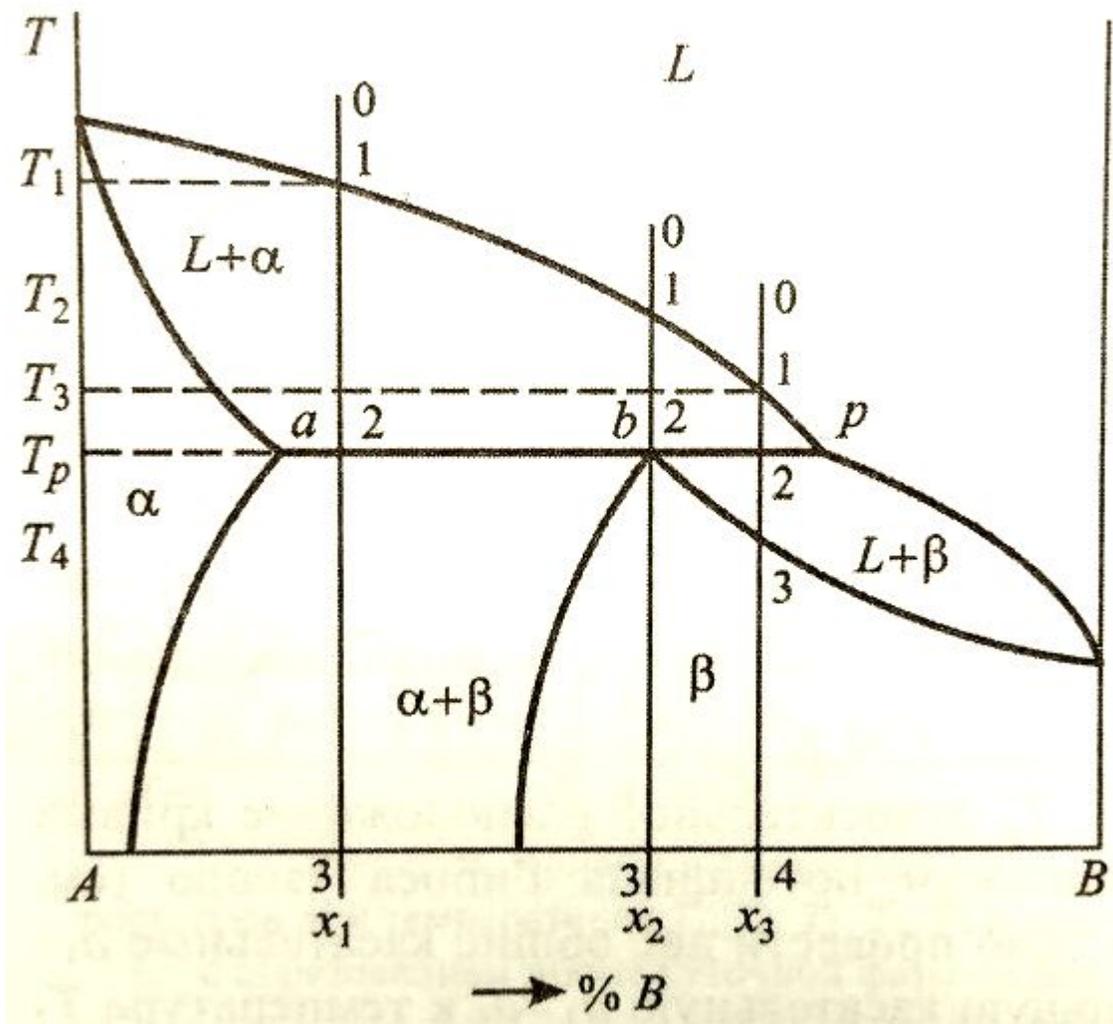


Диаграмма с полной взаимной растворимостью
компонентов в жидком и твердом состояниях

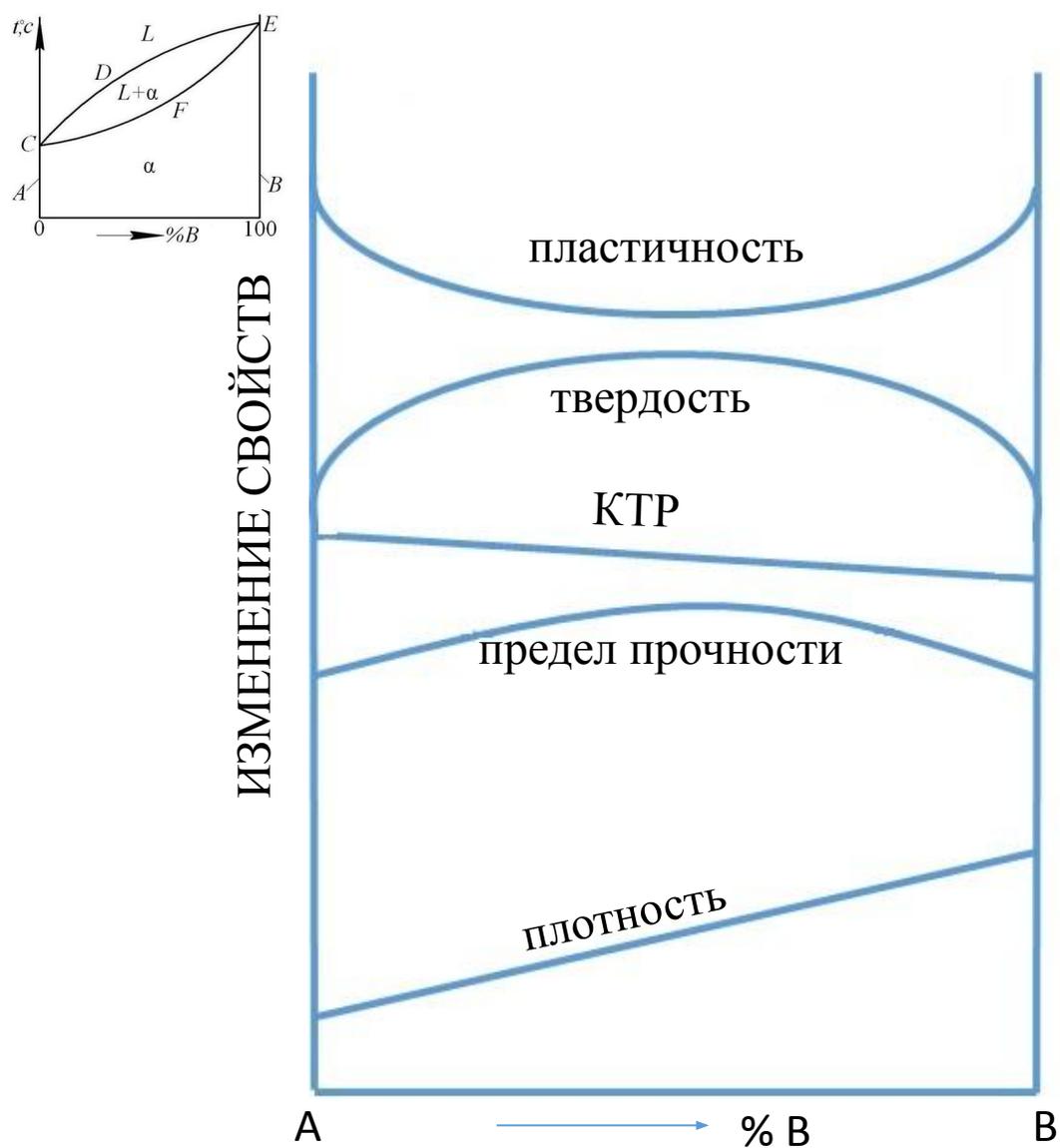
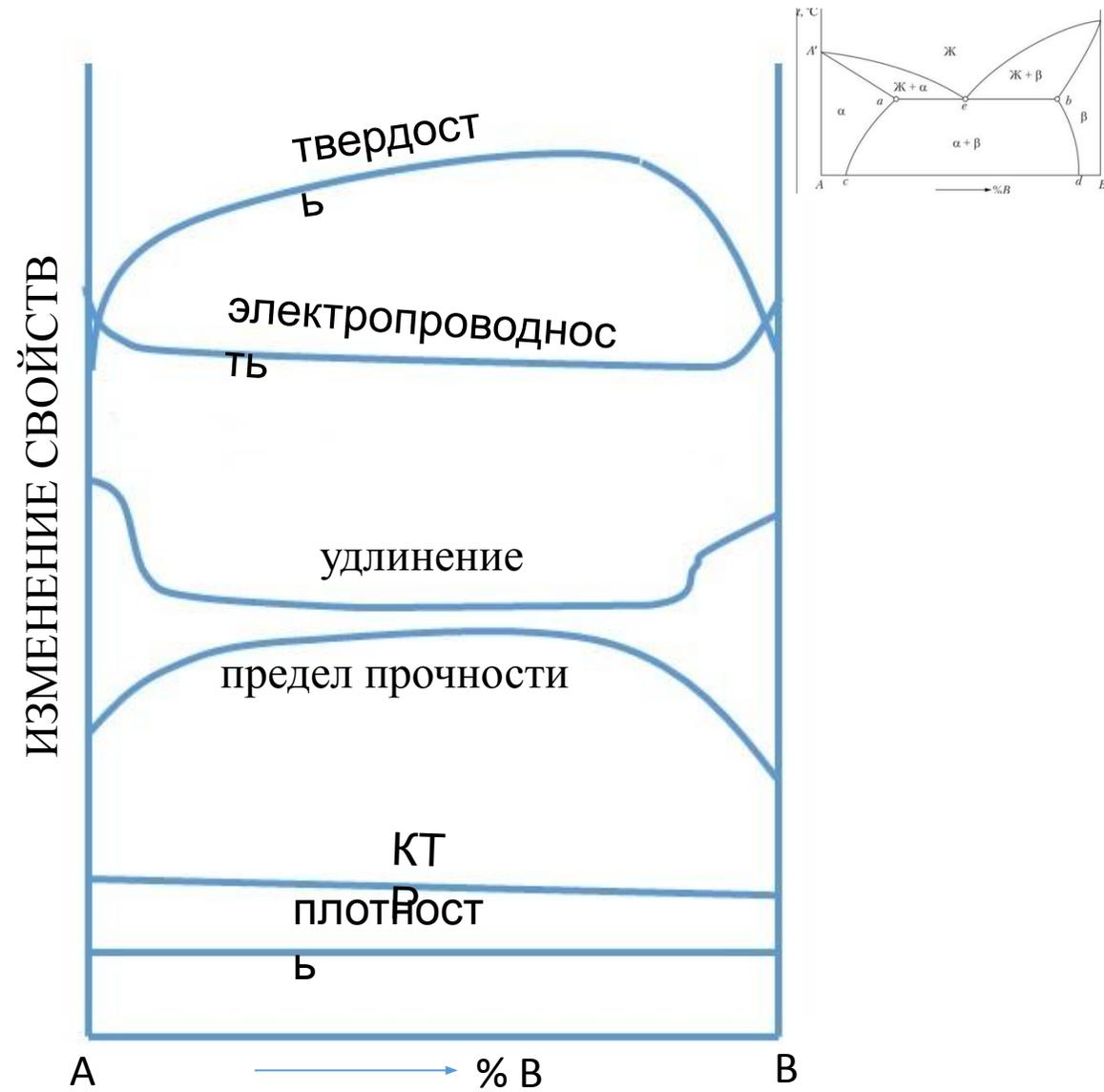


Диаграмма с эвтектическим равновесием



Зависимость литейных свойств сплавов от состава

Узкоинтервальные (менее 10-30 К)

Широкоинтервальные (более 100 К)

