

**ЛЕКЦИЯ 2:** Металлы и сплавы. Атомно-кристаллическая структура металлов. Кристаллизация металлов. Полиморфные превращения. Дефекты кристаллического строения. Фазы и структура в металлических сплавах: твердые растворы, химические соединения, механические смеси.

### **Металлы и сплавы**

В технике под **металлами** понимают вещества, обладающие комплексом металлических свойств: характерным металлическим блеском, высокой электропроводностью, хорошей теплопроводностью, высокой пластичностью.

Металлы используются человеком уже много тысячелетий. По именам металлов названы определяющие эпохи развития человечества: Бронзовый Век, Железный Век, Век Чугуна и т.д. Ни одно металлическое изделие из числа окружающих нас не состоит на 100% из железа, меди, золота или другого металла. В любом присутствуют сознательно введенные человеком добавки и попавшие помимо воли человека вредные примеси.

Абсолютно чистый металл можно получить только в космической лаборатории. Все остальные металлы в реальной жизни представляют собой **сплавы** — твердые соединения двух или более металлов (и неметаллов), полученные целенаправленно в процессе металлургического производства.

### **Атомно-кристаллическая структура металлов**

Все вещества в твердом состоянии могут иметь **кристаллическое** или **аморфное** строение. В аморфном веществе атомы расположены хаотично, а в кристаллическом — в строго определенном порядке. Все металлы в твердом состоянии имеют кристаллическое строение.

Для описания кристаллической структуры металлов пользуются понятием кристаллической решетки. **Кристаллическая решетка** — это воображаемая пространственная сетка, в узлах которой расположены атомы. Наименьшая часть кристаллической решетки, определяющая структуру металла, называется **элементарной кристаллической ячейкой**.

На рис. 1 изображены элементарные ячейки для наиболее распространенных кристаллических решеток. В **кубической объемно-центрированной решетке** (рис. 1а) атомы расположены в узлах ячейки и один атом в центре куба. Такую решетку имеют хром, вольфрам, молибден и др.

В **кубической гранецентрированной решетке** (рис. 1б) атомы расположены в вершинах куба и в центре каждой грани. Эту решетку имеют алюминий, медь, никель и другие металлы.

В **гексагональной плотноупакованной решетке** (рис. 1в) атомы расположены в вершинах и центрах оснований шестигранной призмы и три атома в середине призмы. Такой тип решетки имеют магний, цинк и некоторые другие металлы.

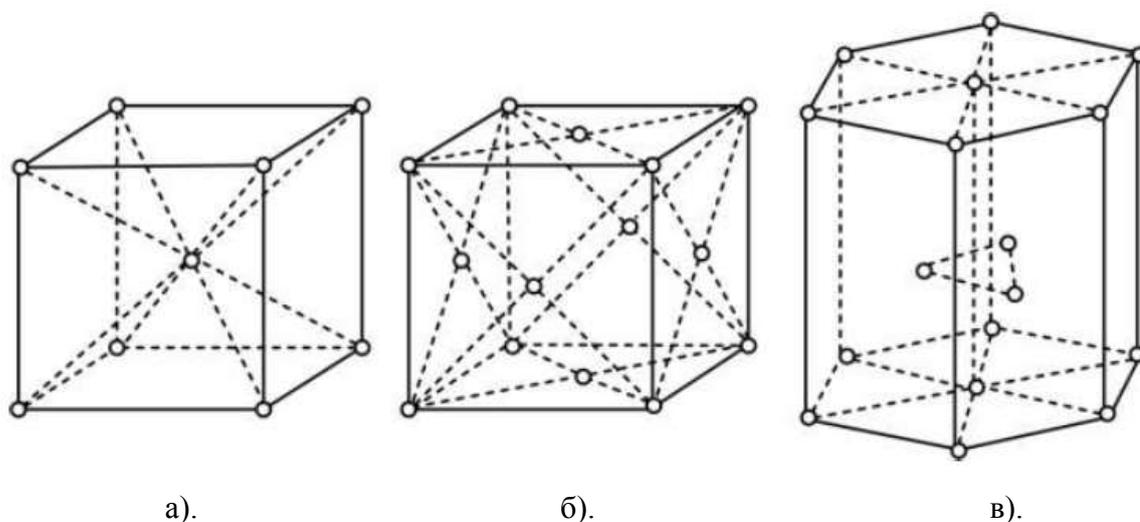


Рисунок 1. Основные виды кристаллических решеток

### **Кристаллизация металлов**

Процесс образования в металлах кристаллической решетки называется **кристаллизацией**. Для изучения процесса кристаллизации строят кривые охлаждения металлов, которые показывают изменение температуры  $t$  во времени  $\tau$ . На рис. 2 приведены кривые охлаждения аморфного и кристаллического веществ. Затвердевание аморфного вещества (рис. 2а) происходит постепенно, без резко выраженной границы между жидким и твердым состоянием.

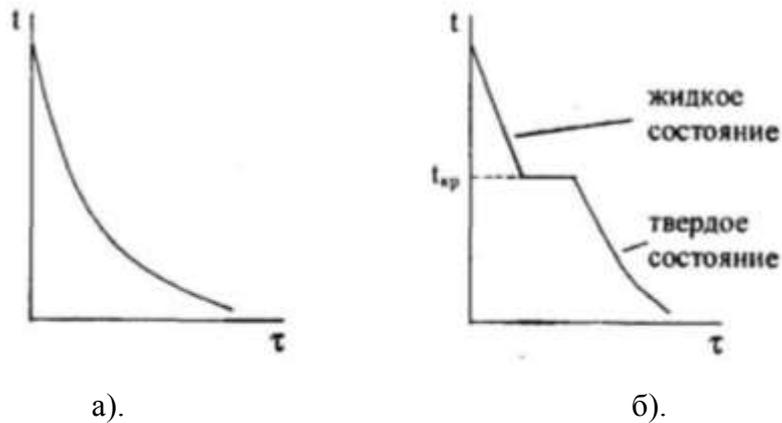


Рисунок 2. Кривые охлаждения аморфного и кристаллического тел

На кривой охлаждения кристаллического вещества (рис. 2б) имеется горизонтальный участок с температурой  $t_{кр}$ , называемой **температурой кристаллизации**. Наличие этого участка говорит о том, что процесс сопровождается выделением скрытой теплоты кристаллизации. Длина горизонтального участка — это время кристаллизации.

Кристаллизация металла происходит постепенно. Она объединяет два процесса, происходящих одновременно: возникновение центров кристаллизации и рост кристаллов. В процессе кристаллизации, когда растущий кристалл окружен жидкостью, он имеет правильную геометрическую форму. При столкновении растущих кристаллов их правильная форма нарушается (рис. 3).

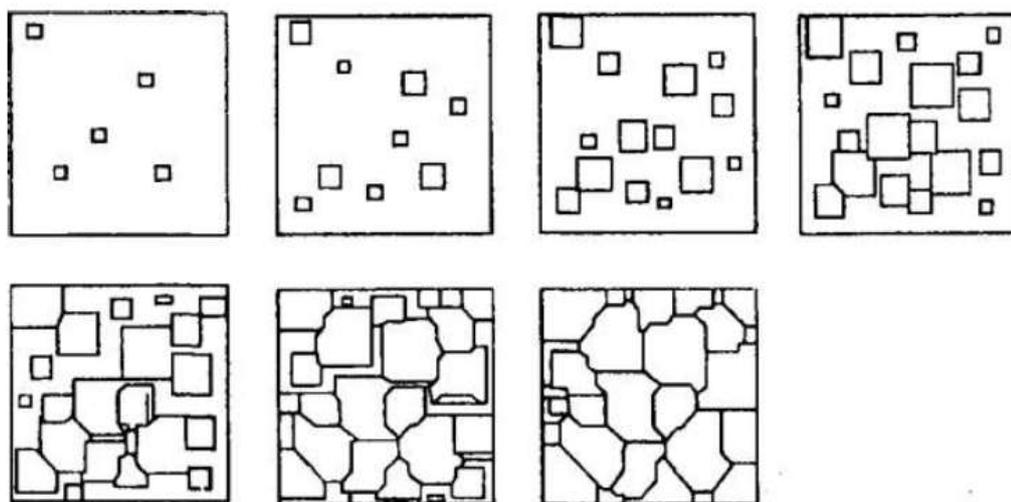


Рисунок 3. Схема процесса кристаллизации металла

После окончания кристаллизации образуются кристаллы неправильной формы, которые называются **зернами** или **кристаллитами**. Внутри каждого зерна имеется определенная ориентация кристаллической решетки, отличающаяся от ориентации решеток соседних зерен.

### **Полиморфные превращения**

Некоторые металлы в зависимости от температуры могут существовать в различных кристаллических формах. Это явление называется **полиморфизм** или **аллотропия**, а различные кристаллические формы одного вещества называются **полиморфными модификациями**. Процесс перехода от одной кристаллической формы к другой называется **полиморфным превращением**. Полиморфные превращения протекают при определенной температуре. Полиморфные модификации обозначают строчными греческими буквами  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  и т. д., причем,  $\alpha$  соответствует модификации, существующей при наиболее низкой температуре. Полиморфизм характерен для железа, олова, кобальта, марганца, титана и некоторых других металлов. Важное значение имеет полиморфизм железа. На рисунке 4 изображена кривая охлаждения железа.

Полиморфные превращения характеризуются горизонтальными участками на кривой охлаждения, так как при них происходит полная перекристаллизация металла. До  $911^{\circ}\text{C}$  устойчиво  $\text{Fe}_{\alpha}$ , имеющее кубическую объемно-центрированную решетку. В интервале  $911\text{-}1392^{\circ}\text{C}$  существует  $\text{Fe}_{\gamma}$  с кубической гранецентрированной кристаллической решеткой. При  $1392\text{-}1539^{\circ}\text{C}$  вновь устойчиво  $\text{Fe}_{\alpha}$ . Часто высокотемпературную модификацию  $\text{Fe}_{\alpha}$  обозначают  $\text{Fe}_{\delta}$ . Остановка на кривой охлаждения при  $768^{\circ}\text{C}$  связана не с полиморфным превращением, а с изменением магнитных свойств. До  $768^{\circ}\text{C}$  железо магнитно, а выше — немагнитно.

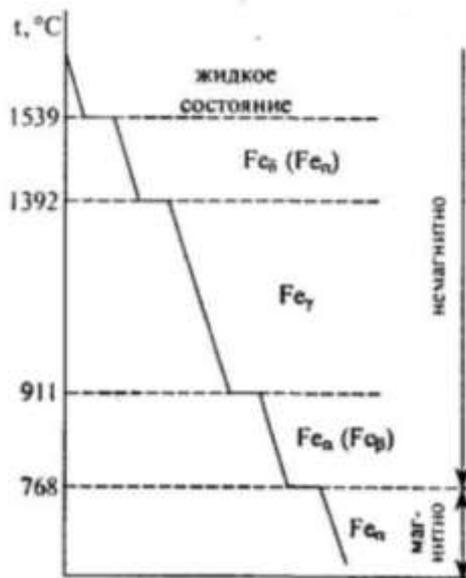


Рисунок 4. Кривая охлаждения железа

### Дефекты кристаллического строения

Реальный металлический кристалл всегда имеет дефекты кристаллического строения. Они подразделяются на точечные, линейные и поверхностные.

**Точечные дефекты** малы во всех трех измерениях. К точечным дефектам относятся вакансии, представляющие собой узлы кристаллической решетки в которых отсутствуют атомы (рис. 5а), а также замещенные атомы примеси (рис. 5б) и внедренные атомы (рис. 5в) которые могут быть как примесными, так и атомами основного металла. Точечные дефекты вызывают местные искажения кристаллической решетки, которые затухают достаточно быстро по мере удаления от дефекта.

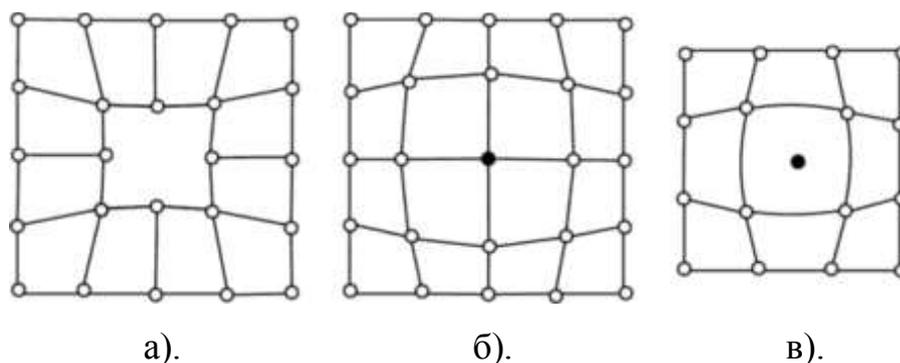


Рисунок 5. Схемы точечных дефектов в кристаллах

**Линейные дефекты** имеют малые размеры в двух измерениях и большую протяженность в третьем. Эти дефекты называют дислокациями. Краевая дислокация (рис. 6) представляет собой искажение кристаллической решетки, вызванное наличием «лишней» атомной полуплоскости.

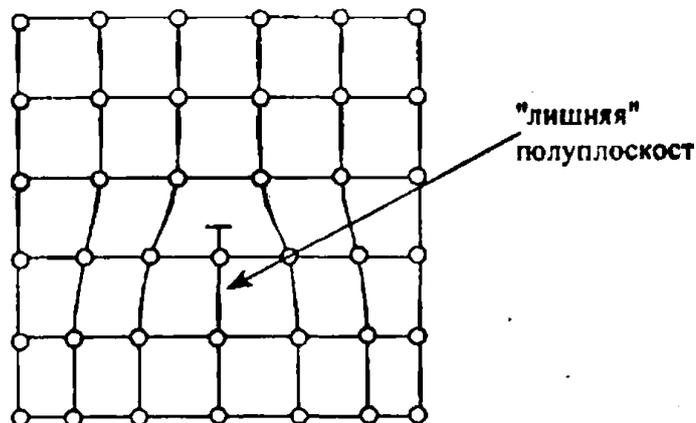


Рисунок 6. Схема краевой дислокации

**Поверхностные дефекты** малы только в одном измерении. К ним относятся, например, границы между отдельными зернами или группами зерен.

### **Наклеп и рекристаллизация**

При пластической деформации изменяется не только форма и размеры металла, но также его внутреннее строение и механические свойства. Зерна разворачиваются, деформируются и сплющиваются, вытягиваясь в направлении деформации. Образуется волокнистая структура. При этом прочность и твердость металла повышаются, а пластичность и вязкость снижаются. Явление упрочнения металла при пластической деформации называется **наклепом**.

Волокнистое строение и наклеп могут быть устранены при нагреве металла. Частичное снятие наклепа происходит уже при небольшом нагреве (до 300-400°C для железа). Но волокнистая структура при этом сохраняется. При нагреве до более высокой температуры в металле происходит образование новых равноосных зерен. Этот процесс называется **рекристаллизацией**. Наклеп при этом снимается полностью.

Температура, при которой начинается процесс рекристаллизации называется **температурой рекристаллизации**. Абсолютная температура рекристаллизации  $T_p$  связана с абсолютной температурой плавления простой зависимостью:

$$T_p = a * T_{пл},$$

где  $a$  — коэффициент, зависящий от состава и структуры металла. Для особо чистых металлов  $a = 0,2$ , для металлов технической чистоты  $a = 0,3 - 0,4$ , для сплавов  $a = 0,5 - 0,6$ .

Если деформирование металла происходит при температуре, которая выше температуры рекристаллизации, то наклеп после деформации не возникает. Такая деформация называется горячей. При горячей деформации идут одновременно процессы упрочнения и рекристаллизации. Деформация, которая происходит ниже температуры рекристаллизации, называется холодной.

**Фазы и структура в металлических сплавах: твердые растворы, химические соединения, механические смеси**

**Металлическим сплавом** называется материал, полученный сплавлением двух или более металлов или металлов с неметаллами, обладающий металлическими свойствами. Вещества, которые образуют сплав называются **компонентами**. **Фазой** называют однородную часть сплава, характеризующуюся определенными составом и строением и отделенную от других частей сплава поверхностью раздела. **Под структурой** понимают форму размер и характер взаимного расположения фаз в металлах и сплавах. **Структурными составляющими** называют обособленные части сплава, имеющие одинаковое строение с присущими им характерными особенностями.

По характеру взаимодействия компонентов все сплавы подразделяются на три основных типа: механические смеси, химические соединения и твердые растворы.

**Механическая смесь** двух компонентов  $A$  и  $B$  образуется, если они не способны к взаимодействию или взаимному растворению. Каждый компонент при этом кристаллизуется в свою кристаллическую решетку. Структура механических смесей неоднородная, состоящая из отдельных зерен компонента  $A$  и компонента  $B$ . Свойства механических смесей зависят от количественного соотношения компонентов: чем больше в сплаве данного компонента, тем ближе к его свойствам свойства смеси.

**Химическое соединение** образуется когда компоненты сплава  $A$  и  $B$  вступают в химическое взаимодействие. При этом соотношение чисел атомов в соединении соответствует его химической формуле  $A_mB_n$ . Химическое соединение имеет свою кристаллическую решетку, которая отличается от кристаллических решеток компонентов. Химические соединения имеют однородную структуру, состоящую из одинаковых по составу и свойствам зерен.

При образовании **твердого раствора** атомы одного компонента входят в кристаллическую решетку другого. Твердые растворы замещения образуются в результате частичного замещения атомов кристаллической решетки одного компонента атомами второго (рис. 5б). Твердые растворы внедрения образуются когда атомы растворенного компонента внедряются в кристаллическую решетку компонента-растворителя (рис. 5в). Твердый раствор имеет однородную структуру, одну кристаллическую решетку. В отличие от химического соединения твердый раствор существует не при строго определенном соотношении компонентов, а в интервале концентраций. Обозначают твердые растворы строчными буквами греческого алфавита  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\tau$  и т. д.

**Диаграмма состояния** показывает строение сплава в зависимости от соотношения компонентов и от температуры. Она строится экспериментально по кривым охлаждения сплавов (рис. 7). В отличие от чистых металлов сплавы кристаллизуются не при постоянной температуре, а в интервале температур. Поэтому на кривых охлаждения сплавов имеется две

критические точки. В верхней критической точке, называемой **точкой ликвидус** ( $t_l$ ) начинается кристаллизация. В нижней критической точке, которая называется **точкой солидус** ( $t_c$ ), кристаллизация завершается. Кривая охлаждения механической смеси (рис. 7а) отличается от кривой охлаждения твердого раствора (рис. 7б) наличием горизонтального участка. На этом участке происходит кристаллизация эвтектики. **Эвтектикой** называют механическую смесь двух фаз, одновременно кристаллизовавшихся из жидкого сплава. Эвтектика имеет определенный химический состав и образуется при постоянной температуре.

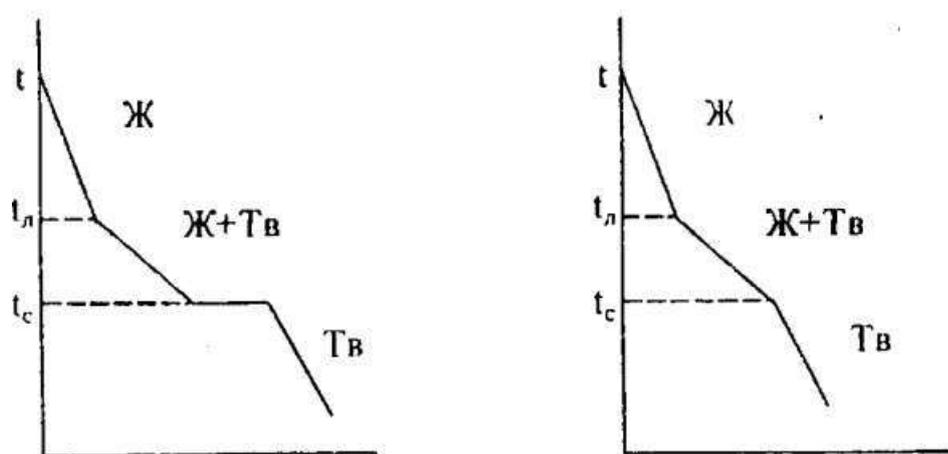


Рисунок 7. Кривые охлаждения сплавов: а). механической смеси; б). твердого раствора.

Диаграмму состояния строят в координатах температура-концентрация. Линии диаграммы разграничивают области одинаковых фазовых состояний. Вид диаграммы зависит от того, как взаимодействуют между собой компоненты. Для построения диаграммы состояния используют большое количество кривых охлаждения для сплавов различных концентраций. При построении диаграммы критические точки переносятся с кривых охлаждения на диаграмму и соединяются линией. В получившихся на диаграмме областях записывают фазы или структурные составляющие. Линия диаграммы состояния, на которой при охлаждении начинается кристаллизация сплава называется **линией ликвидус**, а линия, на которой кристаллизация завершается — **линией солидус**.

### Виды диаграмм состояния

Диаграмма состояния сплавов, образующих механические смеси (рис. 8), характеризуется отсутствием растворения компонентов в твердом состоянии. Поэтому в этом сплаве возможно образование трех фаз: жидкого сплава *Ж*, кристаллов *A* и кристаллов *B*. Линия *ACB* диаграммы является линией ликвидус: на участке *AC* при охлаждении начинается кристаллизация компонента *A*, а на участке *CD* — компонента *B*. Линия *DCB* является линией солидус, на ней завершается кристаллизация *A* или *B* и при постоянной температуре происходит кристаллизация эвтектики *Э*. Сплавы, концентрация которых соответствует точке *C* диаграммы, называются **эвтектическими**, их структура представляет собой чистую эвтектику. Сплавы, расположенные на диаграмме левее эвтектического, называются **доэвтектическими**, их структура состоит из зерен *A* и эвтектики. Те сплавы, которые на диаграмме расположены правее эвтектического, называются **заэвтектическими**, их структура представляет собой зерна *B*, окруженные эвтектикой.

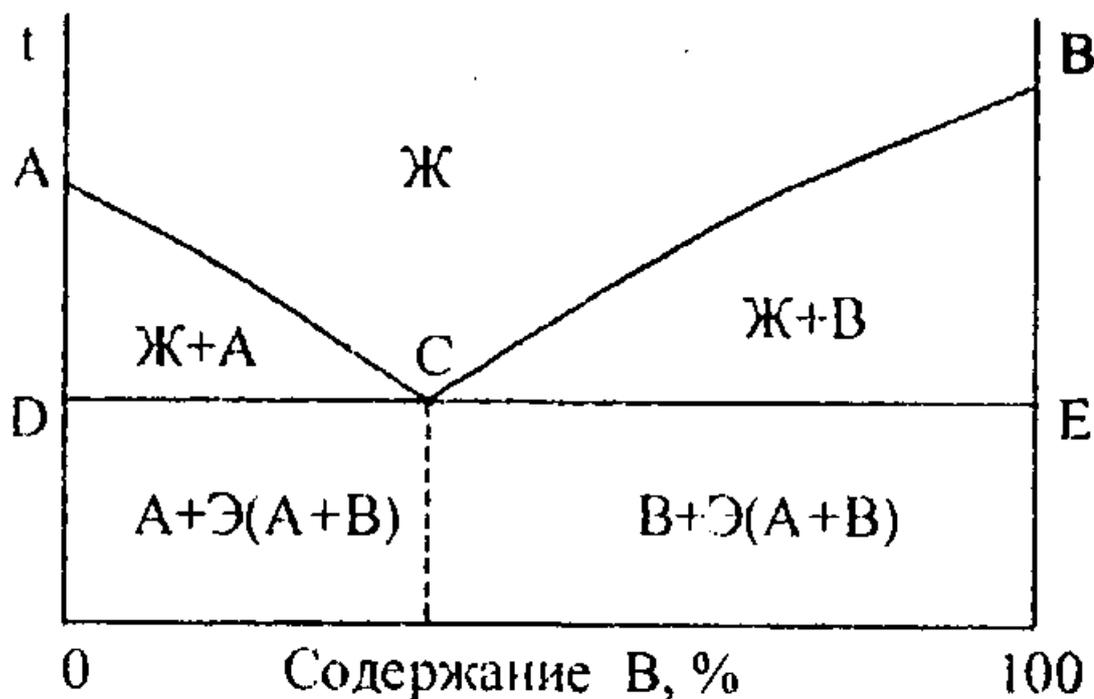


Рисунок 8. Диаграмма состояния сплавов, образующих механические смеси

Диаграмма состояния сплавов с неограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии изображена на рис. 9а. Для этого сплава

возможно образование двух фаз: жидкого сплава и твердого раствора  $\alpha$ . На диаграмме имеется всего две линии, верхняя является линией ликвидус, а нижняя — линией солидус.

Диаграмма состояния сплавов с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии показана на рис. 9б. В этом сплаве могут существовать три фазы — жидкий сплав, твердый раствор  $\alpha$  компонента  $B$  в компоненте  $A$  и твердый раствор  $\beta$  компонента  $A$  в компоненте  $B$ . Данная диаграмма содержит в себе элементы двух предыдущих. Линия  $ACB$  является линией ликвидус, линия  $ADCEB$  — линией солидус. Здесь также образуется эвтектика, имеются эвтектический, доэвтектический и заэвтектический сплавы.

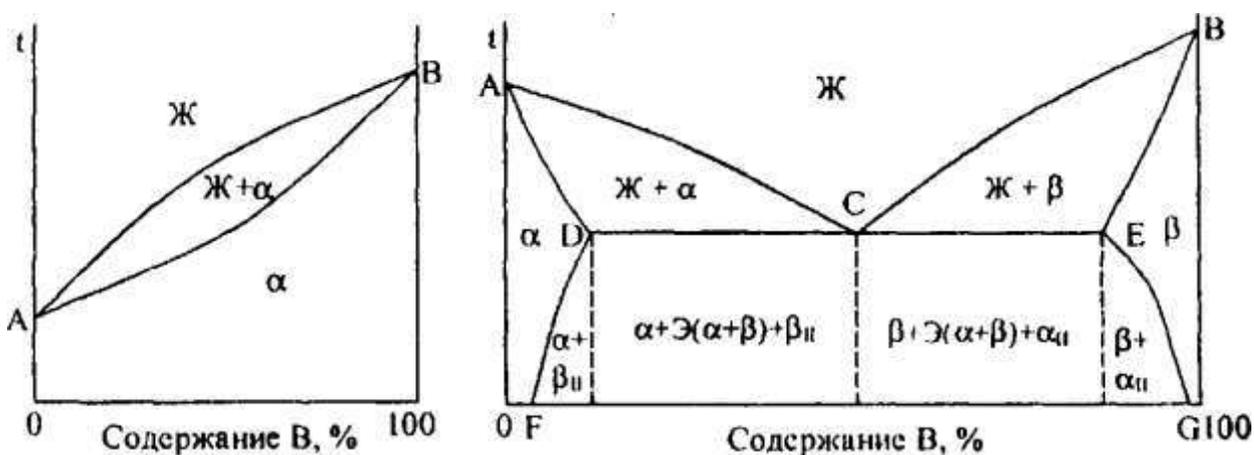


Рисунок 9. Диаграмма с а). неограниченной растворимостью компонентов в твердом растворе; б). ограниченной растворимостью компонентов в твердом растворе

По линиям  $FD$  и  $EG$  происходит выделение вторичных кристаллов  $\alpha_n$  и  $\beta_n$  (вследствие уменьшения растворимости с понижением температуры). Процесс выделения вторичных кристаллов из твердой фазы называется вторичной кристаллизацией.

**Диаграмма состояния сплавов**, образующих химическое соединение (рис.10) характеризуется наличием вертикальной линии, соответствующей соотношением компонентов в химическом соединении  $A_mB_n$ .

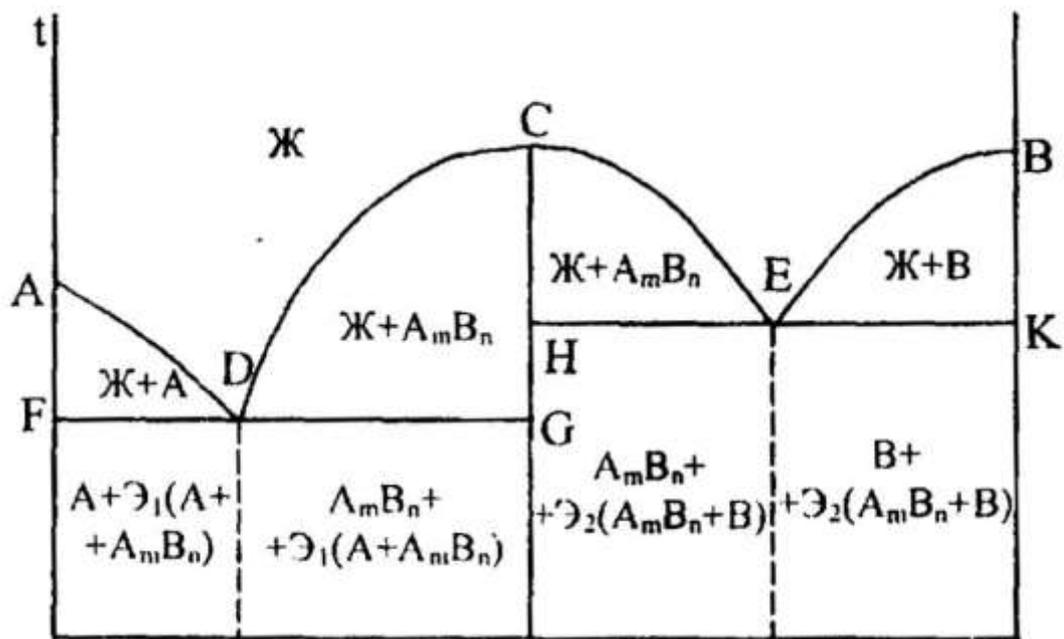


Рисунок 10. Диаграмма состояния сплавов образующих химическое соединение

Эта линия делит диаграмму на две части, которые можно рассматривать как самостоятельные диаграммы сплавов, образуемых одним из компонентов с химическим соединением. На рис. 10 изображена диаграмма для случая, когда каждый из компонентов образует с химическим соединением механическую смесь.