

Направление подготовки бакалавров  
«Химическая технология»

# Материаловедение и технология конструкционных материалов



Лихачев Владислав Александрович, к.х.н.,  
доцент



ВЯТСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

# Материал предыдущей лекции

Что мы прошли на предыдущей лекции

- Реальный металл в зависимости от температуры может находиться в твердом или жидком состоянии. Это определяется величиной свободной энергии металла. При низких температурах она меньше у **твердого** металла при высоких у жидкого.
- Кристаллизация реального металла идет при температурах **ниже** температуры **плавления**, т.к. необходима энергия для образования первого зародыша.
- Реальный металл имеет много дефектов: точечных, линейных, поверхностных за счет чего **прочность** реального металла **значительно ниже** идеального.
- Прочность реального металла от количества дефектов зависит **сложным образом**, отсюда есть два способа упрочнения металла: **снижение числа дефектов и повышение их.**



ВЯТСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

## Материал предыдущей лекции

- Реальный металл состоит из **зерен**, каждое зерно **анизотропно** по свойствам, а реальный металл **изотропен**.
- Размер и форма зерна зависят от условий кристаллизации.
- Размер зерна влияет на **свойства металла**, поэтому его нужно знать.
- Размер зерна оценивается по баллам. Существует **гостированный метод** определения величины зерна по эталонным шкалам. С которым вам предстоит познакомиться на лабораторной работе.



ВЯТСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

## **Тема 3. Фазы в металлических сплавах. Диаграммы фазового равновесия.**

**2.1. Фазы в металлических сплавах.**

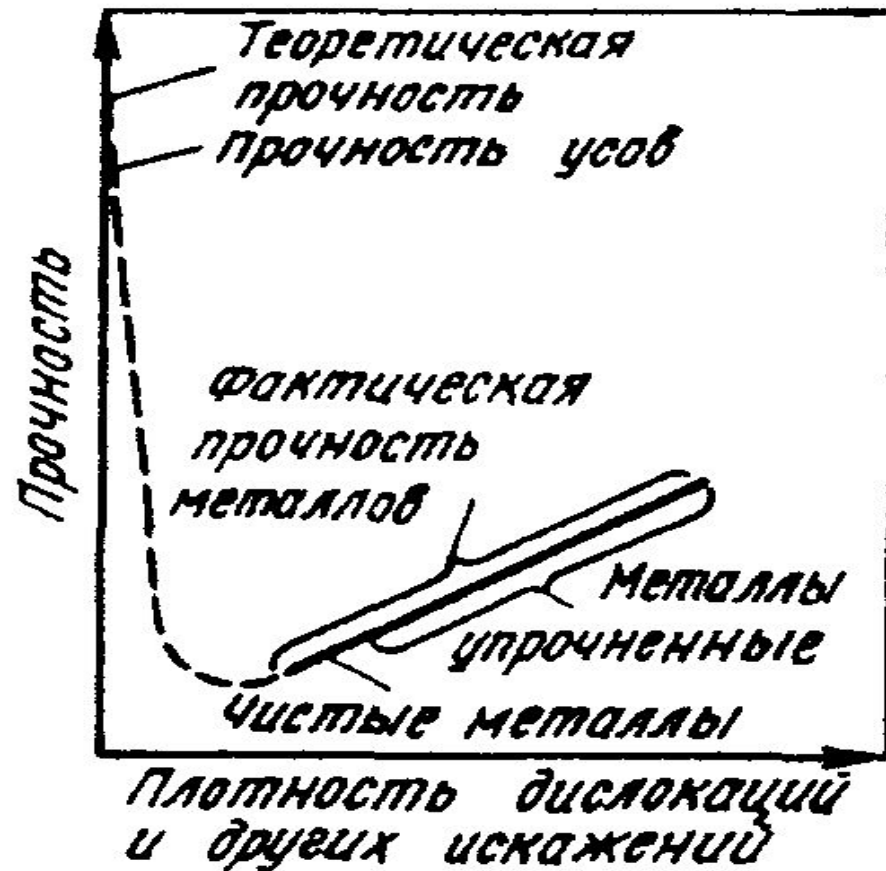
**2.2. Диаграммы фазового равновесия сплавов.**



ВЯТСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

# Металлические сплавы

**Чистые металлы**  
обычно имеют низкую  
прочность и, сл-но,  
невысокие  
технологические  
свойства.  
Поэтому на практике  
значительно чаще  
применяют **сплавы**.





ВЯТСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

# Металлические сплавы

- **Сплавы** – это сложные вещества, полученные сплавлением нескольких компонентов.
- **Компонентом** сплава может быть отдельный элемент: другой металл или не металл (азот, углерод, бор) или химическое соединение: карбиды, нитриды, бориды и т.д.
- В зависимости от физико-химического взаимодействия компонентов в сплавах образуются разные **фазы**.



ВЯТСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

# Металлические сплавы

- За счет большого количества **фаз**, образующихся при сплавообразовании, в сплавах всегда присутствует большое количество зерен, разного характера, а сл-но, в них больше дефектов.
- Поэтому сплавы всегда **более прочны**, чем чистые металлы, но менее пластичны.
- Применение сплавов одно из направлений упрочнения металлов.



ВЯТСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

## Определение фазы

Т.к при сплавообразовании образуется большое количество разных фаз необходимо дать определение фазы.

**Фаза** – однородная гомогенная составная часть системы, характеризующаяся **определённым составом, свойствами, типом кристаллической решетки и отделенная от других частей системы поверхностями раздела.**





ВЯТСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

# Виды фаз в металлических сплавах

*В сплавах возможно образование трёх типов фаз:*

- **Твердые растворы (замещения и внедрения);**
- **Упорядоченные твердые растворы;**
- **Химические соединения.**



ВЯТСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

## Твердые растворы замещения

В твердом растворе **замещения** атомы **растворяющегося** компонента заменяют атомы **растворяющего** компонента в его кристаллографической решетке в произвольном порядке.

Этот тип фаз наиболее часто получается при получении сплавов, за счет сплавления двух или нескольких металлов.



ВЯТСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

## Твердые растворы замещения

**Твёрдые растворы замещения** – фазы, в которых один из компонентов сохраняет свою кристаллическую решетку (обычно концентрация этого компонента в сплаве высокая), а атомы другого или других компонентов располагаются в его решетке, искажая её. (концентрация этого (этих) компонентов в сплаве не высокая).

Эти фазы характерны для латуней, бронз, сплавов алюминия, сплавов железа с никелем, хромом, марганцем и другими металлами.



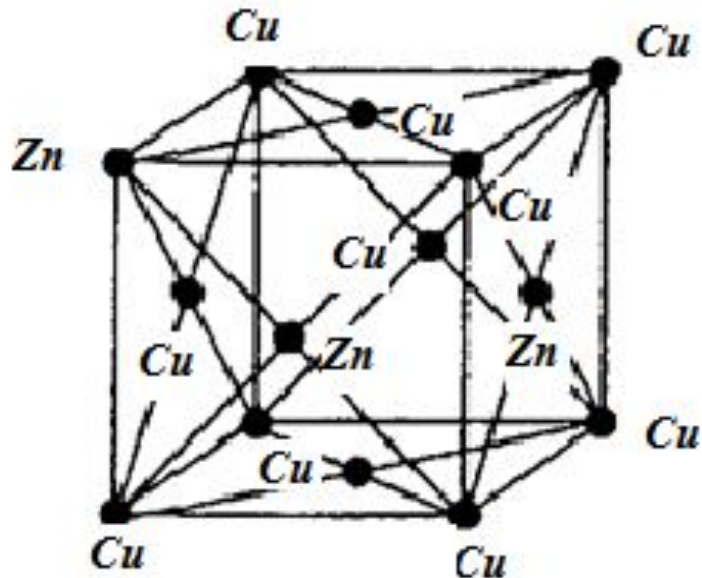
ВЯТСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

# Пример твердого раствора замещения

Сплав медь – цинк (латунь)

Медь имеет решетку ГЦК. В латунях с содержанием цинка до 37% решетка ГЦК сохраняется.

Медь растворитель, цинк растворяющийся элемент.



Растворяющиеся  
компоненты в  
растворах замещения  
замещают атомы  
растворителя в  
произвольном порядке



ВЯТСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

# Растворы замещения

- Растворы замещения образуются также в таких сплавы, как железо-никель, железо-хром, серебро-золото, никель-медь, медь-алюминий и т.д.
- Таким образом, твёрдые растворы замещения обычно образуются между компонентами **металл – металл**.



## Твердые растворы замещения

- Если диаметры атомов **близки**, то образуются растворы с **неограниченной растворимостью** компонентов друг в друге. Решетка растворяющего компонента искажается мало.
- Сплавы железо – никель, медь-золото, медь –цинк и т.д..
- Если диаметры атомов **сильно различаются** – то получаются растворы с **ограниченной растворимостью**.
- Такая ситуация характерна для сплавов алюминия: алюминий – медь, алюминий – никель, алюминий-магний и т.д. Решетка растворяющего компонента (алюминия) искажается очень сильно.



ВЯТСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

## Твердые растворы внедрения

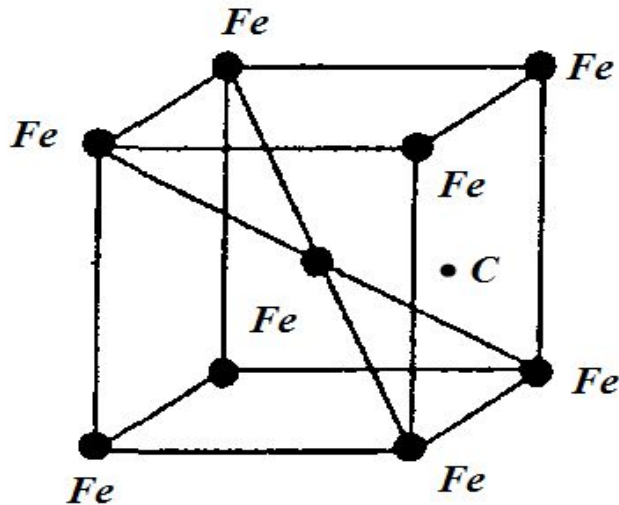
- В твердых растворах внедрения атомы растворяющегося компонента располагаются в **порах решетки** растворяющего компонента.
- Характерны для компонентов очень сильно отличающихся по диаметру атома, такого рода растворы образуют компоненты **металл – неметалл**.
- Твердые растворы внедрения – это всегда растворы с **ограниченной растворимостью** компонентов, т. к. пор в решетках немного.



ВЯТСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

## Твердые растворы внедрения

Примером твёрдого раствора внедрения может служить раствор углерода в  $Fe_{\alpha}$ .  $Fe_{\alpha}$  имеет решетку ОЦК. Раствор углерода в  $Fe_{\alpha}$  называют **ферритом**.



Углерод располагается в октаэдрических порах.

К растворам внедрения относятся также растворы азота, углерода, бора, водорода, кислорода и кремния в железе и других металлах





ВЯТСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

# Твердые растворы внедрения

- Твердые растворы внедрения всегда растворы с **ограниченной** растворимостью компонентов друг в друге.
- Растворимость растворяющегося компонента зависит от **величины пор** в решетке растворяющего компонента
- Наибольшая растворимость компонентов в решетке ГЦК, наименьшая в ОЦК.



ВЯТСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

## Упорядоченные твердые растворы

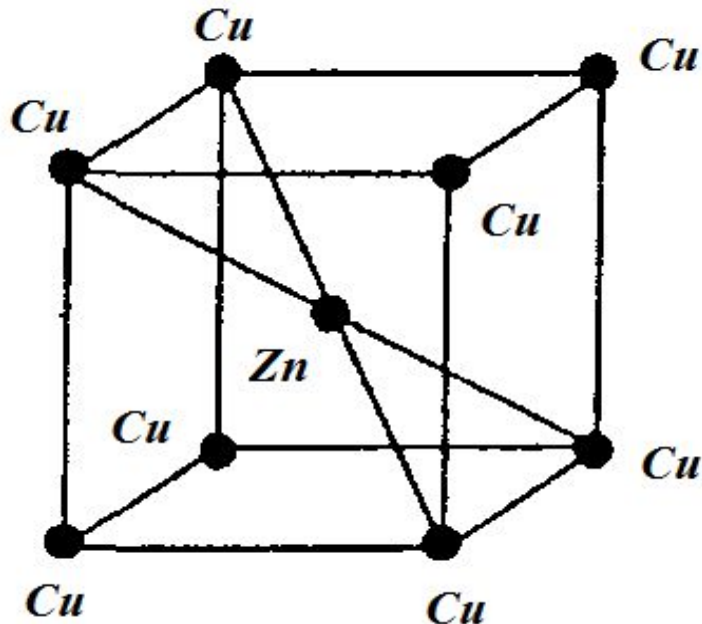
- В упорядоченных твердых растворах атомы растворяющегося компонента замещают атомы растворяющего компонента в его кристаллографической решетке в **строго определенном порядке**;
- Это всегда **растворы замещения** и образуются компонентами металл- металл;
- Упорядоченные твердые растворы имеют характерные только для них свойства;
- Им можно присвоить определенную формулу.



ВЯТСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

## Упорядоченные твёрдые растворы

Примером упорядоченного твёрдого раствора может служить раствор цинка в меди, который образуется при концентрации цинка более 37 %. При его образовании меняется даже вид решетки. Такой раствор имеет решетку ОЦК



Вспомним количество атомов в решетке ОЦК.

Упорядоченному твёрдому раствору можно присвоить химическую формулу: сплав **CuZn**



ВЯТСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

## Упорядоченные твердые растворы

- Таким образом, сплавы медь – цинк (латуни) бывают **однофазные и двухфазные**.
- **Однофазные латуни** получают при концентрации цинка меньше 37 % и содержат только одну фазу твердый раствор компонентов в меди;
- **Двухфазные латуни** получают при концентрации цинка больше 37 % и содержат две фазы твердый раствор компонентов в меди и упорядоченный раствор цинка в меди.



ВЯТСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

## Химические соединения

Следующим видом фаз, которые могут образоваться при получении сплавов являются – **химические соединения**

Химические соединения образуются при взаимодействии элементов сплава друг с другом:

В сплавах можно выделить три вида химических соединений:

1. **Интерметаллиды** (соединения «металл – металл»). Характерны для сплавов алюминия ( $\text{CuAl}_2$ ,  $\text{Ni}_3\text{Al}$ ,  $\text{CoAl}$ ,  $\text{Ti}_3\text{Al}$ ).
2. **Фазы внедрения** (соединения «металл – неметалл»):  $\text{Fe}_4\text{N}$ ,  $\text{Mn}_4\text{N}$ ,  $\text{Co}_4\text{N}$ ,  $\text{Fe}_3\text{C}$ , бориды и т.д.
3. **Примесные и вредные неорганические включения**: оксиды и сульфиды:  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{FeS}$ . и т.д.



ВЯТСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

- Фазовый состав сплава зависит от температуры и концентрации компонентов нем.
- Фазовый состав сплава, в свою очередь, определяет свойства.
- Поэтому важно знать этот состав.
- Фазовый состав сплавов при различных температурах отображается с помощью **диаграмм состояния.**



ВЯТСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

## Диаграммы состояния

Диаграммы состояния имеют еще одно название, их называют **диаграммами фазового равновесия.**

**Диаграммы состояния** представляют собой графическое изображение состояния сплавов при изменении температуры. С их помощью можно проследить фазовые и структурные изменения сплавов в процессе их охлаждения или нагрева.



ВЯТСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

## Диаграммы состояния

Диаграмму состояния на плоскости легко построить только для **двухкомпонентных сплавов**. В этом случае достаточно двух координат, при этом по оси абсцисс откладывается процентный состав сплава, а по оси ординат температура.

**Линии** на диаграмме состояния строят экспериментально, по заранее построенным **кривым охлаждения**. По линиям и точкам на этих кривых, судят о превращениях протекающих в сплаве при изменении температуры.

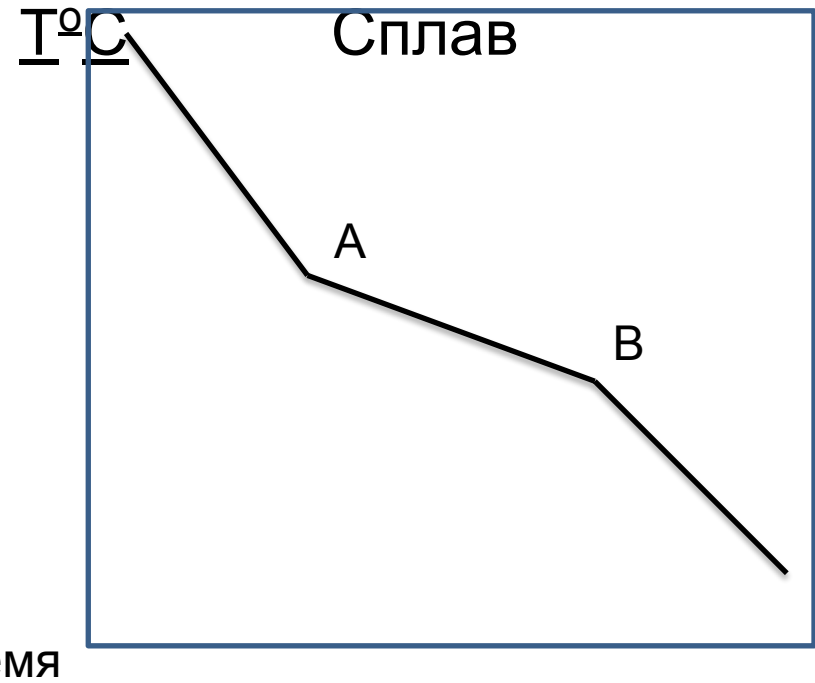




ВЯТСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

# Кривые охлаждения металла и сплава

- Опыт показывает, что кривая охлаждения сплава существенно отличается от кривой охлаждения чистого металла.





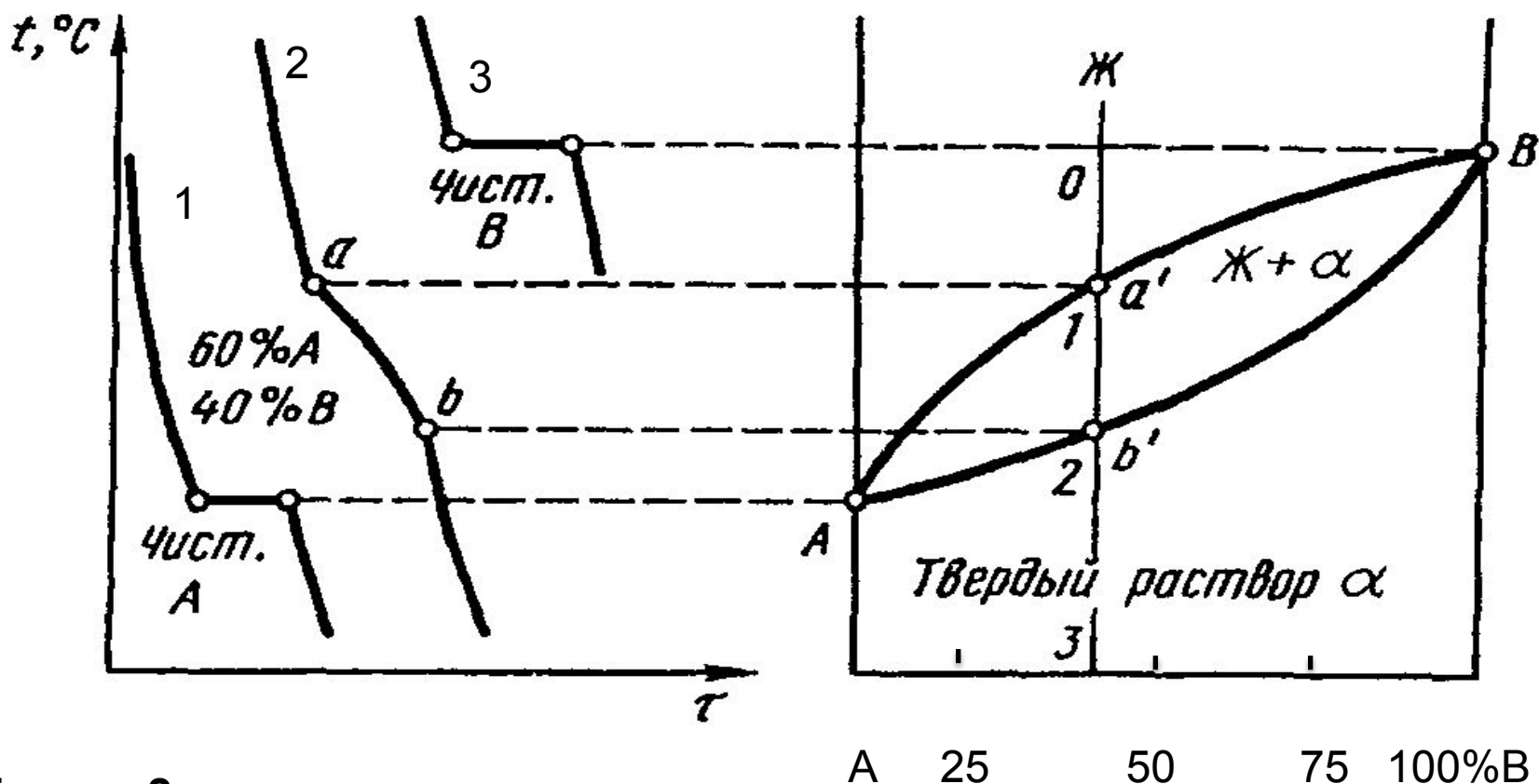
ВЯТСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

## Построение диаграмм состояния

- Чистый металл кристаллизуется при одной температуре близкой к температуре плавления при медленном охлаждении, а сплав кристаллизуется не при одной температуре, а в некотором интервале температур. Сплавы не имеют постоянной температуры кристаллизации.
- Для получения диаграммы состояния нужно снять кривые охлаждения для нескольких растворов с разной концентрацией растворяющихся компонентов.



# Построение диаграммы состояния двух компонентного сплава с неограниченной растворимостью компонентов друг в друге



Кривая 2 – кривая охлаждения сплава с 40% компонента В

## Диаграмма состояния двух компонентного сплава с неограниченной растворимостью компонентов друг в друге

- Линия  $A1B$  – линия начала кристаллизации сплавов называется линией **ликвидус**;
- Линия  $A2B$  – линия конца кристаллизации сплавов называется линией **солидус**.
- Выше линии  $A1B$  сплавы находятся в виде **жидкого раствора**;
- Ниже линии  $A2B$  сплавы находятся в виде твердого раствора. Обозначим его как  $\alpha$  – **твердый раствор**.



ВЯТСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

## Диаграмма состояния двух компонентного сплава с неограниченной растворимостью компонентов друг в друге

- Между линиями ликвидус и солидус сплавы будут находиться одновременно в жидком состоянии, в виде **жидкого раствора**, и в твердом состоянии, в виде  **$\alpha$  –твердого раствора**.
- Таким образом, диаграмма состояния позволяет узнать:
  - а) при каких температурах сплав конкретного состава находится в виде жидкого и твердого раствора.
  - б) в каком интервале температур протекает его кристаллизация.

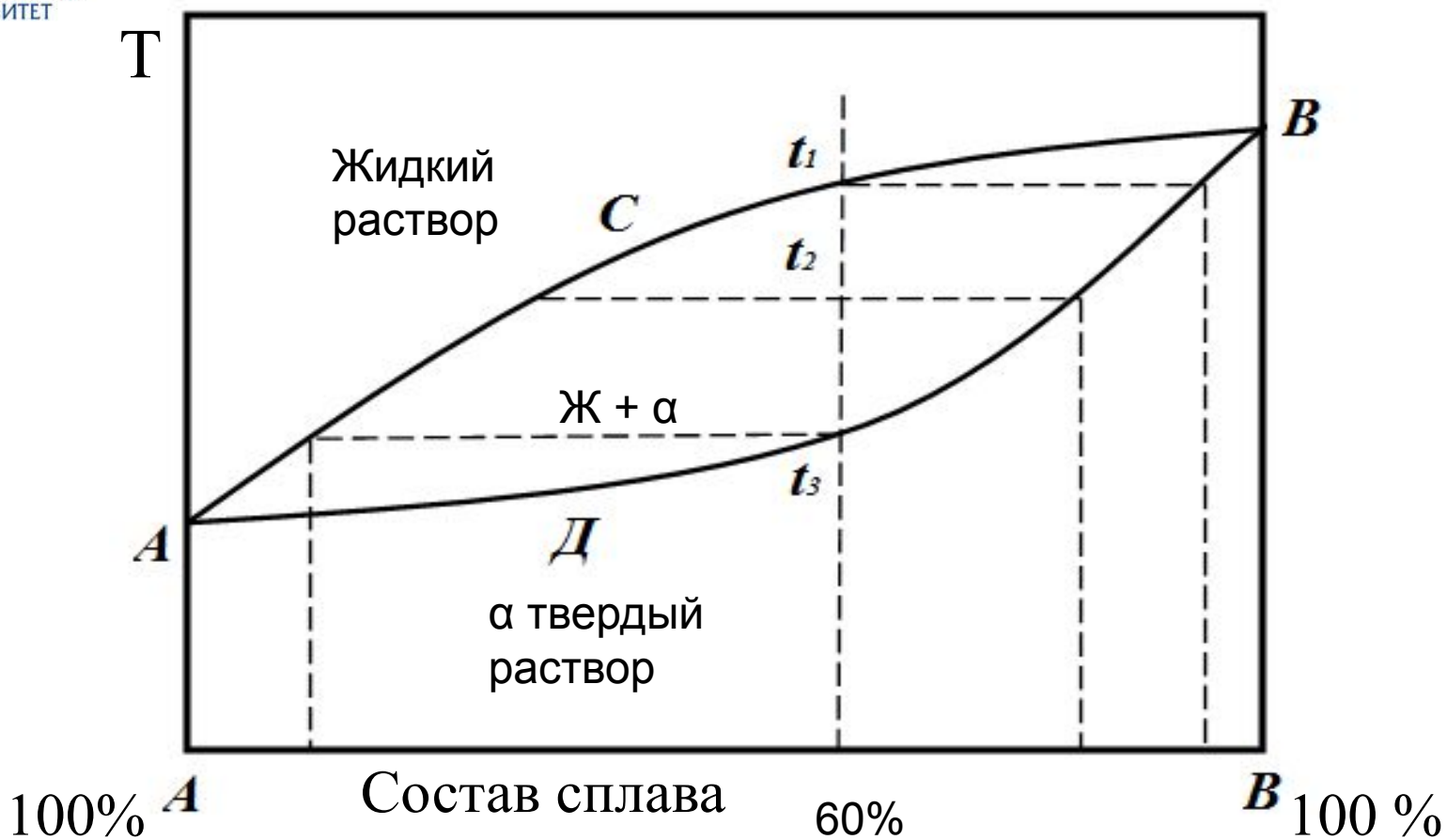
## Диаграмма состояния двух компонентного сплава с неограниченной растворимостью компонентов друг в друге

- Диаграмма состояния позволяет определить еще целый ряд характеристик кристаллизующегося сплава.
- Для того чтобы их определить нужно для данного сплава провести на диаграмме несколько горизонтальных линий при различных температурах.
- Линия параллельная оси абсцисс называется **канода** или **нода**.



ВЯТСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

Диаграмма состояния двух компонентного сплава с неограниченной растворимостью компонентов



Применение **правила отрезков** для сплавов, образующих твёрдые растворы.



ВЯТСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

## Диаграмма состояния двух компонентного сплава с неограниченной растворимостью компонентов

- **Канода** ( или нода) линия, проведенная параллельно оси абсцисс, показывает: 1. состав образующейся твердой фазы, 2. состав остающегося жидкого раствора и 3. количество жидкой и твердой фазы, которое определяется по величине отрезков каноды (**правило отрезков**).
- **Правый** отрезок каноды показывает количество жидкой фазы, а **левый** отрезок количество твердой фазы.





ВЯТСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

## Диаграмма состояния двух компонентного сплава с неограниченной растворимостью компонентов

- Таким образом, при кристаллизации сплавов первые твердые кристаллы будут обогащены тугоплавким компонентом В, а последние низкоплавким компонентом А.
- Т. е. слиток будет неоднороден по составу. Неоднородность слитка по составу при кристаллизации сплавов называется **дендритная ликвация**.
- Дендритная ликвация приводит к неоднородности слитка по свойствам и соответственно она вредна и ее нужно удалять.



ВЯТСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

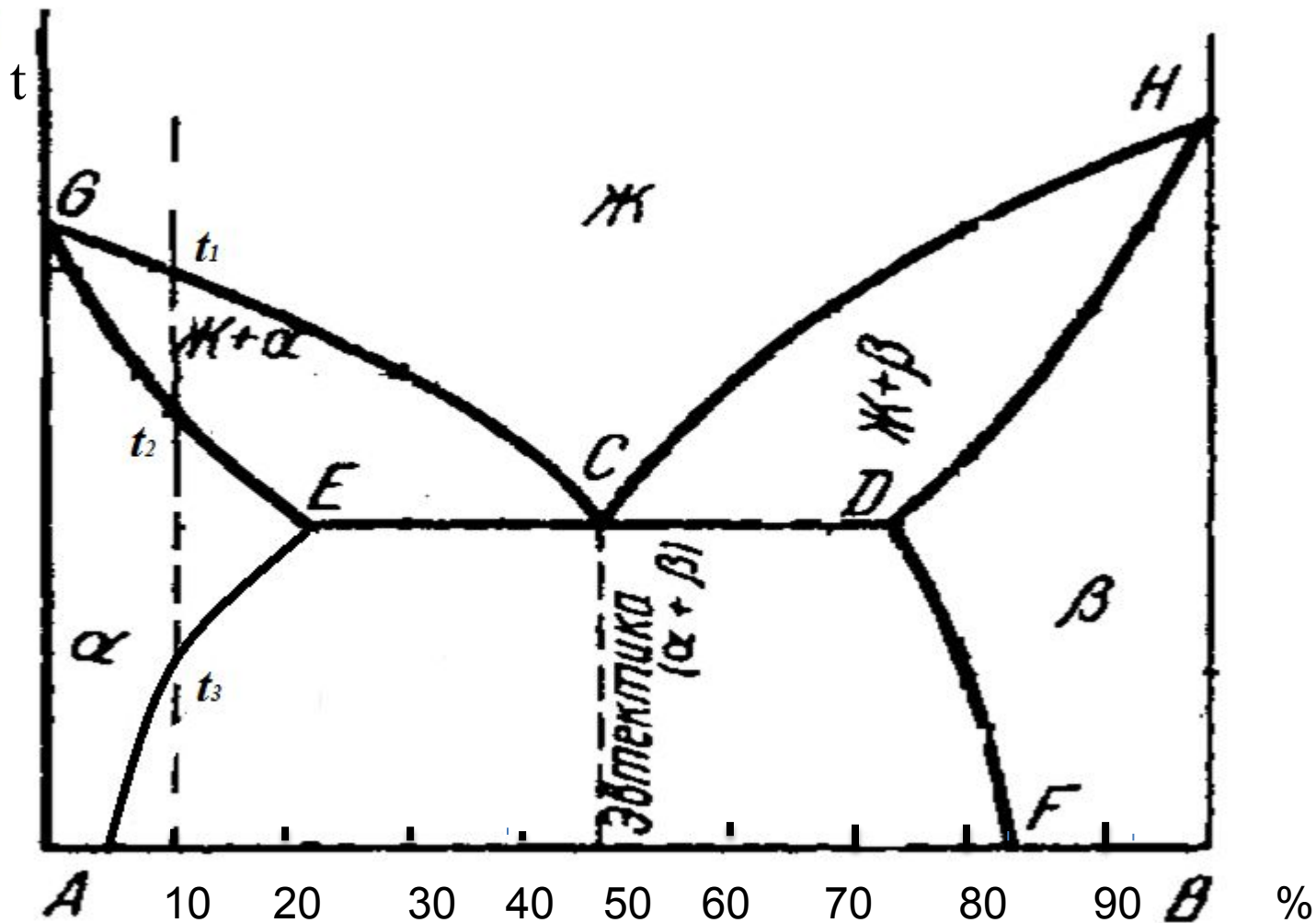
## Диаграмма состояния двух компонентного сплава с ограниченной растворимостью компонентов

- Разберем более сложную диаграмму состояния двухкомпонентного сплава с ограниченной растворимостью компонентов в друг друге.
- В этом случае при кристаллизации сплавов в зависимости от концентрации компонентов получаются **два вида твердых сплавов**:
  - 1 – твердый раствор компонента В в компоненте А. Назовем его твердый раствор  $\alpha$  ; 2 – твердый раствор компонента А в компоненте В. Назовем его твердый раствор  $\beta$ .
- Если далее мы снимем кривые охлаждения (кристаллизации) большого количества сплавов с разным содержанием компонентов А и Б , то с помощью их мы сможем получить диаграмму состояния такого сплава.



ВЯТСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

## Диаграмма состояния двухкомпонентного сплава с ограниченной растворимостью компонентов друг в друге



## Диаграмма состояния двухкомпонентного сплава с ограниченной растворимостью компонентов друг в друге

- Линия GCH – линия **ликвидус**;
- Линия GECDH – линия **солидус**;
- EA – линия **изменения растворимости** компонента **B** в компоненте **A**;
- DF – линия **изменения растворимости** компонента **A** в компоненте **B**;
- Точка E предельная растворимость компонента B в компоненте A;
- Точка D предельная растворимость компонента A в компоненте B;

## Диаграмма состояния двухкомпонентного сплава с ограниченной растворимостью компонентов друг в друге

- Точка **С** соответствует сплаву так называемого **эвтектического состава**.
- Сплав **эвтектического** состава кристаллизуется при одной температуре, как чистый металл, при этом получают одновременно два вида кристаллов: твердый раствор  $\alpha$  и твердый раствор  $\beta$ .
- **Эвтектика** – это смесь двух твердых фаз, получающихся при кристаллизации из жидкой фазы.
- Эвтектика одна из **структурных составляющих сплавов**.



ВЯТСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

# Понятие о структуре металлов

- **Структура металла** – это тип, форма, размеры, конфигурация, взаимное расположение **областей твёрдого тела**, отделённых друг от друга поверхностями раздела.
- Структура понятие **общее** ее изучают не только при исследовании металла, но и керамики, солей, полимеров и т.д.
- **Элементы структуры металла:** фаза, зерно, структурная составляющая, трещина, раковина, неметаллическое включение, газовый пузырь и т.д.
- **Структурная составляющая:** эвтектика (смесь двух фаз), эвтектоид (также смесь двух фаз)



ВЯТСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

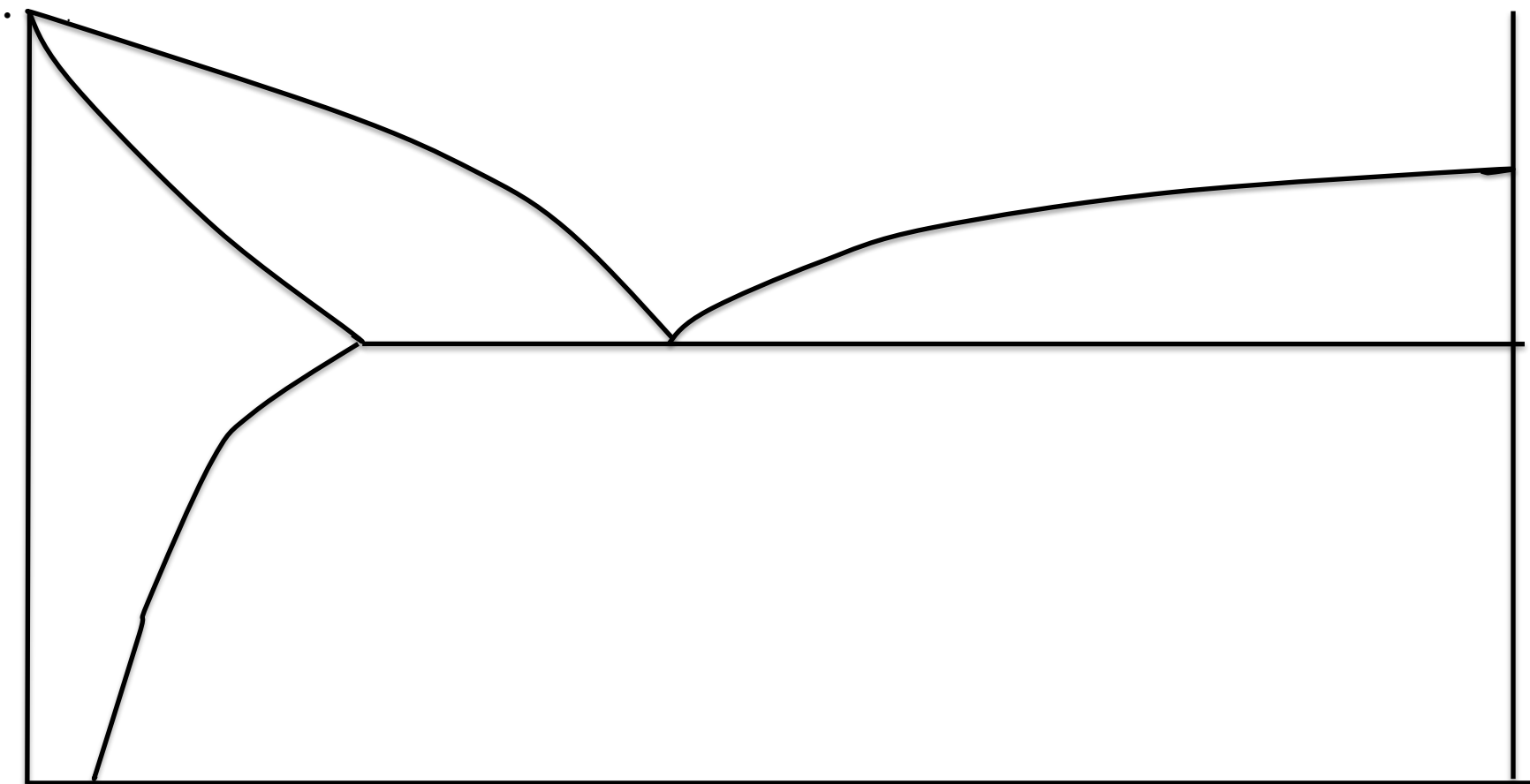
# Эвтектические составы в практике

- Сплавы **эвтектического состава** очень важны в машиностроении, так как обладают лучшими литейными свойствами (низкая температура плавления, хорошая жидкотекучесть, малая усадка). Поэтому литейные сплавы, например, алюминия и меди всегда имеют эвтектики, а сплав алюминия АК12 – это чистая эвтектика.
- Эвтектики образуются также при **сплавлении солей** и эти эвтектики очень важны, например, при получении алюминия и магния электролизом из расплавов.



ВЯТСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

# Диаграмма состояния двухкомпонентного сплава с ограниченной растворимостью одного компонента и нерастворимостью другого

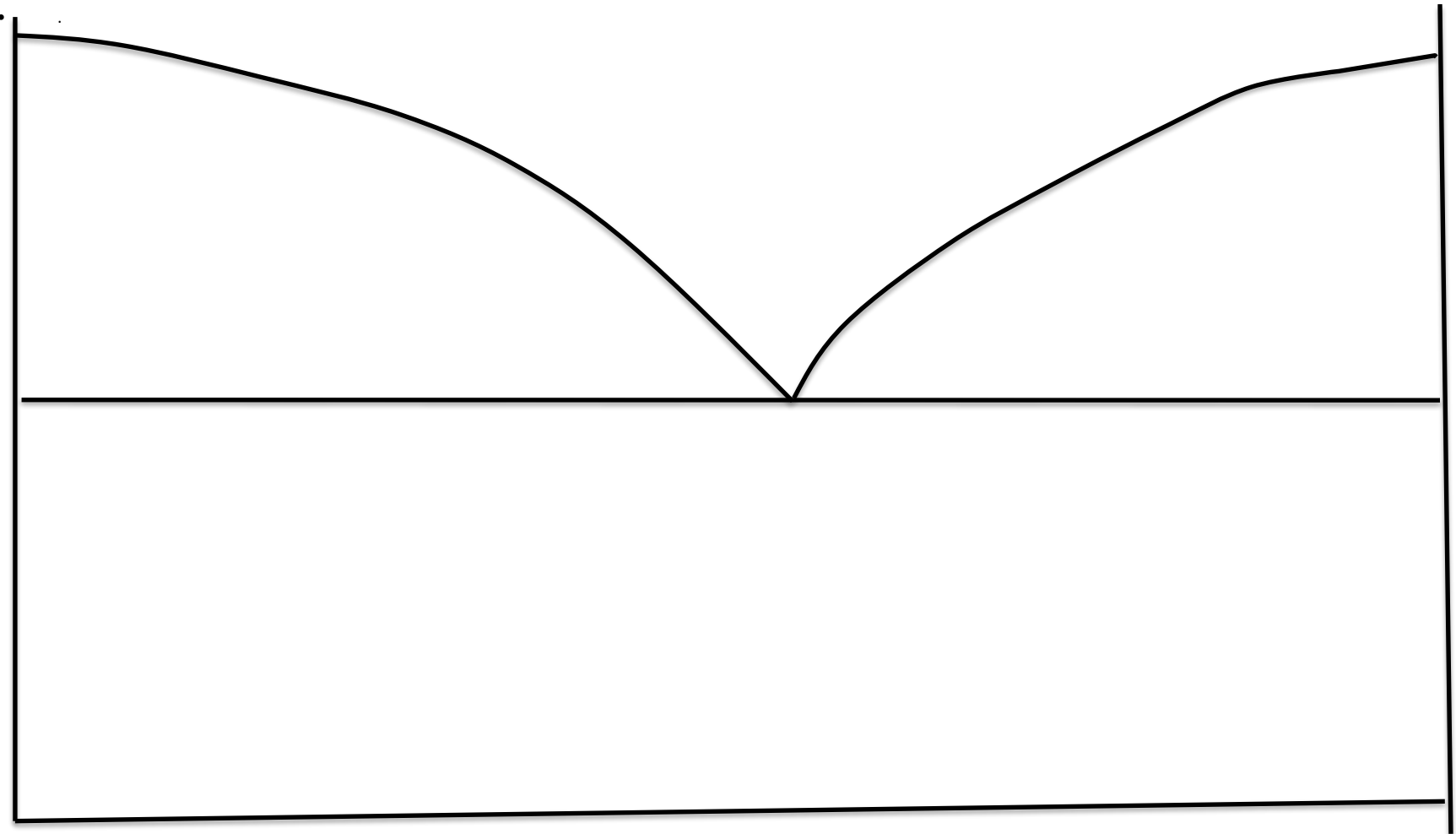






ВЯТСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

# Диаграмма состояния двухкомпонентного сплава с не растворимостью компонентов друг в друге



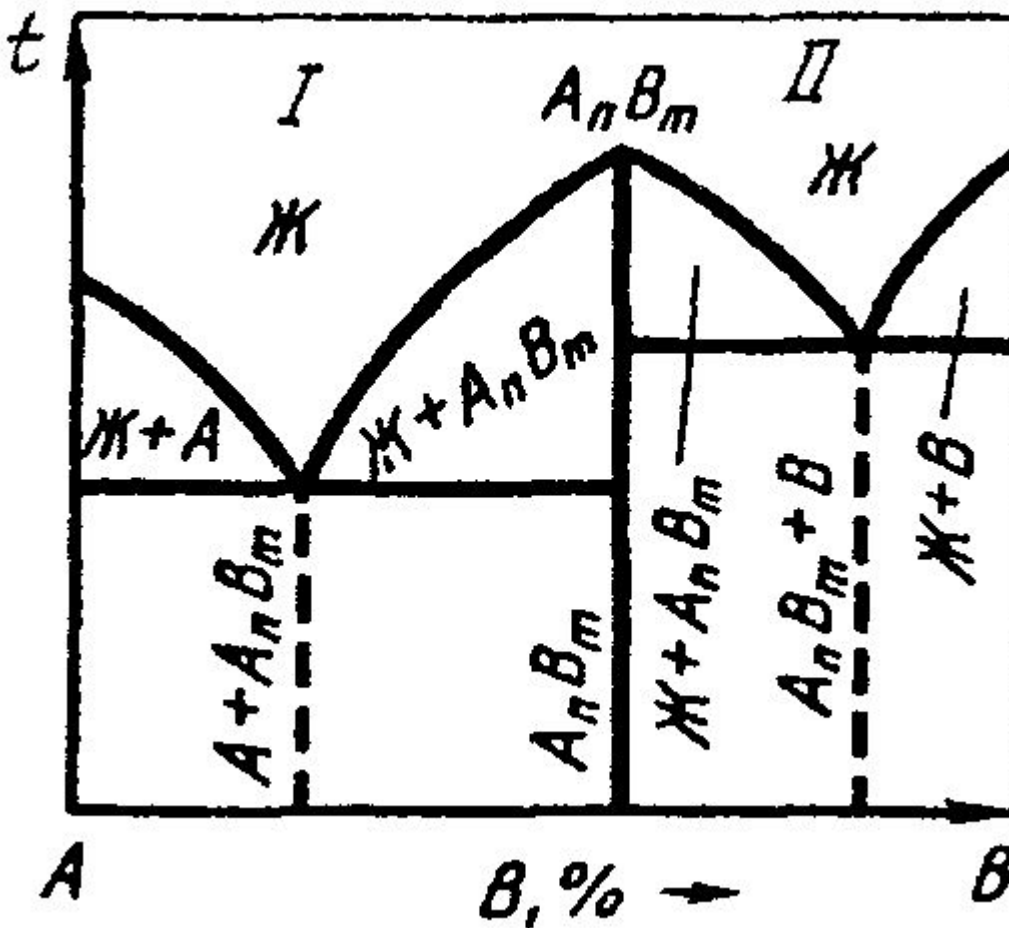


ВЯТСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

## Диаграмма состояния двух компонентного сплава устойчивым химическим соединением.

Компоненты сплава в друг друга не растворяются

Диаграмма состояния  
сплава еще более  
усложняется, если  
компоненты сплава могут  
образовывать  
химическое соединение.







ВЯТСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

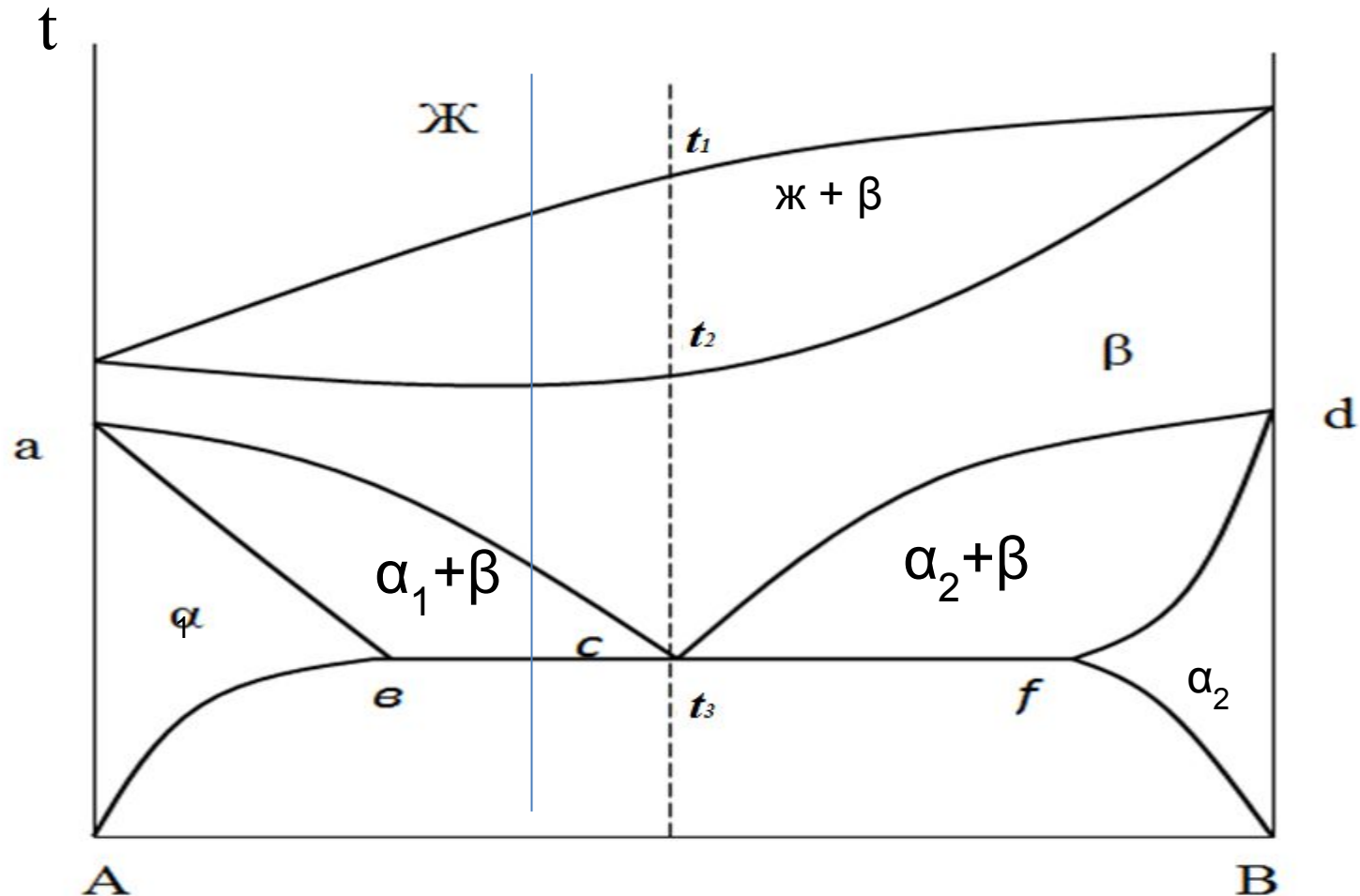


Диаграмма состояния двухкомпонентного сплава с неограниченной растворимостью и полиморфным превращением обоих компонентов



ВЯТСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

## Понятие эвтектоида

- Таким образом при полиморфных переходах также может образоваться смесь двух твердых фаз, подобная эвтектике.
- Только **эвтектика** получается при кристаллизации из жидкой фазы.
- А механическую смесь двух твердых растворов, получающуюся при полиморфном переходе называют **ЭВТЕКТОИДОМ**.
- Эвтектоид получается при полиморфном переходе из твердой фазы.



ВЯТСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

## Диаграммы состояния трехкомпонентных сплавов

Диаграмму состояния трехкомпонентного сплава на плоскости нарисовать невозможно, т.к. нужно использовать уже три координаты.

Такие диаграммы трехкомпонентных систем вы проходили на физхимии, но не применительно к металлическим сплавам, а применительно к солям и оксидам.