

Составители:

Куроедов Юрий Борисович  
Агафонова Екатерина Васильевна

НОВОСИБИРСКИЙ ГАУ  
ИНЖЕНЕРНЫЙ ИНСТИТУТ

## ДИАГРАММЫ СОСТОЯНИЯ ДВОЙНЫХ СПЛАВОВ

Методические указания  
к выполнению лабораторной работы по дисциплине  
«Материаловедение и технология конструкционных материалов»

Редактор  
Компьютерная верстка

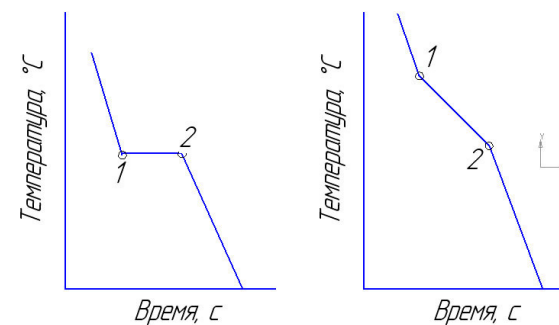
Н.К. Крупина  
Е.В. Агафонова

Подписано в печать  
Формат 60x84.  $\frac{1}{16}$  Объем \_\_\_уч.- изд. л., \_\_\_ усл. печ.л.  
Тираж 100 экз. Бумага офсетная. Изд. № \_\_\_ Заказ № \_\_\_

Отпечатано в издательстве НГАУ  
630039, Новосибирск, ул. Добролюбова, 160, офис 106.  
Тел. факс (383) 267-09-10. E-mail: 2134539@mail.ru

## Диаграммы состояния двойных сплавов

Методические указания к выполнению  
лабораторной работы по дисциплине  
«Материаловедение и технология конструкционных материалов»



Новосибирск 2016

**Диаграммы состояния двойных сплавов:** методические указания к лабораторной работе / Новосиб. гос. аграр. ун-т. Инженер. ин-т; сост: Ю.Б. Куроедов, Е.В. Агафонова. – Новосибирск, 2016. – 24с.

В методических указаниях приведены теоретические основы теории сплавов, виды диаграмм состояния двойных сплавов, зависимости между свойствами сплавов и диаграммами, а также порядок выполнения лабораторной работы и рисунки различных диаграмм состояния двойных сплавов.

Предназначены для студентов Инженерного Института, обучающихся по направлениям подготовки Агроинженерия, Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов, Технология транспортных процессов, Профессиональное обучение (по отраслям), Техносферная безопасность, Стандартизация и метрология, Строительство.

Утверждены и рекомендованы к изданию методическим советом Инженерного института НГАУ (протокол №7 от 1 марта 2016г.).

© Новосибирский государственный аграрный университет, 2016  
© Инженерный институт, 2016

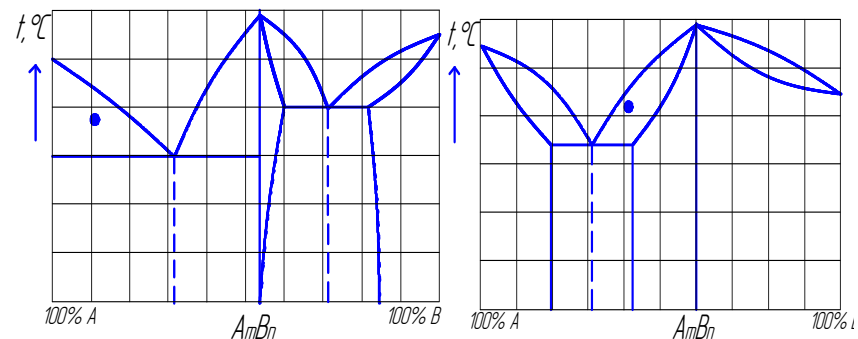


Рис. 13

Рис. 14.

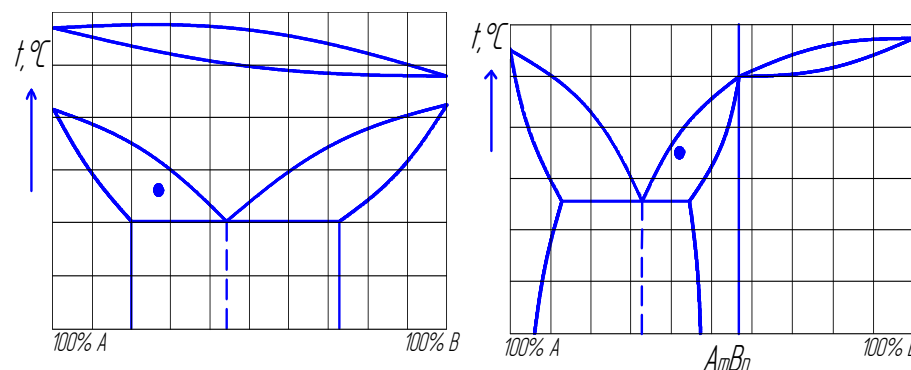


Рис. 15

Рис. 16.

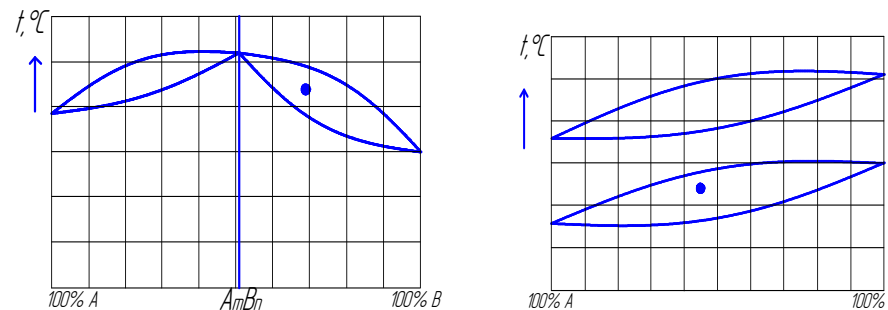


Рис. 17

Рис. 18.

## ВВЕДЕНИЕ

Цель лабораторной работы – изучение методики построения диаграмм состояния сплавов и знакомство с методами их расшифровки.

Диаграмма состояния позволяет установить структуру (строение) сплавов при данной температуре; температуру начала и конца кристаллизации; превращения, происходящие в сплавах при нагревании и охлаждении, а также назначать режимы термической обработки, температурные интервалы литья и обработки давлением.

В процессе изучения, методики построения диаграмм состояния сплавов, формируется профессиональная компетенция:

- способность обоснованно выбирать материал и назначать его обработку для получения свойств, обеспечивающих высокую надежность деталей.

## 1. ОСНОВЫ ТЕОРИИ СПЛАВОВ

### 1.1. Основные сведения о сплавах

Чистые металлы не обеспечивают требуемых механических и технологических свойств изделий, поэтому в технике применяют сплавы.

*Металлический сплав* – вещество, состоящее из двух или более компонентов, обладающее металлическими свойствами.

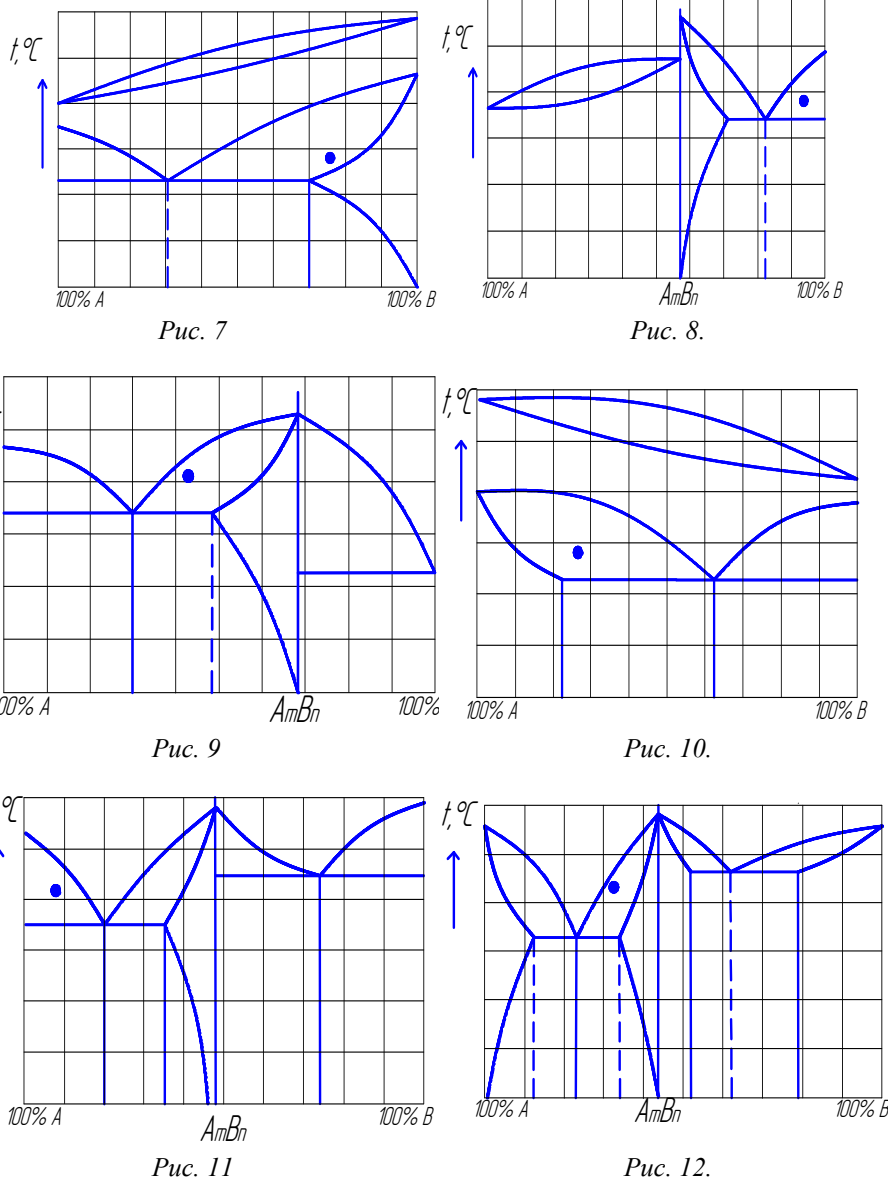
*Компонентами* называют химические элементы или их соединения в составе сплава. В качестве компонентов сплава могут присутствовать металлы (железо,  $Fe$ ), неметаллы (углерод,  $C$ ) или химические соединения (цементит,  $Fe_3C$ ).

Сплавы получают:

- взаимодействием компонентов в жидком состоянии (сплавлением);
- слпанием (диффузией в твердом состоянии);
- осаждением нескольких компонентов на катоде (электролиз растворов).

По числу компонентов, находящихся в сплаве, их делят на двойные, тройные и т.д. Если в системе имеется один химически чистый элемент – это однокомпонентная система. Однокомпонентной системой будет химическое соединение, не разлагающееся на составные части в интервале температур изучаемой системы. Сплавы могут быть гомогенными (однофазными) гетерогенными (многофазными).

*Фазой* называют однородную часть одинакового агрегатного состояния и состава, отделенную от других частей системы поверхностью



раздела, переход через которую приводит к изменению химического состава или структуры вещества.

Вещества, входящие в состав сплава, при затвердевании могут находиться в виде отдельных частиц, зерен обоих компонентов (механическая смесь), в виде химических соединений или взаимно растворяющихся друг в друге компонентов (твердый раствор).

*Механическая смесь* двух компонентов А и В образуются тогда, когда они не способны к взаимному растворению в твердом состоянии и не вступают в химическую реакцию с образованием соединений. Такие сплавы состоят из смеси кристаллов веществ, сохраняющих свои кристаллические решетки (рис.1).

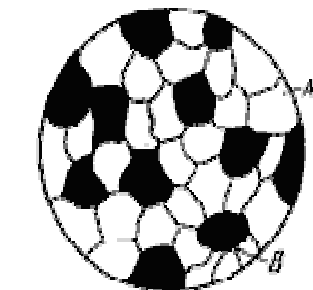


Рис.1. Схема микроструктуры механической смеси

Они имеют кристаллическую решетку, отличную от кристаллических решеток компонентов, поэтому обладают другими механическими, физическими и химическими свойствами (рис.2)

Свойства сплава определяются соотношением компонентов, входящих в его состав.

Сплавы типа *химического соединения* образуются при взаимодействии компонентов, входящих в состав сплава, причем содержание компонентов строго определенным.

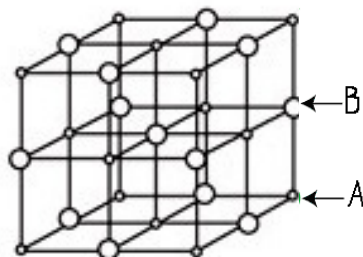


Рис.2. Кристаллическая решетка химического соединения

Сплавы типа *твердых растворов* бывают трех видов:

- твердые растворы замещения,
- твердые растворы внедрения
- твердые растворы вычитания.

При образовании твердого раствора сохраняется решетка одного из элементов, который называется *растворителем*. Атомы растворенного вещества искажают и изменяют средние размеры элементарной ячейки растворителя. В твердом растворе, как и у чистых металлов, присутствует только один тип решетки. Таким образом, твердый раствор является од-

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### Схемы к выполнению лабораторной работы

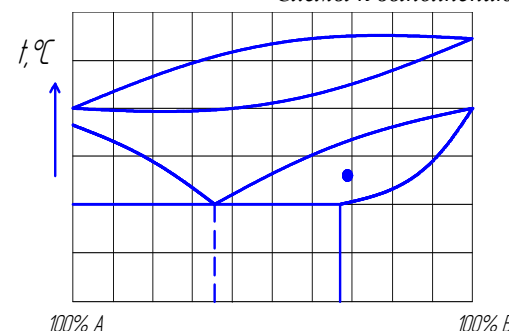


Рис. 1

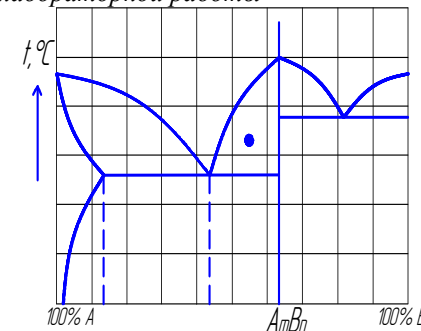


Рис. 2.

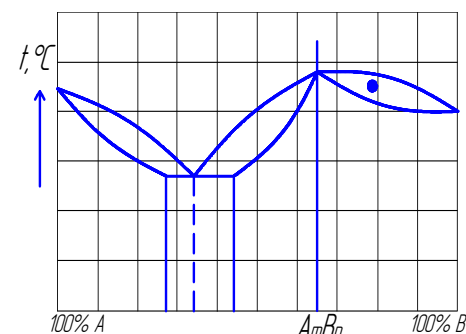


Рис. 3

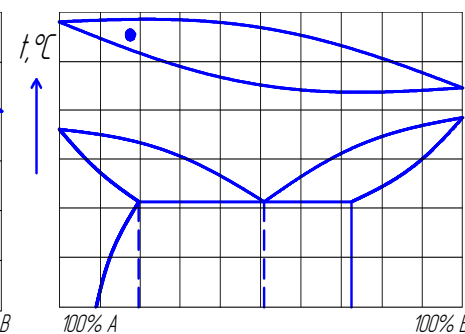


Рис. 4.

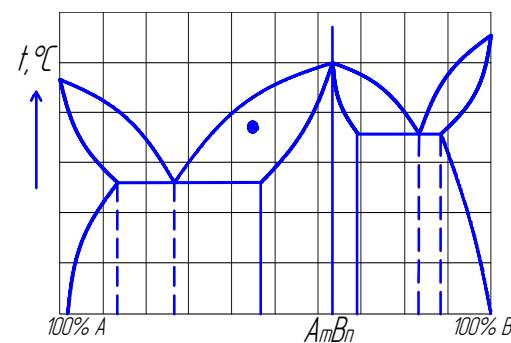


Рис. 5

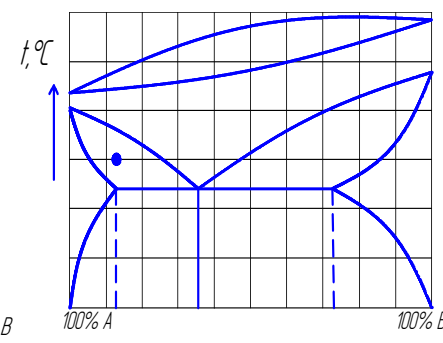


Рис. 6.

2. *Материаловедение и технология металлов* [Электронный ресурс]: Учебник / Г.П. Фетисов, Ф.А. Гарифулин. - М.: НИЦ ИНФРА-М; Мн.: Нов. знание, 2014. - 397 с. [ЭБС ИНФРА-М].

3. *Материалы и их технологии. В 2 ч. Ч. 1.* [Электронный ресурс]: Учебник / В.А. Горохов, Н.В. Беляков, А.Г. Схиртладзе; Под ред. В.А. Горохова. - М.: НИЦ ИНФРА-М; Мн.: Нов. знание, 2014. - 589 с. [ЭБС ИНФРА-М]

4. *Галимов Э.Р.* Материаловедение для транспортного машиностроения [Электронный ресурс]: учебное пособие / Э.Р. Галимов, Л.В. Тарасенко, М.В. Унчикова [и др.]. – Электрон. дан. – СПб.: Лань, 2013. – 443 с. [ЭБС Лань]

5. *Алексеев Г.В.* Виртуальный лабораторный практикум по курсу «Материаловедение»: учебное пособие / Г.В. Алексеев, И.И. Бриденко, С.А. Вологжанина. – СПб. : Лань, 2013. – 208 с.

6. *Адашкин А.М.* Материаловедение (металлообработка): учеб. для нач. проф. образования / А.М. Адашкин, В.М. Зуев. – М.: ИРПО, ПрофОбрИздат, 2001. – 240 с.

7. *Материаловедение и технология конструкционных материалов.* Под редакцией В.С. Чередниченко. М.: Омега – Л. 2006 – 752с.

8. *Оськин В.А.* Материаловедение. Технология конструкционных материалов/ В.А. Оськин и др. Кн. 1 – М.: КолосС, 2008 – 447с.4.

9. *Ржевская С.В.* Материаловедение: учеб. для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во Моск. гос. гор. ун-та, 2003. – 456 с.

10. *Дальский А.М.* технология конструкционных материалов./А.М. Дальский и др.-М.: Машиностроение; 2005. - 592с.

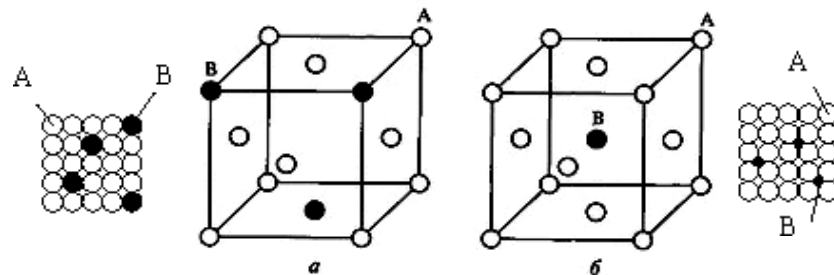
## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. ОСНОВЫ ТЕОРИИ СПЛАВОВ.....	3
1.1. Основы введения о сплавах.....	3
1.2. Диаграммы состояния двухкомпонентных систем.....	6
1.3. Правило фаз (правило Гиббса).....	17
1.4. Правило отрезков (правило рычага).....	20
1.5. Связь между свойствами сплава и диаграммой состояния.....	21
2. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ.....	22
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	23
ПРИЛОЖЕНИЕ .....	24

нофазным, состоит из одного вида кристаллов и имеет одну кристаллическую решетку.

*Твердые растворы замещения* образуются в тех случаях, когда атом растворяемого (В) вещества замещают в кристаллической решетке атомы растворителя (А) (рис. 3 а).

Рис.3. Твердые растворы; а) замещения; б) внедрения



Это возможно, если компоненты имеют близкую температуру плавления, одинаковую решетку и размеры их атомов мало отличаются друг от друга (не более 15%). Размеры атомов растворяемого вещества влияют на параметры решетки, увеличивая её, если диаметр атома растворяемого вещества больше диаметра растворителя, или уменьшая их, если диаметр меньше. Атомы растворяемого вещества могут занимать в кристаллической решетке растворителя строго определенное положение (упорядоченные твердые растворы) или располагаться в произвольном порядке (неупорядоченные твердые растворы). Твердые растворы замещения могут быть ограниченными и неограниченными. При неограниченной растворимости любое количество атомов А может быть заменено атомами В. Следовательно, если увеличивается концентрация атомов В, то большее их число будет находиться в узлах решетки вместо атомов А до тех пор, пока все атомы А не будут замещены атомами В. Таким образом совершается плавный переход от компонента А к компоненту В.

*Образование твердых растворов внедрения* (рис. 3 б) происходит при растворении атомов растворяемого элемента (В) в кристаллической решетке растворителя (А), т.е. когда атомы растворенного элемента внедряются в решетку растворителя в промежутки между его атомами. Атомы растворяемого элемента по размерам невелики, отношение диаметров атома растворяемого элемента и атома растворителя меньше 0,59. Чаще твердые растворы внедрения образуются с неметаллами, при этом параметры кристаллической решетки увеличиваются.

Твердые растворы вычитания образуются только в сплавах, содержащих химические соединения, когда избыточные атомы одного из компонентов занимают строго определенное положение в кристаллической решетке, а места, которые должны быть заняты атомами другого компонента, остаются частично свободными. Твердые растворы вычитания чаще встречаются в полупроводниковых материалах.

Твердые растворы принято обозначать буквами греческого алфавита  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  и т.д.

## 1.2. Диаграммы состояния двухкомпонентных систем

Переход из жидкого состояния в твердое происходит у металлов при определенной температуре и сопровождается резким изменением свойств.

Температурой, при которой в металле или сплаве происходит то или иное превращение (переход одной кристаллической решетки в другую, переход из твердого состояния в жидкое), называется *циклической температурой* или *критической точкой*.

Наблюдая за температурой металла или сплава в процессе его охлаждения или нагрева, можно построить график в координатах температура – время. На графике нарушение монотонности хода кривой. Точки прогиба, спроектированные на ось температур, дают значение критических точек.

Отклонение хода кривой в критических точках объясняется качественным изменением вещества, сопровождающимся тепловыми эффектами – поглощением или выделением тепла в момент превращения. Во время плавления кристаллического тела поглощается скрытая теплота плавления, а во время затвердевания жидкости скрытая теплота кристаллизации выделяется.

На кривой охлаждения чистого металла, построенной в координатах температура – время, критическая точка выражается в виде горизонтальной площадки. Чистый металл затвердевает при постоянной температуре (рис.4 а).

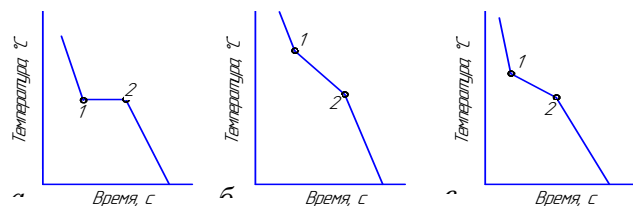


Рис.4. Кривые охлаждения чистого металла (а) и сплавов (б и в)

тектические. Они легче обрабатываются резанием. Сплавы, состоящие из однофазного твердого раствора, легко деформируются в горячем и холодном состоянии.

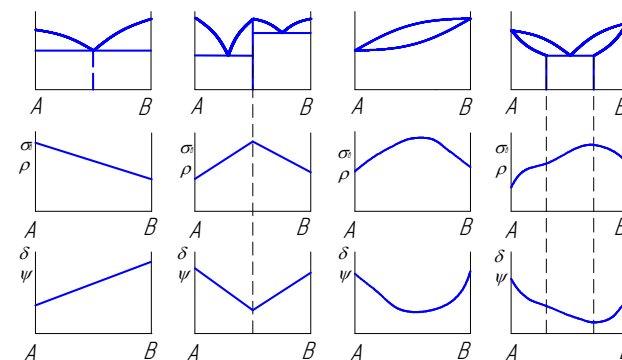


Рис.14. Зависимость между диаграммами состояния и свойствами сплавов

Диаграммы состояния позволяют выбрать сплав для конкретных деталей и назначить вид обработки для получения необходимой структуры и свойств сплава.

## 2. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

1. Вычертить заданную диаграмму состояния (вариант задания выбирается в соответствии с вариантом приложения 1)
2. В каждой области диаграммы указать состав данной системы в состоянии равновесия.
3. Дать характеристику состояния заданного сплава  $k$  при температуре, указанной на диаграмме:
  - а) построить кривую охлаждения сплава с указанием всех превращений, протекающих в сплавах;
  - б) определить химический состав сплава;
  - в) определить химический состав фаз;
  - г) определить количество фаз.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Материаловедение [Электронный ресурс]: Учебное пособие/Давыдова И. С., Максина Е. Л., 2-е изд. - М.: ИЦ РИОР, НИЦ ИНФРА-М, 2016. - 228 с. [ЭБС ИНФРА-М]

Чтобы определить количественное соотношение фаз, через заданную точку проводят горизонтальную линию (коноду). Отрезки линии между заданной точкой и точками, определяющими составы фаз, обратно пропорциональны количествам этих фаз.

1. Количество твердой фазы равно отношению длины плеча, прилегающего к жидкой фазе, к длине всего рычага:

$$\text{твердая фаза (В)} \quad Q_A = \frac{ak}{a\hat{a}} \cdot 100\%.$$

2. Количество жидкой фазы равно отношению длины плеча, прилегающего к твердой фазе, к длине всего рычага:

$$\text{жидкая фаза (Ж)} \quad Q_{\hat{A}} = \frac{\hat{a}k}{a\hat{a}} \cdot 100\%.$$

Определим количество фаз в точке  $k$  (рис. 13):

Отрезок  $a\hat{v}$  равен массе всего сплава (100 %):

$ak$ ,  $\hat{a}k$ ,  $vk$  – длины отрезков, определяемых по оси концентраций:

$$ak = 80 - 72 = 8; \quad \hat{a}k = 100 - 80 = 20; \quad a\hat{v} = 8 + 20 = 28.$$

$$\text{Твердая фаза (В)} \quad Q_A = \frac{ak}{a\hat{a}} \cdot 100\% = \frac{8}{28} \cdot 100\% = 28,6\%.$$

$$\text{Жидкая фаза (Ж)} \quad Q_{\hat{A}} = \frac{\hat{a}k}{a\hat{a}} \cdot 100\% = \frac{20}{28} \cdot 100\% = 71,4\%.$$

### 1.5. Связь между свойствами сплава и диаграммой состояния

Между свойствами сплава и диаграммами состояния существует определенная связь (рис. 14). При образовании механических смесей свойства сплавов (твердость, прочность, электросопротивление) изменяются по линейному закону. Диаграмма состояния сплавов с химическим соединением имеют характерный перелом на кривой свойств. При образовании твердых растворов свойства меняются по криволинейному закону с максимумом и минимумом.

Технологические свойства сплава зависят от вида диаграммы состояния: с увеличением расстояния между линиями ликвидус и солидус увеличивается продолжительность кристаллизации, склонность сплава к ликвации (неоднородность по химическому составу), образование трещин в отливках, пористость также возрастает. Лучшие литейные сплавы – эв-

В отличие от чистых металлов, сплавы затвердевают в интервале температур, при этом на изгибе охлаждения критические точки могут быть выражены как в виде точек изгиба, так и в виде горизонтальных площадок (рис. 4, б и в).

Сплавы эвтектические и химические соединения затвердевают при постоянной температуре и имеют одну критическую точку в виде горизонтальной площадки. Некоторые чистые металлы, обладающие полиморфными (аллотропными) превращениями и ряд сплавов претерпевают превращения в твердом состоянии. В этом случае на кривых охлаждения появляются дополнительные критические точки.

Сплавление элементов в различных пропорциях дает большие возможности для получения сплавов с разнообразными заданными свойствами. Данные анализа позволяют получать диаграммы состояния сплавов.

#### 1.2.1. Правила построения диаграмм

Диаграмма состояния определяет изменение состояния сплава в зависимости от температуры и концентрации компонентов в нем. Давление считается постоянным для всех рассматриваемых случаев. Диаграмму состояния строят в двух координатах: по оси ординат откладывается температура, по оси абсцисс – концентрация компонентов (рис. 5). Для построения диаграмм изготавливают серию сплавов различного состава, например, 50% А и 20% В; 60% А и 40% В; 40% А и 60% В; 20% А и 80% В.

Сначала определяются критические точки для чистых компонентов (100% А и 100% В), далее критические точки для сплавов различной концентрации. На рис. 5 показано построение диаграммы состояния сплавов из компонентов А и В путем перенесения критических точек с кривых охлаждения конкретных сплавов на график в координатах температура – концентрация сплава.

Соединим линиями критические точки, при которых начинается (верхние точки) и заканчивается (нижние точки) процесс кристаллизации сплавов. Полученные линии образуют диаграмму состояния сплавов компонентов А и В при различных температурах.

На диаграмме верхняя линия, как геометрическое место критических точек, при которых начинается процесс кристаллизации, называется линией *ликвидус*. Выше линии ликвидус сплавы находятся в жидком состоянии. Нижняя линия, как геометрическое место критических точек, при которых заканчивается процесс кристаллизации, называется линией *солидус*. Ниже линии солидус сплавы находятся в твердом состоянии.

Между этими линиями часть сплавов находится в жидком состоянии, а часть сплавов – в твердом состоянии.

Диаграммы состояния бывают четырех типов:

1 тип – компоненты сплава в твердом состоянии полностью не растворимы друг в друге – образуют механическую смесь;

2 тип – компоненты сплава неограниченно растворимы друг в друге – образуют твердый раствор;

3 тип – компоненты сплава ограничено растворимы друг в друге – образуют твердый раствор и механическую смесь;

4 тип – компоненты сплава образуют химическое соединение.

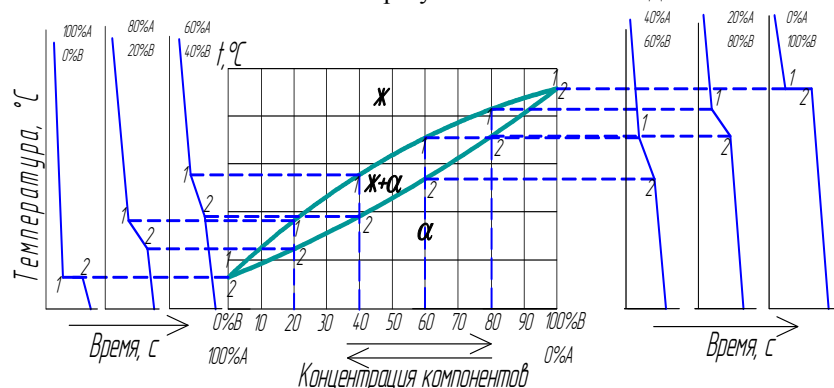


Рис.5. Методика построения диаграмм состояния

### 1.2.2. Диаграмма состояния сплавов, образующих в твердом состоянии механическую смесь (1 тип)

Общий вид диаграмм показан на рис.6, линия CED – ликвидус, линия FEG – солидус.

Для определения структуры сплавов в твердом состоянии, т.е. для расшифровки диаграмм состояний рассмотрим процессы кристаллизации трех сплавов: сплав I (эвтектический), сплав II (доэвтектический), сплав III (заэвтектический).

Кристаллизация эвтектического сплава I.

При температуре 1 сплав в жидком состоянии. При постоянной температуре 2 (точка E) сплав затвердевает. Горизонтальная линия, проведенная через точку 2, указывает что кристаллами, появляющимися при этой температуре, будут кристаллические элементы А и В. Они образуют механическую смесь, называемую – *эвтектикой*.

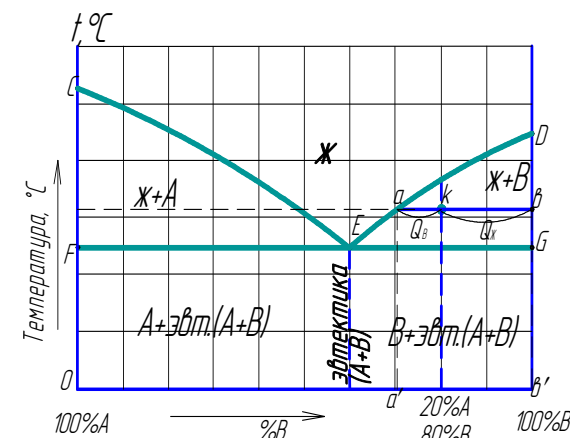
В точке 1 начало кристаллизации, в точке 2 конец кристаллизации.

Число степеней свободы системы  $C$  в точке 1':

$C_1 = 2 - 2 + 1 = 1$ ,  $C \neq 0$  сплав кристаллизуется в интервале температур (на кривой охлаждения перегиб).

Число степеней свободы системы  $C$  в точке 2':

$C_2 = 2 - 2 + 1 = 1$ ,  $C \neq 0$ , заканчивается процесс кристаллизации и далее равномерно сплав охладится до комнатной температуры (на кривой охлаждения перегиб).



ис.13. Применение правила отрезков

### 1.4. Правило отрезков (правило рычага)

По диаграмме состояния можно определить не только число фаз конкретного сплава при данной температуре, но и относительное количество каждой фазы.

Для определения количества фаз сплавов А – В, содержащего 80% компонента В, при заданной температуре, необходимо провести перпендикуляр из точки  $k$  на ось концентрации, и коноду (горизонтальную линию), соответствующую заданной температуре (рис. 13).

Горизонтальная линия пересечет линии диаграммы, ограничивающие данную область (точки  $a$  и  $b$ ). Точка  $a'$  соответствует концентрации компонентов в жидкой фазе. Точка  $b'$  соответствует концентрации твердой фазы.

Правило отрезков:



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

$I$  – внешний переменный фактор (возможность изменения температуры).

Если  $C = 0$ , то идет превращение при постоянной температуре (на кривой охлаждения наблюдается площадка).

Если  $C \neq 0$ , то охлаждение пропорционально изменяющемуся времени (наблюдается изменение на кривой охлаждения - перегиб)

**Правило концентраций.** Для определения концентрации компонентов в фазах, через данную точку, характеризующую состояние сплава, проводят горизонтальную линию (*коноду*) до пересечения с линиями, ограничивающими данную область. Проекция точек пересечения на ось концентрации показывают составы фаз.

**Проведем анализ диаграммы (рис. 12).**

1. Количество компонентов:  $K = 2$  (компоненты А и В).

2. Число фаз:  $f = 2$  (жидкая фаза и кристаллы твердого раствора  $\alpha$ )

**Определим состав фаз в точке  $k$  (рис. 12, а):**

Для его определения через точку  $k$  проводят коноду (горизонтальную линию) до пересечения с ближайшими линиями диаграммы: ликвидус и солидус.

Состав жидкой фазы определяется проекцией точки пересечения горизонтали с линией ликвидус  $a$  на ось концентрации.

Состав твердой фазы определяется проекцией точки пересечения горизонтали с линией солидус  $b$  (или осью компонента) на ось концентрации. Состав жидкой фазы изменяется по линии ликвидуса, а состав твердой фазы – по линии солидуса. С понижением температуры состав фаз изменяется в сторону уменьшения содержания компонента В.

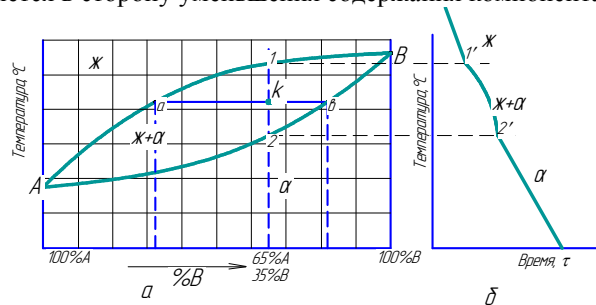


Рис. 12. Применение правила фаз

Построим кривую охлаждения сплава с содержанием 35% компонента В (рис. 12, б):

**Эвтектика** – механическая смесь двух или более компонентов, одновременно кристаллизующихся из жидкого сплава. Сплавы, расположенные слева от эвтектического сплава, называют доэвтектическими, справа – заэвтектическими.

Процесс кристаллизации доэвтектического сплава II начинается при температуре 2. Проведя горизонтальную линию через точку 2 до пересечения с линией CF, увидели появление кристаллов чистого компонента А (точка 2'). В области CEF содержится кристаллы А + жидкий раствор  $\angle$ .

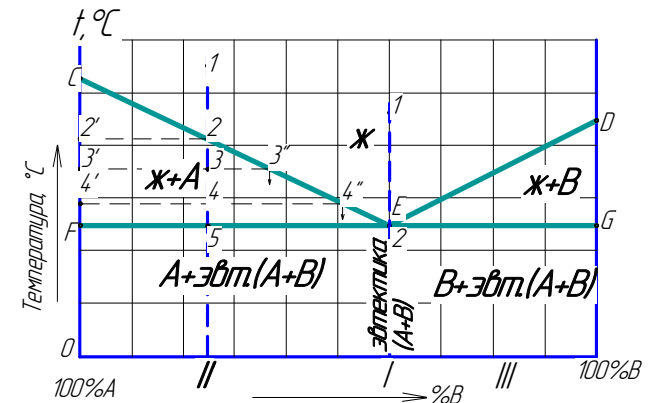


Рис. 6. Диаграмма состояния сплавов образующих в твердом состоянии механическую смесь

При дальнейшем охлаждении будет увеличиваться кристаллов компонента А. При температурах точек 3 и 4 продолжают выпадать кристаллы компонента А (точки 3' и 4'). Остатки жидкого сплава принимают концентрацию точек 3'' и 4''.

Таким образом, при охлаждении доэвтектического сплава II выделяются кристаллы элемента А, а состав оставшегося жидкого сплава изменяется на кривой 2 – Е. Поэтому при температуре точки 5, когда процесс кристаллизации заканчивается, оставшаяся жидкость, приняв эвтектическую концентрацию затвердевает в эвтектику кристаллов А и В. Ниже линии FE сплав в твердом состоянии имеет структуру кристаллов А и эвтектику (А+В).

Примерами систем, образующих в твердом состоянии механические смеси, являются Pb – Sb, Ag – Pb, Sn – Zn и др.

### 1.2.3. Диаграмма состояний сплавов, образующих твердые растворы с неограниченной растворимостью (II тип)

Сплавы, образующие в твердом состоянии растворы с неограниченной растворимостью, представлены диаграммой состояний на рис.7.

Проследим за поведением сплава К концентрации 50%А + 50%B при медленном охлаждении. При температуре 1 сплав находится в жидком состоянии, при температуре 2 начинается процесс кристаллизации.

Для определения состава кристаллов, выделяющихся при температуре точки 2 проводим через нее горизонтальную линию до пересечения с линией солидус. В точке 2' выпадает твердый раствор  $\alpha$ . Проекция точки 2' на ось концентраций, показывает состав выпавших кристаллов.

Первые выпавшие кристаллы отсекаются от среднего химического состава сплава. Они более богаты тугоплавким компонентом В. При дальнейшем понижении температуры увеличивается количество твердого раствора  $\alpha$  и уменьшается количество жидкого сплава, меняющий их состав.

В процессе затвердевания сплава состав твердой фазы определяется точкой пересечения изотермы с линией солидус, а состав жидкой фазы – точкой пересечения изотермы с линией ликвидус. Это правило только для областей диаграмм, где в сплаве несколько фаз.

При температуре точки 3 выпадают кристаллы твердого раствора  $\alpha$ , концентрация которых определяется точкой 3'. Оставшийся жидкий сплав имеет состав определяющийся точкой 3''. Аналогично точка 4' определяет состав кристаллов твердого раствора  $\alpha$  при температуре точки 4, а точка 4'' состав оставшегося жидкого сплава. Таким образом, состав жидкой фазы изменяется по линии ликвидус (от точки 2 до точки 5''), а твердой фазы – по линии солидус (от точки 2'' до точки 5). При температуре точки 5 кристаллизация заканчивается.

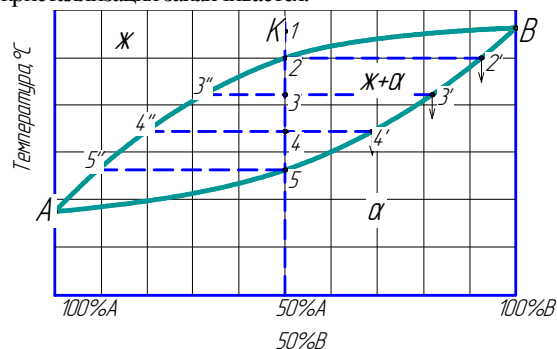


Рис.7. Диаграмма состояния сплавов образующих в твердом состоянии растворы с неограниченной растворимостью

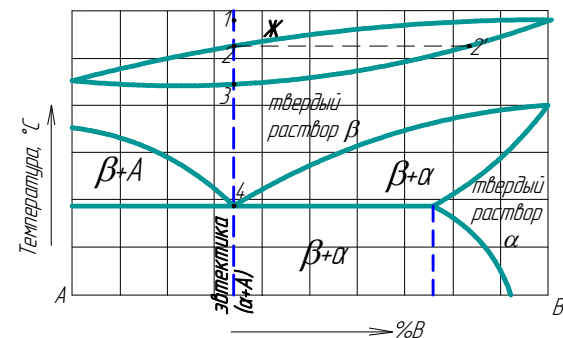


Рис.11. Диаграмма состояний сплавов, испытывающих полиморфные превращения

Большинство сплавов, претерпевающих полиморфное превращение, могут быть подвергнуты термической обработке (отжигу, закалке, отпуску). Превращения в твердом состоянии наблюдаются во всех сплавах, если хотя бы один из компонентов обладает полиморфизмом (способность изменять кристаллическую решетку с изменением температуры), это компоненты: Fe, Co, Mn, Ti и др.

### 1.3. Правило фаз (правило Гиббса)

*Правило фаз Гиббса* устанавливает количественную зависимость между числом степеней свободы, числом компонентов и фаз условия равновесия.

Правило фаз выражается уравнением:

$$C = K - \Phi + n,$$

где  $C$  – число степеней свободы системы – это число внутренних и внешних факторов (температура, давление, концентрация), которые можно изменять без изменения количества фаз в системе. Если вариантность  $C = 1$  (моновариантная система), то возможно изменение одного из факторов в некоторых пределах, без изменения числа фаз. Если вариантность  $C = 0$  (нонвариантная система), то внешние факторы изменять нельзя без изменения числа фаз в системе

$K$  – число компонентов;

 $\Phi$  – число фаз

$n$  – внешние переменные факторы ( $t, p$ ). Если давление  $p = const$  при превращении в сплавах, то:

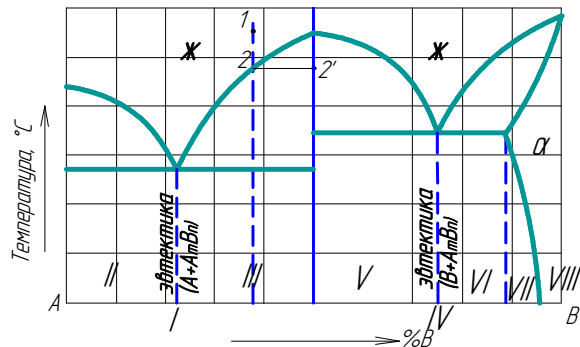


Рис.10. Диаграмма состояний сплавов, образующих в твердом состоянии химическое соединение

#### 1.2.6. Диаграмма состояний сплавов, испытывающих полиморфные превращения

Если хотя бы один из компонентов, образующих сплав, претерпевает аллотропические (полиморфные) превращения, то в сплавах наблюдается вторичная кристаллизация (перекристаллизация в твердом состоянии). Процессы кристаллизации в твердом состоянии вследствие аллотропических превращений подчиняются тем же закономерностям, что и процессы кристаллизации при переходе из жидкого состояния в твердое. Вид диаграммы состояний зависит от соединений, образующихся между аллотропическими формами обоих компонентов.

Диаграмма, представленная на рис.11, показывает, что высокотемпературные модификации компонентов А и В неограниченно растворимы друг в друге и образуют неограниченный твердый раствор β.

Низкотемпературные модификации А и В образуют ограниченный твердый раствор α на основе решетки элемента В с растворимостью, уменьшающейся с понижением температуры.

Рассмотрим процесс кристаллизации сплава I. Сплав при температуре 3 затвердевает в неограниченный твердый раствор β, который при постоянной температуре 4 перекристаллизуется в химическую смесь из кристаллов чистого элемента А и твердого раствора α.

Механическая смесь, образовавшаяся при кристаллизации в твердом состоянии, называется *эвтектоидом*. Таким образом, в структуре эвтектоидного сплава I механическая смесь, состоит из кристаллов компонентов А и твердого раствора α.

После медленного охлаждения сплав К (как и все другие сплавы любой концентрации) будут иметь однородную зернистую структуру, состоящую из кристаллов твердого раствора α. Кристаллы чистых исходных компонентов А и В не могут выделяться в такого рода сплавах.

Микроструктура сплавов после медленного охлаждения похожа на микроструктуру чистых металлов. О растворении одного компонента в другом узнают с помощью химического или рентгеновского анализов.

Неограниченные твердые растворы замещения имеют сплавы: Cu – Ni, Fe – Cr, Co – Ni, Fe – V и др.

#### 1.2.4. Диаграмма состояния сплавов, образующих твердые растворы с ограниченной растворимостью (III тип)

На рис.8 приведена диаграмма состояний сплавов двух компонентов А и В, когда только один компонент В может раствориться в твердом компоненте А, образуя твердый раствор α (α – ограниченный твердый раствор на основе кристаллической решетки компонента А с растворимостью, уменьшающейся с понижением температуры).

Максимальное количество компонента В, которое может раствориться в А при температуре t, определяется отрезком АК. С понижением температуры растворимость уменьшается по линии MN до количества, определяемого отрезком AN. Линия MN определяет предел насыщения решетки А атомами компонента В при различных температурах.

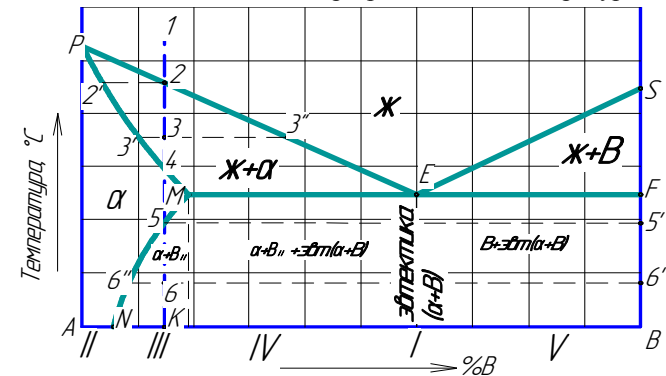


Рис.8. Диаграмма состояний сплавов, образующих в твердом состоянии ограниченный твердый раствор

Рассмотрим процесс кристаллизации для некоторых сплавов, представленных на диаграмме. Эвтектический сплав I кристаллизуется

при постоянной температуре точки Е в механическую смесь (эвтектику), состоящую из кристаллов чистого компонента В и твердого раствора  $\alpha$ .

Подробное исследование кристаллизации показывает, что при температуре точки 1 сплав находится в жидком состоянии. Кристаллизация сплава начинается при температуре точки 2, когда появляются первые кристаллы твердого раствора  $\alpha$ , состав которых определяется точкой 2'.

При дальнейшем понижении температуры будут образовываться кристаллы твердого раствора  $\alpha$ , имеющую различную концентрацию. Она определяется конодой, проведенной через точку 3 (3' – 3'').

Окончательно сплав закристаллизуется при температуре точки 4. Структура сплава однородная зернистая из кристаллов твердого раствора  $\alpha$ .

От точки 4 до точки 5 состав сплава не изменится. При температуре точки 5 твердый раствор достигает максимального насыщения растворителя А растворенным компонентом В. Конода, проведенная через точку 5, показывает начало выделения кристаллов чистого компонента В<sub>II</sub> концентрации точки 5'.

Процесс выделения кристаллов В<sub>II</sub> из твердого раствора  $\alpha$  продолжается до точки N из-за уменьшения растворимости по мере понижения температуры. Концентрация остающегося твердого раствора  $\alpha$  соответствует линии 5–N. При температуре точки 6 точкой 6'.

Следовательно, ниже точки 5 структура сплава состоит из кристаллов твердого раствора  $\alpha$  и чистого компонента В<sub>II</sub>, концентрирующегося по границам зерен твердого раствора.

Кристаллы В, выделившиеся из твердого раствора, называются вторичными кристаллами и обозначаются символом В<sub>II</sub> в отличие от первичных кристаллов В, выделяющихся из жидкого сплава (вторичная кристаллизация, перекристаллизация).

Сплавы, концентрация которых находится левее точки N, вторичной кристаллизации не имеют. Некоторые сплавы позволяют компонентам А и В растворяться друг в друге до определенных концентраций, образуя ограниченные твердые растворы  $\alpha$  и  $\beta$  (рис.9).

Ограниченный твердый раствор  $\alpha$  образуется при растворении компонента В в компоненте А (раствор на основе кристаллической решетки А) с растворимостью, уменьшающейся при понижении температуры.

Ограниченный твердый раствор  $\beta$  образуется на основе кристаллической решетки компонента В. В данном случае растворитель компонента А в решетке компонента В является постоянной и не изменяемой

при понижении температуры. Ограниченную растворимость имеют: Sn в Cu (бронза), Sb в Gr, Cu в Al (дюралюминий), Sn в Sb, Pb в Mg, Zn в Cu (латунь и др.).

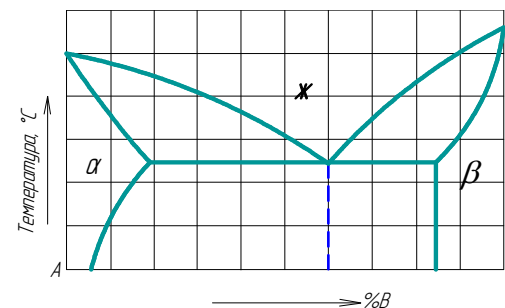


Рис.9. Диаграмма состояния сплавов, образующих в твердом состоянии ограниченные твердые растворы

#### 1.2.5. Диаграмма состояния сплавов, образующих в твердом состоянии химическое соединение (IV тип)

Химическое соединение образуется при строго определенном составе сплава и соотношении атомов, условно выражающихся формулами  $A_mB_n$ .

Химическое соединение имеет свою, отличную от компонентов, составляющих соединение, кристаллическую решетку с упорядоченным расположением в ней атомов компонентов. В связи с этим химическое соединение ведет себя в сплавах как самостоятельный компонент. Общий вид диаграммы представлен на рис.10.

Диаграмму, показанную на рис.10, следует рассматривать как две диаграммы из компонентов А –  $A_mB_n$  и  $A_mB_n$  – В.

В диаграмме А –  $A_mB_n$  эвтектический сплав I имеет структуру состоящую из эвтектики (А –  $A_mB_n$ ), а  $A_mB_n$  – В эвтектический сплав IV – состоит из эвтектики ( $A_mB_n$  – В).

В начале процесса кристаллизации заэвтектического сплава III при температуре 2 появляются кристаллы химического соединения  $A_mB_n$  (точка 2') и т.д.

Примерами сплавов, в которых образуется одно или несколько химических соединений являются Cu – Mg, Sn – Mg, Al – Na и т.д.