

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО  
ОБРАЗОВАНИЯ РФ  
НАБЕРЕЖНОЧЕЛНИНСКИЙ ИНСТИТУТ (ФИЛИАЛ)  
ГОСУДАРСТВЕННОГО АВТОНОМНОГО  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО  
ОБРАЗОВАНИЯ «КАЗАНСКИЙ (ПРИВОЛЖСКИЙ) ФЕДЕРАЛЬНЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»

## **ФАЗОВЫЙ АНАЛИЗ СПЛАВОВ**

*Методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу  
«Материаловедение и технологии материалов»  
«Методы исследования, контроля и испытания материалов»*

Набережные Челны  
2019

**Фазовый анализ сплавов:** Методические указания к выполнению лабораторных работ по курсу «Материаловедение и технологии материалов», «Методы исследования, контроля и испытания материалов» / сост. А.Г. Панов, Г.Ф. Мухаметзянова, И.Ф. Шаехова, С.А. Рыжкова – Набережные Челны: НЧИ (ф) КФУ, 2019 - 15 с.

Методические указания предназначены студентам и слушателям специальности 22.03.1 – «Материаловедение и технологии материалов» для выполнения лабораторной работы по дисциплинам «Материаловедение и технологии материалов», «Методы исследования, контроля и испытания материалов». В работе даны краткое описание назначения, правил построения и чтения двойных диаграмм состояния (фазовых диаграмм), порядка выполнения лабораторной работы и формы отчёта по ней.

Библиогр.: 3 назв. Рис.6. Прил.

Рецензент: к.т.н., доцент, доцент кафедры «Материалы, технологии и качества» НЧИ КФУ Шафигуллин Л.Н.

@ НЧИ (ф) КФУ  
2019 г.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ .....	5
2. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ .....	12
3. ЛИТЕРАТУРА .....	13
4. ЦЕЛИ И СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ .....	13
5. ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ .....	13
ПРИЛОЖЕНИЕ .....	15

## ВВЕДЕНИЕ

Лабораторная работа «Фазовый анализ сплавов» предназначены для закрепления лекционного материала по фазовому строению материалов и приобретения навыков чтения фазовых диаграмм сплавов. Она также предназначена для развития практических навыков работы с прикладными программами на персональных компьютерах.

Работы выполняются в условиях измерительной лаборатории кафедры «Материалы, технологии и качества». К проведению лабораторных работ допускаются студенты, прошедшие инструктаж по охране труда и технике безопасности, а также обучение безопасным методам труда на соответствующем оборудовании, используемом при выполнении работ.

Студенты знакомятся с целью, содержанием и порядком работы по настоящим методическим указаниям, изучают рекомендуемую литературу.

Перед началом работы преподаватель проводит собеседование с каждым студентом и до пускает к работе, если студент показал достаточные знания теоретического материала, цели, порядка выполнения и правил техники безопасности.

По выполненной работе студент составляет индивидуальный отчёт в соответствии с требованиями данных методических указаний.

## 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

### ДИАГРАММЫ СОСТОЯНИЯ КАК БАНК ДАННЫХ ФАЗОВЫХ СОСТАВОВ И ПРЕВРАЩЕНИЙ СПЛАВОВ

В многокомпонентных системах возможны взаимодействия компонентов, в результате которых образуются различные фазы, т.е. однородные структуры, имеющие границу раздела. При определённых установившихся внешних условиях замкнутая система приходит в состояние минимальной внутренней энергии. Это состояние зависит от внешних условий (Т; Р) и характеризуется числом и концентрацией образовавшихся фаз. Закономерность изменения числа фаз в гетерогенной системе определяется правилом фаз. Правило фаз устанавливает зависимость между числом степеней свободы, числом компонентов и числом фаз и выражается уравнением:

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

где С - число степеней свободы системы (или вариантность);

К - число компонентов, образующих систему;

2 - число внешних факторов (Т и Р);

Φ - число фаз, находящихся в равновесии.

Под числом степеней свободы (вариантностью системы) понимают возможность изменения температуры, давления и концентрации без изменения числа фаз, находящихся в равновесии.

При нормальных условиях изменяется только один фактор – температура, при  $P = \text{const}$ , тогда:

$$C = K - \Phi + 1.$$

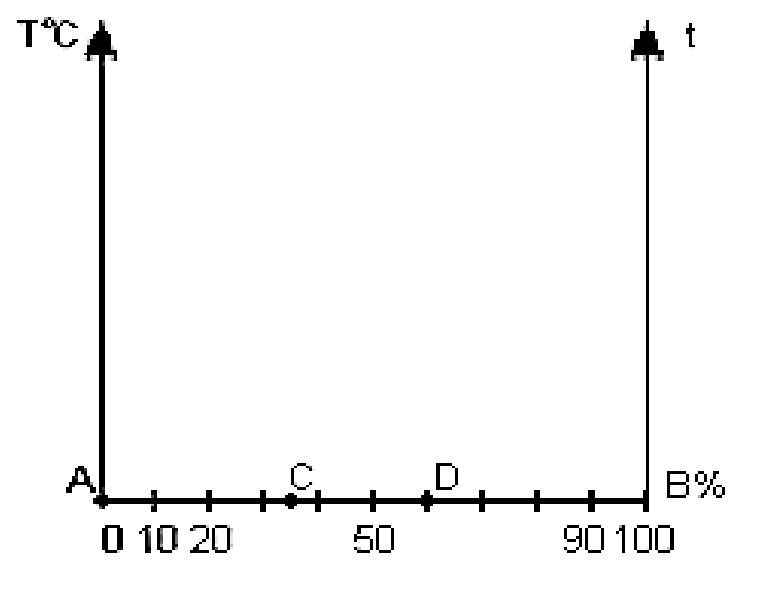
Число степеней свободы не может быть меньше нуля, тогда  $K - \Phi + 1 > 0$ , а  $\Phi < K + 1$ , то есть число фаз в сплаве не может быть больше, чем число компонентов плюс единица. Таким образом, в двойной системе может быть не более трёх фаз.

При  $C = 0$  - существует в равновесии сразу три фазы - имеется инвариантное равновесие (безвариантное). При таком равновесии сплав может существовать только при условии постоянной температуры и определённого состава всех фаз, находящихся в равновесии. То есть превращение начинается и закан-

чивается при постоянной температуре. Если  $C = 1$  или  $2$ , то превращение протекает с течением времени в интервале температур.

Диаграммы состояния, или диаграммы фазового равновесия в удобной графической форме показывают фазовый состав сплава в зависимости от температуры и концентрации. Диаграммы состояния строят для условий равновесия (окончательное состояние). Равновесное состояние соответствует минимальному значению свободной энергии. Это состояние может быть достигнуто только при очень малых скоростях охлаждения или длительном нагреве. Однако истинное равновесие достигается редко, наиболее часто системы находятся в метастабильном состоянии (неустойчивом), и под воздействием внешних факторов могут переходить в другие более устойчивые состояния. Метастабильные состояния нередко сообщают сплавам высокие механические и другие свойства.

Диаграммы фазового равновесия характеризуют окончательное состояние сплавов, то есть после того как все превращения в них произошли и полностью закончились. Диаграмма состояния показывает изменение состояния сплавов в зависимости от температуры ( $P = \text{const}$ ) и концентрации. Если в системе имеется два компонента, то диаграмму строят в двух измерениях: первое - температурная шкала, второе - концентрация сплава (рисунок 1).



**Рисунок 1.** Шкалы измерения двойной (двухкомпонентной) диаграммы состояния сплавов

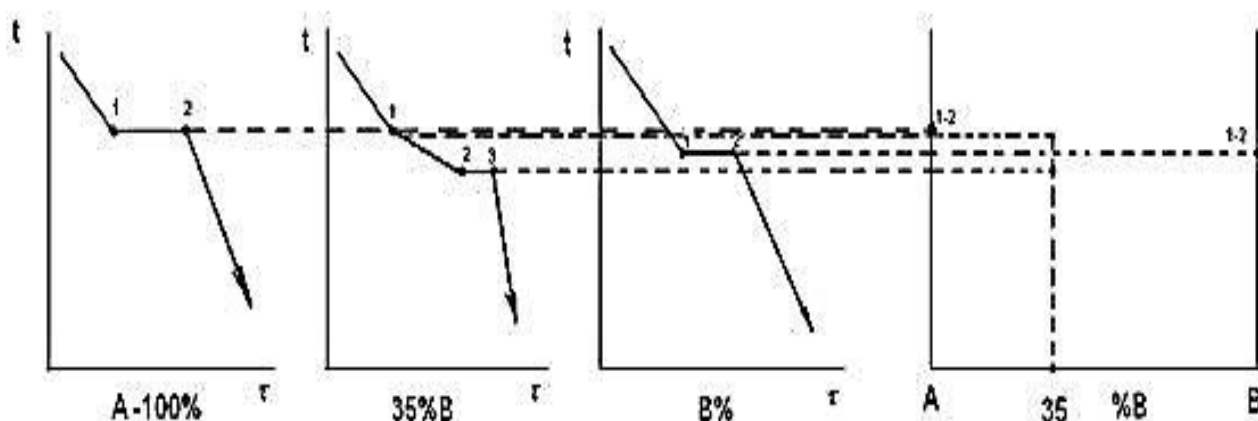
Каждая точка на оси абсцисс (горизонтали) соответствует определённому содержанию каждого компонента. Общее содержание компонентов в сплаве 100%. Крайние ординаты (вертикали) на диаграмме соответствуют чистым компонентам, а ординаты между ними - двойным сплавам. Через точку С, например, проходит сплав, содержащий 35% компонента В и, соответственно, 65% компонента А.

Каждая точка на диаграмме состояния показывает состояние сплава данной концентрации при данной температуре. Каждая вертикаль соответствует состояниям определённого сплава при изменении температуры. Изменение фазового состояния (превращение) сплава отмечается на вертикали точкой.

Линии, соединяющие точки аналогичных превращений, разграничивают на диаграмме области фазовых состояний.

Вид диаграммы состояния зависит от того, как реагируют оба компонента друг с другом в твёрдом или жидком состоянии, то есть, растворимы ли они в жидком и твёрдом состоянии, образуют ли химические соединения и т. д.

Обычно диаграммы состояния строят экспериментально, используя термический анализ, то есть строят кривые охлаждения и по остановкам и перегибам на этих кривых, вызванным тепловым эффектом превращений, определяют температуры превращений. Такие температуры называют критическими точками. Диаграмму состояния можно построить, имея достаточное количество сплавов и определив в каждом сплаве температуры превращений, (рисунок 2).



**Рисунок 2.** Построение двойной диаграммы состояния с помощью кривых охлаждения

С помощью диаграммы состояния можно проследить, какие структуры будет иметь медленно охлаждаемый сплав при любой температуре.

В жидком состоянии большинство металлов неограниченно растворяются друг в друге, образуя однородный раствор. Но бывают и исключения, например, в системах: Fe - Pb, Cu - Pb.

Кристаллизация в сплаве начинается только при переохлаждении с образованием зародышей и их последующем росте. Любые фазы, образующиеся в сплаве, отличаются по составу от исходного жидкого раствора, поэтому для образования устойчивого зародыша необходимы флуктуации концентрации или плотности расплава (рисунок 3). Флуктуациями концентрации называют временно возникающие отклонения химического состава сплава в отдельных малых объёмах жидкого раствора от среднего его состава. Такие флуктуации возникают вследствие диффузионного перемещения атомов вещества.

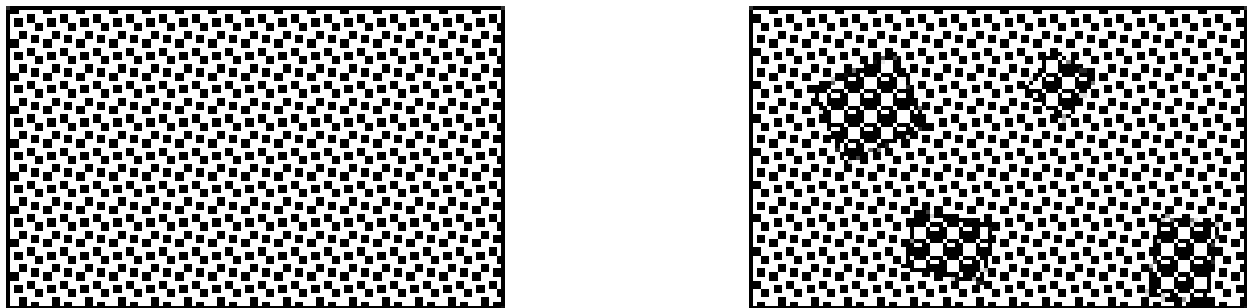


Рисунок 3. Образование флуктуаций в расплаве.

Диаграмма состояния для случая полной взаимной растворимости компонентов *A* и *B* в жидком и твёрдом состояниях в зависимости от концентрации и температуры дана на рисунке 4.

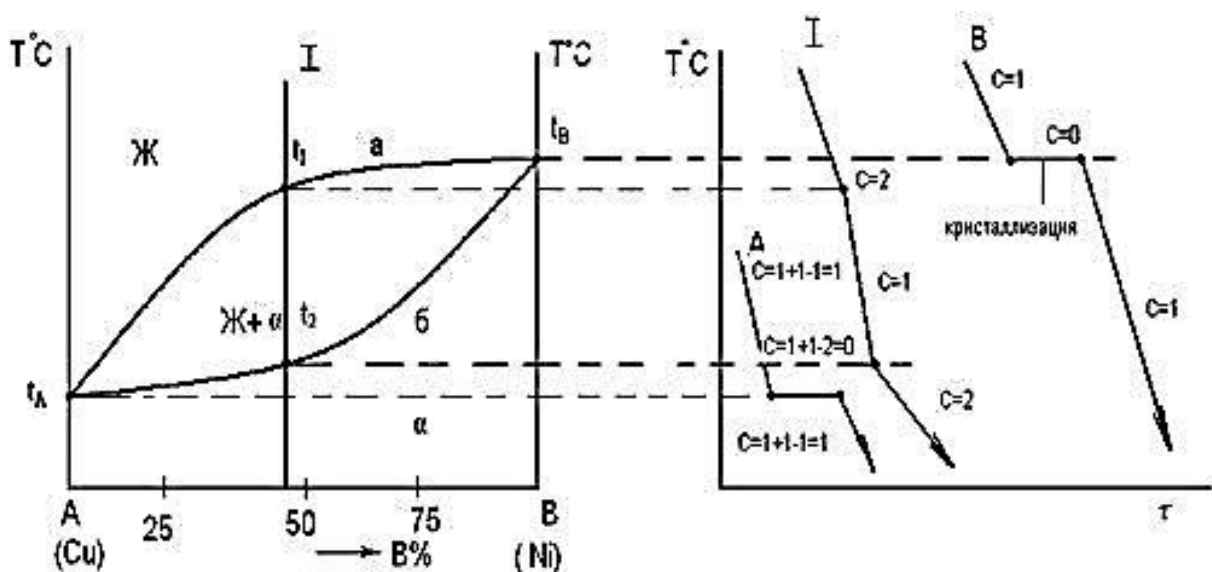


Рисунок 4. Диаграмма состояния с неограниченной растворимостью компонентов



Если два компонента неограниченно растворяются в жидком и твёрдом состояниях, то возможно существование только двух фаз – жидкого раствора  $\mathcal{J}$  ( $L$ ) и твёрдого раствора ( $\alpha$ ). Следовательно, трёх фаз быть не может, кристаллизация не наблюдается при постоянной температуре и горизонтальной линии на диаграмме нет.

При температуре выше линии  $t_A$ - $a$ - $t_B$ , называемой линией ликвидус, существует только жидкая фаза  $\mathcal{J}$ . В этой области свободная энергия жидкой фазы  $F_{\mathcal{J}}$  ниже свободной энергии твёрдого раствора  $F_{\alpha}$ , состоящего из компонентов  $A$  и  $B$ . В области ниже линии  $t_A$ - $b$ - $t_B$ , называемой линией солидус, устойчив  $\alpha$ -твёрдый раствор, так как  $F_{\alpha} < F_{\mathcal{J}}$ . Между линиями ликвидус и солидус в равновесии находятся жидкая фаза и  $\alpha$ -твёрдый раствор.

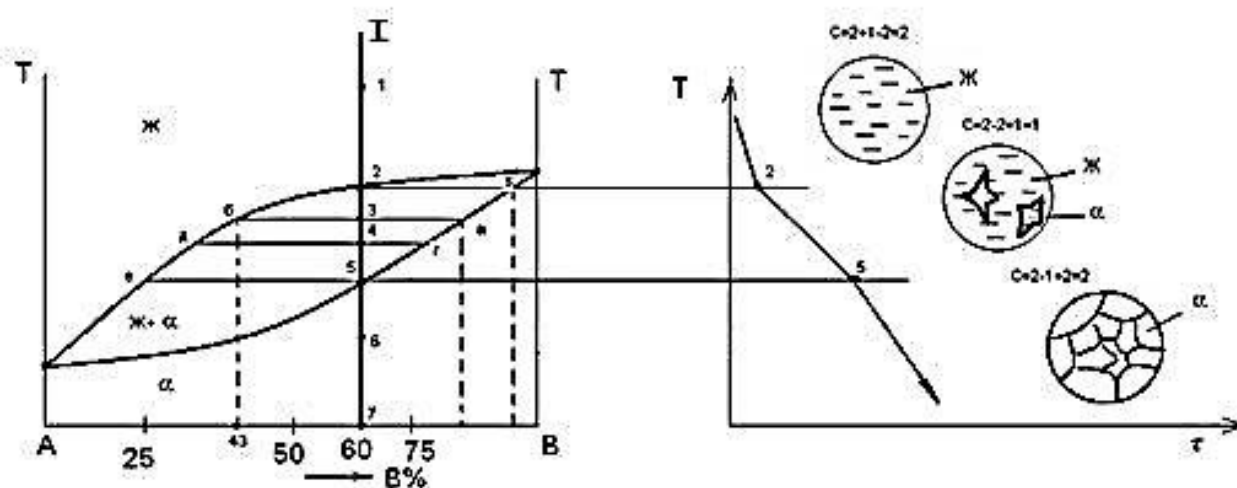
Кристаллизация чистого **компонента  $A$** : равномерное понижение температуры до значения  $t_A$  (температура плавления компонента  $A$ ), при которой компонент  $A$  затвердевает (до  $t_A$ :  $C = 1 - 1 + 1 = 1$ ). На кривой отмечается остановка (горизонтальная линия), так как согласно правилу фаз только при этой температуре одновременно могут существовать две фазы - твёрдая и жидкая ( $C = 1 - 2 + 1 = 0$ ). После затвердевания ( $\Phi = 1$ ), температура снова равномерно понижается  $C = 1 + 1 - 1 = 1$ . Аналогично для чистого компонента  $B$  (рисунок 4).

При охлаждении **сплава  $I$**  температура понижается до  $t_1$  ( $C = 2 - 1 + 1 = 2$ ), при которой начинается кристаллизация, на кривой охлаждения наблюдается перегиб, связанный с уменьшением скорости охлаждения вследствие выделения скрытой теплоты кристаллизации. Начиная от температуры  $t_1$ , из  $\mathcal{J}$ -фазы кристаллизуется твёрдый раствор. Процесс кристаллизации идёт при понижающейся температуре ( $C = 2 - 2 + 1 = 1$ ), существует две фазы:  $\mathcal{J}$  и  $\alpha$ . При достижении  $t_2$  сплав затвердевает и при более низких температурах существует только  $\alpha$ -твёрдый раствор.

Если найденные точки перенести на диаграмму, и одноименные точки соединить плавными линиями, то получится диаграмма состояния системы сплавов  $A$  и  $B$ , образующих непрерывный ряд твёрдых растворов (рисунок 4). В интервале температур между линиями ликвидус и солидус две фазы - жидкий сплав и  $\alpha$ -твёрдый раствор.

Рассмотрим более подробно процесс кристаллизации сплава, содержащего 60% компонента  $B$ . При температуре  $t_1$  сплав находится в жидком состоянии. В нём имеется равновесный набор фазовых и концентрационных флуктуаций (отклонение от среднего химического состава). При охлаждении в интервале тем-

ператур  $t_1$  до  $t_2$  количество и размер флуктуаций при охлаждении увеличивается. Ниже  $t_2$  критический размер зародыша достигает максимальной величины, начинается процесс кристаллизации. Ниже  $t_2$  сплав является двухфазным (Ж и  $\alpha$  - кристаллы). Двухфазное состояние существует в интервале температур  $t_2 - t_5$  (рисунок 5).



**Рисунок 5.**

В процессе кристаллизации изменяется и концентрация фаз, и количество каждой фазы (при кристаллизации количество твёрдой фазы увеличивается, а жидкой уменьшается). В любой точке диаграммы, когда существует две фазы, можно определить количество обеих фаз и их концентрацию. Для этого служит правило рычага, или правило отрезков.

### **Первое правило отрезков (правило концентраций):**

*Чтобы определить концентрации компонентов в равновесных фазах в любой точке диаграммы состояния, через данную точку, характеризующую состояние сплава, проводят горизонтальную линию (коноду) до пересечения с линиями (например, ликвидус и солидус), ограничивающими данную область. Проекция точек пересечения на ось концентраций показывают концентрацию компонентов в фазах (или составы фаз).*

Таким образом, химический состав твёрдой фазы  $\alpha$  для температуры  $t_3$  описывается точкой пересечения коноды с линией солидус, то есть в точке - а (82% В, остальное - 18% А). Точка встречи коноды и линии ликвидус (т. б) описывает равновесное состояние жидкости, то есть её химический состав (Ж-фаза содержит: 43% В, остальное - 57% А). При  $t_4$  - жидкость имеет состав точки - д, а  $\alpha$ - твёрдый раствор имеет состав точки - г. При температуре  $t_5$  процесс кристал-

лизации заканчивается. Таким образом, состав твёрдой фазы изменяется по линии солидус (от точки  $s$  до точки  $t_5$ ), а состав  $Ж$  фазы изменяется по линии ликвидус (от точки  $t_2$  до точки  $e$ ).

В процессе кристаллизации изменяется не только состав фаз, но и количественное состояние между ними. Для определения количественных соотношений (долей) фаз, находящихся в равновесии при данной температуре пользуются вторым правилом отрезков (или рычага).

### **Второе правило отрезков (правило рычага):**

*Чтобы определить количественное соотношение (доли) фаз в любой точке диаграммы состояния, через заданную точку проводят горизонтальную линию (коноду). Отрезки этой линии между заданной точкой и точками, определяющими составы фаз, обратно пропорциональны количествам (долям) этих фаз.*

Таким образом, для температуры  $t_3$  точка  $З$  определяет состояние сплава, точка  $б$  - состав  $Ж$  фазы; точка  $а$  - состав  $а$  - твёрдой фазы, отрезок  $ба$  - определяет всё количество сплава (конода, её длину принимают за 100% объёма сплава); отрезок  $За$  характеризует количество жидкой фазы; отрезок  $бЗ$  определяет количество кристаллов  $а$  - твёрдой фазы.

$$a_a = 3б/ба * 100\% = 30/100 * 100\% = 30\%,$$

$$Ж_б = 3а/ба * 100\% = 70/100 * 100\% = 70\%,$$

$$Ж_б = 100 - a_a = 100\% - 30\% = 70\%.$$

При  $t_4$ :  $a_г = 4д/дг * 100\% = 60/100 * 100\% = 60\%,$

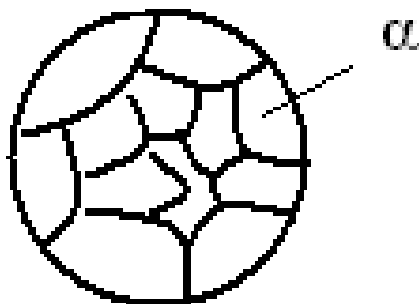
$$Ж_д = 4г/дг * 100\% = 40/100 * 100\% = 40\%,$$

$$Ж_г = 100/дг * 100\% = 100\% - 60\% = 40\%.$$

Отрезки, примыкающие к жидкой фазе, характеризуют количество твёрдой фазы. Отрезок коноды, примыкающий к твёрдой фазе, характеризует количество жидкой фазы.

Окончание затвердевания сплава соответствует температуре  $t_5$ . Выделяющиеся кристаллы твёрдого раствора имеют переменный состав, зависящий от температуры ( $t_2$ :  $a_s$ ;  $t_3$ :  $a_a$ ;  $t_4$ :  $a_г$ ;  $t_5$ :  $a_5$ ). Однако при медленном охлаждении процессы диффузии в жидкой и твёрдой фазе (объёмная диффузия), а также процессы взаимной диффузии между ними (межфазная диффузия) успевают за процессом кристаллизации, поэтому состав кристаллов выравнивается. В этих

условиях сплав после затвердевания будет состоять из однородных кристаллических зёрен твёрдого раствора (рисунок 6), а их состав будет соответствовать исходному составу сплава (точка 6 (рисунок 5)).



**Рисунок 6.** Микроструктура сплава

По описанному механизму осуществляется дендритная ликвация в сплавах: в кристаллах оси первого порядка обогащены тугоплавким компонентом (*B*), периферийные слои кристалла и межосные пространства, кристаллизующиеся в последнюю очередь, обогащены компонентом легкоплавким (*A*), понижающим температуру плавления сплава. Быстрое охлаждение подавляет дендритную ликвацию.

## 2. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Для чего необходимы диаграммы состояния?
2. Что такое эвтектика?
3. Что такое перитектика?
4. Что такое твёрдый раствор?
5. Что такое неограниченная растворимость двух компонентов?
6. Что такое ограниченная растворимость двух компонентов?
7. Что такое ликвидус?
8. Что такое солидус?
9. Что такое конода?
10. Как определить фазовый состав сплава при определённой температуре?
11. Как определить концентрацию элементов в фазах при определённой температуре?
12. Как определить пропорции (доли) фаз при определённой температуре?
13. Что такое конгруэнтное плавление?
14. Что такое инконгруэнтное плавление?

### 3. ЛИТЕРАТУРА

1. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Материаловедение: Учебник для машиностроительных ВУЗов – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение. 1980. – 493 с.

2. Металловедение и термообработка стали: Справ.изд. – 3-е изд., перераб. и доп. В 3-х т.: Т.2 Основы термической обработки / Под ред. Бернштейна М.Л. и Рахштадта А.Г. – М.: Металлургия, 1983, - 368 с.

3. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник: В 3т.: Т1 / Под общ.ред. Н.П. Лякишева. – М.: Машиностроение, 1996. – 992 с.

### 4. ЦЕЛИ И СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Цели лабораторной работы:

- закрепить знания по фазовым диаграммам состояния,
- развить практические навыки работы с прикладными программами на персональных компьютерах (MicrosoftOfficeWord),

В работе используются персональные компьютеры с пакетом прикладных программ MicrosoftOfficeWord.

Лабораторная работа включает следующие этапы:

- 1) Теоретико-методологический анализ исследуемой области.
- 2) Проведение фазового анализа различных областей заданных вариантов двойных диаграмм состояния.
- 3) Построение кривых охлаждения для заданных сплавов двойных диаграмм состояния.
- 4) Подготовка отчёта по лабораторной работе.
- 6) Защита лабораторной работы.

### 5. ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

Работа рассчитана на 6 часов

5.1. Последовательность реализуемых этапов:

5.1.1. Получение варианта задания (Приложение), теоретико-методологический анализ исследуемой области – 2 часа.

Студенты (слушатели) освежают в памяти информацию по многокомпонентным и двойным фазовым диаграммам состояния, по методам работы с пакетом прикладных программ MicrosoftOfficeWord, используя настоящие методические указания и рекомендуемую литературу.

5.1.2. Исследование фазовых превращений в соответствии с вариантом задания – 2 часа.

5.1.3. Составление отчёта– 2 часа.

5.1.4. Защита работы – 0,25 часа.

5.2. Указания к выполнению работы

Перед началом работы в качестве персонального задания студентам (слушателям) получить у преподавателя индивидуальные варианты двойных систем и концентраций элементов для исследования фазовых превращений.

После проведения теоретико-методологического анализа приступить к выполнению анализа. Для этого на заданных диаграммах состояния провести вертикали (ординаты) с соответствующими концентрациями элементов. Установить все критические точки. Определить типы превращений в критических точках. Определить характер изменения в критической точке поведения температуры при охлаждении сплава, начиная от температур жидкого состояния до комнатной температуры. Определить, зарисовать и описать кристаллографические особенности фаз во всех критических точках и областях температур между критическими точками, начиная от температур жидкого состояния до комнатной температуры. Выявленные закономерности изобразить схематически аналогично рисункам 4 и 5.

Для оформления отчёта воспользоваться прикладной программой MicrosoftOfficeWord.

**ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ**

1. Сплав Ag-Al с содержанием 1%, 8%, 60% Al.
2. Сплав Ag-Al с содержанием 3%, 28%, 90% Al.
3. Сплав Ag-Au с содержанием 10%, 50%, 90% Au.
4. Сплав Ag-Ba с содержанием 20%, 26%, 65% Ba.
5. Сплав Ag-Be с содержанием 5%, 50%, 90% Be.
6. Сплав Ag-Ca с содержанием 1%, 10%, 30% Ca.
7. Сплав Ag-Cd с содержанием 5%, 55%, 80% Cd.
8. Сплав Ag-Ce с содержанием 1%, 30%, 50% Ce.
9. Сплав Ag-Al с содержанием 1%, 8%, 90% Al.
10. Сплав Ag-O с содержанием 0,1%, 1% O.
11. Сплав Ag-Mg с содержанием 2%, 20%, 60% Mg.
12. Сплав Ag-Mn с содержанием 5%, 20%, 60% Mn.
13. Сплав Al-Ni с содержанием 20%, 70%, 85% Ni.
14. Сплав Al-Pt с содержанием 20%, 85%, 95% Pt.
15. Сплав Al-Si с содержанием 1%, 12,5%, 30% Si.
16. Сплав Be-Mo с содержанием 1%, 3%, 30% Mo.
17. Сплав Ce-Ga с содержанием 10%, 20%, 50% Ga.
18. Сплав Ce-Mg с содержанием 40%, 70%, 90% Mg.
19. Сплав Ce-Ni с содержанием 5%, 20%, 60% Ni.
20. Сплав Ce-Si с содержанием 2%, 15%, 60% Si.