

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ  
ВОСТОЧНОУКРАИНСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
им. ВЛАДИМИРА ДАЛЯ  
КРАСНОДОНСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ ИНЖЕНЕРИИ И МЕНЕДЖМЕНТА  
КАФЕДРА ИНЖЕНЕРНЫХ ДИСЦИПЛИН

*Колесников В.А.*

КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ

по дисциплине

**ТЕХНОЛОГИЯ МЕТАЛЛОВ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ. ЧАСТЬ 2.**

**КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ**

для студентов направления «Машиностроение»

Специальность: 7.090221 «Оборудование перерабатывающих и пищевых производств»

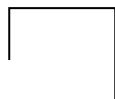
УТВЕРЖДЕНО

На заседании кафедры

«Инженерных дисциплин»

Протокол № 2 от 02.09.10 р.

КРАСНОДОН 2010



УДК 669.01 (075.8)

Конспект лекций по дисциплине «Технология металлов и материаловедение». Часть 2. Кристаллизация металлов и сплавов. Для студентов, которые обучаются по направлению «Машиностроение», специальность: 7.090221 «Оборудование перерабатывающих и пищевых производств». Конспект лекций на русском языке. Сост: доц., к.т.н. Колесников В.А. Краснодон: изд-во ВНУ им. В.Даля, 2010. 44 с.

Изложены разделы о кристаллизации металлов и сплавов. Приведены диаграммы состояний сплавов I рода и кривые охлаждения. Приведен пример построения кривых охлаждения для сплавов системы Pb-Sn. Рис. 17. Ист. 31.

Сост.:

В.А. Колесников, доц., к.т.н.

Отв. за выпуск

В.А. Колесников, доц., к.т.н.

Рецензент:

Зав. каф.  
микро и наноэлектроники,  
совместитель каф. прикладного  
материаловедения, д.т.н., проф.

Г. Н. Кожемякин

## 1. **КРАТКОЕ ИЗЛОЖЕНИЕ МАТЕРИАЛА РАССМОТРЕННОГО В ПРЕДЫДУЩЕЙ ЛЕКЦИИ**

Уважаемые студенты, Вы ознакомились с 1 й лекцией которая была посвящена строению металлов и сплавов по дисциплине **«Технология металлов и материаловедение»**.. Из неё Вы узнали, что **металл** — группа элементов, обладающая характерными *металлическими свойствами*, такими как высокая тепло- и электропроводность, положительный температурный коэффициент сопротивления, высокая пластичность и др. Из 119 химических элементов, представленных в периодической системе химических элементов Д.И. Менделеева), 98 открытых элементов относят к металлам.

Свойства металлов обусловлены особенностями их строения. Согласно теории металлического состояния, металл представляет собой вещество, состоящее из положительных ядер, вокруг которых по орбиталям вращаются электроны. На последнем уровне число электронов невелико и они слабо связаны с ядром. Эти электроны имеют возможность перемещаться по всему объему металла, т.е. принадлежать целой совокупности атомов. Также с особенностями атомного строения связан характер взаимодействия металлов, способность их создавать различные соединения, в которые входят несколько металлов (сплавы), металлы с неметаллами (например, карбиды, сульфиды и т.д.).

Под атомно-кристаллической структурой понимают взаимное расположение атомов, существующее в кристалле. Кристалл состоит из атомов (ионов), расположенных в определенном порядке, который периодически повторяется в трех измерениях.

В кристаллах существует не только ближний, но и дальний порядок размещения атомов, т. е. упорядоченное расположение частиц в кристалле сохраняется на больших участках кристаллов. Для описания атомно-кристаллической структуры пользуются понятием пространственной или кристаллической решетки.

**Кристаллическая решетка** представляет собой воображаемую пространственную сетку, в узлах которой располагаются атомы (ионы), образующие металл (твердое кристаллическое тело). Наименьший объем кристалла, дающий представление об атомной структуре металла во всем объеме, получил название **элементарной кристаллической ячейки**.

Для реального металла характерно наличие большого количества дефектов строения, нарушающих периодичность расположения атомов в кристаллической решетке. Эти дефекты оказывают существенное влияние на свойства материала.

Различают три типа дефектов кристаллического строения: **точечные, линейные и поверхностные**.

**Сплав** — макроскопически однородная смесь двух или большего числа химических элементов с преобладанием металлических компонентов. Основной или единственной фазой сплава, как правило, является твёрдый раствор легирующих элементов в металле, являющемся основой сплава. Под сплавом подразумевается вещество, полученное сплавлением двух или более элементов. В состав сплава могут входить металлы и неметаллы. Эти элементы называются **компонентами** сплава.

Сплавы имеют металлические свойства, например: металлический блеск, высокие электропроводность и теплопроводность. Иногда компонентами сплава могут быть не только химические элементы, но и химические соединения, обладающие металлическими свойствами. Например, основными компонентами твёрдых сплавов являются карбиды вольфрама или титана. Макроскопические свойства сплавов всегда отличаются от свойств их компонентов, а макроскопическая однородность многофазных (гетерогенных) сплавов достигается за счёт равномерного распределения примесных фаз в металлической матрице.

Примеси бывают **полезными**, улучшающими свойства, и **вредными**, ухудшающими его свойства. Примеси бывают **специальные**, которые вводят

для придания сплаву требуемых свойств и *случайные*, попадающие в сплав на разных этапах его формирования.

Сплавы обычно получают с помощью смешивания компонентов в расплавленном состоянии с последующим охлаждением. При высоких температурах плавления компонентов, сплавы производятся смешиванием порошков металлов с последующим спеканием (так получаются, например, многие вольфрамовые сплавы). Также возможно помимо сплавления получение сплавов: спеканием, электролизом, возгонкой. Такие вещества называют псевдосплавами.

Сплавы являются одним из основных конструкционных материалов. Среди них наибольшее значение имеют сплавы на основе железа и алюминия. В состав многих сплавов могут вводиться и неметаллы, такие как углерод, кремний, бор и др. В технике применяется более 5 тыс. сплавов.

***Кристаллическое строение сплава*** более сложное, чем чистого металла, и зависит от взаимодействия его компонентов при кристаллизации. Компоненты в твердом сплаве могут образовывать ***твердый раствор***, ***химическое соединение*** и ***механическую смесь***.

Поверхностные дефекты наблюдаются прежде всего на границах зерен.

***Граница зерен*** - это поверхность, по обе стороны от которой кристаллические решетки различаются пространственной ориентацией.

Каждое из зерен металла состоит из отдельных фрагментов, а последние - из блоков, образующих мозаичную структуру. Зерна металла взаимно разориентированы на несколько градусов, фрагменты разориентированы на минуты, а блоки, составляющие фрагмент, взаимно разориентированы всего лишь на несколько секунд. На границах зерен в процессе кристаллизации металла скапливаются различные примеси, образуются дефекты, неметаллические включения, оксидные пленки. В результате металлическая связь между зернами нарушается и прочность металла снижается.

Во второй лекции Вам предстоит ознакомиться с явлением кристаллизации металлов и сплавов.

## **2. ЛЕКЦИЯ 2. КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ ДИАГРАММЫ СОСТОЯНИЯ СПЛАВОВ. КРИВЫЕ ОХЛАЖДЕНИЯ**

### **2.1. КРИВЫЕ ОХЛАЖДЕНИЯ. ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ СПЛАВА 1 го РОДА**

Расплавленный жидкий металл, получаемый в металлургической печи, сливается в специальный литейный ковш, откуда этот металл переливают в тигель (рис. 2.1). После чего происходит процесс кристаллизации жидкого металла в твердое состояние.



А

Б

*Рис. 2.1. Заливка жидкого металла из литейного ковша в тигель- а;  
Тигель изготовленный из графита - б*

**Тигель** (от нем. *Tiegel* — горшок)— это ёмкость для нагрева, высушивания, сжигания, обжига или плавления различных материалов. Тигли — это неотъемлемая часть металлургического и лабораторного оборудования при литье различных металлов, сплавов, и пр. Отличительной особенностью тиглей является применение для их конструкции огнеупорных материалов и высокоустойчивых к различным воздействиям металлов и сплавов.

Тигель имеет обычно коническую (усеченный конус) или цилиндрическую форму. Разновидностью тиглей являются также плавильные чашки, плавильные лодочки.

Для металлургии и металловедения представляет особый интерес выбор температуры плавления в качестве основного свойства, а также температуры равновесия между жидкой и твердой фазами, и температуры фазовых равновесий в твердом состоянии (при полиморфных превращениях, образовании и распаде твердых растворов).

Процесс перехода сплава из жидкого состояния в твердое с образованием кристаллических решеток (кристаллов) называется первичной кристаллизацией.

В металловедении *системами* являются металлы и металлические сплавы. Чистый металл представляет из себя простую однокомпонентную систему, сплав – сложную. Система – группа тел выделяемых для наблюдения и изучения.

**Компоненты** – вещества, образующие систему. В качестве компонентов выступают чистые вещества и химические соединения, если они не диссоциируют на составные части в исследуемом интервале температур.

**Фаза** – однородная часть системы, отделенная от других частей системы поверхностного раздела, при переходе через которую структура и свойства резко меняются.

**Вариантность** ( $C$ ) (число степеней свободы) – это число внутренних и внешних факторов (температура, давление, концентрация), которые можно изменять без изменения фаз в системе.

Если вариантность  $C = 1$  (моновариантная система), то возможно изменение одного из факторов в некоторых пределах, без изменения числа фаз.

Если вариантность  $C = 0$  (инвариантная система), то внешние факторы изменять нельзя без изменения числа фаз в системе.

Существует математическая связь между числом компонентов ( $K$ ), числом фаз ( $\Phi$ ) и вариантностью системы ( $C$ ). Это правило фаз или закон Гиббса

$$C = K - \Phi + 2 \quad (2.1.1)$$

Если принять, что все превращения происходят при постоянном давлении, то число переменных уменьшится

$$C = K - \Phi + 1 \quad (2.1.2)$$

Где:  $C$  – число степеней свободы,  $K$  – число компонентов,  $\Phi$  – число фаз, 1 – учитывает возможность изменения температуры.

Рассмотрим условия, при которых из двухкомпонентной жидкости выделяются твердые фазы. Учитывая, что давление постоянно, используем правило фаз в виде уравнения (2.1.2). Если система состоит только из одной жидкой фазы, то  $C = 2 + 1 - 1 = 2$ . Это означает, что в известных пределах можно произвольно изменять и температуру, и состав жидкости, оставляя систему однофазной. Таким образом, на диаграмме равновесия (в координатах состав - температура) однофазной двухкомпонентной системе соответствует плоскость.

Если из жидкости при ее охлаждении выделяется одна твердая фаза, то  $C = 1$ , и, следовательно, это моновариантное равновесие изображается линией. Такие линии ограничивают фазовые поля, т.е. области существования фаз, например, твердой или жидкой. Очевидно, точка пересечения двух линий соответствует одновременному существованию трех фаз - двух твердых и одной жидкой. Такое равновесие является неинвариантным ( $C = 0$ ), и изменение любого параметра (температуры или состава) приведет к исчезновению одной из фаз.

Процесс кристаллизации сплавов и связанные с ним закономерности строения сплавов изучают по диаграммам состояния. Диаграммы состояния - это графические изображения, показывающие в условиях равновесия



фазовый состав и структуру сплавов в зависимости от температуры и химической концентрации компонентов.

Под равновесным состоянием сплава понимают такое состояние, при котором все фазовые превращения в сплаве полностью происходят в соответствии с диаграммой состояния. Такое состояние наступает при медленном охлаждении сплава. По диаграммам состояния можно определить число фаз в сплавах, относительное количество каждой фазы, ее состав и природу: компоненты, твердый раствор, химическое соединение, определить температуры плавления, затвердевания и аллотропических превращений в сплавах.

Диаграммы состояния строят на основании результатов термического анализа, при котором для сплавов различного состава вычерчивают кривые охлаждения в координатах «температура – время». На кривых охлаждения каждого сплава фиксируют температуры фазовых превращений (критические точки). Затем критические точки различных сплавов переносят на диаграмму состояния, которую строят в координатах «температура – концентрация».

Точки, соответствующие температурам начала и конца кристаллизации, температурам фазовых превращений, соединяют плавными кривыми.

Диаграмма состояния может быть построена по данным кривых охлаждения сплавов различного состава.

При построении диаграмм состояния сплавов на оси абсцисс указывают химический состав или концентрацию сплава в процентах. Для этого горизонтальную линию определенной длины делят на сто одинаковых частей и каждое деление принимают за 1 % одного из компонентов сплава.

Рассмотрим основные диаграммы равновесий (или состояний) в двухкомпонентных системах.

*Первый тип диаграмм.* Компоненты *A* и *B* неограниченно взаимно растворимы в жидком состоянии, а в твердом не образуют ни растворов, ни химических соединений. Известно, что абсолютной нерастворимости компонентов друг в друге не существует. Однако для упрощения в

некоторых случаях с достаточным приближением можно считать, что из жидкости выделяются чистые компоненты в виде отдельных фаз. Это наблюдается, например, для таких систем, как Pb-As, Cd-Bi, Au-Si, KCl-LiCl, CaO-MgO. Диаграмма равновесия для подобных систем схематически представлена на рис. 2.1.2а, на котором по оси ординат откладывается температура плавления, а по оси абсцисс - состав.

Процесс перехода металла из жидкого состояния в кристаллическое можно изобразить кривыми в координатах время – температура. Кривая охлаждения чистого металла представлена на рис. 2.1.2б.

$T_{теор}$  - теоретическая температура кристаллизации;

$T_{кр}$  - фактическая температура кристаллизации.

До точки 1 охлаждается металл в жидком состоянии, процесс сопровождается плавным понижением температуры. На участке 1 – 2 идет процесс кристаллизации, сопровождающийся выделением тепла, которое называется скрытой теплотой кристаллизации. Оно компенсирует рассеивание теплоты в пространство, и поэтому температура остается постоянной. После окончания кристаллизации в точке 2 температура снова начинает снижаться, металл охлаждается в твердом состоянии.

Построение кривых охлаждения является одним из методов физико-химического анализа и называется термическим анализом. Академиком Н.С. Курнаковым еще в 1904 г. был создан прибор для автоматической записи кривых охлаждения. В настоящее время физико-химический анализ наряду с использованием кривых охлаждения, микроскопическими методами и измерениями твердости включает рентгеноструктурные и рентгеноспектральные исследования.

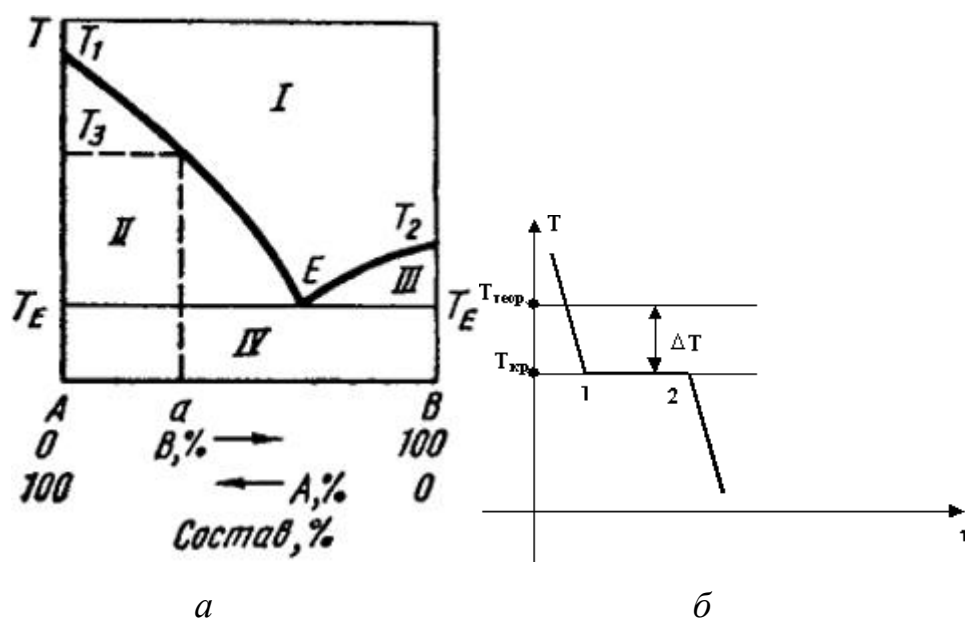


Рис. 2.1.2. Первый тип диаграммы состояния- а; Кривая охлаждения чистого металла - б)

Жидкий расплав (поле I рис. 2.1.2а) характеризуется тем, что в известных пределах можно произвольно изменять его температуру и состав, не вызывая появления новых фаз ( $C = 2$ ). Линии  $T_1E$  и  $T_2E$  и горизонталь  $T_ET_E$  ограничивают области (поля II и III), соответствующие моновариантным двухфазным равновесиям. В них заданной температуре соответствует определенный состав жидкости, равновесной с кристаллами компонентов ( $A$  или  $B$ ), и, наоборот, данному составу жидкости соответствует своя температура кристаллизации. Так, при температуре  $T_3$  состав жидкости, находящейся в равновесии с твердым компонентом  $A$ , определяется пересечением горизонтальной прямой, идущей на уровне  $T_3$  с линией  $T_1E$ , т.е. соответствует точке  $a$  на оси абсцисс.

В поле II существуют две фазы - расплав переменного состава, зависящего от  $T$ , и твердый компонент  $A$ . Поле III также ограничивает область существования двух фаз - твердого компонента  $B$  и расплава переменного состава. Поле IV соответствует механической смеси твердых компонентов  $A$  к  $B$ .

Диаграммы равновесия преимущественно строятся на основании измерений температуры охлаждающихся сплавов различного состава, ход которых изменяется при выделении фаз, и других превращениях. Результаты этих измерений изображаются на графиках в координатах температура - время в виде так называемых кривых охлаждения. Построение диаграммы первого типа таким способом пояснено на рис. 2.1.3, где в левой части представлены кривые охлаждения.

*Состав 1* - чистый компонент *A*. При охлаждении расплава температура монотонно уменьшается до  $T_1$ . Здесь температура остается некоторое время постоянной и равной температуре плавления компонента  $A(T)$ .

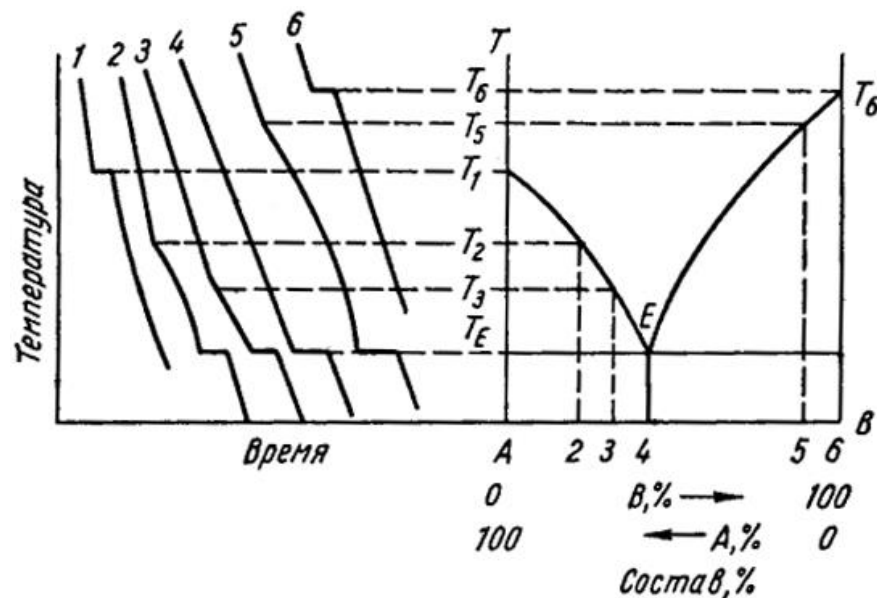


Рис. 2.1.3. Построение диаграммы состояния по кривым охлаждения

*Состав 2* - расплав содержит компоненты *A* и *B*. При охлаждении до температуры  $T_2$  достигается насыщение и начинают выделяться кристаллы чистого компонента *A*. Процесс охлаждения замедляется (излом на кривой), так как освобождается теплота плавления. Температура  $T_2$  отмечается на диаграмме равновесия на перпендикуляре, восстановленном к оси составов в точке 2. В отличие от предыдущего случая здесь не может быть постоянства температуры при кристаллизации, так как вследствие выделения компонента

$A$  расплав непрерывно становится всё более концентрированным относительно компонента  $B$ , и поэтому температура его замерзания понижается.

Совокупность подобных точек выделения кристаллов компонента  $A$  - линия  $T_1E$ , описывающая составы расплавов, равновесных с компонентом  $A_T$ . При температуре  $T_E$  концентрация компонента  $B$  настолько увеличивается, что расплав становится насыщенным и этим компонентом. Следовательно, находится в равновесии одновременно с кристаллами компонентов  $A$  и  $B$ . Расплав такого состава, называемого эвтектическим, затвердевает целиком без изменения состава и при неизменяющейся температуре, подобно чистому компоненту. Это следует из правила фаз, так как компоненты  $A_T$  и  $B_T$  представляют собой отдельные фазы (жидкость - третья фаза) и  $C = 2 + 1 - 3 = 0$ , т.е. равновесие при  $T_E$  является нонвариантным (остановка на кривой охлаждения).

Ниже  $T_E$  жидкость полностью исчезает и существует лишь смесь из двух твердых фаз  $A$  и  $B$ . Под микроскопом в полностью затвердевшем сплаве можно увидеть относительно крупные кристаллы  $A$ , которые выделились из расплава во время его охлаждения от  $T_2$  до  $T_E$ . Они находятся в массе, представляющей собой тесную смесь мелких кристалликов  $A$  и  $B$ , которая образовалась при окончательном затвердевании расплава при  $T_E$ . Такая смесь называется эвтектикой. Она не является фазой, а есть механическая смесь двух фаз.

Состав 3 - кривая охлаждения имеет такой же вид, как для состава 2, с той разницей, что выделение кристаллов компонента  $A$  начинается при более низкой температуре, так как по мере повышения концентрации компонента  $B$  от состава 2 до 3 температура начала кристаллизации понижается от  $T_2$  до  $T_3$ . Подобные кривые охлаждения и такие же фазы характерны для сплавов, составы которых лежат в интервале концентраций от компонента  $A$  до состава 4.

*Состав 4 - эвтектический*, как отмечалось выше, кристаллизуется при постоянной температуре  $T_E$ . Эвтектическая точка  $E$  отвечает равновесию трех фаз - одной жидкой и двух твердых ( $\Phi = 3$ ), которое изображается уравнением: Расплав (состава 4)  $\longleftrightarrow A_T + B_T$ . Для эвтектического расплава характерна кривая охлаждения такая же, как для чистого вещества. Вследствие одновременной кристаллизации  $A$  и  $B$  эвтектическая смесь состоит, как уже отмечалось, из мелких, тесно перемешанных кристалликов обоих компонентов. Эта смесь имеет самую низкую температуру плавления из всех сплавов данной системы. При любых других составах эвтектическая составляющая первая начинает выплавляться из любого твердого сплава при его нагревании до  $T_E$ .

*Состав 5* - при охлаждении этого расплава до температуры  $T_5$  начинается кристаллизация чистого компонента  $B$ . По мере его выделения происходит дальнейшее понижение температуры, а остающаяся жидкость обогащается компонентом  $A$ . Составы расплавов, находящихся в равновесии с кристаллами компонента  $B$ , описываются линией  $T_6E$ , подобно тому как расплавы, равновесные с кристаллами  $A$  описываются линией  $T_1E$ .

Таким образом, при температуре  $T_E$  концентрация расплава соответствует точке  $E$ , и происходит кристаллизация эвтектики. Все расплавы, имеющие составы в интервале концентраций 4-6, характеризуются такими же кривыми охлаждения, как расплав 5,

*Состав 6* - чистый компонент  $B$ , кривая охлаждения которого подобна кривой 1. Кристаллизация происходит при постоянной температуре  $T_6$ .

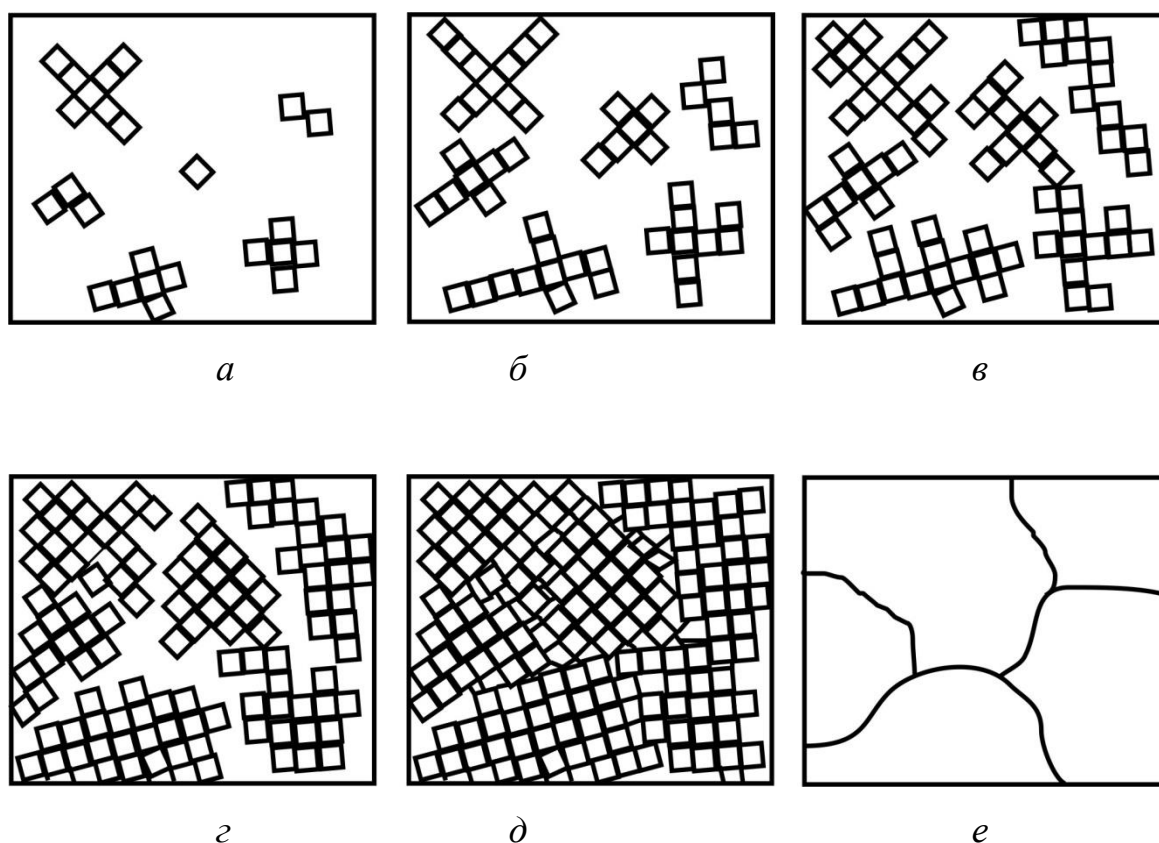
Как видно из рис. VII.3, кристаллизация всех сплавов системы  $A-B$  заканчивается при температуре  $T_E$ . При охлаждении расплава любого состава до этой температуры жидкая фаза принимает одну и ту же концентрацию, отвечающую эвтектике (точка  $E$ ). Горизонталь  $T_E T_E$  называется линией солидуса, так как при более низких температурах существуют только твердые фазы, а жидкость полностью исчезает. Линии

$T_1E$  и  $T_6E$  называются линиями ликвидуса, так как при температурах, лежащих выше этих линий, существует только жидкая фаза.

Рассмотрим более подробно процесс кристаллизации сплавов. Кристаллизация протекает в условиях, когда система переходит к термодинамически более устойчивому состоянию с минимумом свободной энергии.

**Кристаллизация** – это процесс образования участков кристаллической решетки в жидкой фазе и рост кристаллов из образовавшихся центров. Превращения, происходящие в процессе кристаллизации, имеют важное значение, так как в значительной степени определяют свойства металла. Впервые процессы кристаллизации были изучены русским ученым Д. К. Черновым. Кристаллизация состоит в следующем. В жидком металле атомы непрерывно движутся. По мере понижения температуры движение замедляется, атомы сближаются и группируются в кристаллы. Эта первичная группа кристаллов получила название центров кристаллизации. Далее к этим центрам присоединяются вновь образующиеся кристаллы. Одновременно продолжается образование новых центров. Таким образом, ***кристаллизация состоит из двух стадий: образования центров кристаллизации и роста кристаллов вокруг этих центров.***

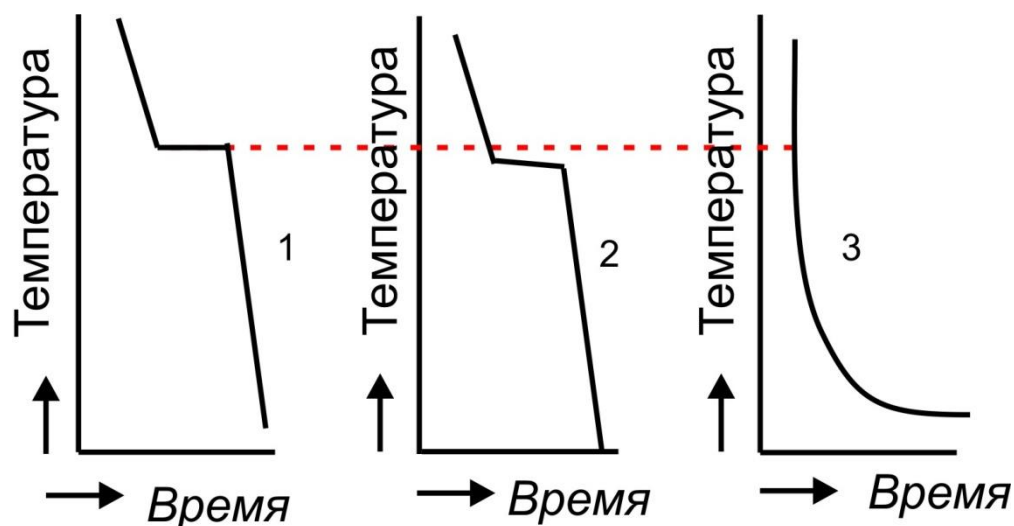
На рис. 2.1.4. показан механизм кристаллизации. Сначала рост кристаллов не встречает препятствий (рис. 2.1.4.а), и растущие кристаллы сохраняют правильность строения кристаллической решетки. При дальнейшем движении кристаллы сталкиваются, и образовавшиеся группы имеют уже неправильную форму, но сохраняют правильность строения внутри каждого кристалла. Такие группы кристаллов называют зернами (рис. 2.1.4, б, в, г, д). На рис. 2.1.4е показаны границы зерен различных размеров, что влияет на эксплуатационные свойства металла. Крупнозернистый металл имеет низкое сопротивление удару, при обработке мешает получению требуемого класса шероховатости поверхности. Размеры зерен зависят от различных факторов: природы самого металла и условий кристаллизации.



*Рис. 2.1.4. Схема процесса кристаллизации металла*

Так как процессы кристаллизации зависят от температуры и протекают во времени, то кривые охлаждения (рис. 2.1.5) строятся в координатах температура — время. На кривой 1 показан идеальный процесс кристаллизации металла без переохлаждения. Сначала температура понижается равномерно — кривая идет вниз. При достижении температуры затвердевания падение температуры прекращается — на кривой образуется горизонтальный участок.





*Рис. 2.1.5. Кривые охлаждения при кристаллизации:*

*1 — теоретическая кривая кристаллизации металла; 2 — кривая кристаллизации металла с переохлаждением; 3 — кривая кристаллизации неметалла*

Это объясняется тем, что группировка атомов идет с выделением тепла. По окончании затвердевания температура снова понижается. По закону кристаллизации чистых металлов каждый металл кристаллизуется при строго индивидуальной температуре. Практически кристаллизация протекает несколько иначе, так как часто имеет место переохлаждение, т. е. металл при температуре затвердевания остается жидким, и кристаллизация начинается при более низкой температуре. Разница между идеальной и истинной температурой кристаллизации называется степенью переохлаждения. Кривая 2 соответствует процессу кристаллизации с переохлаждением. Кривая 3 характерна для кристаллизации неметаллов: нет четко выраженной температуры кристаллизации, затвердевание происходит постепенно. Степень переохлаждения является важнейшим фактором, определяющим величину зерна. При большой скорости охлаждения степень переохлаждения больше и зёрна мельче. Так, при отливке тонкостенных изделий получается мелкозернистая структура, при отливке толстостенных — крупнозернистая. Вторичная кристаллизация (аллотропия). Некоторые металлы: железо,

кобальт, олово и др. — имеют в твердом состоянии две и более кристаллических решеток при неодинаковых температурах.

Большинство кузнецов, если не все, считают дендриты святой принадлежностью булата.

**Дендрит** (от греч. δένδρον — дерево) - это древовидные кристаллические образования, обнаруживаемые в монокристаллах и слитках металлов, полуметаллов, полупроводников и их сплавов. Максимальная скорость роста кристаллов наблюдается по таким плоскостям и направлениям, которые имеют наибольшую плотность упаковки атомов. В результате вырастают длинные ветви, которые называют осями первого порядка (рис. 2.1.6). На осях первого порядка появляются и начинают расти ветви второго порядка, от которых отходят ветви третьего порядка. В последнюю очередь идет кристаллизация в участках между осями дендрита. Под включением понимают объем пустот, геометрически изолированный в кристалле, заполненный веществом, отличающимся от вещества основного кристалла. Включением может быть пузырек газа или жидкости, частица другого кристалла, отличного от основного по вещественному или фазовому составу.

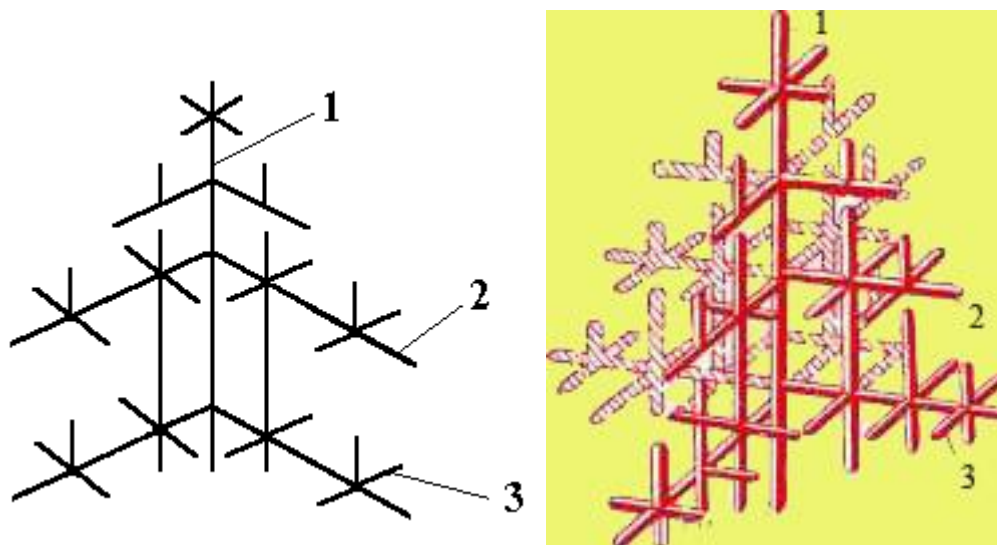
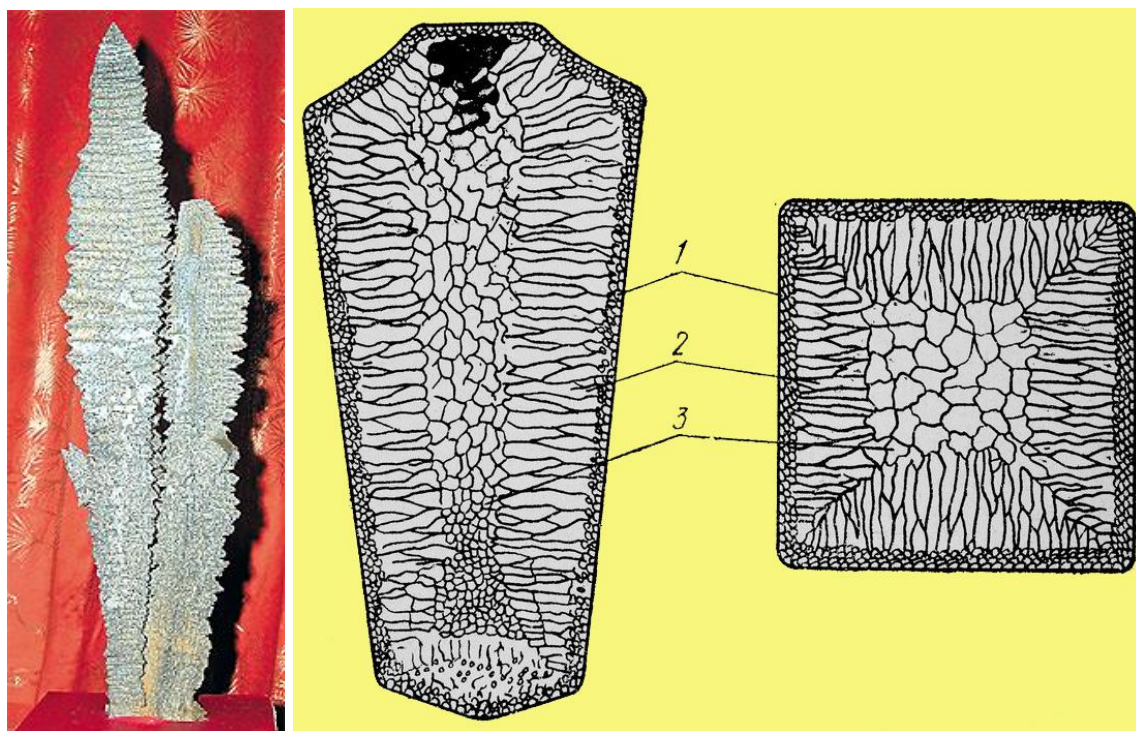


Рис. 2.1.6. Схема строения дендрита: 1, 2, 3 - оси первого, второго и третьего порядка

На самом деле не кристаллизуется при застывании только аморфное стекло. Кристаллы получаются в слитках алюминия, бронзы, стали, чугуна. Самый знаменитый «Кристалл Чернова» — дендрит в 39см.; 3,5кг. — был

найден в слитке стали. Кристаллы – это функция слитка и от его состава зависят мало, поэтому, чтобы вы ни плавил – дендриты будут. Вопрос только в том, какие они будут. Вопрос очень важный, поэтому рассмотрим строение слитка. Слиток любого металла, после остывания, обычно состоит из трёх зон (рис. 2.1.7).



А

Б

*Рис. 2.1.7. Кристалл Чернова экспонат музея военной академии Ракетных войск стратегического назначения имени Петра Великого (Россия, г. Санкт-Петербург) [5]. Строение слитка любого металла: 1 - корка мелкозернистых кристаллов; 2 - зона столбчатых кристаллов; 3 – равноосные кристаллы*

Внешняя корка мелкозернистых кристаллов, потом зона столбчатых кристаллов, а внутри – равноосные. Практические уточнения: а) поскольку кристаллы растут от холода к теплу (а тепло идет вверх), то столбчатые кристаллы располагаются под углом к оси слитка; в) в квадратных тиглях внешняя корка мелких кристаллов внутри образует круг, а не идёт

параллельно стенкам. Из строения слитка можно сделать два вывода: а) никакие неровности стенок тигля не влияют на структурообразование – всё сглаживает и нивелирует внешний слой мелких кристаллов; в) рисунок на поверхности вутца говорит о его химическом составе: если есть золотой отлив, значит С больше 1,85%; а веточки говорят о лигатуре.

***Лигатура** в металлургии, вспомогательные сплавы, применяемые для введения в жидкий металл легирующих элементов (см. также Легирование, Легированная сталь) с целью придания определённых свойств металлическому расплаву (например, жидкотекучести) или затвердевшему металлу (повышенной механической прочности и др.). Усвоение легирующего элемента из лигатуры выше и устойчивее, чем при введении его в чистом виде. Лигатуру получают сплавлением входящих в её состав компонентов либо восстановлением их из руд, концентратов или окислов. В чёрной металлургии лигатуру отличают от ферросплавов, используемых не только для легирования, но и для раскисления металлов. Лигатурой называют также металлы, которые вводятся в благородные металлы (золото, серебро и др.) для придания им нужных свойств (например, твёрдости) или удешевления изделий. В качестве лигатуры применяются медь, ртуть.*



Рис. 2.1.8. Структура чистого алюминия до (слева) и после (справа) обработки лигатурой –а; Структура сплава AlSi (7%Si) до модифицирования (слева внизу) и после модифицирования (справа вверху)- б [7]

**Это интересно.** Среди уникальных экспонатов музея военной академии Ракетных войск стратегического назначения имени Петра Великого (Россия) —



булатный клинок из личной коллекции Д.К. Чернова. Работы основоположника металловедения и термической обработки стали Дмитрия Чернова приоткрыли завесу многих производственных тайн, в том числе и булата. Оказалось, замысловатый узор на старинных восточных мечах и кинжалах — не что иное, как рисунок крупнокристаллического строения. А причина их высокой твердости, упругости и остроты не в присутствии особых примесей, как думали многие авторитетные металлурги, а в точном соблюдении состава углеродистой стали. В 1869 г. Чернов повторил на Обуховском заводе некоторые из опытов знаменитого металлурга Павла Аносова, в результате которых из полученного слитка булатной стали были изготовлены два кинжальных клинка с ясным волнистым узором, по качеству не уступающие дамаскским. В 1906 г. Чернов передал свою коллекцию холодного оружия в дар Михайловской артиллерийской академии, где на протяжении 25 лет возглавлял кафедру металлургии и сталелитейного дела.



Рис. 2.1.9. Булатный клинок из личной коллекции Д.К. Чернова [5]

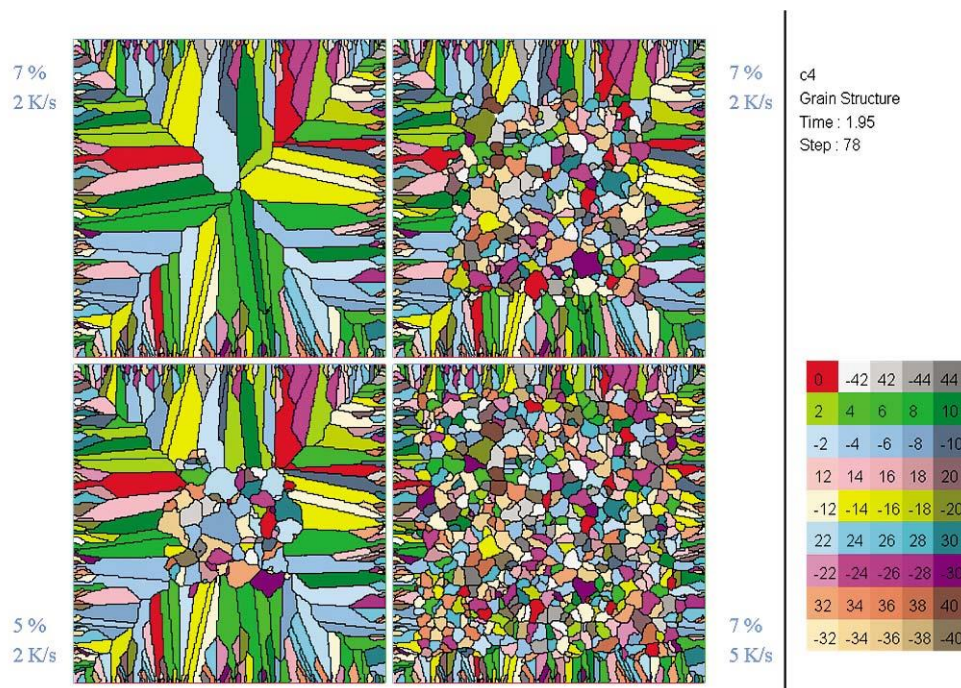
Еще одно открытие этого гениального ученого-металлурга, причисленное к памятнику науки и техники, — это «Кристалл Чернова». История этого свидетельства гения человеческой мысли и научного прогресса началась 2 декабря 1878 г. на заседании Русского технического общества, когда Дмитрий Чернов представил доклад «Исследования, относящиеся до структуры литых стальных болванок». В новой работе ученого, посвященной процессу затвердевания жидкой стали, впервые в мире было дано описание кристаллической структуры стальных слитков, ставшее классическим. Сталь, застывая, образует сложную систему кристаллов — результат совместной кристаллизации железа и углерода. При этом образуются кристаллы переменного состава, которые представляют собой твердые растворы углерода в железе. Затвердевание начинается с появления так называемых центров кристаллизации, из которых затем выбрасываются оси будущих кристаллов. Первыми появляются кристаллы в тех местах, где металл соприкасается с охлаждающими его стенками

*изложницы. Иначе говоря, жидкий металл покрывается твердой коркой. Это замедляет остывание, и кристаллы, образовавшиеся позднее, имеют большие размеры. Они теснят друг друга, переплетаются и искривляются. Иногда в верхней части слитка вырастают огромные правильной формы кристаллы. Изучение процесса кристаллизации позволило Чернову объяснить возникновение дефектов стальных отливок и указать способы их устранения.*

*Один из учеников Чернова — подполковник Ф. Берсенов привез ему великолепный стальной кристалл из усадочной раковины 100-тонного слитка. Мерцающий отраженным светом, с причудливыми изломами, образец (длина — 39 см, вес — 3,45 кг) получил название «Кристалл Чернова».*

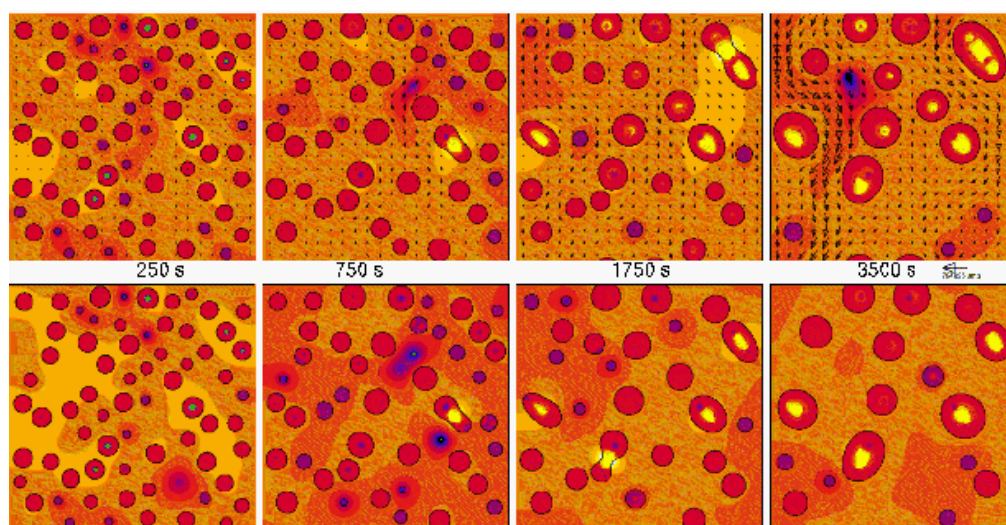
Самым драгоценным в слитке является зона столбчатых кристаллов. Металл здесь плотный, не содержит раковин и газовых пузырей. Степень развития столбчатых кристаллов зависит от химического состава металла, температуры нагрева, размера слитка, скорости остывания. Идеально, если столбчатые кристаллы сомкнулись в центре — это явление называется **транскристаллизацией**. Главная задача плавильщика— регулируя состав, массу, температуру, - добиться **транскристаллизации**, тогда и булат будет упругим и прочным.

Развитие современных компьютерных технологий позволяет смоделировать эволюцию развития кристаллической структуры с момента зарождения первых кристаллов. При этом учитываются все внешние факторы и свойства материала, заложенные в модель. Так в модуле *SAFE* (*Cellular Automated Finite Element*— клеточный автомат на основе конечных элементов) пакета ProCast применены самые современные стохастические модели, позволяющие определить размер зерна, расстояния между вторичными ветвями дендритов, фазы, радиус графитовых включений.



*Рис. 2.10. Окно модуля CAFE пакета ProCast. Моделирование эволюции развития кристаллической структуры сплава*

Важным инструментом при моделировании дендритной микроструктуры в процессе кристаллизации является так называемый метод "фаза-поле". На рис. 2.11. приведен пример, кристаллизации сплава (Al – 4% Cu).



*Рис. 2.11. Компьютерное моделирование процесса кристаллизации в условиях конвекции*

## 2.2. ПРИМЕР ПОСТРОЕНИЯ ДИАГРАММЫ СОСТОЯНИЯ СПЛАВОВ 1 го РОДА СОСТОЯЩЕЙ ИЗ ДВУХ КОМПОНЕНТОВ

Диаграмму состояния сплавов, состоящих из двух компонентов, строят в координатах "температура - концентрация" (рис. 2.2.1). По оси ординат откладывают температуру, по оси абсцисс - концентрацию. Общее содержание обоих компонентов в сплаве равно 100 %. По оси абсцисс от 0 до 100 % увеличивается концентрация Sb в сплаве, следовательно, концентрация Pb в сплаве будет возрастать справа налево. Таким образом, крайние ординаты соответствуют чистым компонентам Pb и Sb. На оси ординат в точках, соответствующих чистым компонентам, отмечают значения температур кристаллизации Pb и Sb. Затем на основании проведенного термического анализа сплавов Pb - Sb с различным содержанием компонентов строят кривые охлаждения с целью определения температуры начала кристаллизации  $T_1$  и конца кристаллизации  $T_2$ .

Значения температур –  $T_1$  и  $T_2$  для каждого сплава наносят на вертикаль, соответствующую концентрации данного сплава. Соединяют температуры кристаллизации чистых металлов и температуры начала кристаллизации –  $T_2$  плавной линией. Кривая, отвечающая началу равновесной кристаллизации сплавов, называется линией **ликвидус** (ACB).

Кривая, проведенная через точки конца кристаллизации, называется линией **солидус** (DCE).

Выше линии ликвидус сплав находится в жидком состоянии, ниже линии солидус - в твердом. Сплав, содержащий 13% Sb, является эвтектическим. Сплавы, в которых Sb меньше 13%, называются доэвтектическими; если содержание Sb больше 13%, - то такие сплавы являются заэвтектическими,

В доэвтектических сплавах ниже линии AC начинается процесс кристаллизации, из жидкости выделяются кристаллы Pb, в заэвтектических



сплавах ниже линии GB выделяются кристаллы Sb. Следовательно, в области ACD существуют две фазы: Ж + Pb, в области CBE: Ж + Sb.

В процессе кристаллизации доэвтектических и заэвтектических сплавов концентрация жидкой фазы изменяется и стремится к эвтектической. На линии DCE из жидкости эвтектической концентрации одновременно выделяются кристаллы Pb и Sb, т.е. кристаллизуется эвтектика

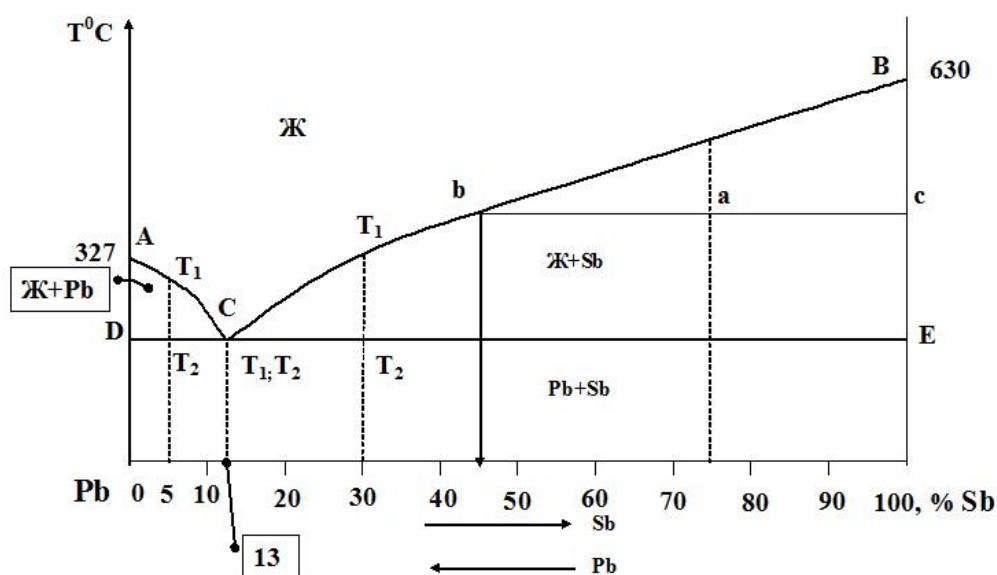


Рис.2.2.1. Диаграмма состояния Pb –Sb

### 2.3. ПРАВИЛО ФАЗ

Диаграмма состояния дает представление о процессах кристаллизации сплавов, показывает области существования сплавов в жидком и твердом состояниях и интервал кристаллизации, позволяет определять равновесный состав жидкой и твердой фаз на любой стадии кристаллизации.

Процесс кристаллизации подчиняется правилу фаз, которое дает количественную зависимость между степенью свободы системы и количеством фаз и компонентов.

Фазой называется однородная часть неоднородной системы, разграниченная от других частей системы (фаз) поверхностью раздела, при переходе через которые химический состав или структура вещества изменяются скачком.

Для условий, когда все превращения происходят при постоянном давлении, правило фаз выражается уравнением

$$C = k - f + 1 \quad (2.3.1)$$

где:  $C$  - число степеней свободы системы, т.е. число внешних (температура) и внутренних (концентрация) факторов, которые можно изменять без изменения числа фаз в системе;

$k$  - число компонентов;

$f$  - число фаз.

Процесс кристаллизации сплавов Pb-Sb с точки зрения правила фаз представляется в таком виде.

В период охлаждения жидкого сплава число степеней свободы будет две:

$$C = k - f + 1 = 2 - 1 + 1 = 2 \quad (2.3.2)$$

Это значит, что можно менять в известных пределах температуру, а также можно изменять концентрацию жидкого раствора, добавляя к нему свинец или сурьму, а сплав останется однофазным (жидкий раствор).

В период выделения кристаллов пересыщающего компонента из жидкого раствора (между линией ликвидус и солидус).

$$C = k - f + 1 = 2 - 2 + 1 = 1 \quad (2.3.3)$$

Это значит, что в известных пределах можно повышать или понижать температуру, но число фаз останется равным двум:

жидкий раствор и твердые кристаллы.

В период образования эвтектики (линия солидус) число степеней свободы равно 0, так как

$$C = k - f + 1 = 2 - 3 + 1 = 0 \quad (2.3.4)$$

Это значит, что процесс кристаллизации эвтектики происходит при постоянной температуре, причем концентрация сурьмы в каждой фазе строго постоянна, а именно: в жидком растворе - 13 % - Sb , в твердых кристаллах сурьмы - 100 % Sb , в твердых кристаллах свинца - 100 % Pb.

## ***2.4. ПРАВИЛО ОТРЕЗКОВ***

В процессе кристаллизации изменяются и концентрация фаз (поэтому состав жидкости изменяется), и количество каждой фазы (при кристаллизации количество твердой фазы увеличивается, а жидкой уменьшается). В любой точке диаграммы, когда в сплаве одновременно существуют две фазы, можно определить количество обеих фаз и их концентрацию.

Для определения количественного соотношения фаз и концентрации фаз применяют правило отрезков (или правило рычага).

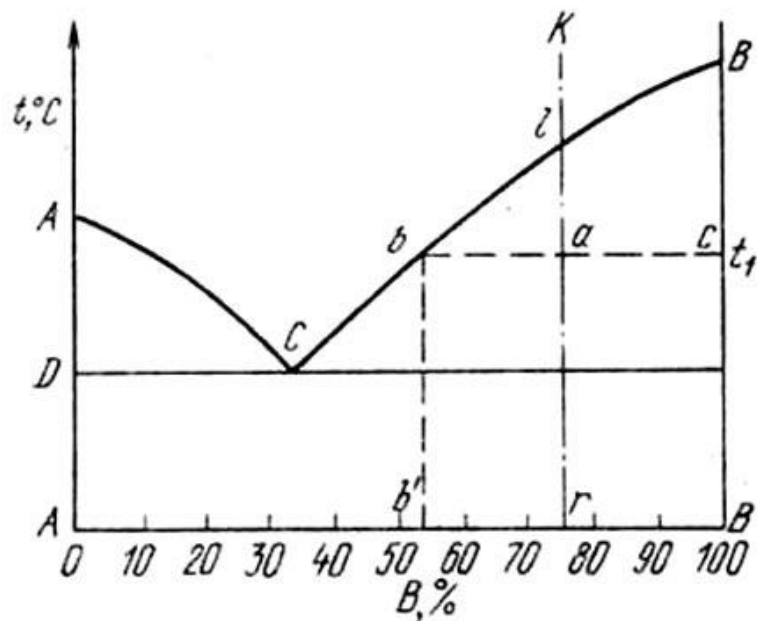


Рис. 2.4.1. Пример диаграммы состояния сплавов (правило отрезков)

В точке  $a$ , показывающей состояние сплава  $K$  при температуре  $t_1$ , сплав состоит из кристаллов  $B$  и жидкости. Выше точки  $l$  сплав находится в однофазном состоянии, и концентрация компонентов в этой фазе (т. е. в жидкости) определялась проекцией точки  $l$ . При охлаждении из сплава выделяются кристаллы  $B$  и состав жидкости изменяется в сторону увеличения в ней компонента  $A$ . При температуре  $t_1$  концентрация компонента  $B$  в жидкости определяется проекцией точки  $b$ ; это максимальное количество компонента  $B$ , которое может содержать жидкость при  $t_1$ . По достижении эвтектической температуры жидкость принимает эвтектическую концентрацию. Следовательно, при охлаждении сплава  $K$  концентрация жидкости меняется по кривой  $lC$ . Выделяющиеся кристаллы  $B$  имеют постоянный состав — это чистый компонент  $B$ , концентрация которого лежит на вертикальной оси  $BB$ .

**Первое положение правила отрезков** формулируется следующим образом.

*Чтобы определить концентрации компонентов в фазах, через данную точку, характеризующую состояние сплава, проводят горизонтальную*

*линию до пересечения с линиями, ограничивающими данную область; проекции точек пересечения на ось концентраций показывают составы фаз.*

Следовательно, для сплава  $K$  при температуре  $t_1$  составы обеих фаз определяются проекциями точек  $b$  и  $c$ , так как эти точки находятся на пересечении горизонтальной линии проходящей через точку  $a$ , с линиями диаграммы.

Количество этих фаз также можно определить. Для определения количества каждой фазы (второе положение правила отрезков) предположим, что сплав  $K$  находится при температуре  $t_1$

Если точка  $a$  определяет состояние сплава, точка  $b$  — состав жидкой фазы, а точка  $c$  — состав твердой фазы, то отрезок  $bl$  - определяет все количество сплава, отрезок  $ac$  — количество жидкости и отрезок  $ba$  — количество кристаллов.

***Второе положение правила отрезков*** формулируется так.

*Для того чтобы определить количественное соотношение фаз, через заданную точку проводят горизонтальную линию. Отрезки этой линии между заданной точкой и точками, определяющими составы фаз, обратно пропорциональны количествам этих фаз.*

Правило отрезков в двойных диаграммах состояния можно применить только в двухфазных областях. В однофазной области имеется лишь одна фаза; любая точка внутри области характеризует ее концентрацию.

Рассмотрим применение правила отрезков на диаграмме состояния системы  $Pb-Sb$  сплав с исходной концентрацией  $K$  (рис. 2.2.1.). При температуре  $T$  сплав состоит из кристаллов сурьмы и жидкости. Для определения состава фаз через заданную точку  $a$  проводят линию до пересечения с границами области диаграммы. Проекция точки  $b$  на ось концентрации покажет состав жидкой фазы, а проекция точки  $c$  - состав твердой фазы. Из диаграммы видно, что в процессе кристаллизации при понижении температуры, состав жидкой фазы изменяется по линии ликвидус и стремится к эвтектической концентрации, а состав твердой фазы остается

постоянным.

При кристаллизации изменяется и соотношение фаз: количество твердой фазы увеличивается, жидкой - уменьшается.

Обозначим вес жидкой фазы через  $Q_{ж}$ , твердой через  $Q_{ТВ}$ , а общий вес жидкой и твердой фаз через  $Q$ . Если написать уравнение моментов относительно точки  $a$ , то

$$Q_{ж} \cdot ab = Q_{ТВ} \cdot ac ; Q_{ж} / Q_{ТВ} = ac/ab ; Q_{ж} / Q = ac/bc ; Q_{ж} = ac/bc \cdot 100\% ;$$

$$Q_{ТВ} / Q = ab/bc ; Q_{ТВ} = ab/bc \cdot 100\%$$

## 2.5. ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ ДЛЯ СПЛАВОВ, ОБРАЗУЮЩИХ МЕХАНИЧЕСКИЕ СМЕСИ ИЗ ЧИСТЫХ КОМПОНЕНТОВ (I РОДА)

Оба компонента в жидком состоянии неограниченно растворимы, а в твердом состоянии нерастворимы и не образуют химических соединений.

Компоненты: вещества А и В ( $k = 2$ ).

Фазы: жидкость L, кристаллы А и кристаллы В (максимальное значение  $f = 3$ ).

Линия ACB является линией ликвидус (начало кристаллизации), линия DCE — линией солидус (конец кристаллизации). На линии AC начинают (при охлаждении) выделяться кристаллы А, а на линии CB — кристаллы В. На линии DCE из жидкости концентрации С одновременно выделяются кристаллы А и В.

Если взять какой-нибудь сплав, например сплав I, то кривая охлаждения для него будет иметь вид, показанный на рис. 2.5.2а. На этой кривой участок 0 — 1 соответствует охлаждению жидкого сплава, участок 1—2 — выделению кристаллов А, участок 2 — 2' — совместному выделению кристаллов А и В, а участок 2' — 3 — охлаждению твердого тела. На рис. 2 - 4 схематически

показано строение сплава в разные моменты кристаллизации. Из жидкости (рис. 2.5.2б) выделяются кристаллы Л, затем оставшаяся жидкость кристаллизуется с одновременным выделением кристаллов А к В. Рис. 2.5.2в показывает структуру уже закристаллизовавшегося металла; видны первичные выделения кристаллов А и механическая смесь кристаллов А + В, которые кристаллизовались одновременно.

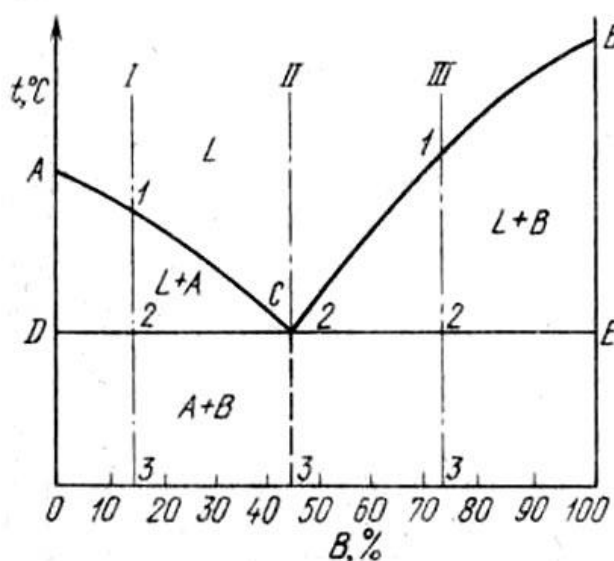


Рис. 2.5.1. Диаграмма состояния для сплавов, образующих механические смеси из чистых компонентов (I рода)

Механическая смесь двух (или более) видов кристаллов, одновременно кристаллизовавшихся из жидкости, называется эвтектикой. Кривая охлаждения сплава эвтектической концентрации показана на рис. 2.5.2б. На кривой охлаждения отрезок 0—2 соответствует охлаждению жидкого сплава, отрезок 2—2' — кристаллизации эвтектики и 2' — 3 — охлаждению закристаллизовавшегося сплава.

Кривая охлаждения заэвтектического сплава (сплав I можно назвать доэвтектическим, сплав II — эвтектическим и сплав III — заэвтектическим) изображена на рис. 2.5.2в. На кривой охлаждения отрезок 0—1 соответствует

охлаждению жидкости, отрезок 1 — 2 выделению кристаллов В, 2 — 2' — кристаллизации эвтектики 2' — 3 — охлаждению закристаллизовавшегося сплава.

Отдельные моменты охлаждения сплава показаны на схемах структур на том же рисунке. В отличие от кристаллов  $L$ , которые на рис. 2.5.2а изображались белыми, кристаллы В на рис. 2.5.2в черные.

На диаграмме состояний (см. рис. 2.5.1.) показаны области существования различных фаз. Ниже эвтектической горизонтали DCE находятся две фазы — кристаллы А и В. Левее эвтектической концентрации из жидкости выделяются вначале кристаллы А, а затем эвтектика. Поэтому структурное состояние доэвтектического сплав можно обозначить через А+ эвтектика ( $A + B$ ) и заэвтектического В+ эвтектика ( $A + B$ ), хотя и в том и в другом случае в сплаве две фазы: А и В.

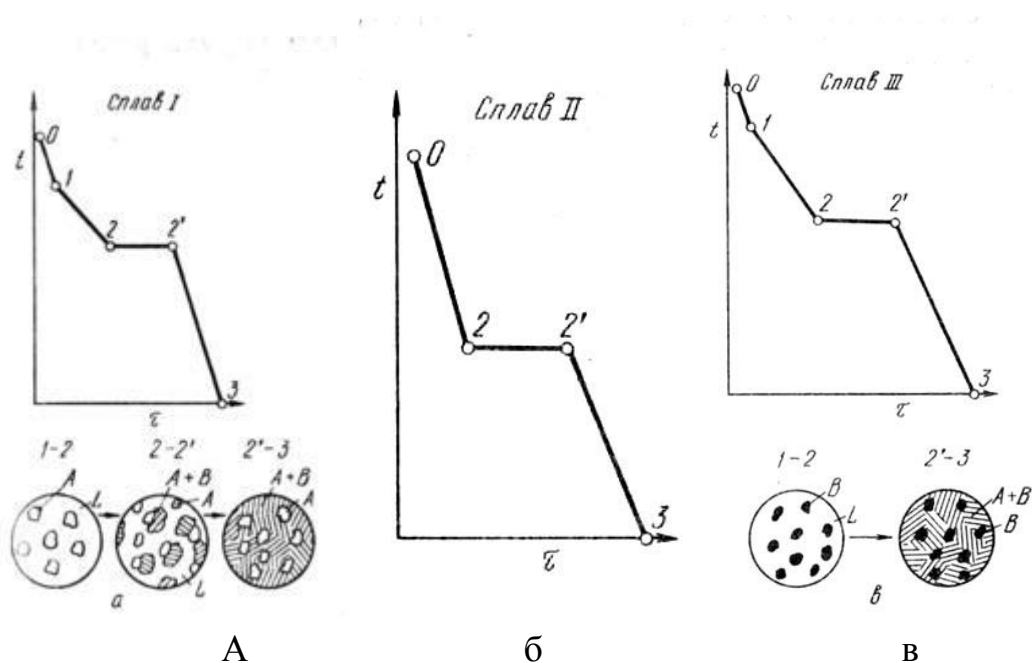


Рис. 2.5.2. Кривые охлаждения: доэвтектический сплав — а; эвтектический сплав — б; заэвтектический сплав — в;



## **2.6. ПРИМЕРЫ ПОСТРОЕНИЯ КРИВЫХ ОХЛАЖДЕНИЯ С УЧЕТОМ КОНЦЕНТРАЦИИ ЗАДАННЫХ КОМПОНЕНТОВ НА ДИАГРАММЕ СОСТОЯНИЯ Pb - Sb**

Строение сплава зависит от того, в какие взаимодействия вступают компоненты, образующие сплав. В связи с этим могут быть образованы три вида сплавов: механические смеси, твердые растворы. и химические соединения.

Сплав системы Pb - Sb относится к сплавам типа "механические смеси". Механическая смесь образуется тогда, когда компоненты, образующие сплав, взаимно растворимы в жидком состоянии, не растворимы в твердом состоянии и не образуют химических соединений.

Особенности кристаллизации сплавов типа механические смеси рассмотрим на примере сплавов Pb-Sb следующего состава:

1. 5% Sb и 95% Pb
2. 13% Sb и 87% Pb
3. 30% Sb и 70% Pb

Кривые охлаждения этих сплавов представлены на рис. 2.6.1.

Кривая охлаждения сплава из 5 % Sb и 95 % Pb состоит из четырех участков ( рис. 2.6.1a )

- 1 - охлаждение сплава в жидком состоянии;
- 2 - кристаллизация избыточного компонента (Pb) в интервале температур –  $T_1$  -  $T_2$  ;
- 3 - одновременная кристаллизация свинца и сурьмы при постоянной температуре  $T_2$ .
- 4 - охлаждение сплава в твердом состоянии.

Кристаллизация сплава начинается при температуре  $T_1$  (верхняя критическая температура) и протекает при переменной температуре до  $T_2$  (нижняя критическая температура).

В интервале температур  $T_1 \dots T_2$  из жидкости выделяются кристаллы избыточного компонента (Pb).

Если из жидкости выделяются кристаллы Pb, то концентрация Pb в жидкой фазе уменьшается, а концентрация Sb в жидкой фазе увеличивается. В процессе кристаллизации концентрация компонентов в жидкой фазе изменяется и стремится к такой концентрации (13% Sb и 87% Pb), когда оба компонента Pb и Sb из жидкости кристаллизуются совместно. Одновременная кристаллизация сурьмы и свинца протекает при постоянной температуре.

В сплаве, содержащем 13 % Sb и 87 % Pb, из жидкой фазы происходит одновременная кристаллизация обоих компонентов (рис. 2.6.1б). В результате образуется однородная механическая смесь. Структура, состоящая из двух или более твердых фаз, одновременно кристаллизовавшихся из жидкости, называется эвтектикой.

В сплаве, содержащем 30% Sb и 70% Pb, процесс кристаллизации начинается при температуре  $T_1$ . Из жидкой фазы начинают кристаллизоваться кристаллы компонента, находящегося в избытке относительно эвтектической концентрации, т.е. Sb (рис. 2.6.2). Если из жидкости выделяются кристаллы сурьмы, то в процессе кристаллизации жидкая фаза обогащается свинцом. Когда концентрация компонентов в жидкой фазе достигнет эвтектической концентрации (т.е. 13% Sb и 87% Pb), то начнется совместная кристаллизация обоих компонентов при постоянной температуре  $T_2$ .

Кривые охлаждения показывают, что все сплавы системы Pb - Sb окончательно затвердевают при постоянной температуре -  $T_2$ . Это дает основание считать, что затвердевшая при постоянной температуре -  $T_2$  часть жидкого сплава имеет постоянный состав. Такому составу соответствует сплав, содержащий 13 % Sb и 87 % Pb. Для сплавов типа механические смеси температура конца кристаллизации не зависит от концентрации

сплава, она постоянна для всех сплавов. Температура начала кристаллизации изменяется в зависимости от концентрации компонентов в сплаве.

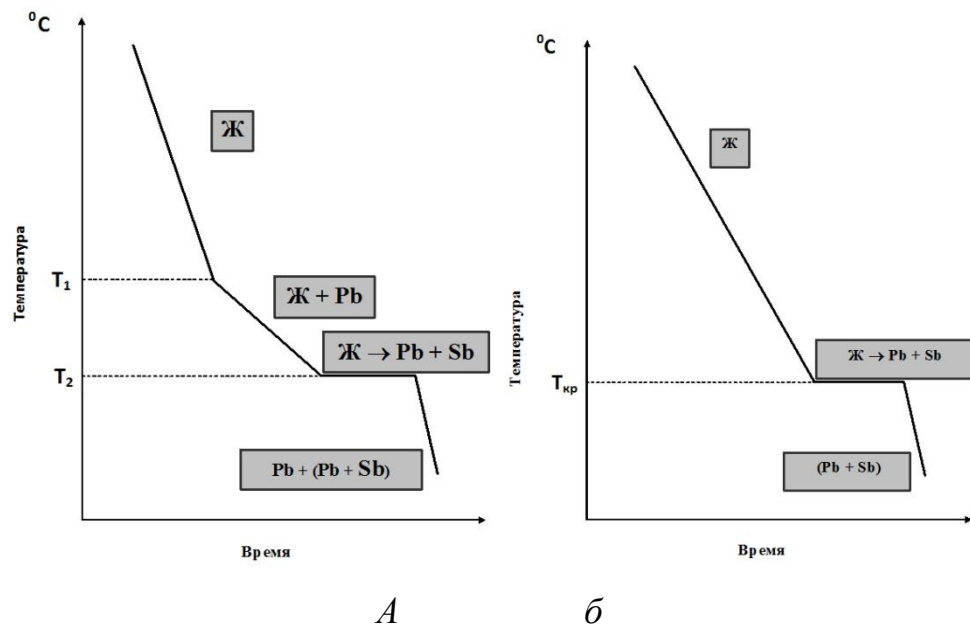


Рис.2.6.1. Кривые охлаждения сплав № 1 (доэвтектический сплав), сплав № 2 (заэвтектический сплав)

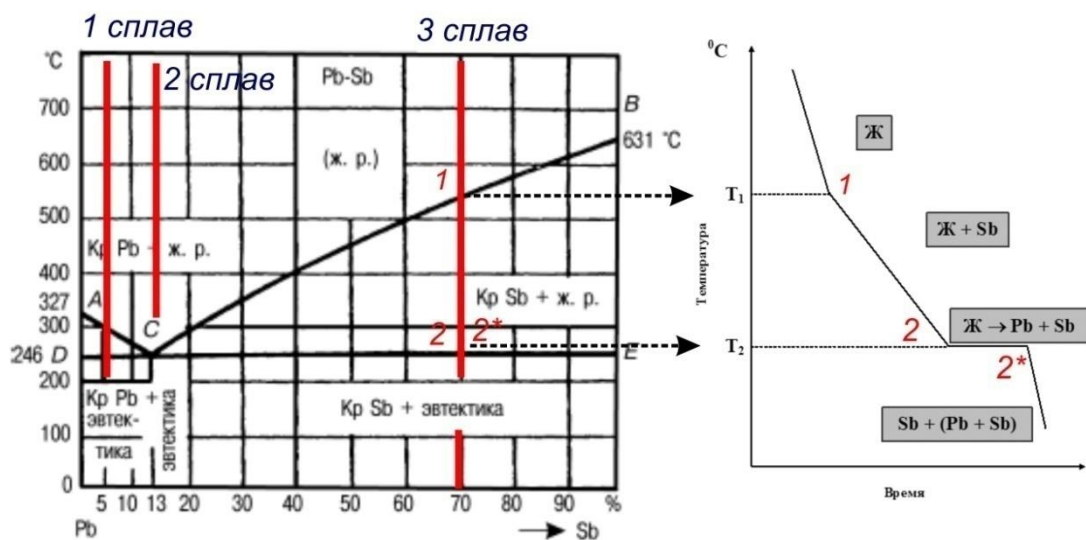


Рис.2.6.2. Диаграмма состояния  $Pb - Sb$  и кривая охлаждения заэвтектического сплава №3

## 2.7. ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Какой процесс называют кристаллизацией сплавов?
2. Что такое вариантность системы?
3. Запишите математическую связь между числом компонентов ( $K$ ), числом фаз ( $\Phi$ ) и вариантностью системы ( $C$ ). Как называется этот закон?
4. Что такое диаграмма состояния? Как происходит построение диаграммы состояния?
5. Что такое кривая охлаждения?
6. Какую линию на диаграмме состояния называют линией ликвидус?
7. Какую линию на диаграмме состояния называют линией солидус?
8. Какие сплавы называют эвтектическими?
9. Какие сплавы называют доэвтектическими?
10. Какие сплавы называют заэвтектическими?
11. Какое явление называется транскристаллизацией?
12. Опишите процесс кристаллизации.
13. Что из себя представляет «кристалл Чернова»?
14. Зарисуйте схему процесса кристаллизации.
15. Зарисуйте схему строения слитка металла после затвердевания. Какие там существуют зоны?
16. Как происходит процесс кристаллизации?
17. Зарисуйте механизм (схему) кристаллизации.
18. Зарисуйте механизм (схему) кристаллизации. Какие группы на этой схеме называются зернами?
19. Зарисуйте кривую охлаждения при кристаллизации для теоретической кривой.
20. Зарисуйте кривую охлаждения при кристаллизации металла с переохлаждением.

21. Зарисуйте кривую охлаждения при кристаллизации неметалла.
22. Что такое дендрит?
23. Зарисуйте схему строения дендрита.
24. Что такое лигатура?
25. Сделайте пример построения диаграммы состояния сплавов 1 го рода состоящей из двух компонентов
26. Как действует правило фаз для диаграммы состояния?
27. Приведите пример применения правила отрезков на диаграмме состояния сплавов.
28. Приведите первое положение правила отрезков.
29. Приведите второе положение правила отрезков.
30. Приведите пример диаграммы состояния для сплавов, образующих механические смеси из чистых компонентов (I рода)
31. Приведите примеры построения кривых охлаждения с учетом концентрации заданных компонентов на диаграмме состояния Pb – Sb.
32. Опишите особенности кристаллизации сплава следующего состава: 5% Sb и 95% Pb. Постройте для этого сплава кривую охлаждения.
33. Опишите особенности кристаллизации сплава следующего состава: 13% Sb и 87% Pb . Постройте для этого сплава кривую охлаждения.
34. Опишите особенности кристаллизации сплава следующего состава: 30% Sb и 70% Pb. Постройте для этого сплава кривую охлаждения.
35. Фамилии каких ученых Вы запомнили изучив конспект лекций.

## 2.8. ЛИТЕРАТУРА

1. Металловедение и термическая обработка стали. Справочник. Т.1, Т.2, Т.3 - М.: Металлургия, 1983. - 460 с.
2. Лахтин Ю.М. Материаловедение / [Учеб. для вузов]. Ю.М. Лахтин. М.: Машиностроение, 1980 - 493с.
3. В.С. Алексеев Материаловедение. Конспект лекций. [Электронный ресурс]. – Электронные данные. Режим доступа: <http://www.fictionbook.ru>.
4. Технология конструкционных материалов [Электронный ресурс]. – Электронные данные. Режим доступа: <http://elib.ispu.ru/library/lessons/tretjakova/index.html>.
5. Уникальные экспонаты музея военной академии РВСН имени Петра Великого. Памятники науки и техники [Электронный ресурс]. – Электронные данные. Режим доступа: [http://geraldika.net/06\\_2007\\_10.htm](http://geraldika.net/06_2007_10.htm).
6. Сергей Девятков. ProCast – виртуальное моделирование литейных технологий. Для тех, кто впереди. [Электронный ресурс]. Слпр и графика – Электронные данные. Режим доступа: <http://www.sapr.ru/Article.aspx?id=17620>.
7. Лигатуры (мастер сплавы) на основе алюминия [Электронный ресурс]. – Электронные данные. Режим доступа: [http://www.lityo.com.ua/sas\\_1\\_7\\_1.html](http://www.lityo.com.ua/sas_1_7_1.html).
8. Диаграммы состояния двойных и многокомпонентных систем на основе железа: Справ. изд. / О. А. Банных, П. Б. С. П. Будберг, Алисова и др.. - М.: Металлургия, 1986. -440 с.
9. Двойные и многокомпонентные системы на основе меди. Под ред. Шухардина С. В. Наука. / 1979. - 248 с.
10. Диаграммы состояния двойных металлических систем (под ред. Н.П. Лякишева). В 3-х тт. М.: Машиностроение, 1996-2000.
11. Гуляев А.П. Металловедение. 5-е изд. / А.П. Гуляев. - М.: Металлургия, 1977. - 648 с.
12. Гуляев А.П. Металловедение. / А.П. Гуляев. -М.: Металлургия, 1986. - 541 с.
13. Металлографические исследования [Електронний ресурс]: База данных

- микроструктур металлов и сплавов. Режим доступа:  
[http://www.microstructure.ru/ruqview2/forshura\\_4196.aspx?page=1](http://www.microstructure.ru/ruqview2/forshura_4196.aspx?page=1)
14. Справочник металлиста. в 5-и томах. ТОМ 2. Под ред. А. Г. Рахштадта и В. А. Брострема. - М.: Машиностроение, 1976.- 720 с.
  15. Системы анализа изображений и моделирования структур [Электронный ресурс]. – Электронные данные. Режим доступа: <http://www.siams.com>.
  16. Урал-М. Центр коллективного пользования. [Электронный ресурс]. – Электронные данные. Режим доступа: <http://ural-m.com/index.html>.
  17. Химическая энциклопедия [Электронный ресурс]. – Электронные данные. Режим доступа: [http://www.chemport.ru/chemical\\_encyclopedia\\_article\\_1048.html](http://www.chemport.ru/chemical_encyclopedia_article_1048.html).
  18. Тройные диаграммы [Электронный ресурс] Энциклопедия. – Электронные данные. Режим доступа: <http://www.cultinfo.ru/fulltext/1/001/008/112/348.htm>.
  19. J. Ramirez, X. Tong, Yili Lu, H.J. Diepers (Aachen), I. Steinbach (Aachen), A. Karma (NEU), and C. Beckermann Phase-Field Simulations with Convection [Электронный ресурс] Энциклопедия. – Электронные данные. Режим доступа: <http://www.icaen.uiowa.edu/~becker/solcast.html>.
  20. Общая теория сплавов. Строение, кристаллизация и свойства сплавов. Диаграмма состояния [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://supermetalloved.narod.ru/14.pdf>.
  21. Марочник сталей и сплавов [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.markmet.ru>.
  22. Кауфман. Л., Бернштейн Х. Расчет диаграмм состояния с помощью ЭВМ. Пер. с англ. / под ред. И. Л. Аптекаря, А. Я. Шиняева. / Л. Кауфман., Х. Бернштейн. - М: Мир, 1972. - 328 С.
  23. Аносов В.Я. Основы физико-химического анализа / Аносов В.Я., Озерова М.И., Фиалков Ю.Я. - М.: Наука, 1976. - 503 с.
  24. Захаров А. М. Диаграммы состояния двойных и тройных систем / А. М Захаров. — М. : Металлургия, 1978.—295 с.

25. Глазов В.М. Фазовые диаграммы простых веществ / Глазов В.М., Лазарев В.Б., Жаров В.В. - М.: Наука, 1980. - 271 с.
26. Зломанов В.П. Р-Т-х диаграммы двухкомпонентных систем. - М.: МГУ, 1980. - 152 с.
27. *Петров Д.А.* Двойные и тройные системы / *Д.А.Петров.* - М.: Металлургия, 1986. - 256 с.
28. Технология конструкционных материалов [Текст]: учебник для вузов/[А. М. Дальский, Т. М. Барсукова, Л. Н. Бухаркин и др.] ; под общ. ред. А. М. Дальского.-3-е изд., перераб. и доп.-М.:Машиностроение,1992.-447 с.:ил. .- ISBN 5217011165:166.25.
29. Технология обработки конструкционных материалов [Текст]: учебник для вузов/[П. Г. Петруха, А. И. Марков, П. Д. Беспехотный и др.] ; под ред. П. Г. Петрухи.-М.:Высшая школа,1991.-512 с.:ил. .-ISBN 5060007030:2.70.
30. Материаловедение и технология металлов [Текст]: учебник для вузов/[Г. П. Фетисов, М. Г. Карпман, В. М. Матюнин и др.] ; под ред. Г. П. Фетисова.- Изд. 6-е, доп.-М.:Высшая школа,2008.-876 с. :ил. .-ISBN 9785060044188:514.00.
31. Общая теория сплавов. Строение, кристаллизация и свойства сплавов. Диаграмма состояния [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://supermetalloved.narod.ru/l4.pdf>.



## СОДЕРЖАНИЕ

страницы

1. Краткое изложение материала рассмотренного в предыдущей лекции .....	3
2. Лекция 2. Кристаллизация металлов и сплавов диаграммы состояния сплавов. кривые охлаждения.....	6
2.1.Кривые охлаждения. Диаграмма состояния сплава 1 го рода.....	6
2.2. Пример построения диаграммы состояния сплавов 1 го рода состоящей из двух компонентов.....	24
2.3. Правило фаз.....	25
2.4. Правило отрезков.....	27
2.5. Диаграмма состояния для сплавов, образующих механические смеси из чистых компонентов (I рода).....	30
2.6. Примеры построения кривых охлаждения с учетом концентрации заданных компонентов на диаграмме состояния Pb-Sb.....	33
2.7. Вопросы для самоконтроля.....	36
2.8. Литература.....	38

## ДЛЯ ЗАМЕТОК

1. Сайт Краснодонского факультета Инженерии и Менеджмента ВНУ им. В. Даля <http://krafim.net.ua>.
2. Сайт кафедры Инженерных дисциплин <http://kidkrasnodon.at.ua>.
3. Сайт о научно-технической информации <http://researchworker.ucoz.ru>.
4. Для лучшего усвоения материала, можно посмотреть документальные фильмы о кристаллизации металлов и сплавов, размещенные по адресам:  
<http://rutube.ru/tracks/2654000.html?v=531d1ac95d16fa5e4e593a4197214d92>.  
<http://rutube.ru/tracks/2654153.html?v=2894e3cea34c9df8535e9272354d124c>.

Навчальне видання

**КОНСПЕКТ З ДИСЦИПЛІНИ**  
**ТЕХНОЛОГІЯ МЕТАЛІВ ТА МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО**  
**ЧАСТИНА 2**

**КРИСТАЛІЗАЦІЯ МЕТАЛІВ ТА СПЛАВІВ**

На російській мові  
для студентів напрямку:  
«Машинобудування»

У к л а д а ч :

Валерій Олександрович Колесніков

Редактор

Техн. редактор

Оригінал-макет      Валерій Олександрович Колесніков

Підписано до друку \_\_\_\_\_

Формат 60841/16 × Папір друкар. Гарнітура Times.

Друк офсетний. Усл. печ. л. \_\_\_\_\_. Уч.-изд. л. \_\_\_\_\_.

Тираж \_\_\_\_ примірників. Видавництво № \_\_\_\_\_. Замовлення № \_\_\_\_\_. Ціна договірна.

Видавництво Східноукраїнського національного університету

імені Володимира Даля

**Адреса видавництва:** 91034, м. Луганськ, кв. Молодіжний, 20а

Телефон: 8 (0642) 41-34-12, факс. 8 (0642) 41-31-60

E-mail: [uni@snu.edu.ua](mailto:uni@snu.edu.ua)      <http://www.snu.edu.ua>

