

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
Белорусский национальный технический университет

---

Кафедра «Техническая физика»

# ФИЗИКА. ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ В СПЛАВАХ И ТВЕРДЫХ РАСТВОРАХ

Учебно-методическое пособие для студентов специальностей  
1-36 02 01 «Машины и технологии литейного производства»,  
1-42 01 01 «Металлургическое производство  
и материалобработка (по направлениям)»

*Рекомендовано учебно-методическим объединением по образованию  
в области металлургического оборудования и технологий*

Минск  
БНТУ  
2019

УДК 538.91(075.8)

ББК 34.2я7

Ф50

А в т о р ы:

*Т. Н. Канашевич, М. А. Князев,*

*И. А. Сатилов, М. О. Шумская*

Р е ц е н з е н т ы:

кафедра физики полупроводников и наноэлектроники БГУ

(зав. каф., д-р физ.-мат. наук, профессор *В. Б. Оджаяев*);

зав. лабораторией микро- и наносенсорики ГНПО

«Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»

д-р техн. наук, профессор *Н. И. Мухуров*

Ф50 **Физика.** Фазовые переходы в сплавах и твердых растворах : учебно-методическое пособие для студентов специальностей 1-36 02 01 «Машины и технологии литейного производства», 1-42 01 01 «Металлургическое производство и материалобработка (по направлениям)» / Т. Н. Канашевич [и др.]. – Минск: БНТУ, 2019. – 40 с.  
ISBN 978-985-583-396-4.

В издании с использованием мотивационно-прикладного компонента в структуре методической системы преподавания физики на уровне высшего технического образования приведены основные теоретические сведения и практические задания, направленные на формирование у будущих инженеров знаний об основных свойствах фаз и закономерностях перехода между ними, позволяющих прогнозировать состав сплавов и твердых растворов.

Учебно-методическое пособие может быть использовано преподавателями физики и студентами, получающими высшее техническое образование в области металлургического оборудования и технологий.

УДК 538.91(075.8)

ББК 34.2я7

ISBN 978-985-583-396-4

© Белорусский национальный  
технический университет, 2019

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
1. Теоретический раздел .....	6
1.1. Плавление и кристаллизация.....	7
1.2. Полиморфизм.....	11
1.3. Сплавы.....	13
1.4. Твердые растворы.....	16
1.5. Правило фаз .....	20
1.6. Диаграммы состояний трехкомпонентных сплавов.....	21
1.7. Контрольные вопросы.....	23
2. Практический раздел.....	25
2.1. Примеры решения задач .....	25
2.2. Задачи для самостоятельного решения .....	31
Список использованных источников.....	40

## ВВЕДЕНИЕ

Данное пособие составлено с применением мотивационно-прикладного компонента методической системы, назначением которого является формирование у обучающихся устойчивой мотивации к получению профессиональных знаний и самореализации в будущем по выбранной специальности металлургического профиля [10].

Мотивационный компонент цели изучения раздела «Фазовые переходы в сплавах и твердых растворах» курса физики для студентов специальностей металлургического профиля – формирование понимания значимости основных понятий о процессах в технологии металлургического производства и их свойств. Обоснования возможности использования знаний об основных свойствах фаз и закономерностях перехода между ними для прогнозирования состава сплавов и твердых растворов, а также обеспечения возможности решения реальных проблемных производственных ситуаций в металлургии с помощью полученных предметных знаний.

Областью применения полученных знаний и навыков является технология и машины металлургического производства, технологии обработки металлов.

Примерами конкретных производственных ситуаций, для решения которых необходимы знания об изучаемых явлениях, являются:

1. Инженеру (мастеру) металлургического профиля необходимо определить возможность закаливания сплава заданного состава на основе приведенной в справочнике диаграммы состояния указанной многокомпонентной системы (задача № 8 практического раздела).

2. Инженеру (мастеру) литейного цеха необходимо внести изменения в технологию изготовления отливок с использованием земляных форм с целью улучшения механических свойств отливок за счет обеспечения перехода от крупнозернистой структуры к мелкозернистой (задача № 8 для самостоятельного решения).

3. Инженеру (мастеру) необходимо определить структуру металла при заданных степенях переохлаждения по известным из справочника кривым влияния степени переохлаждения на число центров кристаллизации и скорость роста кристаллов (задача № 9 для самостоятельного решения).

4. Технологию литейного цеха необходимо определить, возможна ли кристаллизация двухкомпонентного сплава при постоянной тем-

пературе и что для этого необходимо (задача № 10 для самостоятельного решения).

5. Технологию литейного цеха необходимо определить количество жидкой фазы у сплава заданного состава по диаграмме состояния сплава, известной из справочника (задача № 12 для самостоятельного решения).

6. Технологию необходимо определить возможность закаливания стали заданного состава по диаграмме состояний, известной из справочника (задача № 15 для самостоятельного решения).

В комплект практико-ориентированных заданий входят задания для самостоятельного решения № 8, 9, 10, 12, 15, представленные в практическом разделе.

В набор заданий творческого характера включены задания для самостоятельного решения № 3, 6, 7, требующие глубокого усвоения и уверенного владения материалом теоретического раздела.

## 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

В рамках термодинамического подхода *фазой* называется совокупность однородных частей какой-либо системы, характеризующихся одинаковыми свойствами. Например, вода и плавающий в ней лед образуют систему, состоящую из двух фаз. Известны вещества, кристаллические модификации которых представляют различные фазы. Так, алмаз и графит являются разными твердыми фазами углерода. Процесс превращения одной фазы системы в другую называется *фазовым переходом*. Для таких переходов характерной особенностью является скачкообразность изменения состояния системы. Примерами фазовых переходов являются изменения агрегатного состояния вещества, под которыми принято понимать их твердое, жидкое и газообразное состояния. Твердое и жидкое состояния называют *конденсированными*. Если вещество переходит из твердого состояния в газообразное, то такой переход называют *испарением*. Обратный переход называют *конденсацией*. Переход из твердого состояния в газообразное называют *сублимацией* (возгонкой). Переход из твердого состояния в жидкое называют *плавлением*, а обратный переход *перекристаллизацией* (затвердеванием).

Различные фазы одного и того же вещества могут соприкасаться друг с другом и при этом находиться в равновесии. Такое равновесие имеет место только в определенном диапазоне температур и каждому значению температуры  $T$ , при котором существует равновесие, соответствует некоторое значение давления  $p$ . Одновременное равновесие более чем трех фаз одного вещества невозможно. Три фазы одного и того же вещества могут находиться в равновесии только при одном значении давления и температуры, которым на диаграмме  $(p, T)$  соответствует так называемая тройная точка. Если равновесие состояния двух фаз на диаграмме  $(p, T)$  представляется линией, то тройная точка соответствует точке пересечения взятых попарно кривых равновесия фаз. Если при фазовом переходе происходит выделение или поглощение некоторого количества тепла (так называется теплота перехода), то такой переход называется *фазовым переходом первого рода*. Существуют также фазовые переходы второго рода. Они происходят между различными кристаллическими модификациями вещества и характеризуются отсутствием теплоты перехода. Кроме того, переход в сверхпроводящее состояние без воздействия внешнего магнитного

поля и переход между двумя фазами жидкого гелия He-I и He-II также является фазовым переходом второго рода.

### 1.1. Плавление и кристаллизация

При нагревании твердого тела его температура растет и увеличивается как кинетическая, так и потенциальная энергия атомов (или молекул), составляющих это тело. При этом возрастает амплитуда колебаний атомов. Атомы удаляются друг от друга на большие расстояния и сближаются на меньшие расстояния. В результате энергия взаимодействия электрических зарядов возрастает. Дальнейшее увеличение температуры вызывает столь значительное увеличение амплитуды колебаний атомов, что в определенный момент начинается разрушение кристаллической решетки. Дальний порядок расположения атомов исчезает, решетка разрушается. Происходит процесс плавления кристалла, который носит изотермический характер. Пока происходит плавление, температура не меняется, потому что все поступающее тепло расходуется на распад кристаллической решетки. Теплота, необходимая для перехода кристаллического твердого тела в жидкое состояние, называется *теплотой плавления*. После завершения плавления образуется жидкая фаза и при дальнейшем нагревании ее температура повышается.

Для аморфных тел при равномерном нагревании температура тела непрерывно возрастает, и определенной температуры перехода в жидкую фазу нет. Плавление происходит непрерывно. Можно только определить интервал температур, в пределах которого происходит размягчение аморфного тела.

Если в определенный момент прекратить нагревать жидкость, которая образовалась при плавлении кристаллического тела, то ее температура начнет понижаться и по достижении некоторого значения начнется процесс обратный плавлению – *кристаллизация*. Этот процесс начинается при такой температуре жидкости, когда жидкая и твердая фазы могут находиться в равновесии при данном давлении. Данный процесс сопровождается выделением так называемой теплоты кристаллизации, которая равна теплоте плавления. В процессе кристаллизации, пока формируется кристаллическая решетка, температура не меняется. По завершении кристаллизации тело начинает охлаждаться.

Кристаллизация в определенной мере подобна конденсации. Она происходит в двухфазной среде плавления, в которой уже существуют зародыши (центры кристаллизации) твердой фазы в виде мельчайших кристалликов. Разрастаясь, эти зародыши образуют поликристаллическое твердое тело.

Если же жидкая фаза вещества не содержит зародышей новой фазы, то жидкость можно охладить ниже температуры кристаллизации. Такое состояние является *метастабильным*, и в нем не образуются кристаллики твердой фазы. Однако если жидкую фазу сильно переохладить, то произойдет спонтанное образование зародышей и жидкость начнет кристаллизироваться.

Возможна ситуация, в которой даже при большом переохлаждении молекулы жидкой фазы оказываются столь малоподвижны, что метастабильное состояние сохранится очень долго. В таких случаях жидкая фаза имеет малую текучесть и фактически представляет собой аморфное твердое тело.

Качественная картина плавления и кристаллизации вещества представлена на рис. 1.1.

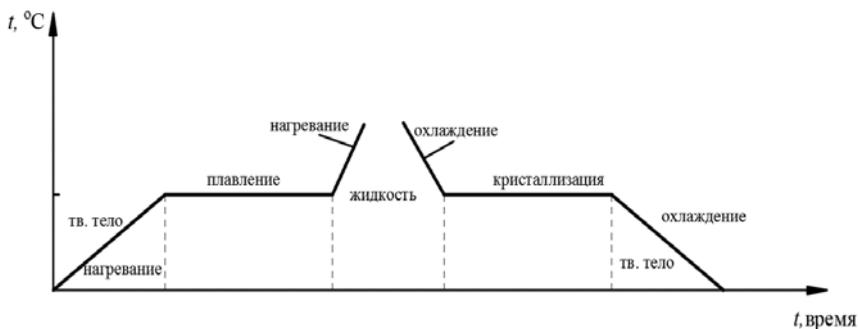


Рис. 1.1. Диаграмма плавления и кристаллизации

Состояния вещества и фазовые переходы в нем описываются при помощи диаграмм состояний. Они строятся в координатах  $p$ ,  $T$  и описывают зависимость между температурой фазового перехода и давлением в виде кривых испарения (КИ), плавления (КП) и сублимации (КС), которые разделяют пространство диаграммы на три области, соответствующие условиям существования различных фаз вещества: твердой (ТТ), жидкой (Ж) и газообразной (Г). Пример такой диаграммы приведен на рис. 1.2.

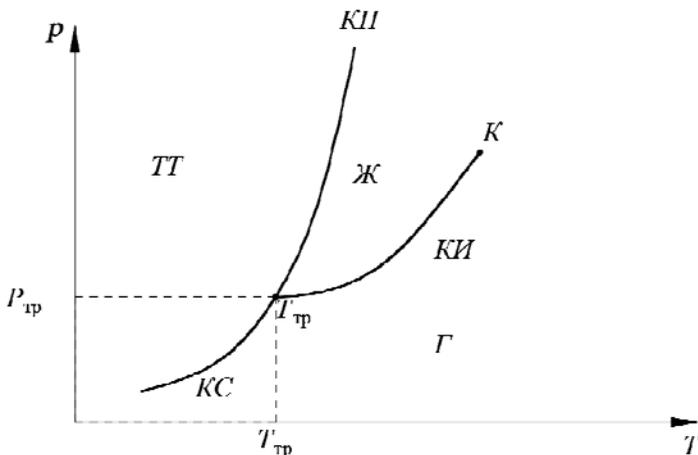


Рис. 1.2. Диаграмма состояний

Кривые на диаграмме называются *кривыми фазового равновесия*. Каждая точка на любой из них соответствует условиям равновесия двух совместно существующих фаз.

Зависимость между температурой фазового перехода и давлением определяется формулой *Клапейрона-Клаузиуса*:

$$dT = T \frac{V_2 - V_1}{\lambda} dp, \quad (1.1)$$

где  $\lambda$  – теплота фазового перехода (теплота испарения, теплота плавления и т. п.);

$V_2$  – удельный объем вещества во второй фазе;

$V_1$  – удельный объем вещества в первой фазе;

$T$  – температура фазового перехода.

В соответствии с формулой (1.1), поскольку  $\lambda$  и  $T$  являются положительными, знак производной  $dp/dT$  определяется тем, как изменяется объем (возрастает или уменьшается) при фазовом переходе. Испарение жидкости или твердого тела сопровождается увеличением объема, поэтому для кривой испарения и кривой сублимации  $\frac{dp}{dT} > 0$ . Это означает, что при повышении давления

увеличивается температура и наоборот. При плавлении объем, как правило, возрастает и  $\frac{dp}{dT} > 0$ , то есть увеличение давления сопровождается повышением температуры плавления. В то же время для ряда веществ объем жидкой фазы меньше, чем объем твердой. Наиболее известным из таких веществ является вода. К ним также относятся чугун, германий, висмут, сурьма. В этом случае  $\frac{dp}{dT} < 0$  и рост давления приводит к уменьшению температуры плавления.

Точка  $T_{тр}$  (рис. 1.2), в которой пересекаются кривые сублимации, плавления и испарения называется *тройной точкой*. Ей соответствуют температура  $T_{тр}$  и равновесное давление  $p_{тр}$ , при которых три фазы вещества одновременно существуют в равновесном состоянии. Любое чистое вещество имеет только одну тройную точку.

Рассмотрим вещество в жидком состоянии, находящееся в равновесии с насыщенным паром. Не изменяя объема, будем понижать температуру жидкости. Данный процесс будет сопровождаться соответствующим уменьшением давления и продолжаться до достижения температуры кристаллизации. В ходе процесса кристаллизации температура и давление не меняются, отводимое при этом тепло является теплом, выделяемым при кристаллизации.

По завершении кристаллизации твердая и газообразная фазы будут находиться в равновесии. Если и дальше уменьшать температуру, будет уменьшаться давление паров, находящихся в равновесии с кристаллической фазой. Точка, соответствующая состоянию вещества, будет перемещаться вниз по кривой сублимации.

На рис. 1.2 видно, что кривая испарения оканчивается в критической точке  $K$ . Следовательно, возможен непрерывный переход из жидкого в газообразное состояние и обратно в обход критической точки, без пересечения кривой испарения. Это означает, что в таком непрерывном переходе фазовые превращения отсутствуют. Такое поведение возможно, так как различия между жидкой и газообразной фазами являются чисто количественными. Переход же из кристаллического состояния в жидкое (или газообразное) может быть только скачкообразным. Эти фазы вещества различаются не только количественно, но и качественно: они различаются симметрией внутреннего строения. Любое свойство симметрии системы или есть,

или его нет. Таким образом, свойство симметрии может появиться или исчезнуть только скачком. Поэтому кривые плавления и сублимации не пересекаются. Кривая плавления стремится к бесконечности, а кривая сублимации – к началу координат ( $p = 0, T = 0$ ).

## 1.2. Полиморфизм

Твердые вещества могут находиться в разных кристаллических модификациях, которые различаются строением кристаллической решетки. Существование нескольких твердых фаз вещества называется *полиморфизмом*. Твердый углерод, в зависимости от строения кристаллической решетки, будет или графитом, или алмазом. Существует ряд разновидностей льда. Твердое железо может находиться в четырех различных модификациях ( $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ - и  $\delta$ -железо). Азотнокислый аммонит имеет пять кристаллических фаз. Полиморфные превращения у твердых тел сопровождаются изменением кристаллической решетки и выделением (или поглощением) теплоты фазового перехода. Они происходят при изменении температуры и давления, а также являются фазовыми переходами. Полиморфизм возможен и в случае некоторых жидкостей (например, у расплавленной серы). В жидком состоянии полиморфные превращения сопровождаются или изменением строения молекулярных групп (полимеризация), или изменением строения самих молекул (изомерия).

Если вещество имеет несколько кристаллических модификаций, то его диаграмма состояний будет иметь более сложный вид. Рассмотрим вещество с двумя кристаллическими модификациями, которые обозначим как Тв. I и Тв. II. Его диаграмма состояний показана на рис. 1.3.

В данном случае существуют уже две тройные точки ( $Tr.$  и  $Tr.'$ ). В точке  $Tr.$  в равновесном состоянии находятся жидкость, газ и первая кристаллическая модификация, а в точке  $Tr.'$  – жидкость, газ и вторая кристаллическая модификация.

Полиморфные превращения между разными кристаллическими модификациями вещества сопровождаются возникновением метастабильных состояний. Если переохлаждение жидкости возможно при строгом соблюдении ряда условий, то задержка фазовых переходов в твердом состоянии и существование кристаллических модификаций в условиях, в том числе и неприемлемых для них,

распространено достаточно широко. Это может быть объяснено тем, что ионы в кристалле расположены достаточно тесно, что ограничивает их тепловое движение малыми колебаниями и затрудняет преобразование решетки из одной модификации в другую. Чтобы ускорить этот процесс, необходимо нагревать тело, делая тепловое движение более интенсивным.

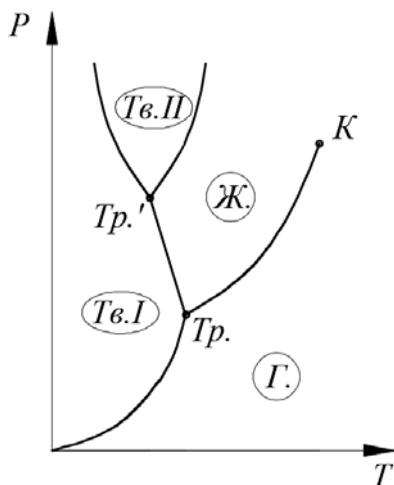


Рис. 1.3. Диаграмма состояний для вещества с двумя кристаллическими модификациями

Поликристаллическая структура твердой фазы является метастабильной, по сравнению с монокристаллической. Вследствие этого, если нагревать мелкокристаллическое тело, оно становится крупнокристаллическим, так как одни кристаллы увеличиваются за счет других (явление рекристаллизации).

Полиморфное превращение происходит значительно быстрее, если в старой фазе имеются «зародыши» новой. Наглядным примером роли таких «зародышей» служит явление «оловянной чумы» (превращение обычного белого олова, имеющего тетрагональную структуру, в порошкообразное серое олово с кубической структурой). При нормальном атмосферном давлении и температуре 18 °C обе модификации олова находятся в равновесии. Если температура выше 18 °C – устойчиво белое олово, если ниже – серое. Белое оло-

во может существовать и на морозе, однако после потепления, если в нем имеются подходящие «зародыши», может рассыпаться в порошок. Скорость превращения белого олова в серое максимальна при 0 °С и резко убывает при понижении температуры.

Замедление перестройки кристаллической решетки при низких температурах приводит к существованию модификаций, которые вообще никогда не являются устойчивыми фазами. Такие модификации не изображаются на фазовой диаграмме, поскольку на ней показаны только устойчивые состояния. Данная ситуация имеет место при закалке стали.

Твердый раствор углерода в  $\gamma$ -железе (аустенит) устойчив при температурах 700–900 °С (в зависимости от содержания углерода в стали). При более низких температурах он должен был бы распаться. Но если сталь очень быстро охладить (закалка), то аустенит не распадается, а превращается в игольчатые кристаллы новой фазы – твердый раствор с тетрагональной решеткой (мартенсит). Эта новая фаза характеризуется очень высокой твердостью, она всегда метастабильна и распадается при медленном нагреве до 250–300 °С (отпуск).

### 1.3. Сплавы

В технике, особенно в машиностроении, чистые металлы применяются не столь часто. Исключительно велика роль сплавов. Это связано с тем, что сплавам можно придать те свойства, которые необходимы, и эти свойства могут быть гораздо выше свойств чистых металлов.

Если понижать температуру жидкого раствора, то при определенной температуре начинается процесс кристаллизации. Свойства образующейся новой фазы вещества зависят от компонентов раствора. Если твердая фаза образуется из смеси кристалликов различных компонентов вещества, то такая твердая фаза называется *сплавом*. Процесс протекания кристаллизации определяется процентным соотношением компонентов в жидком растворе. В общем случае при некоторой определенной температуре начинается кристаллизация только одного из компонентов. И только при одном определенном соотношении между компонентами начинается их одновременная кристаллизация. Такой состав называется *эвтектическим*, а получающийся из него сплав – *эвтектическим сплавом* или *эвтектикой*.

Рассмотрим сплав, состоящий из двух компонентов (бинарный сплав). Для такого сплава диаграмма состояния представлена на рис. 1.4. Точка Э соответствует эвтектическому составу сплава. Если такой раствор охладить, то при температуре  $T_3$  начинают одновременно появляться кристаллы обоих компонентов  $A$  и  $B$ .

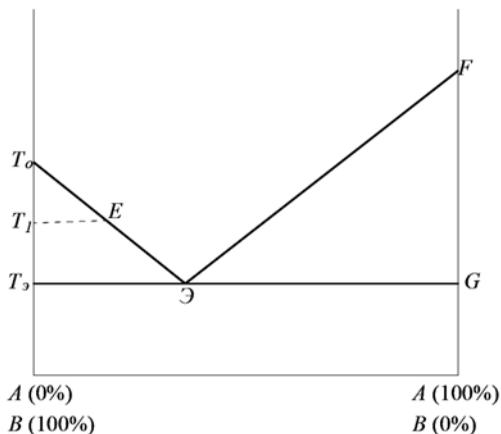


Рис. 1.4. Диаграмма состояний бинарного сплава

При этом процесс кристаллизации протекает при постоянной температуре. Если рассматривать плавление такого сплава, то все процессы будут идти в обратном направлении.

Отличие жидкой фазы вещества от эвтектического раствора приводит к изменению процесса кристаллизации. Если жидкая фаза обогащена, например, компонентом  $B$ , по сравнению с эвтектическим составом (точка  $E$  на диаграмме), то кристаллизация будет проходить уже при температуре  $T_1$ , но появляться будут только кристаллы компонента  $B$ . В результате возникает ситуация, в которой жидкая фаза меняет свой состав, обогащаясь компонентом  $A$ . Таким образом, раствор становится более похожим на эвтектический и его температура кристаллизации уменьшается. В процессе кристаллизации изменяются условия кристаллизации по линии  $EЭ$ . После того, как будет достигнута точка Э, дальнейшая кристаллизация протекает при постоянной температуре. Следовательно, если состав фазы отличается от эвтектического, кристаллизация протекает

в определенном интервале температур (а не при постоянной температуре). При этом твердая фаза будет содержать больше кристаллов той компоненты, которая преобладала в жидком растворе. Кристаллы того компонента, содержание которого было ниже, будут более мелкими вкраплениями между кристаллами того компонента, содержание которого было выше. На фазовой диаграмме, представленной на рис. 1.4, имеются четыре области. Линия  $T_0ЭF$  разделяет жидкое состояние (сверху) от двухфазного, в котором одновременно существуют жидкая и твердая фаза. Ниже линии  $T_0Э$  находится область двухфазных состояний, когда преобладает компонент  $B$ ; ниже линии  $ЭG$  лежит область двухфазных состояний с преобладанием компонента  $A$ . Горизонтальная линия  $T_3G$  отделяет область двухфазных состояний от области твердой фазы, которая располагается ниже этой линии. Линия  $T_0ЭF$  называется линией ликвидуса, а линия  $T_3ЭG$  – линией солидуса.

В качестве примера рассмотрим металлический сплав свинец–сурьма. Свинец плавится при температуре  $332\text{ }^{\circ}\text{C}$ , точка плавления сурьмы –  $630\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Ясно, что свинец соответствует компоненту  $B$ , а сурьма – компоненту  $A$  (см. рис. 1.4). Для сплава, содержащего 90 % свинца и 10 % сурьмы, кристаллизация начнется не при  $332\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а при  $290\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Процесс кристаллизации будет проходить в некотором интервале температур и закончится при  $240\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Для чистого вещества (а не для сплава) процесс кристаллизации происходит при постоянной температуре и на диаграмме фазовых состояний изображается горизонтальной линией (см. рис. 1.1).

На рис. 1.5 представлена диаграмма кристаллизации для сплава. Сначала температура уменьшается так же, как для чистого вещества. Однако затем в некоторой точке скорость снижения температуры уменьшается, хотя и не до нуля.

Достигнув значения  $240\text{ }^{\circ}\text{C}$ , сплав затвердевает как чистое вещество. Причем при температуре  $290\text{ }^{\circ}\text{C}$  в нем начинают формироваться кристаллики свинца; при этом концентрация сурьмы в жидкой фазе возрастает.

На рис. 1.5 видно, что кривая, изображающая этот процесс, перемещается из точки  $A$  не вниз, а вправо. Выпадение кристаллов свинца происходит до точки эвтектики. Это состояние получается, когда свинца 86 %, а сурьмы 14 %. Затем сплав затвердевает целиком. Если взять сплав, обогащенный сурьмой, то будет иметь место

точно такой же процесс. При понижении температуры жидкой фазы начнут появляться кристаллы сурьмы и возрастет концентрация свинца. Когда будет достигнута эвтектическая концентрация, сплав будет затвердевать целиком.

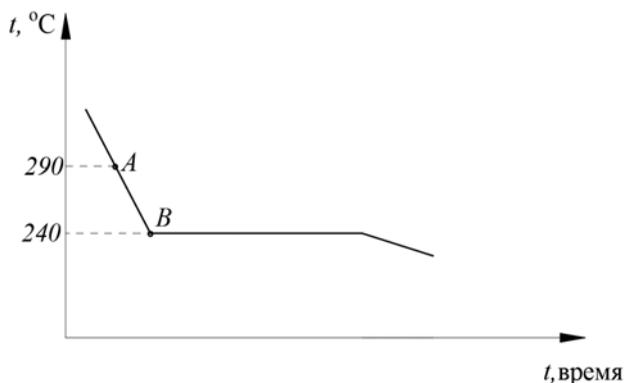


Рис. 1.5. Диаграмма кристаллизации бинарного сплава

## 1.4. Твердые растворы

Если в процессе кристаллизации образуется твердая фаза, состоящая из кристаллов, построенных из атомов всех компонент вещества, то такая фаза называется *твердым раствором*. Среди них различают твердые растворы замещения, внедрения и вычитания. В случае твердого раствора замещения часть атомов в кристаллической решетке одного из компонентов замещается атомами другого. В твердых растворах атомы одного из компонентов внедряются между узлами кристаллической решетки другого компонента. В твердых растворах вычитания происходит не только внедрение или замещение атомов одного компонента атомами другого, но и сохраняется решетка другого компонента с пустыми местами в части узлов.

При кристаллизации жидкой фазы твердые растворы образуют сплавы следующих металлов: висмут и сурьма, медь и цинк, медь и золото и ряд других. Диаграмма состояний для таких соединений имеет специфический вид.

Рассмотрим фазовую диаграмму бинарного сплава висмут–сурьма (рис. 1.6).

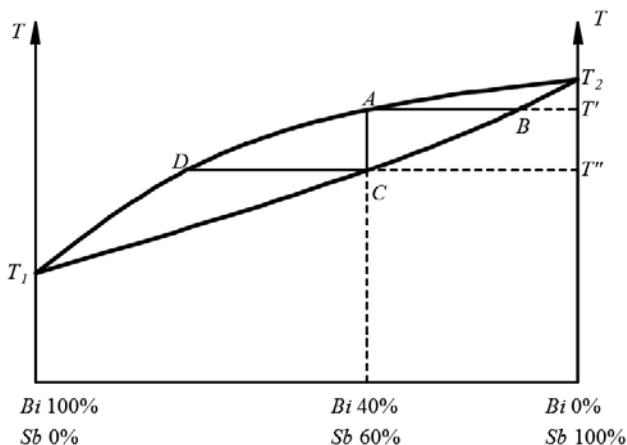


Рис. 1.6. Диаграмма состояний твердых растворов системы висмут–сурьма

Линия  $T_1DAT_2$ , отделяющая жидкую фазу от области, представляющей смесь твердой и жидкой фаз, состоит не из двух пересекающихся в эвтектической точке прямых (как на рис. 1.4), а плавно идет от точки плавления сурьмы  $T_2$  к точке плавления висмута  $T_1$ . Линия  $T_1CBT_2$ , отделяющая область твердой фазы от области смеси твердой и жидкой фаз, не проходит горизонтально, как на рис. 1.4, и является плавной кривой. Пусть сплав содержит 40 % висмута и 60 % сурьмы. При охлаждении расплава в точке  $A$  начинается кристаллизация. Так как мы рассматриваем твердый раствор, кристаллы сурьмы или висмута не образуются. Зато сразу начинается образование кристаллов, содержащих и атомы висмута, и атомы сурьмы. При температуре  $T'$  состав этих кристаллов определяется абсциссой точки  $B$ . выпадающие кристаллы более обогащены сурьмой, а оставшаяся жидкая фаза более богата висмутом. При дальнейшем понижении температуры точка, определяющая состав выделяющихся кристаллов, перемещается по линии солидуса от  $B$  влево и из раствора выпадают кристаллы все более богатые висмутом. Когда вышеуказанная точка достигнет  $C$ , процесс кристаллизации завершится. Точка, изображающая начало процесса кристаллизации, перемещалась из  $A$  в  $D$ . Состав сформировавшегося твердого раствора зависит от скорости охлаждения. При быстром охлаждении кристаллы имеют разные составы, соответствующие точкам между  $B$

и  $C$ . Концентрации кристаллов и жидкости выравниваются при медленном охлаждении, и в момент затвердевания все кристаллы имеют одинаковый состав, определяемый точкой  $C$ .

Если нагревать твердый раствор, то плавление начинается в точке  $C$  при температуре  $T''$ . При этом состав образующейся жидкой фазы будет определяться точкой  $D$ . При повышении температуры до  $T'$ , точка, соответствующая составу плавящихся кристаллов, переходит из  $C$  в  $B$ .

Диаграмма состояния значительно усложняется, если число фаз возрастает до трех. Рассмотрим бинарный сплав железо–углерод, который относится к наиболее широко применяемым в промышленности (техническое железо и все сорта стали). Количество углерода в таком сплаве невелико и не превышает нескольких процентов.

Из рис. 1.7 видно, что при малом содержании углерода при температурах до  $910\text{ }^\circ\text{C}$  железо имеет объемноцентрированную кубическую решетку ( $\alpha$ -фаза). До  $769\text{ }^\circ\text{C}$  железо является ферромагнетиком; при более высоких температурах оно превращается в парамагнетик. Данный переход из ферромагнитного в парамагнитное состояние, происходящий при температуре  $760\text{ }^\circ\text{C}$  (точка Кюри), является *фазовым переходом второго рода*. При  $910\text{ }^\circ\text{C}$   $\alpha$ -фаза превращается в  $\gamma$ -фазу с гранцентрированной кубической решеткой. Превращение  $\alpha$ -железа в  $\gamma$ -железо является *фазовым переходом первого рода* и сопровождается поглощением теплоты. При  $1401\text{ }^\circ\text{C}$   $\gamma$ -фаза превращается в  $\delta$ -фазу, имеющую объемноцентрированную кубическую решетку. При увеличении концентрации углерода в сплаве температура превращения  $\alpha$ -фазы в  $\gamma$ -фазу снижается, а температура превращения  $\gamma$ -фазы в  $\delta$ -фазу повышается. При малых концентрациях углерода (не более  $0,025\%$  (весовые проценты)) атомы углерода внедряются в решетку  $\alpha$ -фазы железа. Такой сплав называется *ферритом*. При более высоких концентрациях внедрение углерода происходит путем образования химического соединения  $\text{Fe}_3\text{C}$ , называемого *цементитом*. На рис. 1.7 область, соответствующая ферриту, лежит между осью ординат и линией  $ABC$ . Ниже линии  $BDM$  находится  $\alpha$ -фаза железа и цементита, а выше этой линии – область  $\gamma$ -фазы железа и цементита. При концентрации углерода до  $2\%$  и высоких температурах устойчивой фазой является аустенит (твердый раствор внедрения углерода в  $\gamma$ -фазу железа). Если концентрацию углерода увеличить, то устойчивой фазой будет сплав  $\gamma$ -фазы железа и цементита. На рис. 1.7 область этой фазы ограничена линией  $DMPE$ .

При более высоких температурах существует эвтектическая область, область  $\gamma$ -фазы и жидкого раствора ограничена линией  $PJH$ . Железо с содержанием углерода 4,3 % является эвтектическим сплавом (температура плавления 1130 °С). При быстром охлаждении аустенитной  $\gamma$ -фазы образуется мартенсит – перенасыщенная углеродом  $\alpha$ -фаза с характерной кристаллической структурой (тетрагональная решетка). Мартенсит характеризуется высокой твердостью.

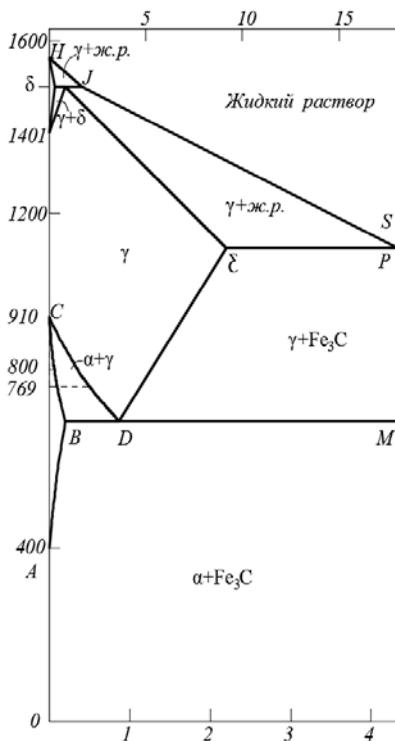


Рис.1.7. Диаграмма состояний системы сплавов углерод железо

Сплавы железа с углеродом при концентрации последнего выше 2 %, содержащие другие элементы (Si, Mn, P, S и т. д.), называются *чугунами*. Эти сплавы используются для переработки в сталь или в специальные чугуны (при добавлении небольших количеств различных элементов).

## 1.5. Правило фаз

Пусть термодинамическая система состоит из нескольких фаз. Состав фазы можно охарактеризовать количеством химически однородных веществ, из которых она состоит. В случае неравновесной системы эти количества могут измениться независимо друг от друга. Для равновесной термодинамической системы между веществами в различных фазах выполняются некоторые определенные количественные соотношения. Поэтому не обязательно указывать содержание всех веществ в фазе, а достаточно указать содержание только некоторых. Количество остальных веществ определяется условиями термодинамического равновесия.

Минимальное число химически однородных веществ, задание которых однозначно определяет состав любой фазы термодинамически равновесной системы, называется *числом компонентов системы*, а сами вещества называются *компонентами системы*. Количество компонентов может задаваться произвольным образом независимо друг от друга. Выбор компонентов, вообще говоря, является неоднозначным. Важно только их число. Если число независимых компонентов равно единице, то система называется *однокомпонентной*; если двух – *двухкомпонентной (бинарной)* и т. д.

Каждый компонент распределен некоторым образом по фазам системы. Для фаз, граничащих друг с другом, компоненты могут переходить из одной фазы в другую. В состоянии термодинамического равновесия компоненты вполне определенным образом распределены по фазам. Пусть в системе установилось термодинамическое равновесие. Нужно, чтобы оно сохранилось по отношению к переходу любого компонента из одной фазы в другую. Поэтому естественно допустить, что количество компонентов во всех фазах системы не меняется, за исключением одного, который может переходить из одной фазы в другую. В состоянии термодинамического равновесия компоненты вполне определенным образом распределены по фазам. Следовательно, систему можно рассматривать как однокомпонентную и применять к ней условие фазового равновесия для химически однородной однокомпонентной системы. Согласно этому условию, если фазы граничат друг с другом, то в состоянии равновесия должны быть равны между собой удельные термодинамические потенциалы каждого компонента во всех фазах.

Пусть в системе  $k$  компонентов, которые входят в состав  $n$  фаз, фазы находятся в состоянии равновесия. Состояние фазы определяется ее составом, а также давлением и температурой. Тогда, чтобы удельные термодинамические потенциалы были равны между собой, должно выполняться правило фаз Гиббса: число фаз, которые могут находиться в равновесии между собой, может превышать число компонентов не более чем на два, то есть  $n \leq k + 2$ .

## 1.6. Диаграммы состояний трехкомпонентных сплавов

Метод построения диаграмм состояния для трехкомпонентных сплавов предложен Д. Гиббсом и называется *методом треугольника Гиббса*. В данном методе используется следующая геометрическая теорема: сумма длин перпендикуляров, опущенных из любой точки, взятой внутри равностороннего треугольника, на его стороны равна высоте этого треугольника. Если принять высоту треугольника за 100 %, то длина каждого из трех перпендикуляров соответствует процентному содержанию соответствующей компоненты сплава. Площадь внутри треугольника дает область составов, обладающих определенными свойствами. В качестве примера на рис. 1.8 показана диаграмма состояний трехкомпонентного сплава железо–никель–хром.

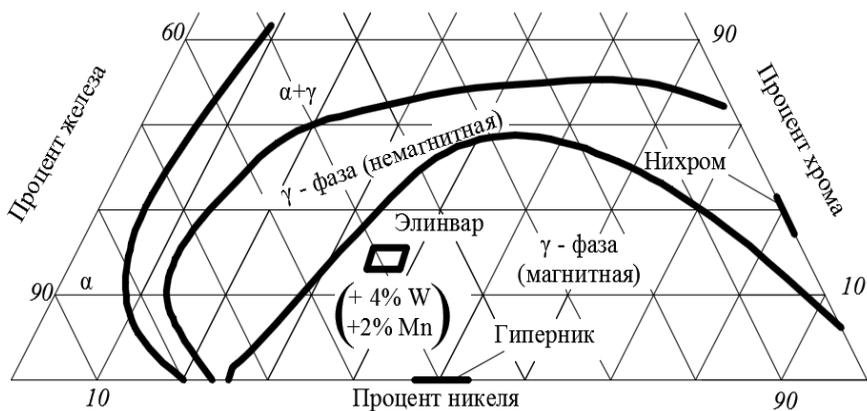


Рис. 1.8. Диаграмма состояний системы железо–никель–хром

Рассмотрим порядок построения диаграмм состояний для трехкомпонентных сплавов (рис. 1.9). Вершины  $A$ ,  $B$  и  $C$  треугольника соответствуют стопроцентному содержанию компонент  $a$ ,  $b$ , и  $c$ . К двум сторонам треугольника восстанавливают перпендикуляры, длины которых равны значениям соответствующих компонент сплава, взятым в долях высоты треугольника, принятой за единицу (или 100 %). Длина перпендикуляра к стороне  $AB$  равна содержанию компоненты  $c$ , перпендикуляр к стороне  $CB$  равен содержанию компоненты  $a$ .

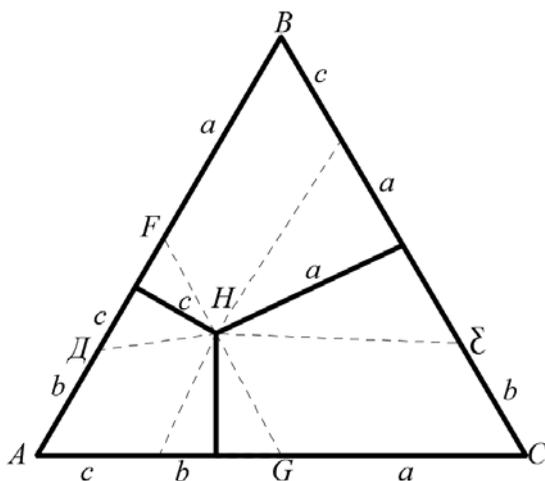


Рис. 1.9. Построение диаграммы состояний трехкомпонентной системы (треугольник Гиббса)

Через концы перпендикуляров проводят прямые линии параллельно сторонам, из которых восстановлены перпендикуляры. Точка  $H$  пересечения этих прямых соответствует сплаву данного состава. Перпендикуляр из точки  $H$  к стороне  $AC$  равен содержанию компоненты  $b$ . Ясно, что прямая, параллельная одной из сторон треугольника, изображает сплавы с постоянной концентрацией той компоненты, 100 % которой изображает вершина, лежащая против этой прямой.

## 1.7. Контрольные вопросы

1. Что называется фазой вещества?
2. Что называется фазовым переходом первого рода?
3. Приведите примеры фазовых переходов первого рода.
4. Что называется фазовым переходом второго рода?
5. Приведите примеры фазовых переходов второго рода.
6. Как происходит плавление вещества?
7. Что называется теплотой плавления?
8. Как происходит кристаллизация вещества?
9. Что называется теплотой кристаллизации?
10. Как можно получить переохлажденную жидкую фазу вещества?
11. Нарисуйте диаграмму плавления и кристаллизации.
12. Что называется диаграммой состояний?
13. Нарисуйте типичную диаграмму состояний.
14. Запишите уравнение Клапейрона-Клаузиуса.
15. Что называется тройной точкой на диаграмме состояний?
16. Сколько может быть тройных точек у чистого вещества?
17. Что называется критической точкой на кривой испарения?
18. Что называется полиморфизмом?
19. Нарисуйте типичную диаграмму состояний вещества, имеющего две фазы.
20. Как возникают метастабильные состояния при полиморфных превращениях?
21. За счет чего можно ускорить процесс полиморфных превращений?
22. Можно ли на диаграмме состояний указать область неустойчивых фаз?
23. Как происходит закалка и отпуск стали?
24. Что называется сплавом?
25. Какой сплав называется эвтектическим?
26. Нарисуйте типичную диаграмму состояний бинарного сплава.
27. Опишите процесс кристаллизации бинарного сплава.
28. Что на диаграмме состояний называется линией ликвидуса, а что – линией солидуса?
29. Опишите процесс плавления бинарного сплава.

30. Подробно опишите процесс кристаллизации сплава свинец–сурьма.
31. Что называется твердым раствором?
32. Какие бывают виды твердых растворов?
33. Нарисуйте типичную диаграмму состояний твердых растворов бинарного сплава.
34. Опишите процесс кристаллизации твердых растворов системы висмут–сурьма.
35. Опишите процесс плавления твердых растворов системы висмут–сурьма.
36. Нарисуйте типичную диаграмму состояний бинарного сплава, содержащего три фазы.
37. Опишите подробно процессы плавления и кристаллизации бинарного сплава железо–углерод.
38. Что называется чугунами?
39. Сформируйте правило фаз Гиббса.
40. Что называется числом компонентов системы и самими компонентами?
41. Что такое метод треугольника Гиббса?
42. Сформулируйте теорему, на использовании которой основывается метод треугольника Гиббса.
43. Как на диаграмме трехкомпонентного сплава изображается сплав с постоянной концентрацией заданной компоненты?

## 2. ПРАКТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

### 2.1. Примеры решения задач

1. Найти изменение энтропии при нагревании воды массой 100 г. от температуры 0 до 100 °С и последующем превращении воды в пар.

*Решение.*

Изменение энтропии будет состоять из двух частей: при нагревании воды и при превращении воды в пар. Изменение энтропии при нагревании найдем из соотношения

$$\Delta S_1 = \int_{T_1}^{T_2} \frac{mcdT}{T} = mc \ln \frac{T_2}{T_1},$$

где  $c$  – удельная теплоемкость воды.

Подставляя значения, получим  $\Delta S_1 = 132$  Дж/К.

Превращение воды в пар происходит при постоянной температуре, поэтому соответствующее изменение энтропии определяется соотношением

$$\Delta S_2 = \frac{1}{T} \int_1^2 dQ = \frac{Q}{T},$$

где  $Q$  – количество теплоты, переданное при превращении нагретой воды в пар.

Если  $\lambda$  – удельная теплота парообразования, то

$$\Delta S_2 = \frac{\lambda m}{T}.$$

Подставляя значения, получим  $\Delta S_2 = 605$  Дж/К. Полное изменение энтропии равно  $\Delta S_2 = \Delta S_1 + \Delta S_2 = 737$  Дж/К.

2. Известно молярное изменение энтропии при плавлении. Найти изменение точки плавления при изменении внешнего давления на  $\Delta p$ . Удельные объемы жидкости и твердого тела известны, но удельная теплота плавления неизвестна.

*Решение.*

Рассмотрим уравнение Клапейрона-Клаузиуса:

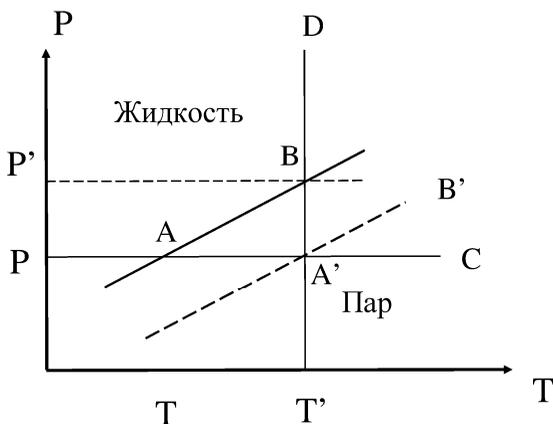
$$\Delta T = \Delta p T (V_{\text{ж}} - V_T) / L.$$

где  $L$  – скрытая теплота плавления.

При рассмотрении 1 моль вещества она связана с изменением энтропии соотношением  $\Delta S = L/T$ . В результате получаем

$$\Delta T = \Delta p (V_{\text{ж}} - V_T) / \Delta S.$$

3. Один грамм обыкновенного сахара  $\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$  растворен в  $100 \text{ см}^3$  воды. Определить повышение точки кипения этого раствора при нормальном давлении. Молекулярный вес сахара – 342; плотность воды при  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  равна  $0,96 \text{ г/см}^3$ ; удельная теплота испарения  $q = 539 \text{ кал}\cdot\text{г}^{-1}$ ; универсальная газовая постоянная  $R = 1,98 \text{ кал}\cdot\text{моль}^{-1}$ ; число молей растворителя  $\nu = \frac{1}{342 \cdot 10^2}$ ;  $\mu\nu = 0,96$ .



*Решение.*

Пусть  $AB$  – кривая испарения чистого растворителя (воды). Кривая испарения  $A'B'$  раствора нелетучего вещества должна идти ниже. Пусть  $P$  – внешнее давление. Будем нагревать систему при постоянном давлении (изобара  $AC$ ). В точках  $A$  и  $A'$ , где изобара пересекает кривые испарения растворителя и раствора, жидкости закипят (обозначим соответствующие температуры через  $T$  и  $T'$ ). Видно, что при постоянном давлении раствор кипит при более высокой температуре, чем чистый растворитель. Чтобы найти  $T'$ , проведем точку  $A'$  через изотерму  $A'D$ . Она пересечет кривую испарения чистого растворителя в точке  $B$  (при давлении  $P'$ ).  $T'$  является температурой кипения чистого раствора при давлении  $P'$ . Если концентрация раствора невелика, стороны треугольника  $AA'B$  можно считать прямыми. Тогда по закону Рауля  $\frac{P'-P}{P'} = \frac{\nu'}{\nu}$ , где  $\nu'$  и  $\nu$  – число молей растворенного вещества и растворителя, пренебрегая удельным объемом жидкости по сравнению с удельным объемом пара, из уравнения Клапейрона-Клаузиуса получаем:

$$\frac{P'-P}{T'-T} = \frac{q_{12}P}{RT^2} = \frac{q_{12}}{Tv_n},$$

где  $q_{12}$  – удельная теплота испарения;

$\mu$  – молекулярный вес молекул пара растворителя;

$v_n$  – объем пара.

В результате полученного деления получаем:

$$\frac{T'-T}{P'} = \frac{\nu'}{\nu} \frac{RT^2}{\mu q_{12} P}.$$

Пренебрегая различием между  $P$  и  $P'$ , можно записать:

$$T - T' = \frac{\nu'}{\nu} \frac{RT^2}{\mu q_{12}}.$$

Подставляя в последнюю формулу данные задачи, находим

$$T - T' = 0,0156 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

4. Используя правила фаз, установите, какой из приводимых ответов правильно характеризует температурные условия кристаллизации чистого вещества: 1)  $T = \text{const}$ , так как число степеней свободы  $C = 1 - 2 + 1 = 0$ ; 2) в интервале температур, так как  $C = 1 - 1 + 1 = 1$ .

*Решение.*

При кристаллизации существуют две фазы: жидкость и образующиеся кристаллы. *Числом степеней свободы*  $C$  системы называется количество факторов, которые можно изменять, не меняя числа фаз системы:

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

где  $K$  – количество компонентов, образующих систему;

$\Phi$  – число фаз в системе;

$\Pi$  – число внешних переменных (обычно  $\Pi = 1$ ).

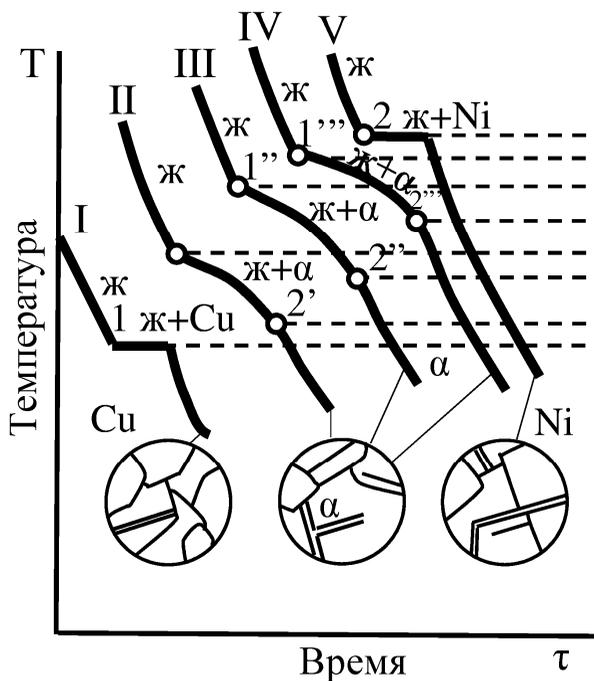
Так как компонент один, а фазы две, то правильным ответом является первый.

5. Исходя из правила фаз, определить, чем отличается температура кристаллизации двухкомпонентных сплавов от кристаллизации чистых веществ, если при кристаллизации сплава образуется одна твердая фаза.

*Решение.*

В условиях задачи  $C = K - \Phi + 1 = 2 - 2 + 1 = 1$ . Так как число степеней свободы отлично от нуля, то процесс кристаллизации сплавов происходит при изменяющейся температуре ( $t \neq \text{const}$ ).

6. На рисунке показано, что кривые охлаждения меди и никеля могут иметь горизонтальные участки. Для сплавов II, III и IV горизонтальных участков нет; имеется только перегиб. Используя правило фаз Гиббса показать, что теоретически именно такими и должны быть кривые охлаждения для этих сплавов.



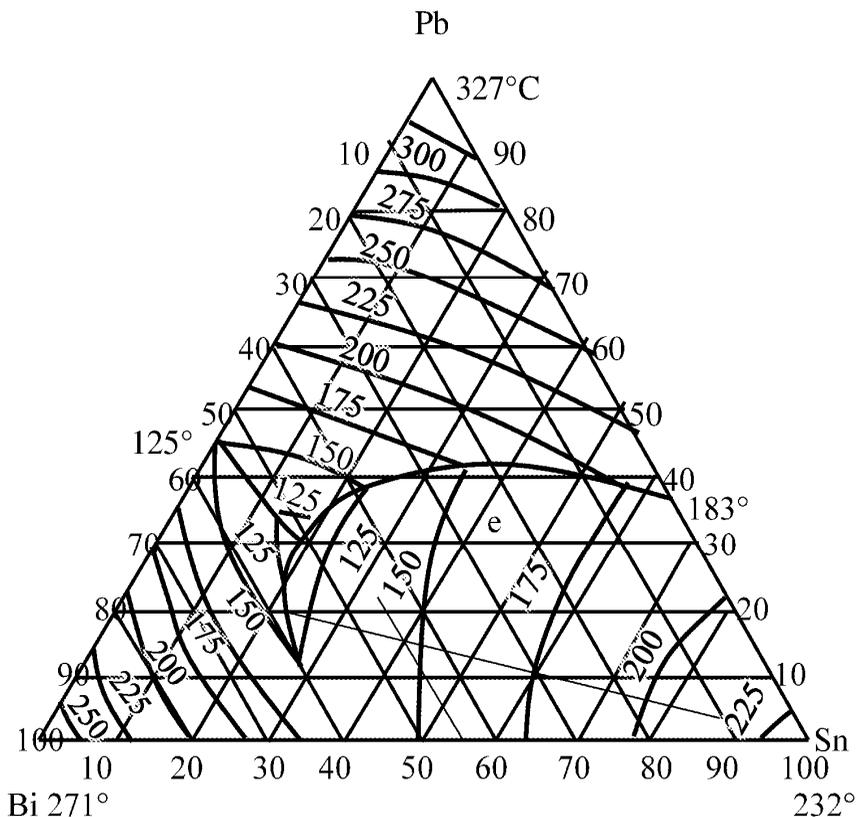
Кривые охлаждения для сплавов Cu–Ni

*Решение.*

Кривые охлаждения меди и никеля имеют горизонтальный участок, так как число степеней свободы при кристаллизации  $C = 1 - 2 + 1 = 0$ . Это означает, что кристаллизация чистых компонентов происходит при постоянной температуре. Выделяющаяся при этом теплота кристаллизации поддерживает температуру постоянной. Поэтому на кривой охлаждения имеется горизонтальный участок.

При кристаллизации сплавов II, III, IV образуется одна твердая фаза  $\alpha$ , поэтому  $C = 2 - 2 + 1 = 1$ . Следовательно, кристаллизация происходит в интервале температур. Поэтому скрытая теплота кристаллизации выделяется постепенно, по мере охлаждения сплава, и горизонтального участка на кривой охлаждения быть не может.

7. Из чего состоит структура сплава точки 1 системы Pb–Sn–Bi?

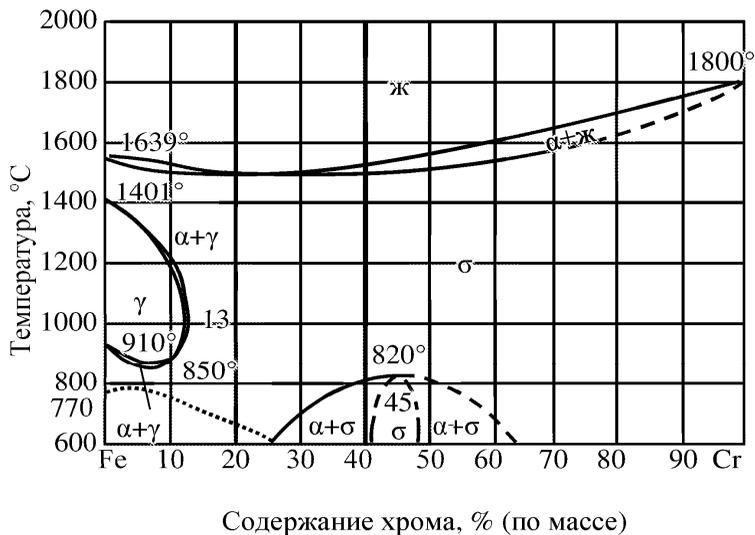


Пространственная диаграмма состояния тройной системы

*Решение.*

Кристаллизация сплава начинается при температуре несколько ниже  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$  с образования кристаллов Sn. При температуре несколько ниже  $125\text{ }^{\circ}\text{C}$  начинается образование кристаллов двойной эвтектики Э (Bi + Sn), которое заканчивается при температуре  $98\text{ }^{\circ}\text{C}$ , когда образуется тройная эвтектика Э (Bi + Sn + Pb). В целом структура сплава состоит из эвтектики Bi + Э (Bi + Sn) + Э (Bi + Sn + Pb).

8. Можно ли закаливать сплав состава 95 % Fe + 5 % Cr? Диаграмма состояния приведена на рисунке.



*Решение.*

Сплав такого состава эффективен для закалки, так как нагрев при температуре около 950 °С приводит к образованию  $\gamma$ -фазы. Быстрое охлаждение от этой температуры может затормозить превращение  $\gamma \rightarrow \alpha$  и зафиксировать неравновесное состояние.

## 2.2. Задачи для самостоятельного решения

1. Лед массой 1 кг, находящийся при температуре  $-30$  °С, нагревают до температуры плавления при нормальном атмосферном давлении. Определить изменение энтропии. Удельная теплоемкость льда равна 2,09 кДж/(кг·К), удельная теплота плавления – 333 кДж/кг.

*Ответ:* 1,46 Дж/К.

2. При плавлении 1 кмоль железа изменяет объем на  $1,03 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>. Насколько изменится температура плавления железа при изменении давления на  $10^5$  Па?

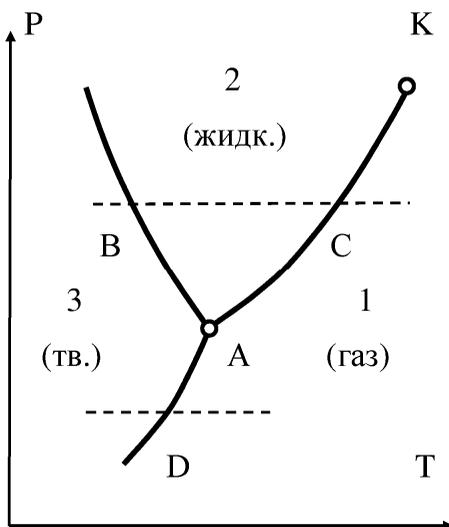
*Ответ:* 0,012 К.

3. Изменение энтропии при таянии льда равно 388 Дж/(К·моль). Насколько изменится температура состояния льда, если внешнее давление возрастает на  $10^5$  Па?

*Ответ:* 0,009 К.

4. Показать, что в тройной точке диаграммы состояний выполняется соотношение:

$$(v_1 - v_2) \frac{dP_{12}}{dT} + (v_3 - v_4) \frac{dP_{23}}{dT} + (v_3 - v_1) \frac{dP_{31}}{dT} = 0.$$



5. Один грамм обыкновенного сахара  $C_{12}H_{22}O_{11}$  растворен в  $100 \text{ cm}^3$  воды. Определить понижение точки замерзания раствора сахара.

*Ответ:*  $T - T' = -0,0543 \text{ }^\circ\text{C}$ .

6. Из скольких фаз состоит система вода–лед, когда одновременно с водой существует пять кусков льда разной формы и размеров?

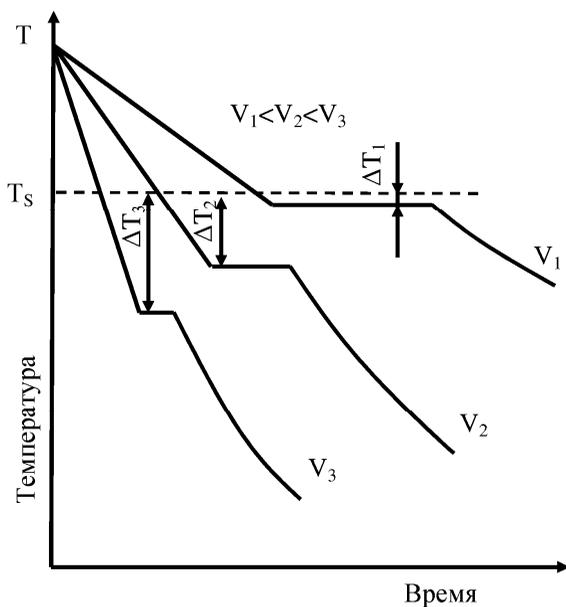
*Ответ:* Две (жидкая фаза – вода; твердая фаза – лед).

7. Каким условием удовлетворяют изменения энтальпии  $\Delta H$  и энтропии  $\Delta S$  при испарении кристаллического тела?

*Ответ:*  $\Delta H$  увеличивается;  $\Delta S > 0$ , причем  $T \Delta S > \Delta H$ .

8. В литейном цехе изготавливают отливки и земляные формы. Механические свойства отливок из-за крупнозернистой структуры невысокие. Как следует изменить технологию, чтобы улучшить структуру и свойства отливок?

*Ответ:* на первый взгляд достаточно увеличить степень переохлаждения при кристаллизации отливок. Однако реализовать это сложно. Если разместить формы в холодильнике с низкой температурой, то результат будет нулевой, поскольку условия охлаждения определяет теплопроводность формовочного материала, и ко времени установки в холодильник металл уже закристаллизуется. Проблема решается, если учесть, что степень переохлаждения зависит от скорости охлаждения (см. рисунок).

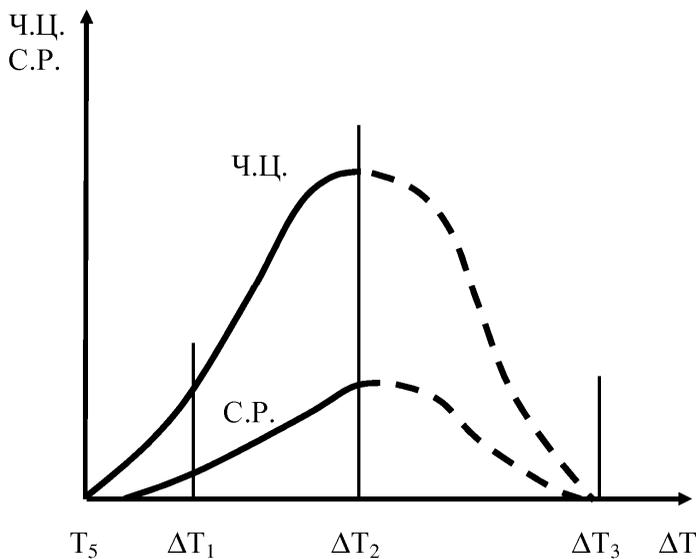


Схемы кривых охлаждения чистого металла от скорости охлаждения ( $v_1 < v_2 < v_3$ )

Для отливок нужно использовать кокиль (разборная форма для литья, изготавливаемая из металла). Металлическая форма имеет теплопроводимость приблизительно в 40 раз более высокую, чем земляная.

Ее использование приводит к увеличению степени переохлаждения, а отливки в результате приобретают мелкокристаллическое строение, что улучшит их механические свойства.

9. В титане происходит полиморфное превращение  $Ti_{\beta} \rightarrow Ti_{\alpha}$  при  $882,5^{\circ}C$ . Считая, что кривые влияния степени переохлаждения  $\Delta T$  на число центров кристаллизации (ЧЦ) и скорость роста кристаллов (СР), представленные на рисунке, соответствуют охлаждению титана  $Ti_{\beta}$ , начиная от  $882,5^{\circ}C$ , определите, какая структура титана образуется при степенях переохлаждения  $\Delta T_1$ ,  $\Delta T_2$  и  $\Delta T_3$ .



Влияние степени переохлаждения  $\Delta T$  на число центров кристаллизации (ЧЦ) и скорость роста кристаллов (СР)

*Ответ:*  $\Delta T_1$  – крупнозернистый  $Ti_{\alpha}$ , при  $\Delta T_2$  – молекулярный  $Ti_{\alpha}$ , при  $\Delta T_3$  – переохлажденный  $Ti_{\beta}$ .

10. Возможна ли кристаллизация двухкомпонентного сплава при постоянной температуре?

*Ответ:* возможна, если при кристаллизации образуются две твердые фазы. В этом случае  $C = 2 - 3 + 1 = 0$ , что означает, что  $t = \text{const}$ .

11. Определить количество кристаллов при температуре  $T_3$  в точке  $u$ , если общее количество сплава равно 100 кг.

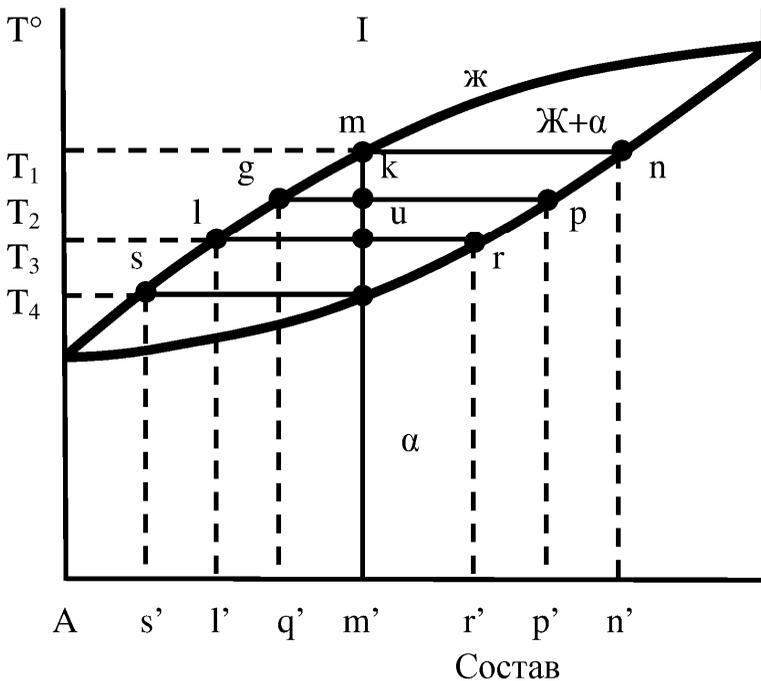


Диаграмма состояния

*Ответ:* относительное количество  $\alpha$ -кристаллов равно  $\frac{lu}{lr} = 0,56$ .

Следовательно их будет 56 кг.

12. Определить количество жидкой фазы у сплава состава 65 % Ni и 35 % Cu в точке 2''.

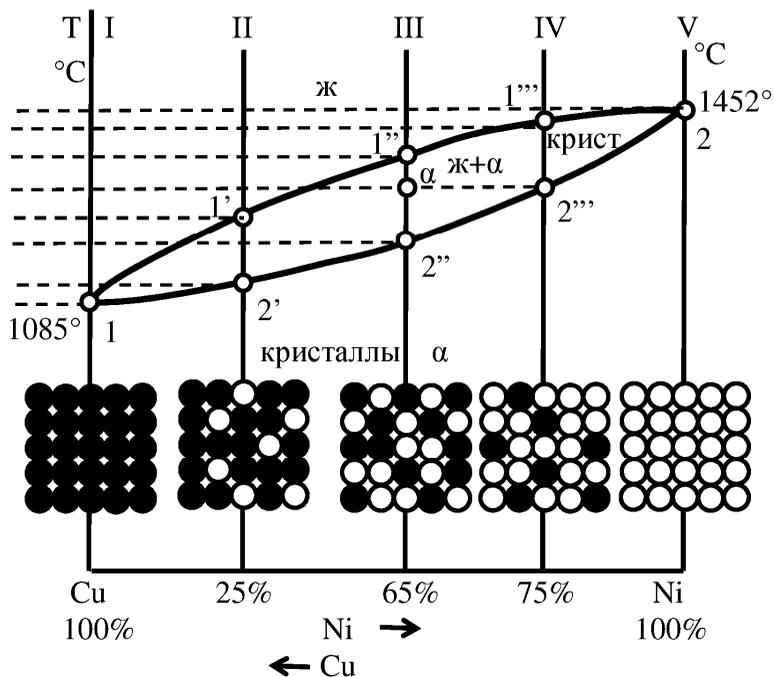
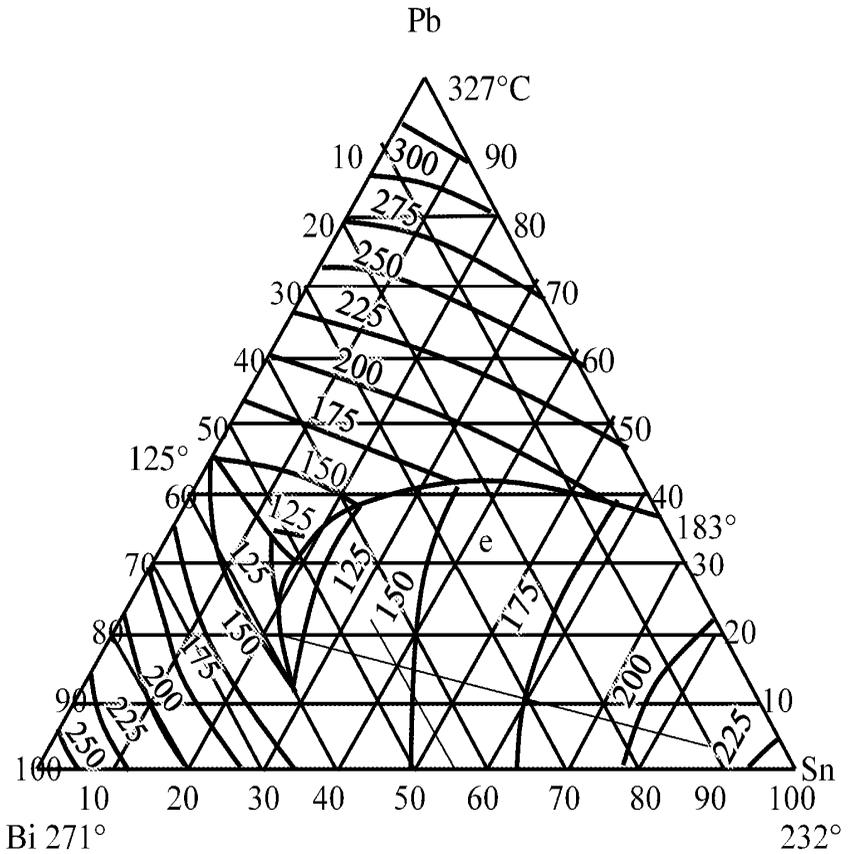


Диаграмма состояний для сплавов Cu–Ni.  
Кривые охлаждения для сплавов I, II, III, IV и V

*Ответ:* количество жидкой фазы равно нулю. При этой температуре кристаллизация закончилась и жидкой фазы нет.

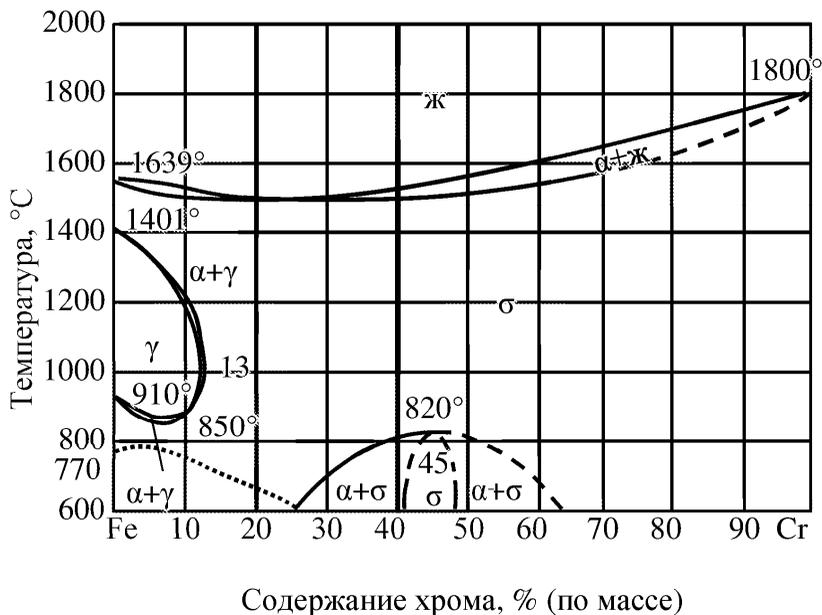


14. Чему равен состав тройного сплава Pb–Sn–Bi в точке *e*?



Ответ: 30 % Bi, 40 % Sn, 30 % Pb.

15. Можно ли закалить сталь (сплав состава 80 % Fe + 20 % Cr), диаграмма состояний которой представлена на рисунке?



*Ответ:* данный сплав не дает эффекта при термической обработке, так как не имеет фазовых превращений в твердом состоянии.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Волькенштейн, В. С. Сборник задач по общему курсу физики / В. С. Волькенштейн. – М.: Физматлит, Лань, 2006. – 240 с.
2. Канашевич, Т. Н. Совершенствование методической системы преподавателя как условие реализации компетентностного подхода в техническом университете / Т. Н. Канашевич, М. О. Шумская // Педагогическая наука и образование. – 2017. – № 4. – С. 67 – 71.
3. Кикоин, А. К. Молекулярная физика / А.К. Кикоин, И. К. Кикоин. – М.: Директмедиа, 2016. – 478 с.
4. Ландау, Л. Д. Курс общей физики. Механика и молекулярная физика / Л. Д. Ландау, А. И. Ахиезер, Е. М. Лифищц. – М.: Изд. Группа URSS, 2014. – 340 с.
5. Матвеев, А. Н. Молекулярная физика: учебное пособие / А. Н. Матвеев. – 4-е изд. – М.: Высшая школа, 2010. – 368 с.
6. Мозберг, Р. К. Материаловедение / Р. К. Мозберг. – М.: Высшая школа, 1991. – 448 с.
7. Савельев, И. В. Курс общей физики. / И. В. Савельев. – М.: АСТ, Астрель, 2002. – Т. 1: Механика. Молекулярная физика. – 432 с.
8. Сивухин, Д. В. Курс общей физики. / Д. В. Сивухин. – М.: Наука, 1990. – Т. 2: Термодинамика и молекулярная физика. – 520 с.
9. Телесин, Р. В. Молекулярная физика / Р. В. Телесин. – СПб.: Лань, 2009. – 368 с.
10. Чертов, А.Г. Задачник по физике / А. Г. Чертов, А. А. Воробьев. – М.: Физматлит, 2007. – 640 с.

Учебное издание

**КАНАШЕВИЧ** Татьяна Николаевна  
**КНЯЗЕВ** Михаил Александрович  
**САТИКОВ** Игорь Абдузарович  
**ШУМСКАЯ** Мария Олеговна

**ФИЗИКА. ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ  
В СПЛАВАХ И ТВЕРДЫХ  
РАСТВОРАХ**

Учебно-методическое пособие для студентов специальностей  
1-36 02 01 «Машины и технологии литейного производства»,  
1-42 01 01 «Металлургическое производство  
и материалобработка (по направлениям)»

Редактор *Е. С. Кочерго*  
Компьютерная верстка *Е. А. Беспанской*

Подписано в печать 01.10.2019. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Ризография.  
Усл. печ. л. 2,33. Уч.-изд. л. 1,82. Тираж 100. Заказ 445.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя  
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.