

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Кузбасский государственный технический университет
имени Т. Ф. Горбачева»

Кафедра технологии металлов

ДИАГРАММЫ СОСТОЯНИЯ ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ СПЛАВОВ

Методические указания к расчетно-графической работе
по дисциплине «Материаловедение» для студентов
направлений 140100.62, 140400.62, 150700.62, 151900.62,
190600.62, 190700.62, 221400.62, специальности 130400.65
очной формы обучения

Составители Л. П. Короткова
Д. В. Видин

Утверждены на заседании кафедры
Протокол № 17 от 22.04.2013
Рекомендованы к печати
учебно-методической комиссией
по направлению 151900.62
Протокол № 28 от 29.04.2013
Электронная копия находится
в библиотеке КузГТУ

КЕМЕРОВО 2013

1. ЦЕЛЬ И СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Цель работы – изучение и закрепление материала лекций по диаграммам состояния двухкомпонентных сплавов. В ходе выполнения расчетно-графической работы (РГР) студенты должны усвоить теоретический материал по методике построения диаграмм состояния, основные типовые диаграммы, правило фаз, правило отрезков, методику построения кривой охлаждения.

Содержание работы – по индивидуальному заданию студенты на примере реальной диаграммы состояния изучают процессы кристаллизации и структурообразования сплавов, выполняют количественные расчеты фазового состава одного из сплавов.

2. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Диаграмма состояния двухкомпонентных сплавов это график в координатах «температура – концентрация компонентов». Устанавливает взаимосвязь между температурой, химическим составом и строением сплавов. Диаграмма отражает устойчивое равновесное состояние сплавов. Линии диаграммы характеризуют температуры начала и окончания кристаллизации, а также химический состав фаз, а области диаграммы – фазовый и структурный состав сплавов данной системы.

В зависимости от взаимодействия компонентов в процессе кристаллизации могут образовываться разные твердые фазы, что меняет вид линий диаграммы – получаются диаграммы разных типов.

2.1. Основные понятия и определения

Компоненты – это химические элементы, из которых состоит сплав. Иногда за компоненты принимают устойчивые химические соединения.

Фазы в сплаве – это однородные части неоднородной системы, отделенные от остальной системы видимой границей раздела, при переходе через которую скачкообразно меняются состав, строение, свойства.

Фазы бывают жидкие (расплав), твердые – кристаллы твердых растворов, кристаллы химических соединений и др.

Жидкая фаза характеризуется ближним порядком. В ней присутствуют участки с закономерным расположением атомов, которые могут служить центрами кристаллизации (зародышами). Они малы по размерам и не стабильны – то возникают, то исчезают.

Твердая фаза характеризуется дальним порядком, т.е. закономерным расположением атомов на большом расстоянии.

Кристаллизация – это переход от ближнего порядка к дальнему. В результате кристаллизации формируется твердая фаза с закономерным расположением атомов в виде кристаллов, формируется дальний порядок в расположении атомов, в котором многократно повторяется элементарная ячейка.

Твердый раствор – это фаза, у которой сохраняется тип кристаллической решетки основного компонента (А). Растворенный компонент (В) либо замещает атом основного компонента в узле кристаллической решетки (*твердый раствор замещения*), либо внедряется в межузельное пространство кристаллической решетки (*твердый раствор внедрения*).

Твердые растворы обозначают строчечными буквами греческого алфавита: α , β , γ и т. д.

Твердые растворы внедрения всегда имеют ограниченную растворимость компонентов, т.к. объем пор в решетках ограничен. Как правило, это растворы углерода, водорода, кислорода, азота в металлах.

Твердые растворы замещения могут быть как ограниченной, так и неограниченной растворимости.

Условия образования неограниченных твердых растворов:

- один тип кристаллической решетки компонентов;
- отклонения в параметрах (размерах) кристаллических решеток компонентов не более 12÷13 %;
- одинаковое строение внешних электронных уровней.

Химические соединения образуются при строго определенном, стехиометрическом соотношении атомов. При этом формируется новый тип кристаллической решетки.

Микроструктура – строение сплава, наблюдаемое в микроскоп. Она может быть однофазной, многофазной.

Микроструктура сплава характеризуется количеством, формой, размерами и взаимным расположением фаз. Элементы структуры, видимые в микроскопе, – структурные составляющие. Структурными составляющими могут быть собственно фазы, а также смеси фаз – эвтектики, эвтектоиды и др.

Фазовые превращения в сплаве при охлаждении (нагреве) наглядно описываются путем построения кривых охлаждения (нагрева) на основе диаграммы состояния сплавов с использованием правила фаз и правила отрезков (см. п. 2.2 и п. 4.4).

2.2. Основные правила

Правило фаз устанавливает взаимосвязь между количеством компонентов «К», количеством фаз «Ф» и числом степеней свободы «С»: $C = K - F + 1$.

К степеням свободы относятся параметры кристаллизации – концентрация, температура, давление. Если $C = 0$ – кристаллизация протекает без изменения параметров, т. е. при постоянной температуре и концентрации; $C = 1, 2$ – кристаллизация протекает с изменением одного, двух параметров соответственно.

Правило отрезков характеризует количественное соотношение фаз в областях диаграммы состояния сплава: если через заданную точку в двухфазной области диаграммы провести горизонтальную прямую (каноду) до пересечения с линиями диаграммы, то:

- концы полученного отрезка, касающиеся однофазных областей (линий), покажут фазовый состав сплава в данной точке;
- проекции концов отрезков на ось концентраций характеризуют концентрацию (химический состав) каждой фазы;
- количественное соотношение фаз в данной точке пропорционально противолежащим отрезкам каноды.

Методика построения кривой охлаждения с применением правила фаз, описание превращений в сплаве при изменении температуры, расчеты фазового состава сплава при заданной температуре приведены в примере разбора диаграммы состояния сплавов в п. 4.

2.3. Основные типы диаграмм состояния

На рис. 1 приведены четыре типовые фазовые диаграммы состояний двухкомпонентных сплавов A и B , дано их краткое описание.

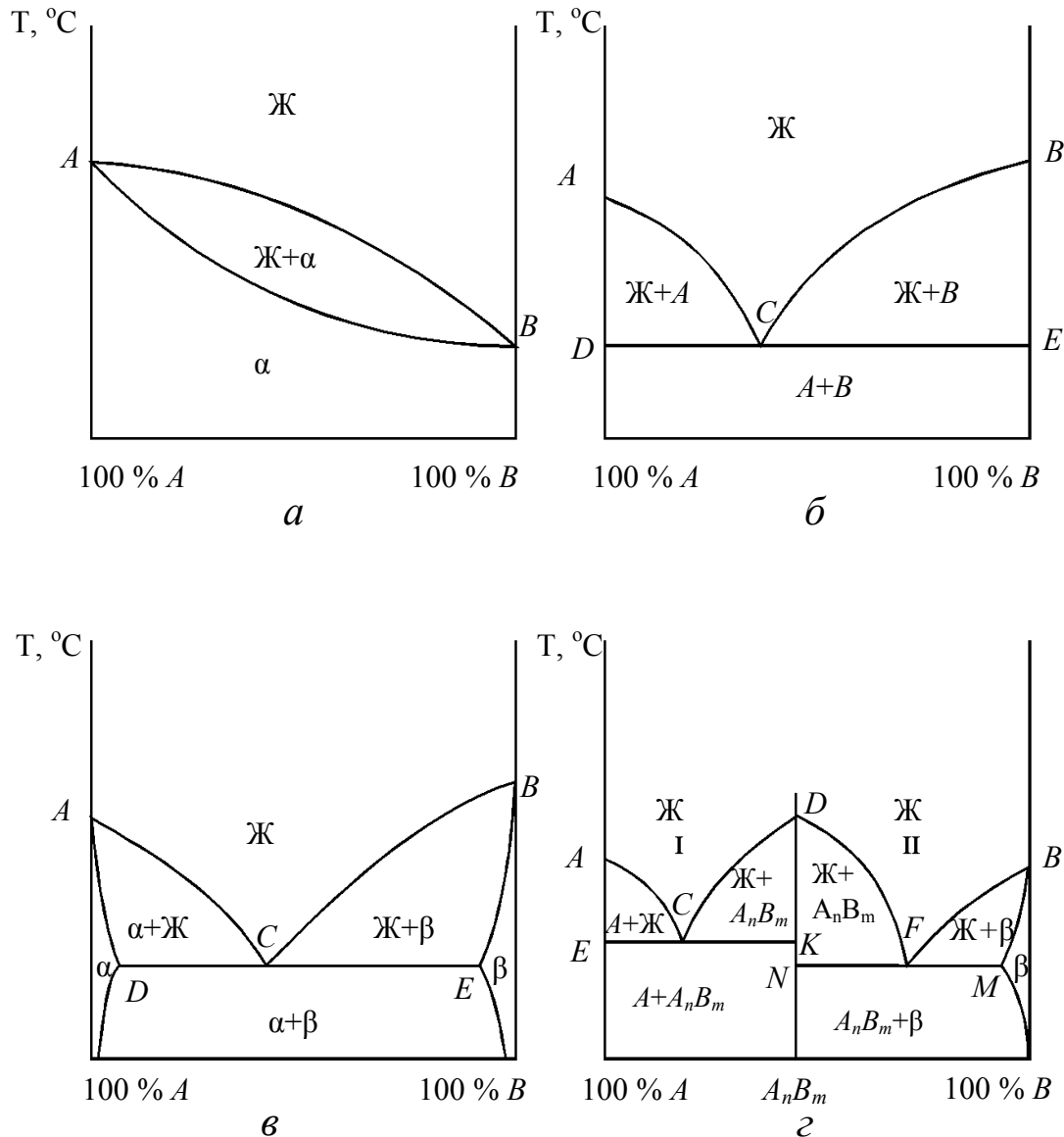


Рис.1. Типовые диаграммы состояния:

а) с неограниченной растворимостью компонентов; б) с отсутствием растворимости компонентов; в) компоненты ограниченно растворимы в твердом состоянии; г) с химическим соединением

Диаграмма состояния сплавов с неограниченной растворимостью компонентов (рис. 1, а) – это случай полной взаимной растворимости компонентов A и B . При таком расположении линий на диаграмме образуется твердый раствор с неограниченной

растворимостью компонентов, обозначаемый буквами греческого алфавита, например: α , β , γ и т. д.

Диаграмма состояния сплавов с отсутствием растворимости компонентов в твердом состоянии (рис. 1, б). В этом случае между линиями ликвидус и солидус образуются при кристаллизации фазы в виде чистых компонентов A или B . Заканчивается кристаллизация всех сплавов данной системы образованием эвтектики по горизонтальной линии солидус DCE ($\Xi = A + B$).

Условия кристаллизации эвтектики:

- наличие жидкой фазы эвтектического состава (точка C),
- при постоянной температуре (линия DCE).

Механизм кристаллизации эвтектики:

Заключается в попеременном выделении фаз. Например, в первую очередь выделяются кристаллы A (ведущая фаза). Жидкая фаза обогащается компонентом B , по составу приобретает заэвтектическую концентрацию, поэтому следующей кристаллизуется фаза B . И так попеременно кристаллизуются фазы $A - B - A - B \dots B$ в результате формируется эвтектическая структура пластинчатой морфологии.

Диаграмма состояния сплавов, компоненты которой ограниченно растворимы в твердом состоянии (рис. 1, в). При кристаллизации между линиями ликвидус и солидус образуются α - или β -фаза в до- или заэвтектических сплавах соответственно. Заканчивается кристаллизация всех сплавов данной системы образованием эвтектики по горизонтальной линии солидус DCE ($\Xi = \alpha + \beta$).

Вторичная кристаллизация для рассматриваемой системы связана с уменьшением растворимости компонентов в твердых растворах по линиям сольвуса (DK и EF). В результате из α образуется β_{II} и, наоборот, из $\beta \rightarrow \alpha_{II}$. Избыточный компонент B вытесняется из кристаллической решетки, образуя вторичную фазу либо внутри зерна α -твердого раствора, либо по его границе.

Диаграмма состояния сплавов, образующих химические соединения (рис. 1, г). При взаимодействии компонентов A и B кристаллизуется устойчивое химическое соединение, например A_nB_m . Эту диаграмму можно рассматривать как диаграмму, состоящую из двух частей в координатах: I – $A - A_nB_m$; II – $A_nB_m - B$. Первую часть диаграммы можно отнести к типу рис. 1, б, а вторую часть – к типу рис. 1, в.

3. СОДЕРЖАНИЕ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РГР

Студенту выдается индивидуальное задание, вариант которого выбирается из таблицы (прил. 1) и реальная диаграмма состояния (прил. 2). Пример оформления РГР представлен в прил. 3.

Студент должен на листе формата А3:

- вычертить фазовую диаграмму состояния сплавов заданной системы и заполнить все ее области;
- выполнить расчет фазового состава, указанного в варианте сплава при заданной температуре;
- вычертить и заполнить структурную диаграмму;
- построить кривую охлаждения и описать все превращения в сплаве при охлаждении из жидкого состояния до 0 °С.

Дополнительные указания.

В прил. 2 даны диаграммы реальных сплавов, в которых указаны только однофазные области (например, α , Ж) или линии (например, 100 % Са, Mg и др.).

При вычерчивании фазовой и структурной диаграмм нужно строго выдерживать масштаб по шкалам температур и концентраций. Искажения в положении линий диаграммы приведут к ошибкам в расчетах.

Все основные линии диаграммы нужно обозначить прописными буквами латинского алфавита (*A, B, C, D* и т. д.), точки пересечения вспомогательных линий с основными линиями – строчечными буквами (*a, b, c, d* и т. д.) или цифрами (1, 2, 3 и т. д.).

Работа выполняется на листе формата А3. В основной надписи указывается наименование работы, вариант задания, фамилия студента и преподавателя. На листе формата А3 размещаются диаграммы, графики, расчеты (прил. 3).

4. ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ РГР

В материаловедении различают фазовые диаграммы состояния, отражающие равновесный фазовый состав при разной концентрации компонентов и разной температуре. Фазовые области отделены основными линиями диаграммы.

Структурные диаграммы отражают структурный состав сплава. Структурные области на диаграмме отделяются основными и верти-

кальными пунктирными линиями. Последние вычерчиваются из точек предельной растворимости твердых растворов, а так же из точек образования эвтектик (прил. 3).

В качестве примера для анализа состояния сплавов выбрана диаграмму третьего типа (рис. 1, в). При кристаллизации этих сплавов образуются две фазы: твердый раствор ограниченной растворимости компонента B в компоненте A – α -твердый раствор и чистый компонент B , т.к. принято допущение, что растворимость компонента A в компоненте B практически отсутствует.

4.1. Пример заполнения фазовой диаграммы состояния

Фазовая диаграмма этой системы представлена на рис. 2.

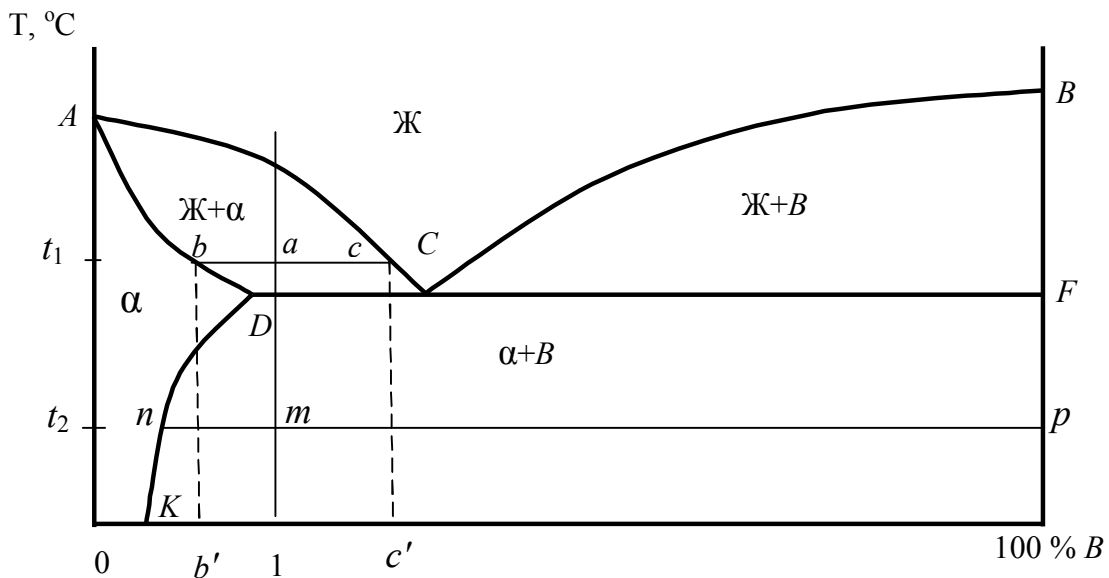


Рис. 2. Фазовая диаграмма системы $A - B$

Все поле диаграммы разграничено основными линиями на отдельные фазовые области. Заполнение фазовых областей диаграммы состояния нужно выполнить, пользуясь правилом отрезков.

Линия ACB – линия ликвидус (температур начала кристаллизации), выше этой линии все сплавы жидкие. При охлаждении сплавов ниже температур ликвидуса начинается кристаллизация. Сплавы, лежащие левее точки C , образуют кристаллы α -твердого раствора. Сплавы, лежащие правее точки C , образуют кристаллы B .

Линия $ADCF$ – линия солидус (температур конца кристаллизации). При температурах солидус на линии AD кристаллизация за-

канчивается образованием кристаллов α , на линии DCF – образованием смеси кристаллов α и B . Таким образом, на поле диаграммы образованы две однофазные области: выше линии ACB – жидкая фаза, левее линии ADK – однофазный α -твердый раствор. Остальные области диаграммы – двухфазные, и фазовый состав в них может быть определен с помощью правила отрезков.

4.2. Применение правила отрезков

В сплаве (1) заданной концентрации при заданной температуре (T_a и T_m) с помощью правила отрезков требуется рассчитать количество фаз (рис. 2).

Для этого необходимо через заданную температуру (T_a и T_m) провести каноду (линию параллельную оси концентраций) до пересечения с основными линиями диаграммы. Точки пересечения обозначить b, c, n, p (рис. 2).

Определим фазовый состав в точке a . Он будет состоять из $\alpha_{b'} + Ж_{c'}$ (см. правило отрезков в п. 2.2). Опустив перпендикуляры из концов отрезка BC на ось концентрации, установим, что кристаллы α будут иметь концентрацию b' , жидкость – c' . Количество кристаллов α -твердого раствора в точке a будет пропорционально противолежащему отрезку ac , а количество жидкой фазы в точке c – пропорционально отрезку каноды ab :

$$Q_{\alpha} = \frac{ac}{bc} \cdot 100 \%, \quad Q_{ж} = \frac{ab}{bc} \cdot 100 \%.$$

При температуре в точке m (ниже линии DCF) этот сплав будет состоять из α -твердого раствора и B соответственно:

$$Q_{\alpha} = \frac{mp}{np} \cdot 100 \%, \quad Q_B = \frac{mn}{np} \cdot 100 \%.$$

4.3. Пример заполнения структурной диаграммы состояния

Для того чтобы разобраться с процессом структурообразования любого сплава данной системы $A - B$, необходимо использовать структурную диаграмму (рис.3, а) и для заданного сплава построить кривую охлаждения (рис.3, б).

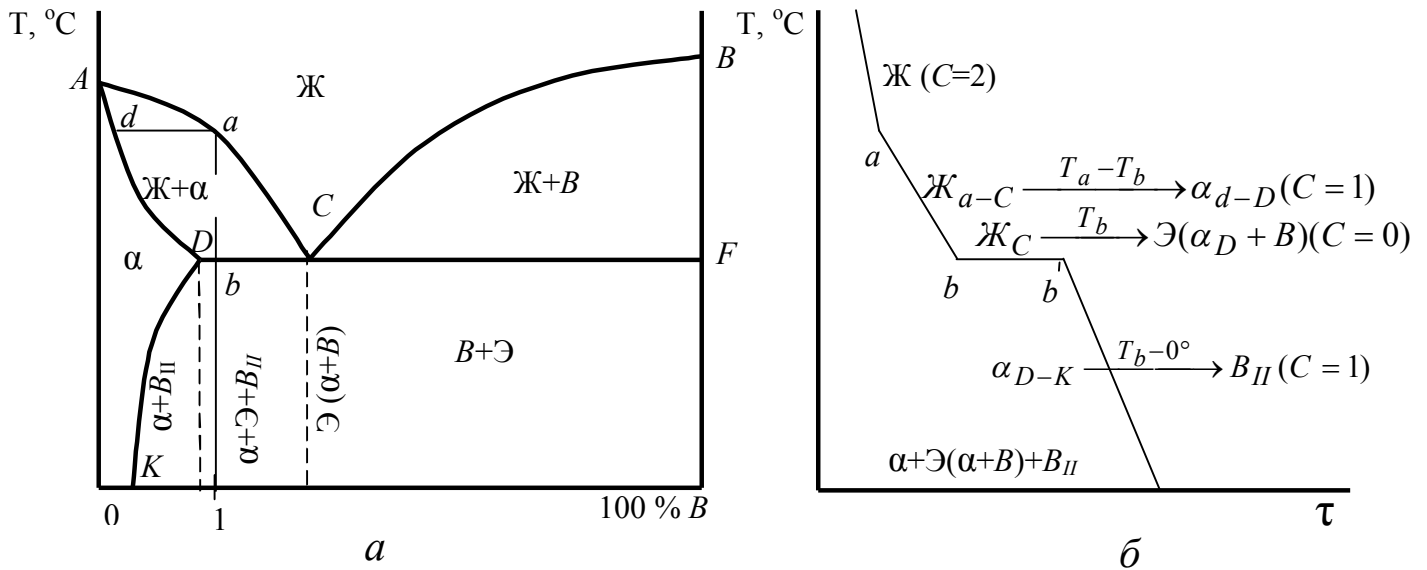


Рис. 3. Структурная диаграмма $A - B$:
а) структурная; б) кривая охлаждения сплава 1

Структурная диаграмма (рис. 3, а) и фазовая диаграмма (рис. 2) левее линии ADK и выше линии $ADCF$ не имеют отличий. Правее линии DK и ниже линии DCF в структурной диаграмме появились две вертикальные пунктирные линии, опущенные на ось концентраций из точек D – предельной растворимости α -твердого раствора и C – эвтектической точки. Они диаграмму дополнительно разделяют на структурные области с разной микроструктурой.

Первичная кристаллизация зависит от типа сплава. Сплав с концентрацией в точке C – эвтектический. При кристаллизации образует эвтектическую смесь, состоящую из кристаллов α -твердого раствора и кристаллов компонента B – $\text{Э}(\alpha+B)$. Сплавы, лежащие левее точки C , – доэвтектические. Их микроструктура включает кристаллы α -твердого раствора и эвтектику. Сплавы, лежащие правее точки C , – заэвтектические, их структура – кристаллы B и эвтектика.

Вторичная кристаллизация происходит во всех сплавах данной системы, расположенных левее линии сольвуса DK . Сплавы с концентрацией от точки K до проекции точки D имеют структуру кристаллов α -твердого раствора и вторичных кристаллов B_{II} . Последние кристаллизуются путем диффузионного выделения из-за уменьшения предела растворимости компонента B в A (линия DK). В доэвтектических сплавах B_{II} присутствует также в виде отдельной структурной составляющей, в остальных сплавах – входит в состав эвтектики.

4.4. Пример построения кривой охлаждения по правилу фаз

На примере сплава 1 (рис. 3, а) рассмотрим превращения при охлаждении из жидкого состояния до комнатной температуры. Для этого из точки 1 на оси концентраций проведем тонкую вспомогательную вертикальную линию, которая пересечет основные линии диаграммы. Точки пересечения a и b – критические точки для сплава 1, т.е. температуры начала и конца кристаллизации.

На кривую охлаждения в координатах «температура T , °C – время τ » (рис. 3, б) переносятся температуры критических точек. Затем по полученным температурам строится кривая охлаждения сплава. При этом правильность построения кривой охлаждения проверяется с помощью правила фаз (см. п. 2.2).

При охлаждении сплава до T_a фазовых превращений нет, равновесным является жидкий расплав, кривая охлаждения будет плавно понижаться ($C = 2$):

$$C = 2(A; B) - 1(\text{Ж}) + 1 = 2.$$

Переохлаждение ниже T_a вызовет кристаллизацию α -твердого раствора, что будет сопровождаться изменением химического состава жидкой и твердой фаз по линиям ликвидус и солидус соответственно. Процесс сопровождается выделением «скрытой» теплоты, охлаждение замедляется, на кривой охлаждения появится «перелом» ($C = 1$):

$$\text{Ж}_{a-C} \xrightarrow{T_a - T_b} \alpha_{d-D},$$

$$C = 2(A; B) - 2(\text{Ж}; \alpha) + 1 = 1.$$

Кристаллизация эвтектики происходит из жидкой фазы эвтектического состава с одновременным выделением двух твердых фаз при постоянной температуре – на кривой охлаждения площадка ($C = 0$):

$$\text{Ж}_C \xrightarrow{T_b} \text{Э}(\alpha_D + B),$$

$$C = 2(A; B) - 3(\text{Ж}; \alpha; B) + 1 = 0.$$

При охлаждении ниже температуры солидус в сплаве 1 происходит вторичная кристаллизация по причине уменьшения растворимости компонента B в α -твердом растворе. В результате выделяются вторичные кристаллы B_{II} ($C = 1$):

$$\alpha_{D-K} \xrightarrow{T_b - 0^\circ} B_{II} (C = 1),$$

$$C = 2(A; B) - 2(\text{Ж}; \alpha) + 1 = 1.$$

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Б. Н. Арзамасов. Материаловедение: учеб. для вузов / Б. Н. Арзамасов [и др.]; под общ. ред. Б. Н. Арзамасова, Г. Г. Мухина. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва: Изд-во МГТУ, 2004. – 648 с. 23 экз.

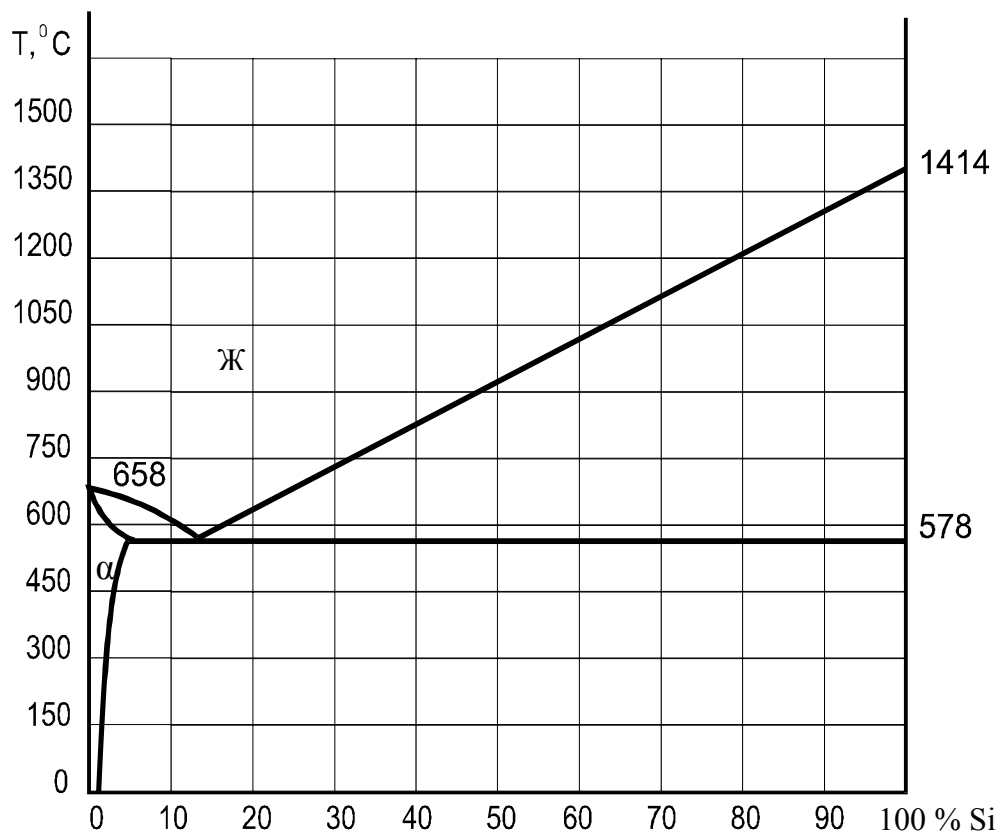
2. Лахтин, Ю. М. Материаловедение и термическая обработка / Ю. М. Лахтин – Москва: Альянс, 2009. – 448 с. 40 экз.

3. Материаловедение. Технология конструкционных материалов [Электронный ресурс] : [учеб. пособие] / Д. В. Видин [и др.]; ФГБОУ ВПО «Кузбас. гос. техн. ун-т им. Т. Ф. Горбачева». – Кемерово, 2011. – 163 с. – <http://library.kuzstu.ru/meto.php?n=90704&type=utchposob:common>.

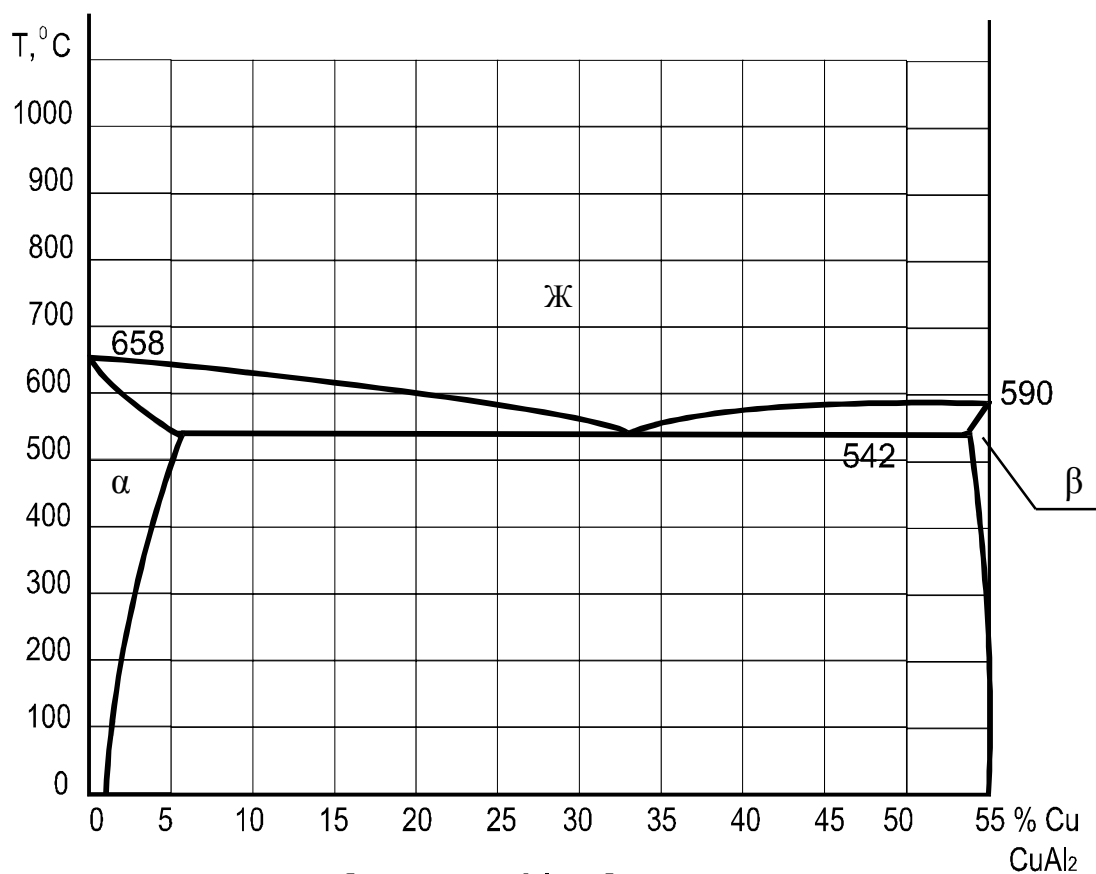
Приложение 1

2-я цифра варианта	1-я цифра варианта	0		1		2		3		4	
	Система сплавов	%	T, °C	%	T, °C	%	T, °C	%	T, °C	%	T, °C
1	Al – Si	5Si	600	5Si	400	10Si	400	20Si	400	20Si	600
2	Al – Cu	5Cu	100	10Cu	100	10Cu	580	15Cu	580	15Cu	400
3	Pb – Sn	10Sn	270	10Sn	50	20Sn	250	20Sn	100	40Sn	200
4	Mg – Ge	10Ge	600	10Ge	700	30Ge	500	30Ge	900	50Ge	700
5	Sb – Ge	5Ge	600	5Ge	300	10Ge	500	12Ge	500	30Ge	600
6	Cu – As	5As	900	5As	600	10As	900	10As	550	15As	800
7	Mg – Ca	10Ca	550	10Ca	200	18Ca	200	40Ca	600	40Ca	400
8	Pb – Mg	10Mg	300	10Mg	100	10Mg	350	20Mg	500	25Mg	480
9	Cu – Ag	10Ag	1000	10Ag	200	20Ag	900	20Ag	600	40Ag	800
0	Al – Ge	10Ge	500	10Ge	300	20Ge	400	25Ge	250	40Ge	500

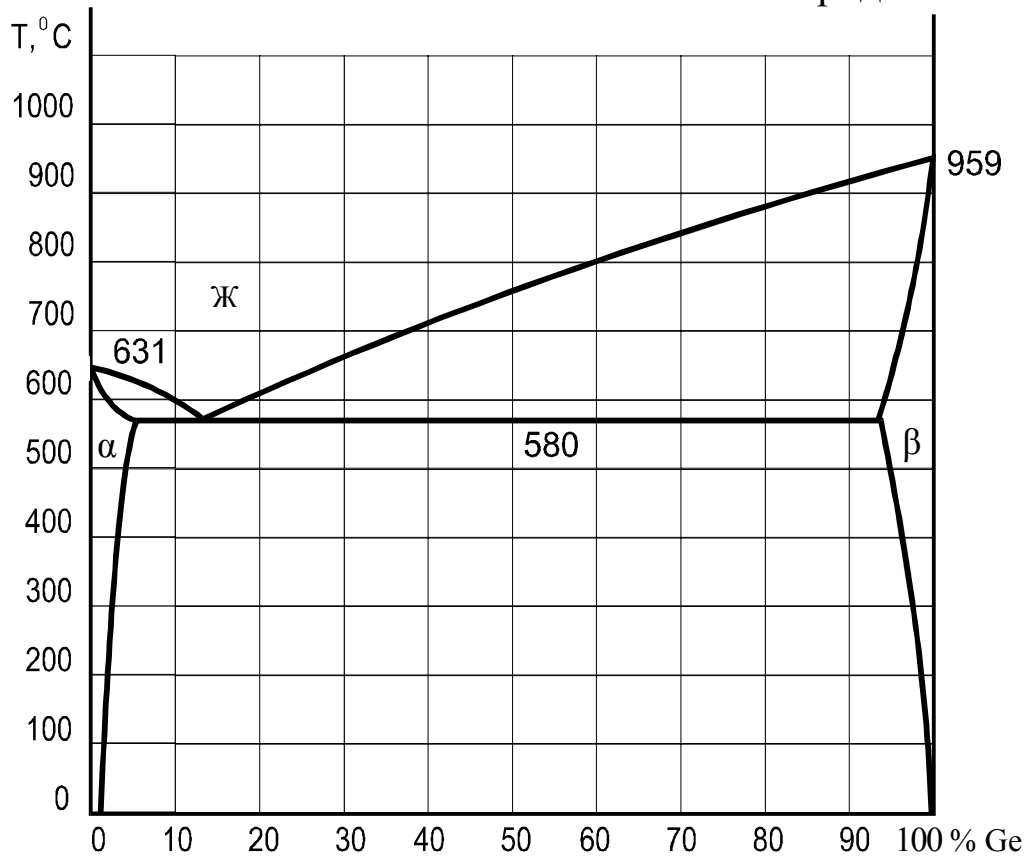
2-я цифра варианта	1-я цифра варианта	5		6		7		8		9	
	Система сплавов	%	T, °C	%	T, °C	%	T, °C	%	T, °C	%	T, °C
1	Al – Si	50Si	800	50Si	200	80Si	1000	80Si	400	11,7Si	200
2	Al – Cu	20Cu	550	20Cu	200	33Cu	500	50Cu	550	50Cu	200
3	Pb – Sn	40Sn	150	62Sn	150	70Sn	100	90Sn	200	90Sn	50
4	Mg – Ge	50Ge	600	60Ge	600	80Ge	800	80Ge	600	90Ge	800
5	Sb – Ge	30Ge	450	60Ge	700	60Ge	500	80Ge	800	80Ge	450
6	Cu – As	15As	650	21As	600	8As	700	25As	700	25As	550
7	Mg – Ca	70Ca	500	70Ca	400	77Ca	400	90Ca	600	90Ca	300
8	Pb – Mg	25Mg	200	32Mg	100	50Mg	500	50Mg	400	80Mg	600
9	Cu – Ag	40Ag	400	60Ag	500	72Ag	600	90Ag	800	90Ag	400
0	Al – Ge	40Ge	300	80Ge	800	80Ge	700	90Ge	500	80Ge	400



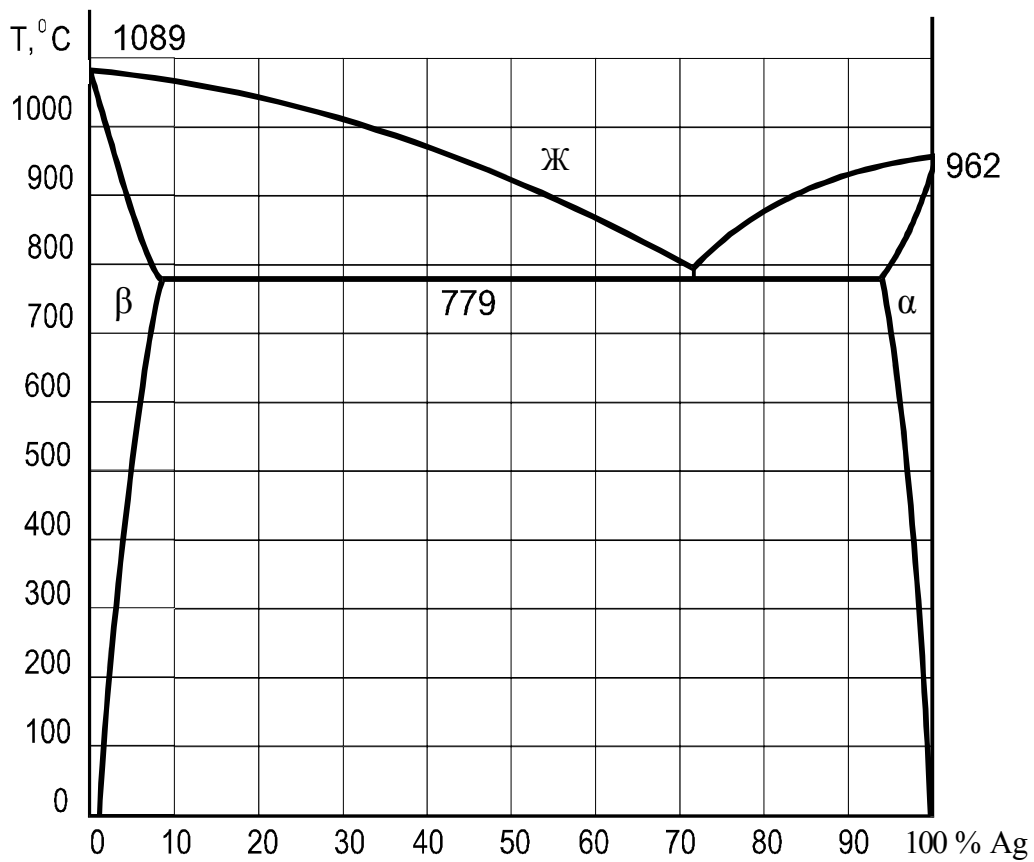
Сплавы Al - Si



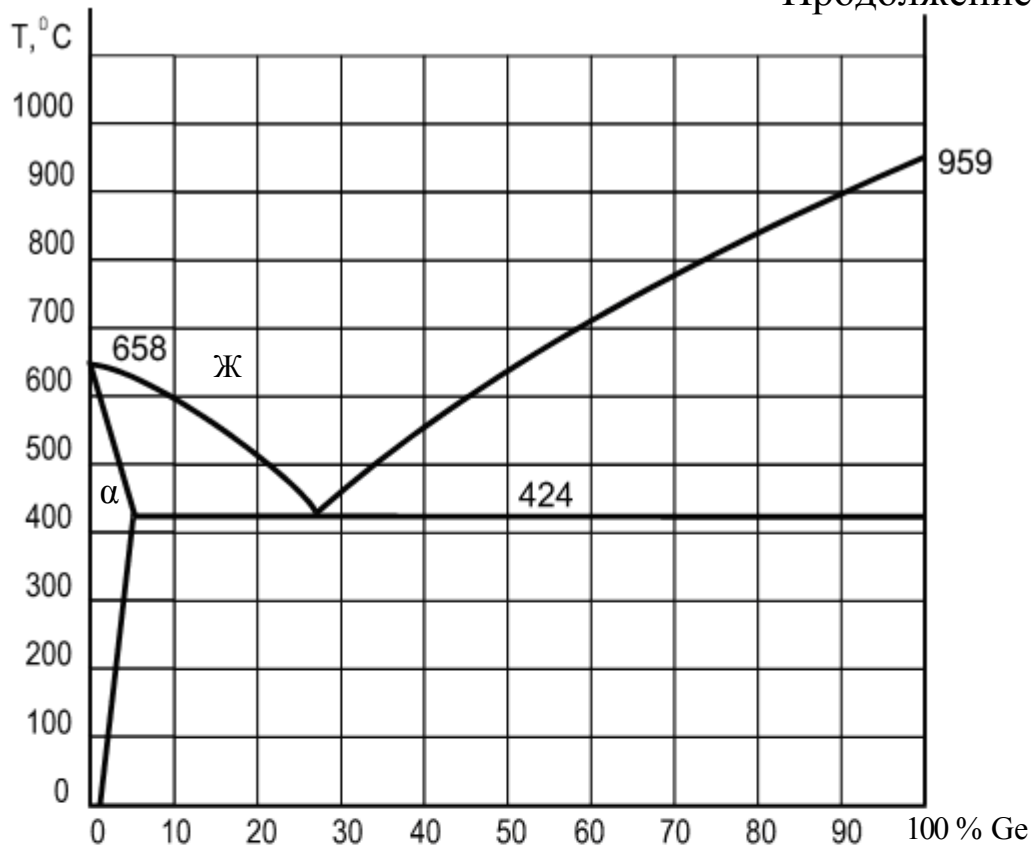
Сплавы Al - Cu



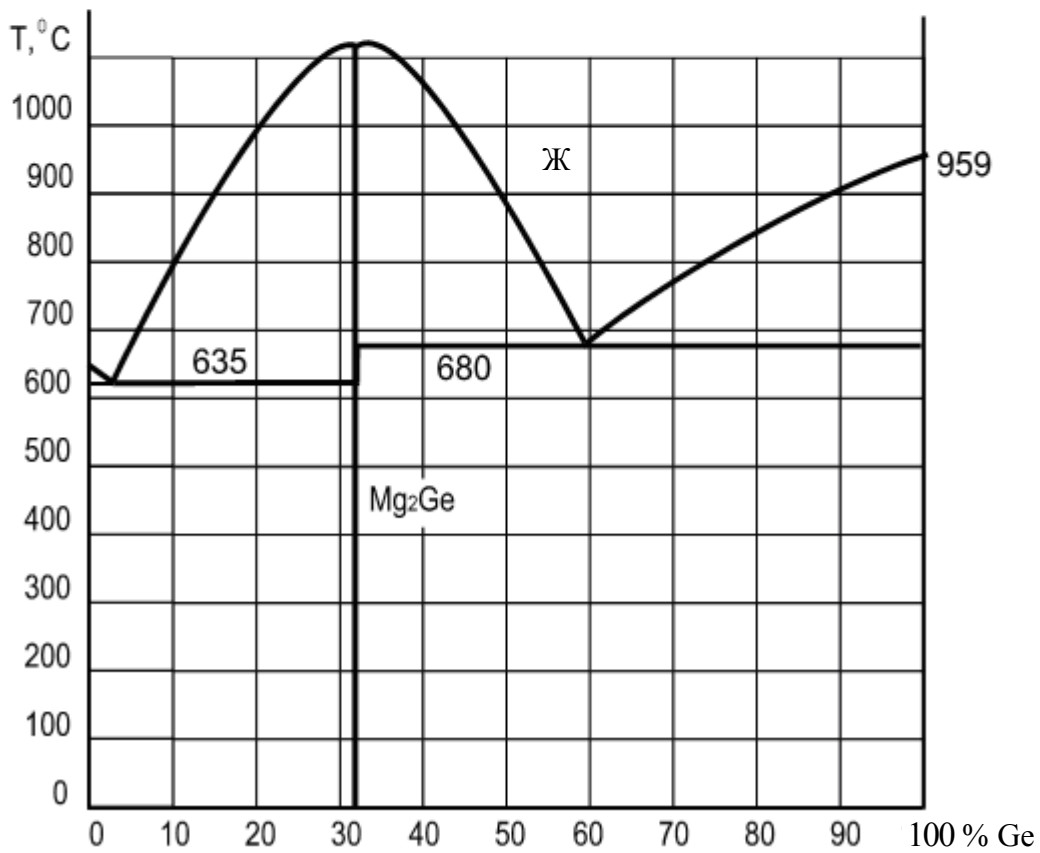
Сплавы Sb – Ge



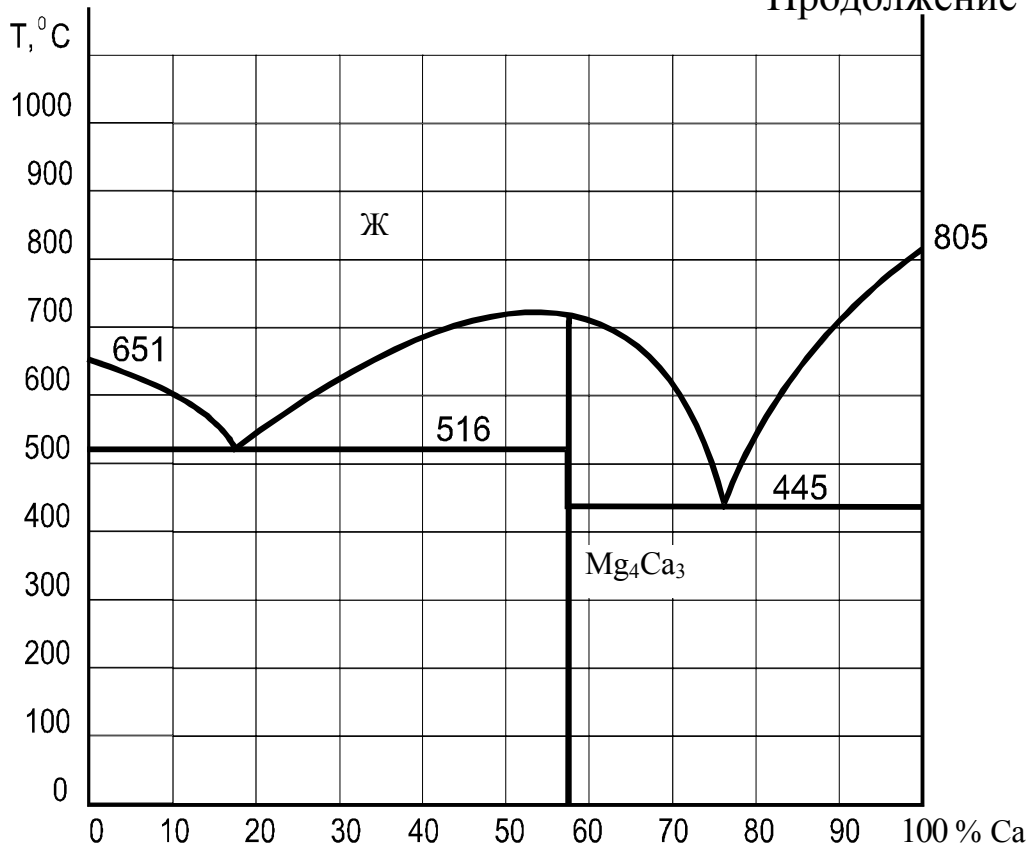
Сплавы Cu – Ag



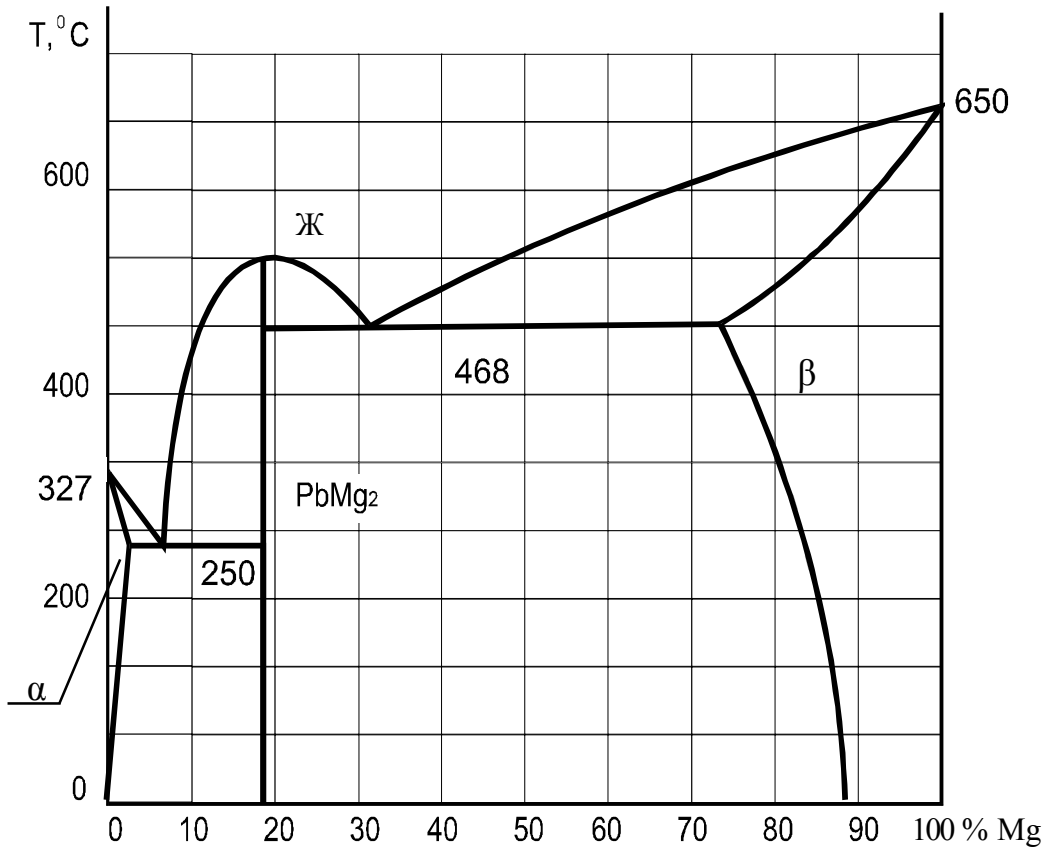
Сплавы Al – Ge



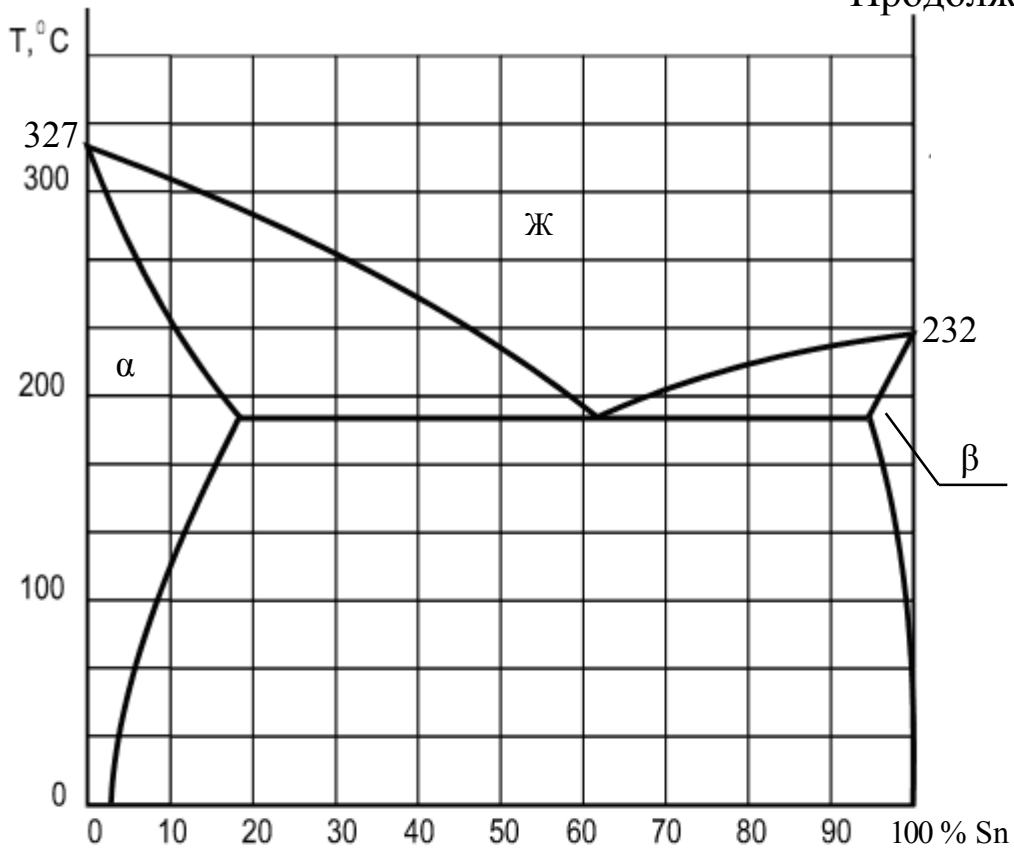
Сплавы Mg – Ge



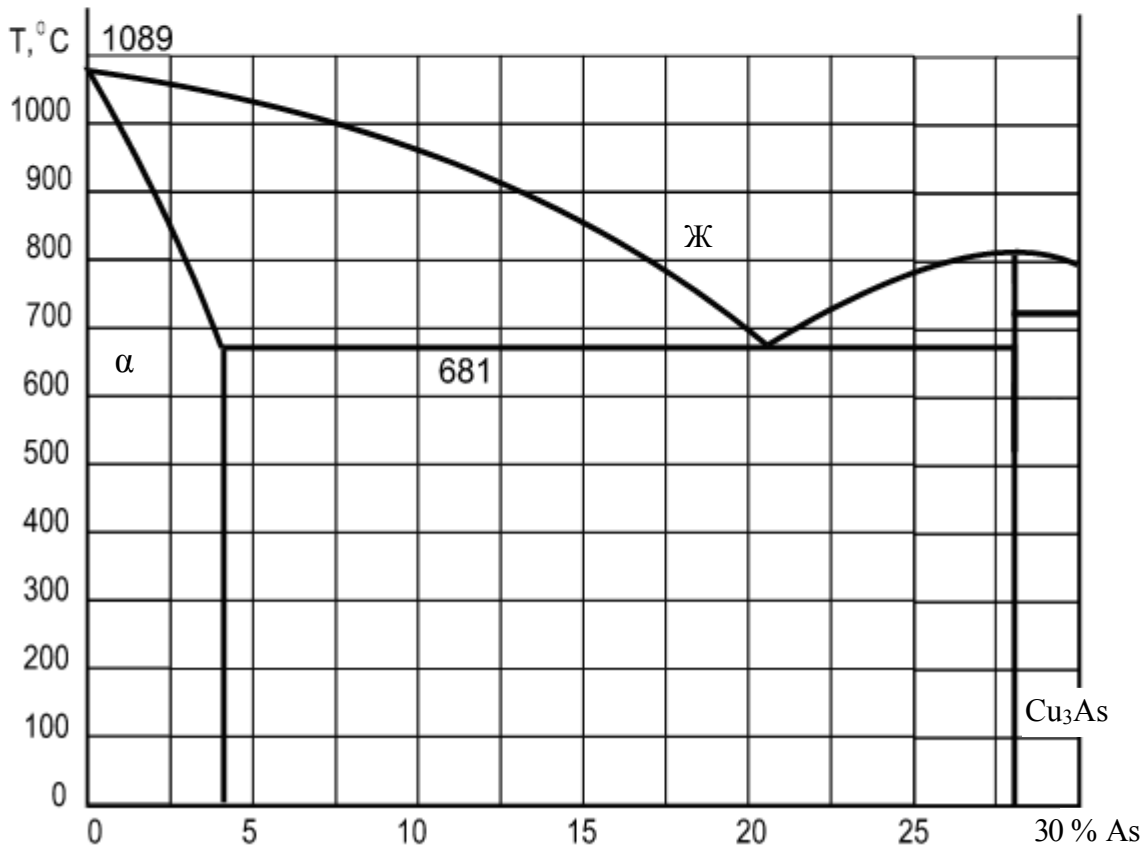
Сплавы Mg – Ca



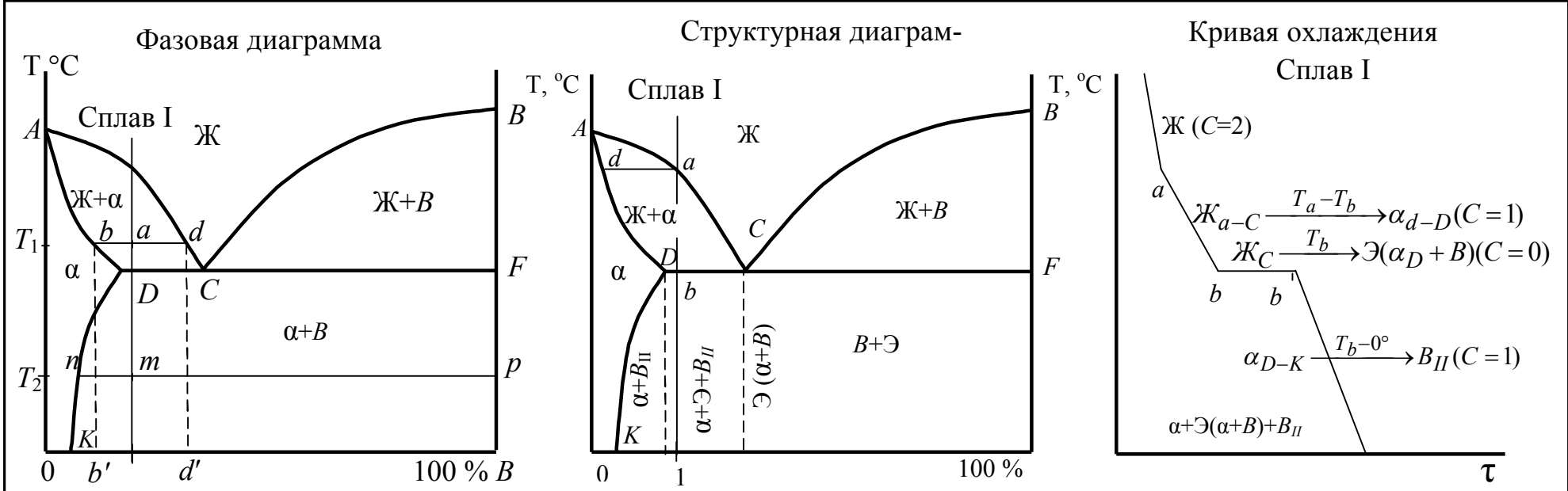
Сплавы Pb – Mg



Сплавы Pb – Sn



Сплавы Cu – As



Расчет количества фаз при T₁:

$$Q_{\alpha} = \frac{ad}{bd} \cdot 100\%; \quad Q_{Ж} = \frac{ba}{bd} \cdot 100\%$$

Расчет количества фаз при T₂:

$$Q_{\alpha} = \frac{mp}{np} \cdot 100\%; \quad Q_{В} = \frac{nm}{np} \cdot 100\%$$

Расчет степеней свободы

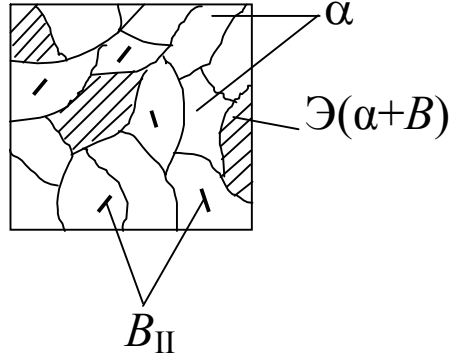
$$C_{0-a} = 2(A; B) - 1(Ж) + 1 = 2;$$

$$C_{a-b} = 2(A; B) - 2(Ж; \alpha) + 1 = 1;$$

$$C_{b-b'} = 2(A; B) - 3(Ж; \alpha; B) + 1 = 0$$

$$C_{b'-0} = 2(A; B) - 2(\alpha; B) + 1 = 1$$

Структура при 20 °C



					<i>РГР №1 по материаловедению</i>			
					Двойные диаграммы состояния	Лит.	Масса	Масштаб
Изм.	Лист.	№ докум.	Подп.	Дата				
Разраб.						Лист		Листов

Составители

**Короткова Лидия Павловна
Видин Денис Владимирович**

**ДИАГРАММЫ СОСТОЯНИЯ
ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ СПЛАВОВ**

Методические указания к расчетно-графической работе
по дисциплине «Материаловедение» для студентов
направлений 140100.62, 140400.62, 150700.62, 151900.62, 190600.62, 190700.62,
221400.62, специальности 130400.65
очной формы обучения

Печатается в авторской редакции

Подписано в печать 21.05.2013. Формат 60×84/16.

Бумага офсетная. Отпечатано на ризографе. Уч.-изд. л. 1,5.

Тираж 36 экз. Заказ

КузГТУ. 650000, Кемерово, ул. Весенняя, 28.

Типография КузГТУ. 650000, Кемерово, ул. Д. Бедного, 4А.