



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»
(ДГТУ)**

КАФЕДРА «ТЕХНИЧЕСКАЯ ЭКСПЛУАТАЦИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ
АППАРАТОВ И НАЗЕМНОГО ОБОРУДОВАНИЯ»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

по выполнению курсовой работы по дисциплине «Конструкционные и
специальные материалы авиационной техники»

Ростов-на-Дону

2024

УДК 629.3.048.3

Составитель А.Г. Тихомиров

Методические указания по выполнению курсовой работы по дисциплине «Конструкционные и специальные материалы авиационной техники». / сост. А.Г. Тихомиров. – Ростов-на-Дону: Донской гос. техн. ун-т, 2024. – 72 с.

Кратко изложены теоретические вопросы, необходимые для успешного выполнения курсовой работы, содержание и порядок выполнения курсовой работы. Предназначены для обучающихся по направлению подготовки: 25.03.01 «Техническая эксплуатация летательных аппаратов и двигателей».

Ответственный за выпуск:

Зав. кафедрой (руководитель структурного подразделения, ответственного за реализацию ОПОП): Решенкин Андрей Станиславович

© Издательский центр ДГТУ, 2024г.

Введение

Выполнение курсовой работы является этапом изучения дисциплины «Конструкционные и специальные материалы авиационной техники», выполняемой с целью закрепления теоретических знаний и получению знаний прикладного характера по изучаемым разделам дисциплины.

Теоретическая часть

1 Краткие сведения теории сплавов

В качестве конструкционных материалов в основном применяются не чистые металлы, а сплавы, полученные на их основе. Это обусловлено тем, что чистые металлы обладают фиксированными свойствами, которые не способны в полной мере удовлетворять требованиям, предъявляемым к конструкционным материалам, а сплавы на их основе способны сочетать в себе различные свойства. От выбора материала зависят потребительские свойства детали, механизма, конструкции. В разработках новых материалов в настоящее время прослеживается тенденция к расширению областей применения материала, т. е. созданию материалов, способных сочетать высокую прочность с достаточной пластичностью, высокой коррозионной стойкостью, сохраняющих эти свойства продолжительное время при повышенных температурах и давлениях и т. д. Причем во многих случаях большое значение имеет снижение массы изделия. В частности, одним из основных условий применения того или иного материала в летательных аппаратах является выигрыш в массе при выполнении всех других требований к комплексу свойств конструкции.

Металлический сплав - вещество, получаемое в результате взаимодействия двух или нескольких компонентов, обладающее свойствами металлов. Основу любого металлического сплава составляют металлы. Компонентами могут быть химические элементы (металлы и неметаллы), а также устойчивые химические соединения. В расплавленном состоянии они могут быть частично или полностью растворимы друг в друге, в твердом состоянии (в зависимости от типа межатомного

взаимодействия) образуют однофазные сплавы (твердые растворы, химические соединения или промежуточные фазы) и многофазные сплавы-смеси. При охлаждении из жидкого состояния до комнатной температуры происходит изменение фазового состава и структуры сплава. Все фазовые превращения, происходящие в сплавах, описываются с помощью диаграмм состояния.

Диаграммой состояния называется графическое изображение равновесных состояний сплава, показывающее фазовый состав сплавов в зависимости от температуры и концентрации компонентов.

Диаграмма состояния строится в координатах: «концентрация – температура». По оси абсцисс откладывается концентрация компонентов в процентах, а по оси ординат – температура в градусах Цельсия. Таким образом, каждая точка диаграммы состояния отвечает определенному составу сплава при определенной температуре в условиях равновесия.

Диаграммы состояния являются базой для изучения фазового состава, фазовых превращений и структуры сплавов, определяющих механические, физические, технологические и другие свойства металлических сплавов. Диаграммы состояния позволяют рационально выбрать область применения того или иного сплава, разрабатывать технологические процессы литья, сварки, пластической деформации и термической обработки, прогнозировать механические, физические и технологические свойства.

Для экспериментального построения диаграммы состояния сплавов, образованных компонентами A и B , изготавливают серию сплавов с различным содержанием этих компонентов. Сплавы нагревают до жидкого состояния, и проводится медленное охлаждение, после чего строятся зависимости изменения температуры от времени (кривые охлаждения). Анализ построенных графиков позволяет определить температуры фазовых превращений для каждой концентрации сплава (температуру начала кристаллизации T_1 и температуру конца кристаллизации T_2). Нанесение полученных температур T_1 и T_2 в зависимости от концентрации, и соединение их линиями, позволяет получить диаграмму состояния сплава (рис. 1).

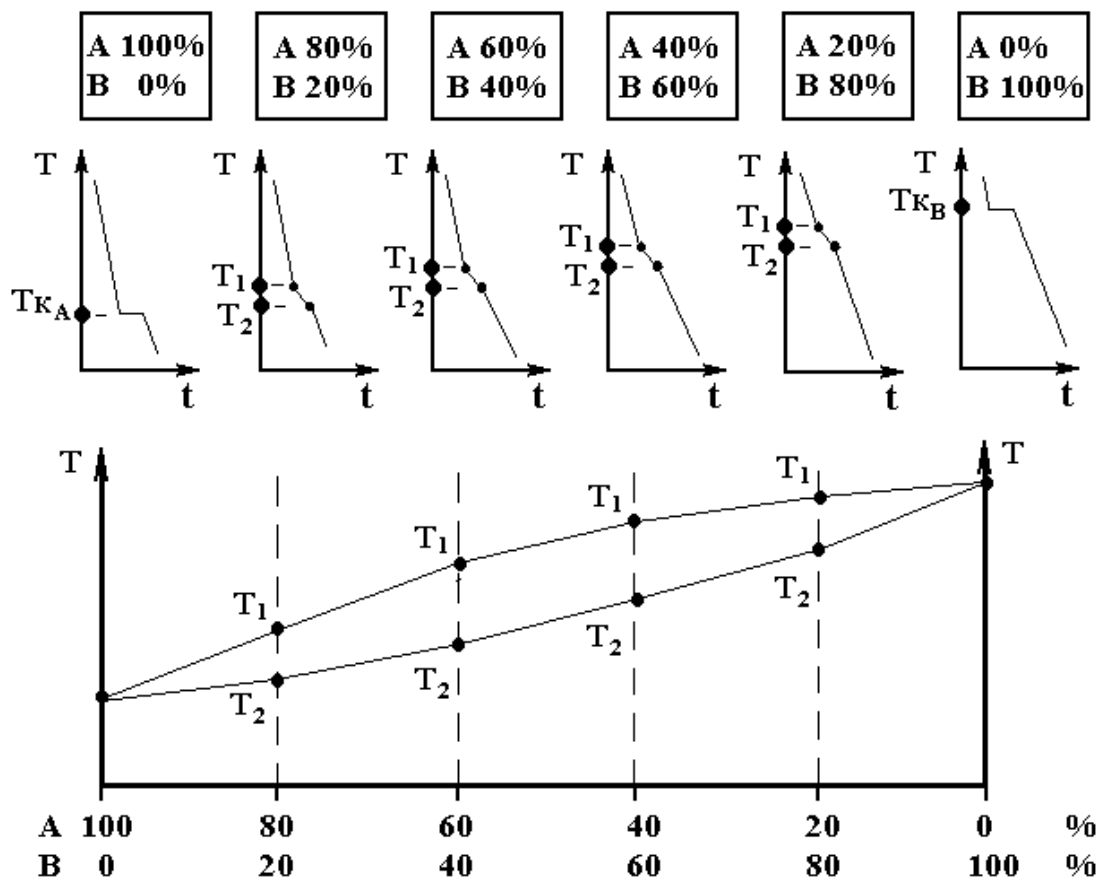


Рисунок 1 – Построение диаграммы состояния

Чистые компоненты сплава A и B имеют одну критическую точку, соответствующую температуре кристаллизации компонентов. Все остальные сплавы системы « $A - B$ » имеют две критические точки.

Линию, проведенную через геометрическое место точек, соответствующих температурам начала кристаллизации T_1 , называют линией ликвидуса (от латинского *liquidus* — жидкий). Выше этой линии все сплавы данной системы находятся в жидком состоянии.

Линию, проведенную через геометрическое место точек, соответствующих температурам конца кристаллизации T_2 , называют линией солидуса (от латинского *solidus* — твердый). Ниже этой линии все сплавы данной системы находятся в твердом состоянии.

Для диаграмм состояний разных сплавов, формы кривых линий ликвидуса и солидуса могут быть различными (выпуклыми, вогнутыми). Эти линии служат линиями раздела фаз.

Фазой называется однородная по химическому составу и кристаллическому строению часть системы, отделенная от других частей поверхностью раздела, при переходе через которую может скачкообразно меняться химический состав, агрегатное состояние, или кристаллическая структура вещества. Фазами могут быть чистые металлы и неметаллы, возможные их аллотропические модификации, химические соединения, жидкие и твердые растворы.

Системой называется совокупность фаз, находящихся в равновесии при определенных внешних условиях. В металлических сплавах (системах) внешними факторами, влияющими на состояние системы, являются температура и давление. Внутренним переменным фактором является концентрация. Если система находится в равновесии, то все внутренние (концентрация) и внешние (температура и давление) факторы системы уравновешены. Следовательно, равновесие означает, что при данных внешних условиях в металлических сплавах сохраняются неизменным состав фазы.

Строение металлических сплавов зависит от того, в какие взаимодействия вступают образующие их компоненты. Структура характеризует форму, размеры и взаимное расположение фаз в сплаве. При кристаллизации сплавов могут образоваться однородные твердые растворы, химические соединения и смеси различных фаз. Под структурой понимают форму, размеры или характер взаимного расположения соответствующих частиц (атомов, блоков, зерен, фаз и др.) в металлах или сплавах. Различают четыре масштабных уровня структуры: атомно-кристаллический, субструктурный, микроструктурный, макроструктурный.

Диаграмма состояния сплавов, компоненты которых полностью растворимы в жидком и твердом состояниях

Полная взаимная растворимость в твердом состоянии возможна тогда, когда оба компонента имеют одинаковые кристаллические решетки и атомные диаметры компонентов мало отличаются по размерам. Диаграмма (рис. 2) имеет простой вид и состоит из двух линий — ликвидус и солидус, пересекающихся между собой в точках кристаллизации чистых компонентов А и В.

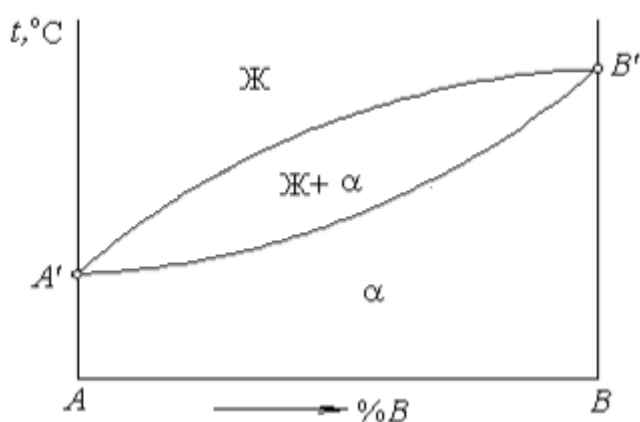


Рисунок 2 – Диаграмма состояния системы «А – В» с неограниченной растворимостью компонентов в жидком и твердом состояниях

Эти линии делят всю диаграмму состояния на три фазовые области. Выше линии ликвидуса располагается область однофазных жидких растворов (Ж), ниже солидуса – область однофазных твёрдых растворов (α). Между линиями ликвидуса и солидуса находится двухфазная область ($\text{Ж} + \alpha$). Диаграммы такого типа имеют системы Ni-Cu, Ag-Au, Mo-V, Mo-W и др.

Рассмотрим процессы, которые будут происходить в сплаве X при его медленном охлаждении до комнатной температуры (рис. 3). При охлаждении в сплаве будут наблюдаться две критические точки (m и n), соответствующие температурам t_1 и t_2 . В исходном состоянии сплав представляет собой жидкий раствор, состав которого соответствует составу сплава.

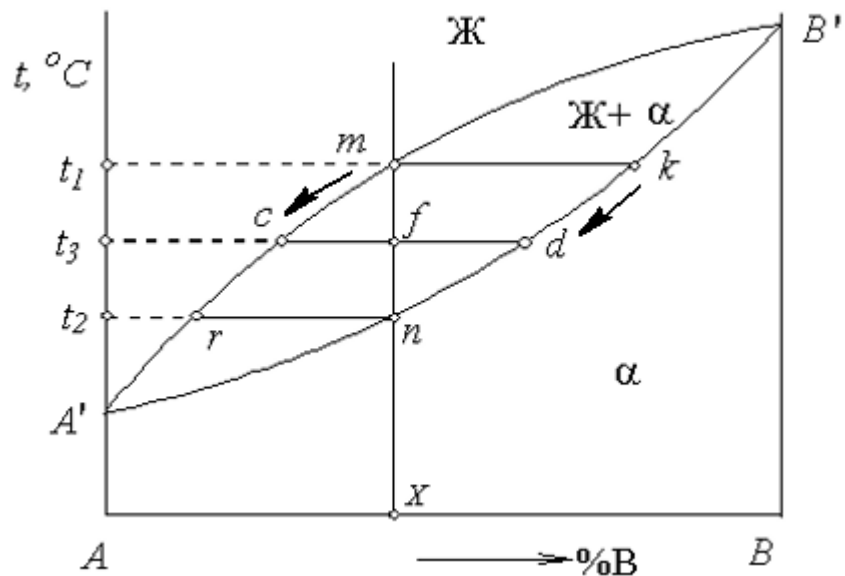


Рисунок 3 – Процессы кристаллизации

При охлаждении образца сплава до температуры первой критической точки t_1 (температура t_1 – температура ликвидуса сплава X) сплав будет оставаться однофазным. При температуре t_1 из жидкого раствора, процентный состав которого соответствует точке m , начнут выделяться кристаллы α -твёрдого раствора, процентный состав которых соответствует точке k . То есть из жидкого раствора при температуре t_1 начинают выпадать кристаллы, сильно обогащенные более тугоплавким компонентом B. При этом произойдет изменение фазового состояния сплава, он станет двухфазным.

Фигуративная точка, отвечающая жидкой фазе, при понижении температуры будет перемещаться от точки m вниз по кривой ликвидус, а фигуративная точка, соответствующая α -твёрдому раствору – от точки k вниз по кривой солидус. На рисунке 3 это показано стрелками.

При какой-то промежуточной температуре t_3 составы находящихся в равновесии жидкой и твёрдой фаз будут описываться фигуративными точками c и d , а состояние сплава X – фигуративной точкой f . Отрезок cd , соединяющий фигуративные точки равновесных фаз, носит название коноды. Количество каждой из равновесных фаз в рассматриваемом сплаве может быть определено по правилу

рычага. Если принять за точку опоры мысленного рычага cd фигуративную точку f , то согласно правилу рычага, отношение масс фаз будет обратно отношению длин отрезков от точки f до фигуративных точек соответствующих фаз. Таким образом,

$$\frac{m_{\text{ж}}}{m_{\alpha}} = \frac{fd}{cf} \quad (1)$$

где $m_{\text{ж}}$ и m_{α} – массы соответственно жидкой и твёрдой фаз.

Из уравнения (1) следует, что

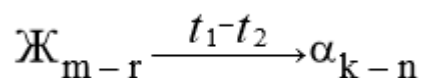
$$\frac{m_{\text{ж}}}{m_{\text{ж}} + m_{\alpha}} = \frac{m_{\text{ж}}}{m_{\text{спл}}} = \frac{fd}{cf + fd} = \frac{fd}{cd},$$

$$\frac{m_{\alpha}}{m_{\text{спл}}} = \frac{cf}{cd},$$

где $m_{\text{спл}}$ – масса сплава.

Как видно из этих уравнений, количество той или иной фазы в сплаве может быть выражено в долях или в процентах от массы всего сплава. При этом вся длина коноды cd будет соответствовать массе всего сплава, то есть 100 %, а отрезки cf и fd – массам α -фазы и жидкой фазы. Процесс кристаллизации закончится при такой температуре, при которой отрезок коноды между точками, соответствующими кристаллам α -фазы и сплаву, будет равен нулю. Такой температурой будет температура t_2 . Температура конца кристаллизации сплава t_2 называется температурой солидуса сплава. Точки r и n будут соответствовать составам последних капель жидкого раствора и кристаллов α -фазы, находящимся в равновесии друг с другом при температуре t_2 . Следовательно, процесс кристаллизации сплава X происходит в интервале температур от t_1 до t_2 . При этом фигуративная точка жидкого раствора перемещается по кривой ликвидус от точки m до точки r , а фигуративная точка α -твёрдого раствора – по кривой солидуса от k до точки n .

Процесс кристаллизации может быть записан в виде реакции кристаллизации сплава:



Кривая охлаждения образца сплава X (рис. 4) в интервале температур от t_1 до t_2 дважды изменяет свой ход, что связано с началом выделения теплоты при кристаллизации и окончанием выделения теплоты после завершения кристаллизации.

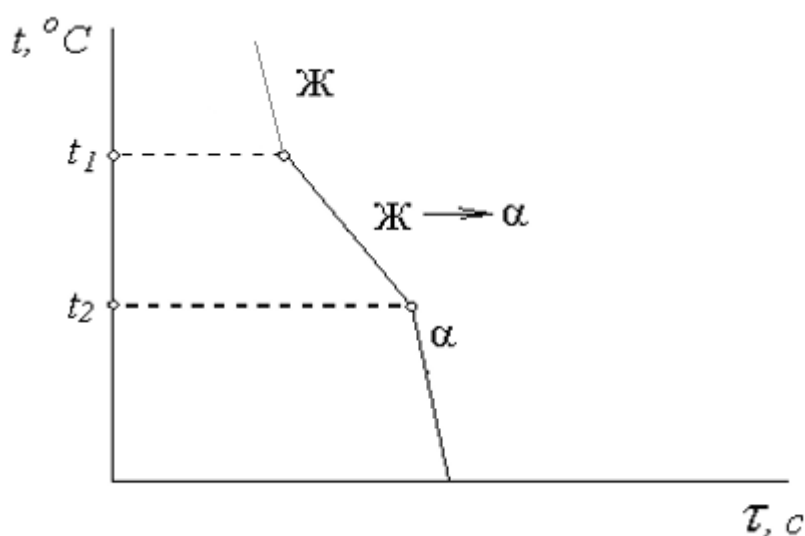


Рисунок 4 – Кривая охлаждения

После равновесной кристаллизации структура сплава X будет состоять из кристаллов (зёрен) α -твёрдого раствора (рис.5)

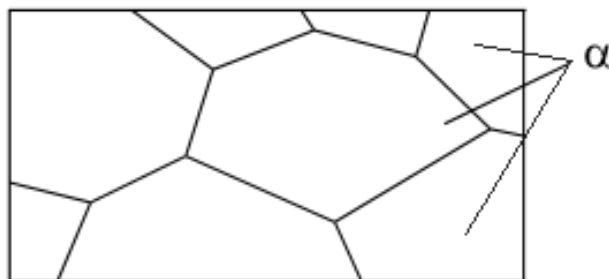


Рисунок 5 – Структура сплава после кристаллизации

Диаграмма состояния двухкомпонентной системы с неограниченной растворимостью компонентов в жидком и ограниченной растворимостью компонентов в твёрдом состояниях (эвтектический тип)

Диаграмма состояния двухкомпонентной системы с неограниченной растворимостью в жидком состоянии и ограниченной растворимостью в твёрдом состоянии эвтектического типа приведена на рисунке 6. $A'e$ – линия ликвидуса α – твёрдого раствора (твёрдого раствора компонента B в компоненте A); $B'e$ – линия ликвидуса β –твёрдого раствора (твёрдого раствора компонента A в компоненте B). $A'a$ и $B'b$ – это линии солидуса α - и β -твёрдых растворов соответственно; ab – эвтектическая линия; e – эвтектическая точка; ac является линией ограниченной растворимости компонента B в компоненте A (линией сольвуса α -раствора), а bd – линией ограниченной растворимости компонента A в компоненте B (линией сольвуса β -раствора).

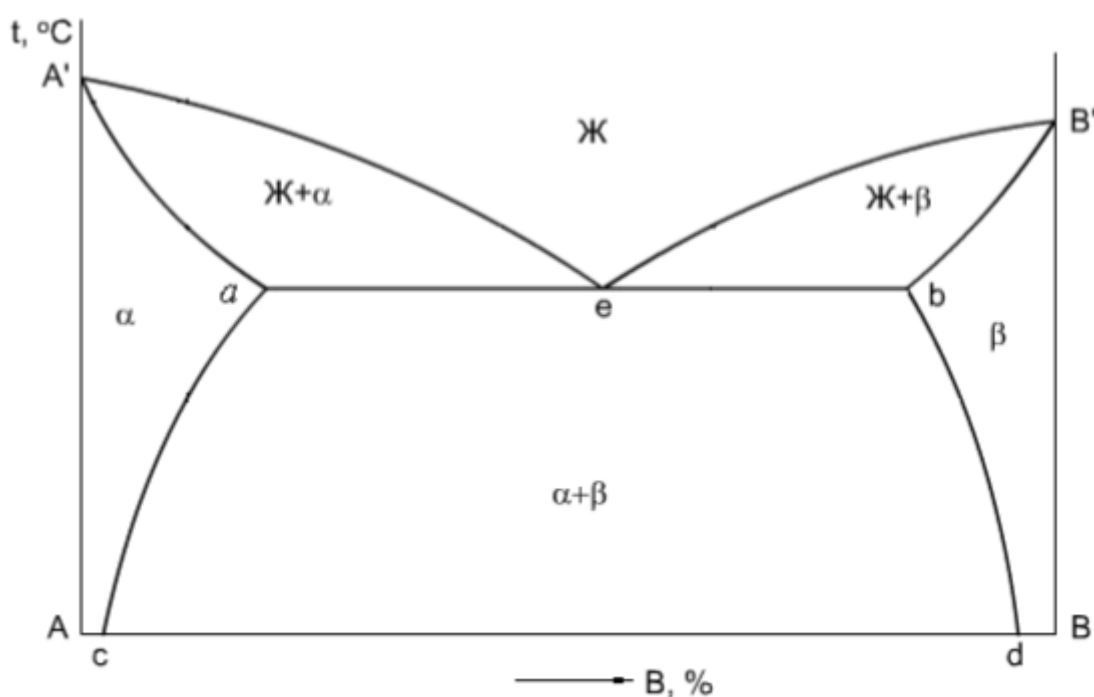


Рисунок 6 – Диаграмма состояния двухкомпонентной системы с ограниченной растворимостью в твёрдом состоянии (фазовая)

Линии диаграммы разбивают всю диаграмму состояния системы « $A - B$ » на шесть фазовых областей: три однофазные области ($Ж$, α , β) и три двухфазные области ($Ж + \alpha$, $Ж + \beta$, $\alpha + \beta$). Эвтектическая прямая является по существу седьмой, выродившейся в линию трехфазной областью $Ж + \alpha + \beta$. Все сплавы системы « $A - B$ » могут быть подразделены на доэвтектические, эвтектические и заэвтектические сплавы. Состав эвтектического сплава соответствует составу точки эвтектики e . Доэвтектические сплавы находятся в области, расположенной между точками a и e , а заэвтектические сплавы – в области между точками e и b .

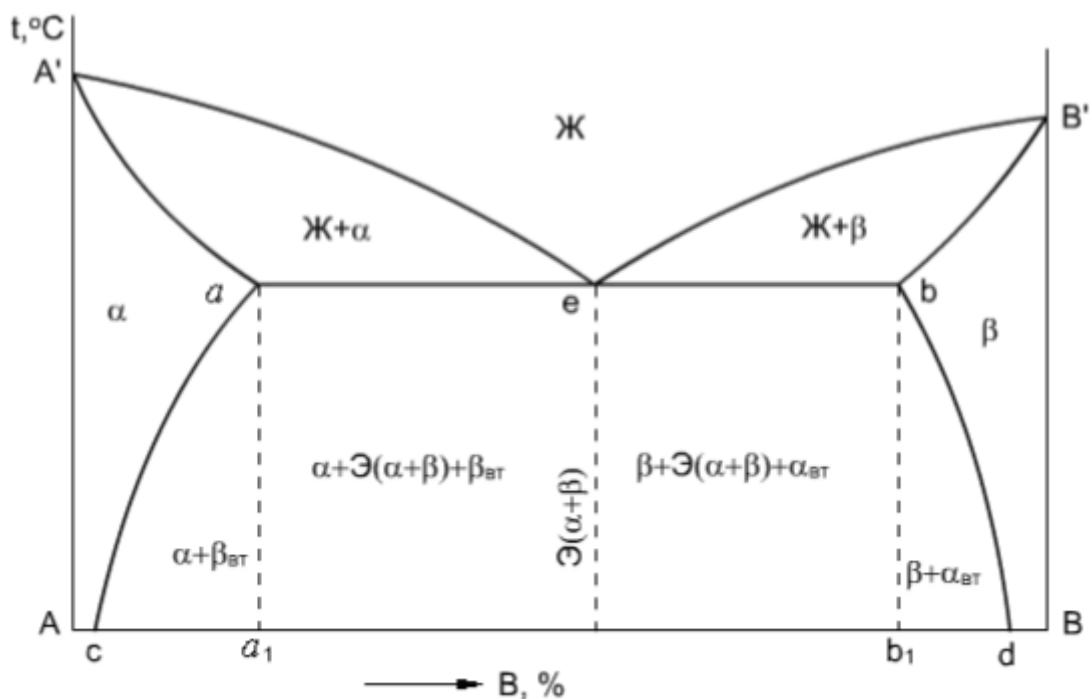


Рисунок 7 – Диаграмма состояния двухкомпонентной системы с ограниченной растворимостью в твёрдом состоянии (структурная)

Проанализируем процессы, происходящие при охлаждении эвтектического сплава X такой системы, в которой величина предельной растворимости как компонента B в α -твёрдом растворе, так и компонента A в β -твёрдом растворе не изменяется при изменении температуры (рис. 8). Вертикаль, проходящая через точку X , пересекает линии диаграммы состояния в точке e .

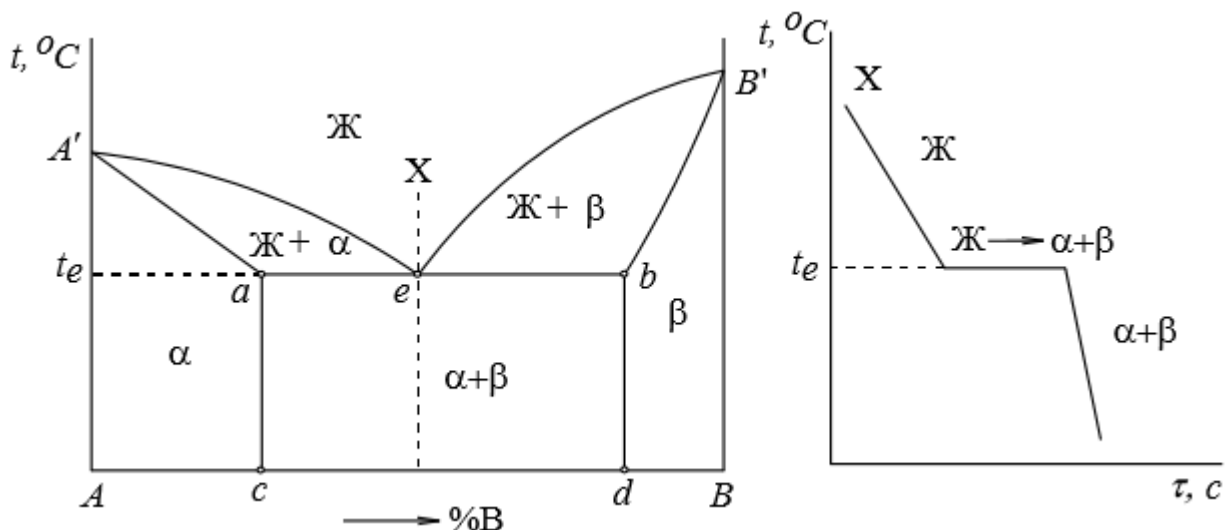
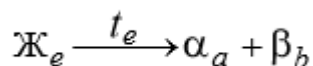


Рисунок 8 – Кристаллизация эвтектического сплава

Сплав X будет иметь одну критическую точку, которой соответствует эвтектическая температура t_e . При охлаждении сплава до t_e фазовый состав сплава изменяться не будет. Точка e одновременно принадлежит как кривой ликвидуса α - твёрдого раствора, так и кривой ликвидуса β -твёрдого раствора. Жидкий сплав, фигуративная точка которого соответствует точке e , будет одновременно насыщен как по отношению к кристаллам α -раствора, так и по отношению к кристаллам β - фазы. Поэтому из этого жидкого раствора в процессе равновесной кристаллизации одновременно будут выделяться как α -, так и β -кристаллы. Получающаяся в результате кристаллизации сплава X смесь α - и β -кристаллов носит название эвтектической смеси, или эвтектики. Процесс эвтектической кристаллизации может быть записан в виде реакции:



При равновесной эвтектической кристаллизации в образце сплава X в равновесии находятся три фазы: жидкий раствор, кристаллы α -твёрдого раствора и кристаллы β -твёрдого раствора, составы которых соответствуют фигуративным точкам e , a и b . После окончания эвтектической кристаллизации структура сплава

будет представлять собой эвтектическую смесь кристаллов α - и β -фаз. Соотношение количеств этих фаз в эвтектике:

$$\frac{m_{\alpha}}{m_{\beta}} = \frac{be}{ae}.$$

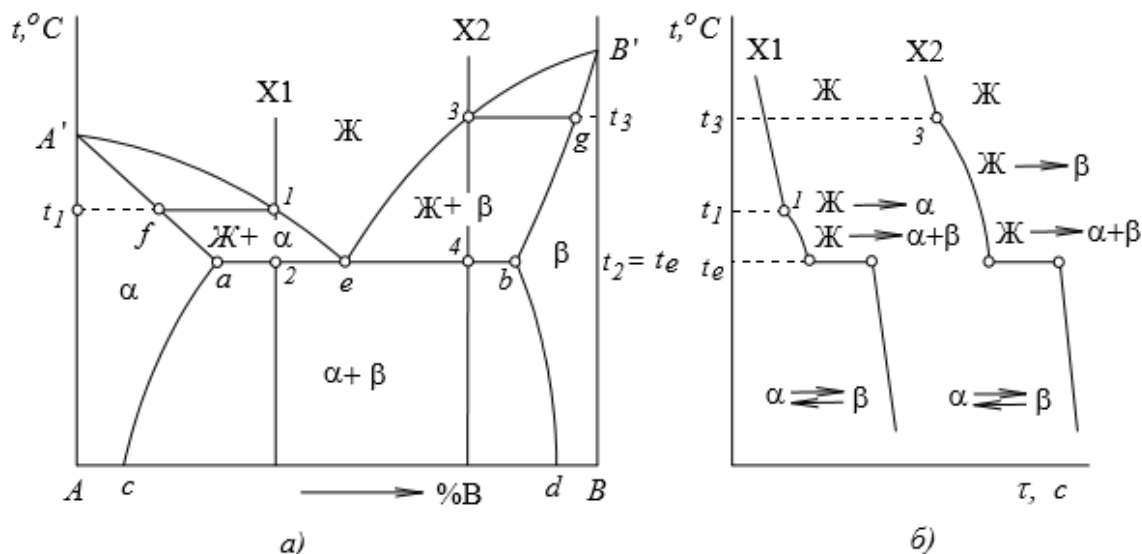
Предельные растворимости компонентов A и B в фазах α , β при изменении температуры не изменяются, поэтому в процессе охлаждения сплава X до комнатной температуры составы фаз в сплаве изменяться не будут.

На кривые охлаждения наблюдается горизонтальная площадка, соответствующая эвтектической кристаллизации. Микроструктура эвтектического сплава (рис. 9) имеет одну структурную составляющую – эвтектику, но фазовых составляющих в структуре сплава X будет две. Это эвтектические кристаллы α - твёрдого раствора и эвтектические кристаллы β -твёрдого раствора.



Рисунок 9 – Микроструктура эвтектического сплава (схема)

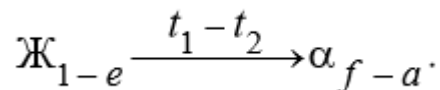
Рассмотрим процессы, происходящие при охлаждении образца доэвтектического сплава X_I такой системы, в которой предельная растворимость компонента B в α -твёрдом растворе и предельная растворимость компонента A в β -твёрдом растворе уменьшаются с понижением температуры (рис. 10).



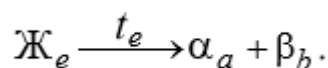
а) диаграмма состояния; б) кривые охлаждения сплавов X_1 и X_2

Рисунок 10 – Кристаллизация доэвтектического и заэвтектического сплавов

Вертикаль сплава X_1 пересекает в точках 1 и 2 две линии диаграммы состояния. В интервале температур от t_1 до t_e происходит кристаллизация твёрдого раствора:

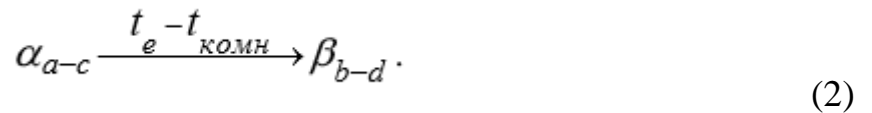


Кристаллы α -фазы, выделяющиеся в эту стадию кристаллизации, называются первичными. В конечный момент кристаллизации фигуративная точка первичных кристаллов оказывается в точке a , а фигуративная точка жидкого раствора в точке e . При температуре t_e жидкий раствор кристаллизуется в виде эвтектики:

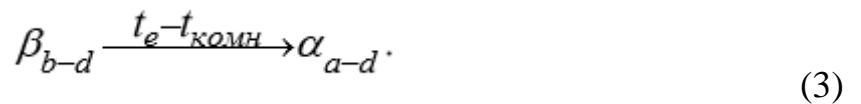


Таким образом, кристаллизация сплава X_1 происходит в две стадии. Поэтому после эвтектической кристаллизации при температуре t_e структура сплава будет состоять из двух структурных составляющих: первичных кристаллов α -твёрдого раствора и эвтектики $\alpha_a + \beta_b$. Фазовых составляющих в структуре сплава X_1 после кристаллизации эвтектики будет также две. Это кристаллы α - и β -фаз.

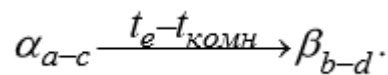
В результате того, что предельная растворимость компонента B в α - твёрдом растворе уменьшается с понижением температуры, в процессе охлаждения будет происходить распад α -твёрдого раствора с выделением вторичных β -кристаллов. При этом фигуративная точка α -кристаллов будет перемещаться по кривой ac , а β - кристаллов – по кривой bd . Этот процесс может быть записан в виде реакции:



В результате этого процесса в кристаллах α -фазы появятся мелкие вторичные кристаллы β -фазы. С понижением температур предельная растворимость компонента A в β -твёрдом растворе также уменьшается, поэтому аналогичный процесс будет происходить и в кристаллах β -фазы:



Реакции (2) и (3) могут быть объединены, так как они протекают одновременно:



В результате этих процессов появляются вторичные кристаллы в первичных кристаллах α -фазы и в кристаллах α - и β -фаз эвтектики. Однако выделения вторичных кристаллов в эвтектике незаметно, так как сама эвтектика на шлифе выглядит как дисперсная смесь двух видов кристаллов. Поэтому вторичные кристаллы заметны только в первичных кристаллах α -твёрдого раствора.

В структуре сплава X_1 (рис. 11) наблюдаются структурные составляющие – первичные кристаллы α -твёрдого раствора с выделением вторичных β -кристаллов и $(\alpha + \beta)$ эвтектика.

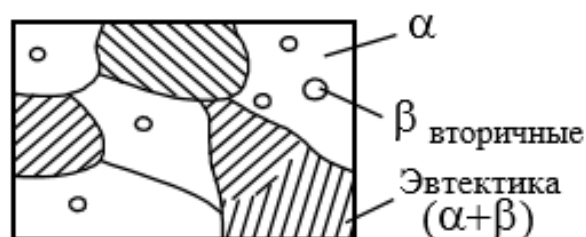


Рисунок 11 – Схема микроструктуры доэвтектического сплава

В структуре будут две фазовые составляющие – кристаллы α_c - и β_d -фаз, состав которых соответствует фигуративным точкам c и d .

Заэвтектический сплав X_2 также имеет две критические точки (точки 3 и 4). При охлаждении сплава X_2 (см. рис 10):

$$\begin{aligned} \text{Ж}_{3-e} &\xrightarrow{t_3-t_e} \beta_{g-b}, \\ \text{Ж}_e &\xrightarrow{t_e} \alpha_a + \beta_b, \\ \alpha_{a-c} &\xrightarrow{t_e-t_{\text{комн.}}} \beta_{b-d}. \end{aligned}$$

Согласно данным выражениям, процесс кристаллизации этого сплава также происходит в две стадии. И в структуре сплава будут структурные составляющие – первичные кристаллы β -фазы с включениями вторичных α -кристаллов и $(\alpha + \beta)$ эвтектика (рис. 12).

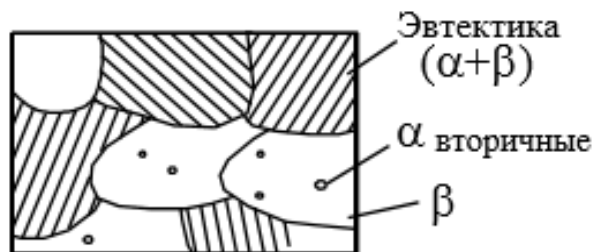
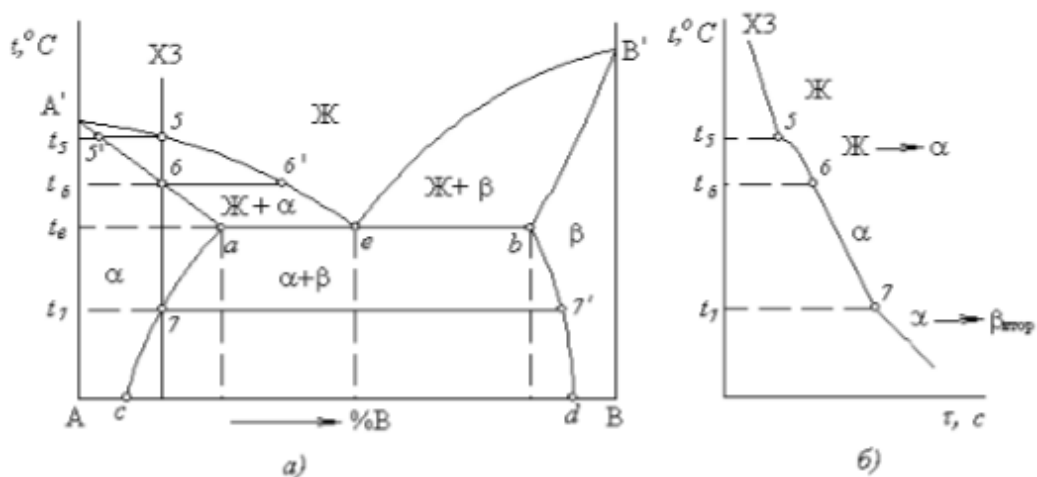


Рисунок 12 – Схема микроструктуры заэвтектического сплава

Рассмотрим процессы, происходящие при медленном охлаждении образца сплава X_3 (рис. 13). Вертикаль сплава пересекает три линии диаграммы состояния в точках 5, 6 и 7. Поэтому при охлаждении сплава X_3 будут наблюдаться три критические точки (t_5 , t_6 и t_7).



а) диаграмма состояния; б) кривая охлаждения сплава X_3

Рисунок 13 – Кристаллизация сплава X_3

$$\begin{aligned} \text{Ж}_{5-6'} &\xrightarrow{t_5-t_6} \alpha_{5'-6}, \\ \alpha_6 &\xrightarrow{t_6-t_7} \alpha_7, \\ \alpha_{7-c} &\xrightarrow{t_7-t_{\text{комн.}}} \beta_{7'-d}. \end{aligned}$$

Стадии охлаждения до температуры t_7 аналогичны стадиям охлаждения и кристаллизации сплавов типа твёрдых растворов. При температуре t_7 фигуративная точка сплава оказывается на кривой сольвуса α -твёрдого раствора. Поэтому α -твёрдый раствор будет насыщенным относительно кристаллов β -фазы, и при дальнейшем охлаждении из кристаллов α -фазы будут выделяться вторичные кристаллы β -фазы. Эти кристаллы β -фазы образуются как по границам, так и внутри α -кристаллов. На рисунке 14 приведена структура образца сплава X_3 . Структура сплава X_3 состоит из кристаллов α -твёрдого раствора, содержащих включения вторичных кристаллов β -твёрдого раствора.

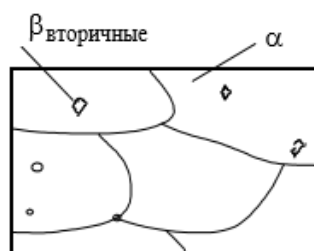


Рисунок 14 – Схема микроструктуры сплава X_3

Диаграмма состояния системы с перитектическим превращением

Перитектическим превращением называется превращение, при котором жидкая фаза, реагируя с ранее выделившейся твердой фазой, образует новую твердую фазу. Перитектическая реакция протекает при строго определенных составах фаз, их количествах и постоянной температуре. Это превращение имеет место при кристаллизации сплавов: Cu-Zn; Cu-Sn; Cu-Al и др. Общий вид диаграммы состояния показан на рисунке 15.

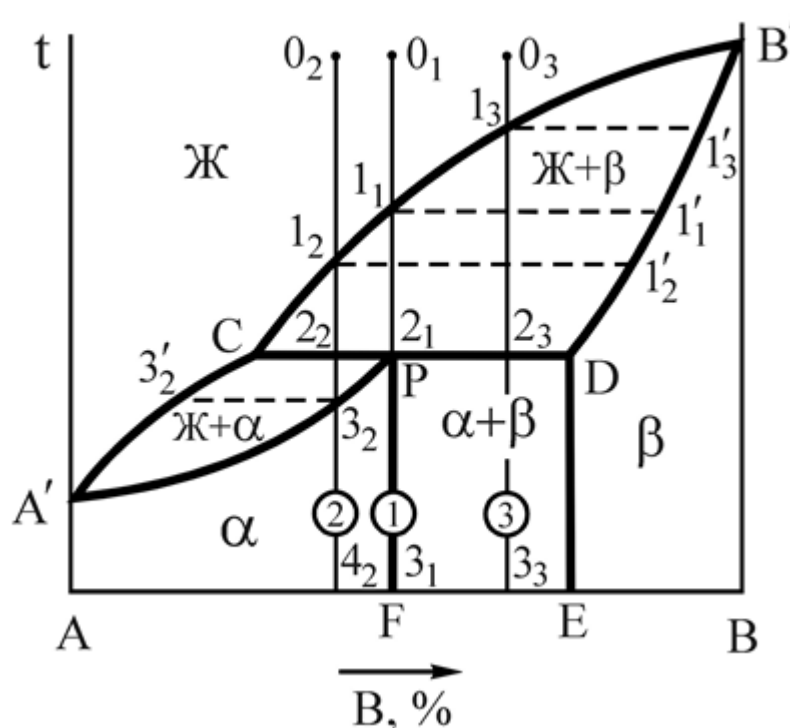


Рисунок 15 – Диаграмма состояния системы A-B с перитектическим превращением

В данной системе компоненты: A и B, фазы: Ж, α, β; α-ограниченный твердый раствор компонента B в A, β-ограниченный твердый раствор компонента A в B. Линии $A'CB'$ - ликвидус, $A'PDB'$ - линии солидус, линия CPD - линия перитектического превращения, линия PF линия предельной растворимости компонента B в A, линия DE - предельной растворимости A в B.

Рассмотрим кристаллизацию трех сплавов 1, 2 и 3, обозначенных кружками на рисунке 15.

На рисунке 16 представлена кривая охлаждения и схема структуры сплава 1

при нормальной температуре.

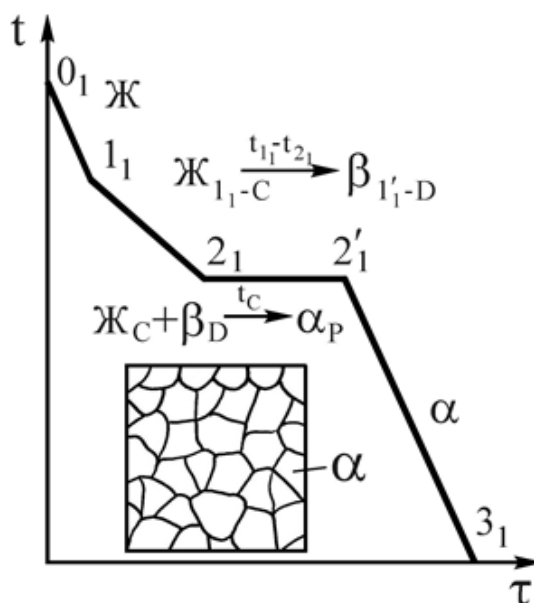
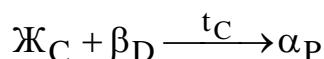


Рисунок 16 – Кривая охлаждения и схема структуры сплава 1 при нормальной температуре

До температуры точки 1_1 - охлаждение жидкого сплава 1. Начало кристаллизации сплава соответствует температуре точки 1_1 , из жидкого сплава начинают кристаллизоваться кристаллы β -твердого раствора. При кристаллизации в интервале температур 1_1-2_1 состав жидкой фазы изменяется по линии ликвидус на участке $1_1-С$, а кристаллов β -твердого раствора по линии солидус на участке $1'_1-D$. При температуре точки 2_1 , в равновесии находятся жидкая фаза состава точки $С$ и β -кристаллы состава точки D , происходит перитектическое превращение по реакции



Соотношение количества жидкой фазы и кристаллов β -твердого раствора, необходимое для образования α -твердого раствора состава точки P , с помощью правила отрезков равно $\frac{PD}{PC}$, т.е. для образования α -твердого раствора указанного состава полностью расходуется жидкая фаза и кристаллы β -твердого раствора. После перитектического превращения происходит охлаждение α -твердого раствора

(участок $2'_1-3_1$ кривой охлаждения, рис.16).

Кривая охлаждения сплава 2 приведена на рисунке 17. Кристаллизация сплава 2 до температуры точки 2_2 протекает аналогично сплаву 1.

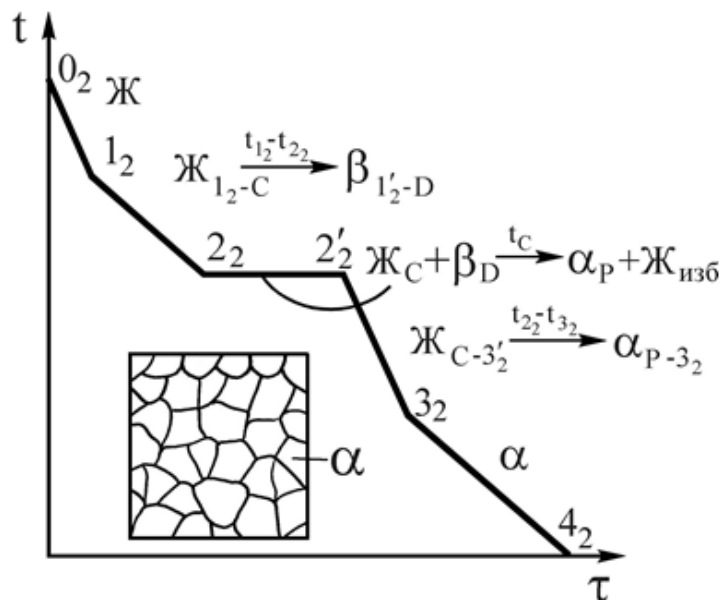


Рисунок 17 – Кривая охлаждения и схема структуры сплава 2 при нормальной температуре

Особо подчеркнем, что в сплавах левее точки Р перитектическое превращение происходит с избытком жидкой фазы. При температуре точки 2 произойдет перитектическое превращение по реакции $Ж_C + \beta_D \xrightarrow{t_C} \alpha_P + Ж_{изб}$

Соотношение количества жидкой фазы и кристаллов β -твердого раствора равно $\frac{2_2 D}{2_2 C}$. Отрезок $2_2 D$ больше отрезка $P D$, поэтому часть жидкой фазы после перитектического превращения остается неизрасходованной. При дальнейшем охлаждении в интервале температур 2_2-3_2 происходит кристаллизация избыточной жидкой фазы, из которой выделяются кристаллы α -твердого раствора. В интервале температур 3_2-4_2 - охлаждение сплава, имеющего однородные зерна α -твердого раствора.

В отличие от сплава 2 в сплаве 3 перитектическое превращение протекает с избытком твердой фазы по реакции $Ж_C + \beta_D \xrightarrow{t_C} \alpha_P + \beta_{изб}$. Кривая охлаждения

сплава 3 приведена на рисунке 18.

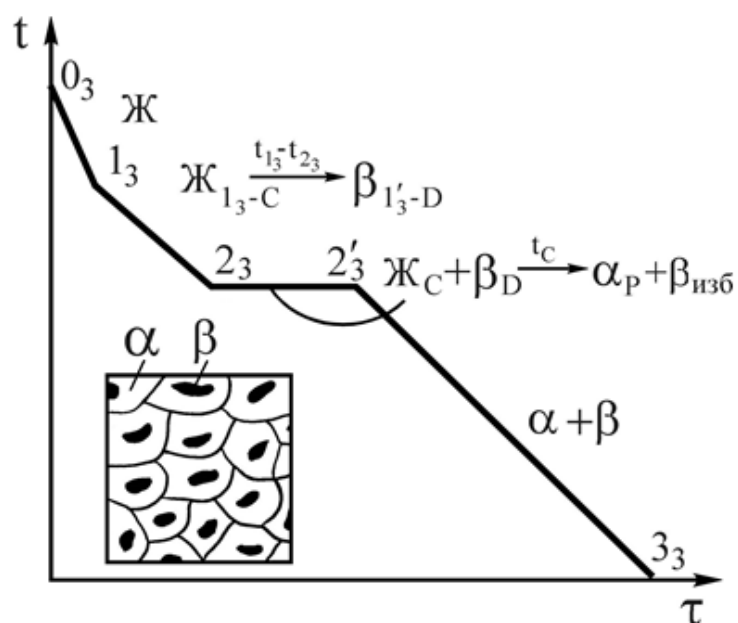


Рисунок 18 – Кривая охлаждения и схема структуры сплава 3 при нормальной температуре

Соотношение количества жидкой фазы и β -твердого раствора в перитектическом превращении равно $\frac{2_3D}{2_3C}$. Отрезок 2_3C больше отрезка PC , поэтому по окончании реакции в избытке остаются кристаллы β -твердого раствора.

Структура этого сплава состоит из зерен α -твердого и β -твердого растворов. Характерным для данной структуры является расположение зерен избыточной фазы β внутри зерен α -твердого раствора, т.е. зерна β как бы окружены зернами α -фазы. Отсюда и название перитектического превращения (перитектика в переводе с греческого - окружение).

Диаграмма состояния сплавов, компоненты которых образуют устойчивое химическое соединение

Устойчивым химическим соединением называется соединение, которое не диссоциирует на составные части до температуры плавления, т.е. при их плавлении

составы жидкой и твердой фаз совпадают. Такие соединения называются конгруэнтно (соответственно) плавящимися и образуются в системах Mg-Si, Mg-Pb, W-Zr и др. Если химическое соединение A_nB_m образуется металлами, такое соединение стехиометрического состава принято называть интерметаллидной фазой.

На рисунке 19 представлены 2 варианта диаграмм с устойчивым химическим соединением, каждая из которых состоит из двух частей, разделенных фигуративной линией химического соединения.

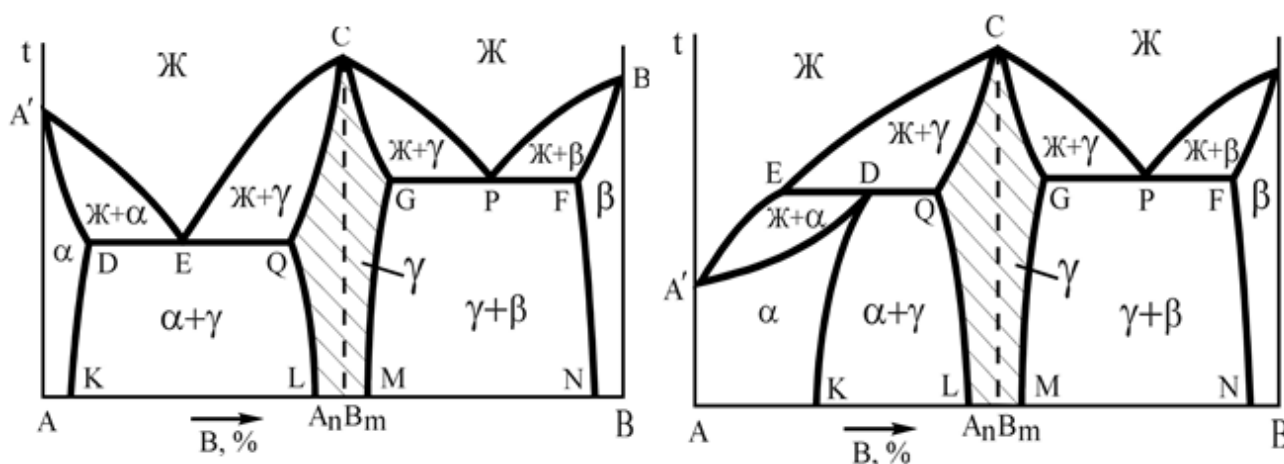


Рисунок 19 – Диаграммы состояния системы А-В с устойчивым химическим соединением

Компоненты: А и В; фазы: Ж, α , β , γ . A_nB_m - химическое соединение, которое образуется при концентрации, соответствующей проекции точки С на ось концентраций, точка С соответствует температуре плавления, γ - твердый раствор на базе химического соединения A_nB_m . Линия $A'ECPB'$ - линия ликвидус, $A'DQCGPFB'$ - линия солидус.

Физически, выполняя функцию компонента, химическое соединение на базе своей решетки, как правило, образует по схеме замещения ограниченный твердый раствор γ . Плавление (кристаллизация) γ -фазы состава A_nB_m в соответствии с правилом фаз происходит при постоянной температуре. Прочтение диаграмм и анализ фазового состояния системы А-В производится по частям, имея ввиду независимость систем А- A_nB_m и A_nB_m -В.

Особенность диаграмм с устойчивым химическим соединением является область γ -фазы. В этой области левее фигуративной линии химического соединения (заштрихована) представлены твердые растворы замещения компонента A , а правее фигуративной линии – растворы компонента B в химическом соединении. При образовании твердых растворов атомы компонента A замещают атомы компонента B в узлах кристаллической решетки соединения A_nB_m или наоборот. Таким образом формируется область γ -раствора переменной концентрации с решеткой, свойственной химическому соединению. В силу этих особенностей γ -фаза называется промежуточной.

Диаграмма состояния сплавов, компоненты которых образуют неустойчивое химическое соединение

Неустойчивыми называются химические соединения, при плавлении которых образуется жидкая и кристаллическая фазы, отличающиеся по составу от химического соединения. При этом во взаимодействии в форме перитектического равновесия находятся три фазы определенного состава (рис.20). Такие фазы – химические соединения называются инконгруэнтно (несоответственно) плавящимися.

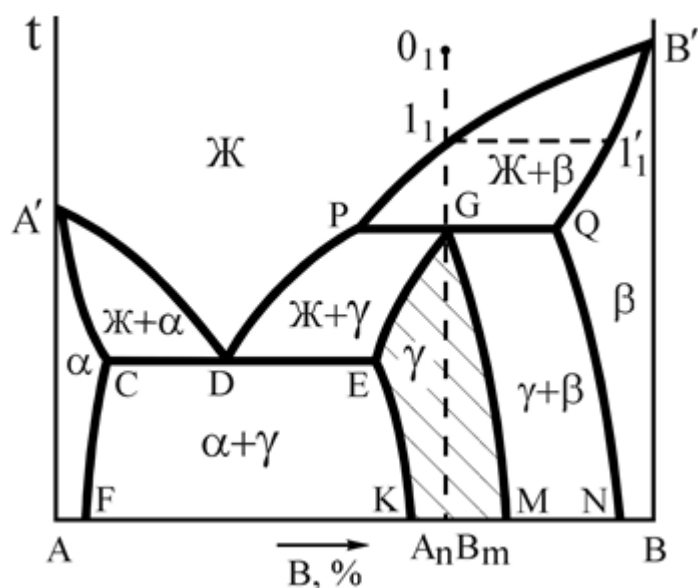


Рисунок 20 – Диаграммы состояния системы А-В с неустойчивым химическим соединением

При охлаждении жидкости, соответствующей по составу соединению A_nB_m , в интервале температур l_1-G реализуется первая стадия кристаллизации в форме реакции $Ж_{l_1-P} \xrightarrow{t_1-t_G} \beta_{l_1-Q}'$, а на уровне температуры точки G завершается кристаллизация в форме невариантного перитектического превращения $Ж_P + \beta_Q \xrightarrow{t_G} A_nB_m$.

Очевидно, что химическое соединение сохраняет свою кристаллическую структуру и состав и при более низких температурах.

Другие сплавы в интервале концентраций P-Q также претерпевают перитектическое превращение, однако после своего завершения в сплавах интервала P-G в соответствии с правилом отрезков в избытке остается жидкость $Ж_{изб}$, а в сплавах интервала G-Q в остатке оказывается твердый раствор $\beta_{изб}$.

Промежуточная γ -фаза переменного состава, формирующаяся на базе кристаллической решетки химического соединения представлена на диаграмме заштрихованной областью.

Диаграммы состояния сплавов, компоненты которых имеют полиморфные превращения

Полиморфизмом отличаются некоторые металлы – железо, марганец, титан, олово и др. Благодаря полиморфизму компонентов сплавы в кристаллическом состоянии претерпевают превращения, которые приводят к существенному изменению структуры и свойств.

На рисунке 21,а показан вариант диаграммы состояния сплавов, в которых компонент А существует в двух полиморфных модификациях - α и β . При взаимодействии этих модификаций с компонентом В образуются соответствующие фазы – твердые растворы, сохраняющие при определенных концентрациях и температурах тип кристаллической решетки одного из компонентов.

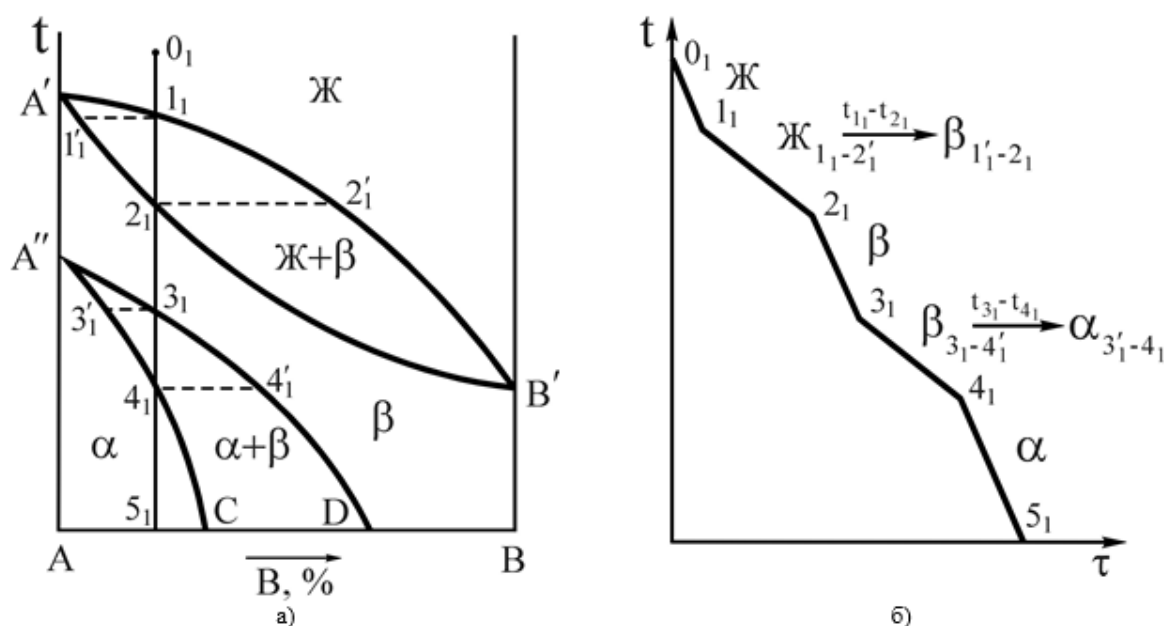


Рисунок 21 – Диаграмма состояния (а), кривая охлаждения и фазовые реакции (б) сплава 1 системы с полиморфизмом компонента А

В сплавах в интервале концентрации С-Д фазовая перекристаллизация протекает частично и поэтому в конечной структуре сосуществуют α - и β -фазы в количествах, зависящих от состава сплава.

На рисунке 22 представлен один из возможных вариантов диаграммы

состояния сплава, оба компонента которого отличаются полиморфизмом.

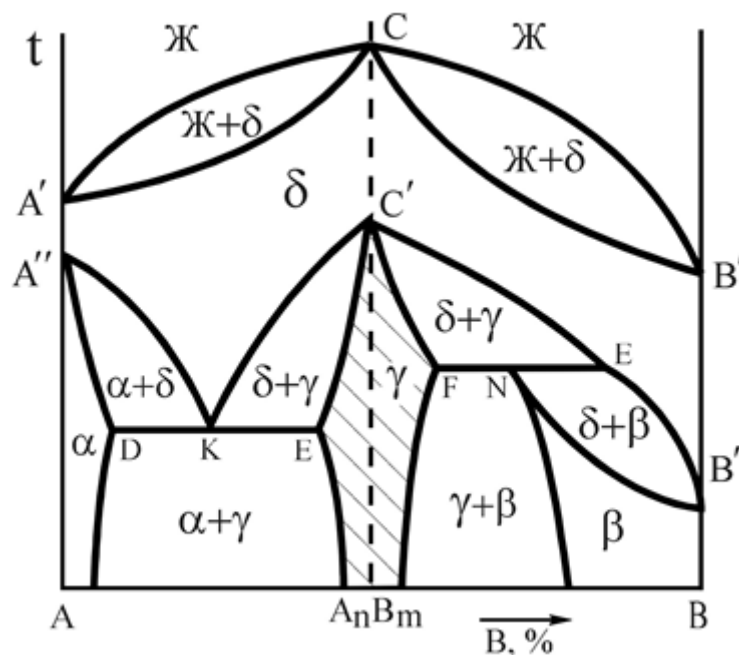


Рисунок 22 – Диаграмма состояния системы А-В с полиморфными превращениями обоих компонентов

В рассмотренном случае продукт первичной кристаллизации δ -раствор претерпевает фазовую перекристаллизацию с образованием α -, β - и γ -растворов. Сплавы в интервале концентраций D-E проходят фазовую перекристаллизацию подобно эвтектическому превращению по реакции $\delta_K \xrightarrow{t_K} \alpha_D + \gamma_E$. Такое невариантное превращение называется эвтектоидным.

Полученная смесь фаз называется эвтектоидом. В сплавах в интервале концентраций F-E происходит перекристаллизация в виде невариантного перитектоидного превращения $\delta_E + \gamma_F \xrightarrow{t_N} \beta_N$.

2 Краткие сведения теории железоуглеродистых сплавов

В настоящее время наиболее широкое применение в промышленности имеют железоуглеродистые сплавы - стали и чугуны, основными компонентами которых являются железо и углерод.

Железо – пластичный металл серебристо-белого цвета с невысокой твердостью (НВ 80). Температура плавления железа 1539 °С, кипения – 3200 °С, плотность – 7,8 г/см³. Железо – полиморфный металл, имеющий четыре полиморфные модификации α , β , γ и δ . На рисунке 23 представлена кривая охлаждения железа с полиморфными модификациями железа.

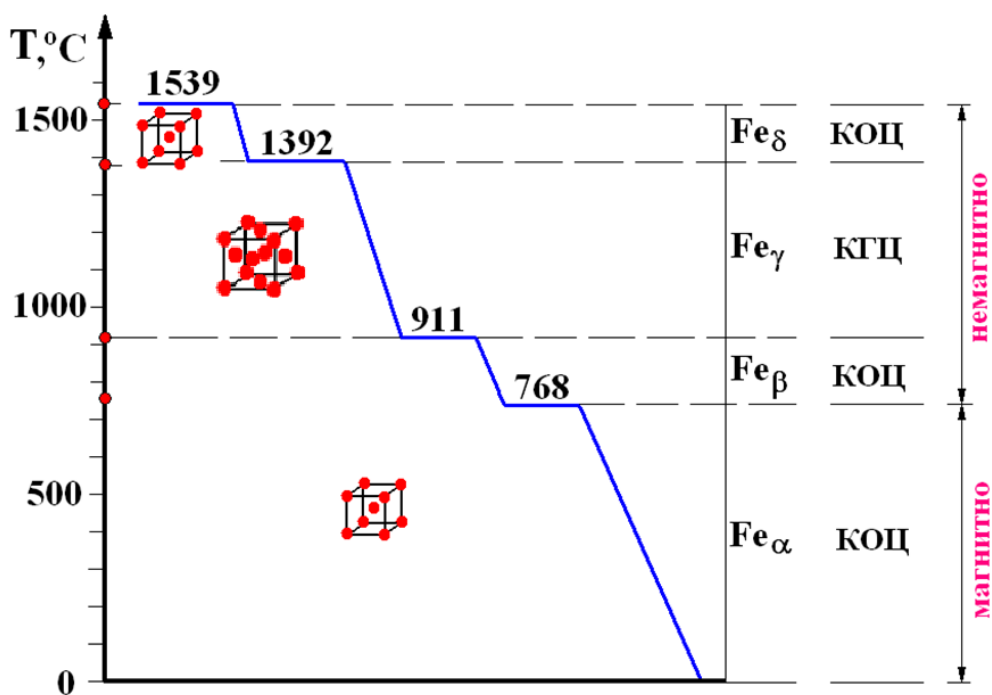


Рисунок 23 – Полиморфные модификации железа

Для упрощения принято железо, имеющее кубическую объемноцентрированную (КОЦ) решетку называть α -железо (Fe α), имеющее кубическую гранецентрированную (КГЦ) решетку называть γ -железо (Fe γ). Модификация α -железа существует при температуре ниже 911 °С (низкотемпературная модификация α -железа), и выше 1392 °С (высокотемпературная модификация α -железа). Кристаллическая решетка α -железа – объемно центрированный куб с периодом решетки 0,28606 нм. До температуры 768 °С α -

железо магнитно (ферромагнетик). Температуру 768 °С, соответствующую магнитному превращению, т.е. переходу из ферромагнитного состояния в парамагнитное, называют точкой Кюри. γ -железо существует при температуре 911 – 1392 °С, оно парамагнитно. Кристаллическая решетка γ -железа гранецентрированная кубическая с периодом решетки 0,3645 нм.

Углерод – неметаллический элемент. Температура плавления около 3500°С, плотность – 2,3 г/см³. Углерод полиморфен. В обычных условиях углерод бывает в виде графита с гексагональной слоистой решеткой. Графит электропроводен, химически стоек, малопрочен, мягок. Метастабильная модификация углерода - алмаз (температура плавления – 5000 °С) имеет сложную кубическую решетку с координационным числом, равным четырем. с периодом 0,357 нм при минимальном расстоянии между соседними атомами в решётке алмаза — 0,15 нм. Высокую твёрдость алмаза определяет прочная связь атомов углерода в алмазе. При высоких температурах и давлениях стабильным становится алмаз (это используют при получении синтетических алмазов).

В сплавах железа с углеродом углерод находится в состоянии твердого раствора с железом и в виде химического соединения – цементита (Fe_3C), а также в свободном состоянии в виде графита (во всех чугунах, кроме белого, структура которого представлена на диаграмме состояния железо-цементит). Фазы в сплавах железа с углеродом представляют собой:

- жидкий раствор (более строгим является использование термина "расплав");
- феррит;
- аустенит;
- цементит;
- свободный углерод в виде графита.

Феррит (обозначается буквой Φ) - твердый раствор внедрения углерода в α -железе. Различают низкотемпературный и высокотемпературный феррит. Предельная концентрация углерода в низкотемпературном феррите мала — 0,02 % при температуре 727 °С. Благодаря столь малому содержанию углерода свойства

феррита совпадают со свойствами железа (низкая твердость и высокая пластичность). Твердый раствор углерода в высокотемпературной модификации Fe_α (т.е. в Fe_δ) - высокотемпературный феррит, который содержит 0,1% углерода. Низкая растворимость углерода в α - железе обусловлена малым размером межатомных пор в ОЦК решетке. Феррит – мягкая пластическая фаза со следующими механическими свойствами: $\sigma_B = 300\text{Мпа}$; $\delta = 40\%$; твёрдость = 80-100 НВ; $\text{КСУ} = 2,5\text{мДж/м}^2$ (ударная вязкость – работа затраченная на разрушение образца).

Аустенит (обозначается буквой А) — это твердый раствор внедрения углерода в γ - железе. Он имеет ГЦК решетку, межатомные поры, в которой больше, чем в ОЦК решетки, поэтому растворимость углерода значительно больше и достигает 2,14 %. Аустенит пластичен, но более прочен феррита (160-200 НВ при 20 – 25° С).

Цементит (обозначается буквой Ц) — это химическое соединение железа с углеродом (карбид железа) Fe_3C . В нем содержится 6,67 % углерода (по массе). Имеет сложную ромбическую кристаллическую решетку. При высоких температурах цементит диссоциирует, поэтому температура его плавления неясна и проставляется ориентировочно – 1260 °С. Характеризуется очень высокой твердостью (НВ 800), крайне низкой пластичностью и хрупкостью. Фаза цементита имеет пять структурных форм: цементит первичный, образующийся из жидкого сплава; цементит вторичный, образующийся из аустенита; цементит третичный, образующийся из феррита; цементит ледебурита; цементит перлита.

Диаграмма состояния системы железо-углерод дает представление о формировании структуры железоуглеродистых сплавов, начиная от кристаллизации из жидкости с последующими процессами фазовой перекристаллизации в твердом состоянии. Диаграмма состояния железо-цементит в интервале концентраций от железа до цементита изображена на рисунке 24.

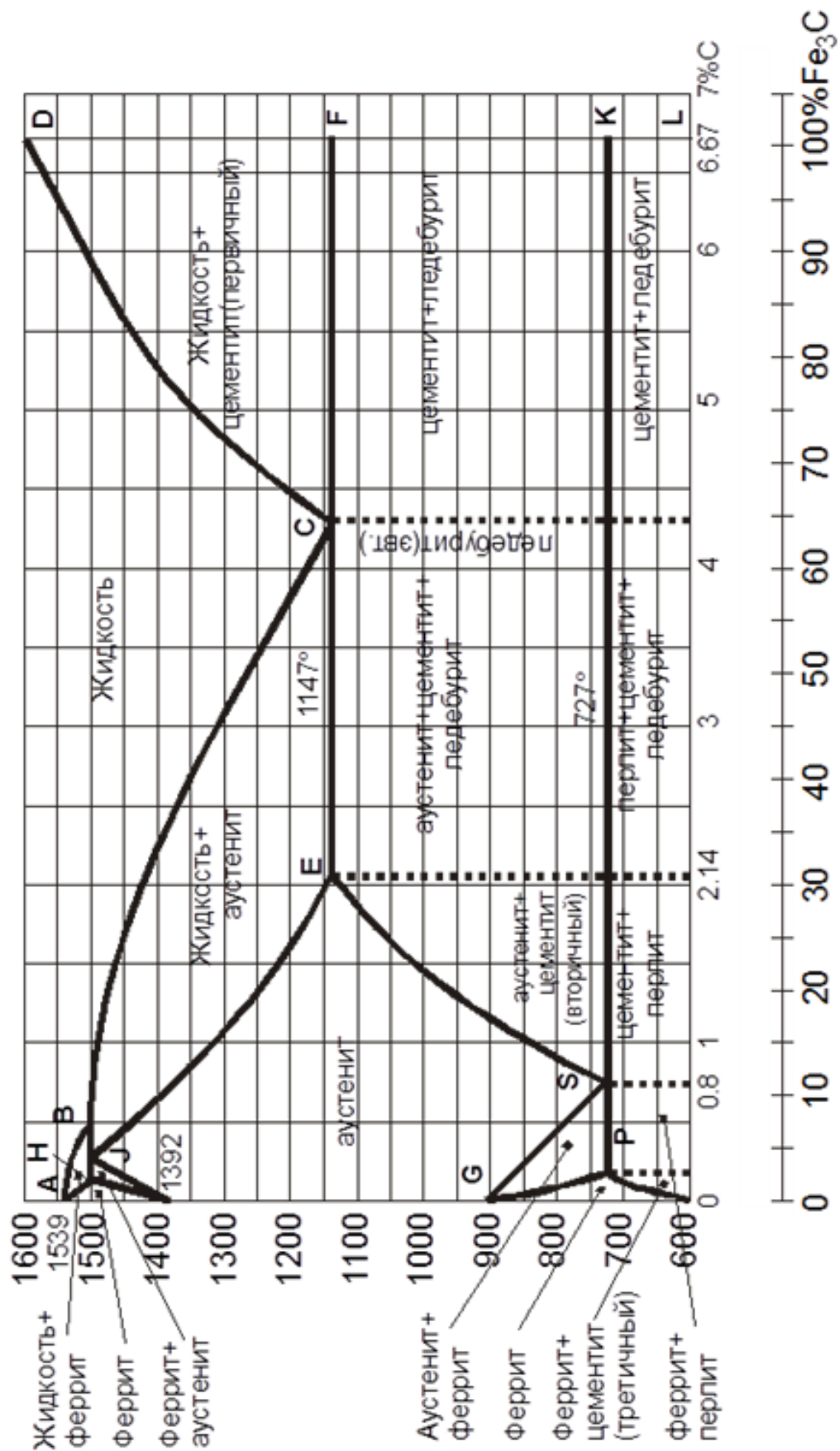


Рисунок 24 – Диаграмма состояния железо-цементит

Структурными составляющими железоуглеродистых сплавов кроме пяти однофазных (жидкость, феррит, цементит, аустенит и графит) являются и две двухфазные структурные составляющие - перлит и ледебурит.

Перлит (обозначается буквой *П*) — это механическая (эвтектоидная) смесь феррита с цементитом. Содержит 0,8 % углерода, образуется из аустенита при температуре 727 °С. Перлит является эвтектоидом. *Эвтектоид* — это механическая смесь двух фаз, образующаяся из твердого раствора (а не из жидкого сплава, как эвтектика). Имеет пластинчатое строение, т.е. его зерна состоят из чередующихся пластинок феррита и цементита. Перлит является прочной структурной составляющей: $\sigma_B = 800 - 900$ МПа; $\sigma_{0,2} = 450$ МПа; δ менее 16%; твёрдость = 180-220 НВ;

Ледебурит (обозначается буквой *Л*) представляет собой эвтектическую смесь аустенита с цементитом. Содержит 4,3 % углерода, образуется из жидкого сплава при температуре 1147 °С. При температуре 727 °С аустенит, входящий в состав ледебурита превращается в перлит и ниже этой температуры ледебурит представляет собой механическую смесь перлита с цементитом. Твёрдость ледебурита более 600 НВ при практически нулевой пластичности. Присутствие ледебурита в структуре сплавов обуславливает их неспособность к обработке давлением и затрудняет обработку резанием.

На горизонтальной оси концентраций диаграммы состояния отложено содержание углерода от 0 до 6,67 %. Левая вертикальная ось соответствует 100 % содержанию железа. На ней отложены температура плавления железа и температуры его полиморфных превращений. Правая вертикальная ось (6,67 % углерода) соответствует 100 % содержанию цементита. Буквенное обозначение точек диаграммы принято согласно международному стандарту и изменению не подлежит.

Точки диаграммы:

A – определяет температуру плавления чистого железа - 1539°C .

D - определяет температуру плавления цементита - 1260°C .

N, G – соответствуют температурам полиморфных превращений железа (1392 , 911°C).

H и P – характеризуют предельную концентрацию углерода соответственно в высокотемпературном и низкотемпературном феррите (соответственно 1499 , 727°C).

E – определяет наибольшую концентрацию углерода в аустените (при температуре 1147°C).

Превращения в сплавах системы железо – цементит происходят как при затвердении жидкой фазы, так и в твёрдом состоянии.

Первичная кристаллизация идёт в интервале температур, определяемых линиями ликвидус и солидус.

Линия ABCD диаграммы является линией ликвидус. На ней начинается кристаллизация: на участке AB — феррита, BC — аустенита и CD — первичного цементита. Линия ANJESF является линией солидус диаграммы.

Вторичная кристаллизация вызвана превращением железа одной модификации в другую и переменной растворимостью углерода в аустените и феррите (при понижении температуры эта растворимость уменьшается). Избыток углерода из твёрдых растворов выделяется в виде цементита.

Выделяющийся из жидкости цементит называют первичным, из аустенита – вторичным, из феррита – третичным. Соответственно на диаграмме состояния CD – линия первичного цементита. ES – линия вторичного цементита, PQ – линия третичного цементита. Эти линии характеризуют изменение концентрации углерода.

В фазовых областях между линиями HNJ и GSP происходит фазовая перекристаллизация $F \leftrightarrow A$, причем линии HN и GP определяют насыщение феррита углеродом, а линии NJ и GS - аустенита железом. Линии ES и PQ определяют насыщенное состояние аустенита и феррита углеродом. В соответствии с указанными значениями при охлаждении из исходной фазы выделяется фаза, богатая компонентом, которым насыщена исходная фаза. Например, при температурах линии ES из аустенита выделяется цементит вторичный.

Три горизонтальные линии на диаграмме (HJB, ECF и PSK) указывают на протекание трех нонвариантных реакций.

1. При 1499 °C (линия HJB) протекает перитектическая реакция, в результате которой образуется аустенит. Реакция эта наблюдается только у сплавов, содержащих углерод от 0,1 до 0,5 %.
2. При 1147 °C (горизонталь ECF) протекает эвтектическая реакция, в результате которой образуется эвтектическая смесь аустенита и цементита, называемая ледебуритом. Эта реакция протекает у всех сплавов, содержащих более 2,14 % углерода.
3. При 727 °C (горизонталь PSK) протекает эвтектоидная реакция, в результате которой образуется эвтектоидная смесь феррита и цементита, называемая перлитом.

Железоуглеродистые сплавы в зависимости от содержания углерода делятся на техническое железо (до 0,02 % C), стали (от 0,02 до 2,14 % C) и чугуны (от 2,14 до 6,67 % C). В сталях, кроме феррита и цементита, имеется также эвтектоидная структурная составляющая пластинчатого строения – перлит; в сталях, содержащих до 0,025 % углерода, перлитной составляющей нет. По структуре в равновесном состоянии углеродистые стали разделяют на доэвтектоидные (содержащие менее 0,8 % углерода), эвтектоидные (содержащие 0,8 % углерода) и заэвтектоидные (содержащие более 0,8 % углерода).

Доэвтектоидные стали после отжига имеют структуру феррита и перлита. Чем больше в доэвтектоидной стали углерода, тем больше в ее структуре перлита

и тем выше прочность стали (одновременно с повышением прочности уменьшается пластичность). Эвтектоидная сталь после отжига состоит из перлита. Она прочная, твердая, но пластичность меньше, чем у доэвтектоидной. Заэвтектоидные стали после отжига имеют структуру перлита и вторичного цементита, который обычно располагается в виде сетки. При увеличении содержания углерода твердость заэвтектоидных сталей увеличивается, а прочность снижается из-за увеличения хрупкости. Именно поэтому на практике применяются стали, содержащие не более 1,3 % углерода. Для повышения пластичности и улучшения обрабатываемости резанием заэвтектоидные стали подвергают специальному отжигу, при котором весь цементит выделяется в виде зерен. Эти зерна находятся в феррите. Такая зернистая смесь называется зернистым перлитом. Микроструктуры сталей приведены на рисунке 25.

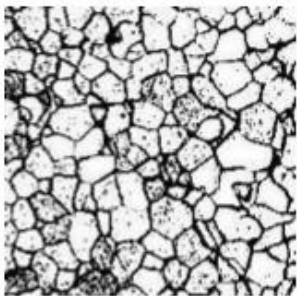
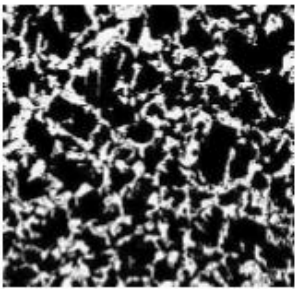
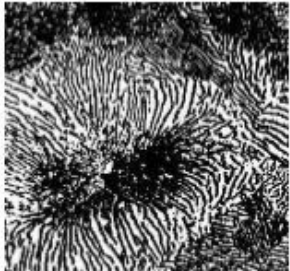
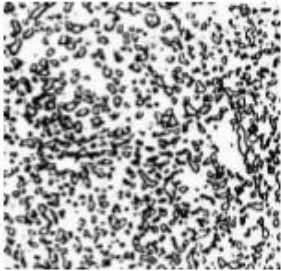
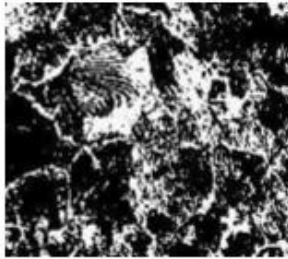
Армко-железо (феррит)		Доэвтектоидная сталь (феррит и перлит)	
			
Эвтектоидная сталь (пластинчатый перлит)	Эвтектоидная сталь (зернистый перлит)	Заэвтектоидная сталь (перлит и цементит)	
			

Рисунок 25 – Микроструктуры сталей

Сплавы железа с углеродом, которые содержат более 2,14 % углерода,

называются чугунами. Углерод в чугуне может находиться в связанном виде – в виде цементита или в свободном – в виде графита. Различают следующие виды чугунов:

- белый чугун, в котором весь углерод находится в связанном состоянии в виде цементита;
- серый чугун, в котором большая часть или весь углерод находится в свободном состоянии в виде пластинчатого графита;
- ковкий чугун, в котором большая часть или весь углерод находится в свободном состоянии в виде хлопьевидного графита. Название ковкие чугуны условно, пластической деформации они не подвергаются;
- высокопрочный чугун, в котором большая часть или весь углерод находится в виде шаровидного графита.

В белом чугуне весь углерод находится в виде цементита (Fe_3C), поэтому этот чугун очень твердый и хрупкий. Структурные превращения в белом чугуне происходят в соответствии с диаграммой железо-цементит. При кристаллизации белых чугунов образуется эвтектика – ледебурит. Он образуется при температуре 1147°C из жидкого расплава, содержащего 4,3% углерода. При 727°C аустенит, входящий в состав ледебурита, превращается в перлит, то есть ниже 727°C ледебурит представляет собой смесь перлита и цементита. По содержанию углерода белые чугуны делятся на доэвтектические (2,14 – 4,3 %), эвтектические (4,3 %) и заэвтектические (больше 4,3 %). Доэвтектические белые чугуны имеют структуру, состоящую из перлита, вторичного цементита и ледебурита. Чем больше углерода в доэвтектическом чугуне, тем больше содержание ледебурита. Эвтектический белый чугун состоит только из ледебурита, заэвтектический чугун – из крупных пластин первичного цементита и ледебурита. Чем больше углерода в заэвтектическом чугуне, тем больше он содержит первичного цементита. Микроструктуры белых чугунов приведены на рисунке 26.

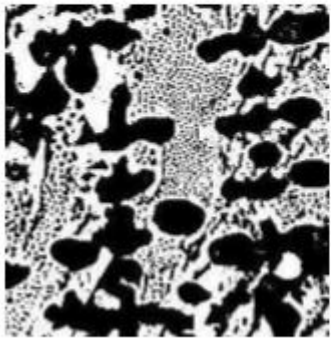
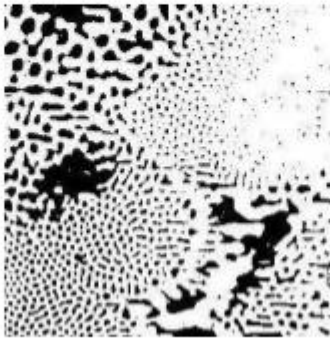
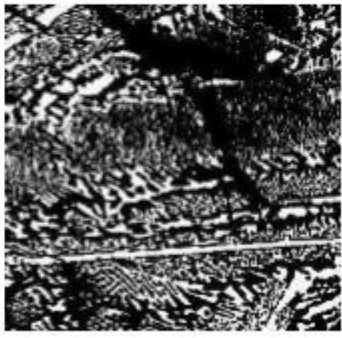
Белый чугун		
доэвтектический	эвтектический	заэвтектический
		

Рисунок 26 – Микроструктуры белых чугунов

Микроструктура серого, ковкого и высокопрочного чугунов (рисунок 27) состоит из металлической основы и графитовых включений. Металлическая основа чугунов бывает ферритной (наименее прочные чугуны), феррито-перлитной, перлитной (наиболее прочные чугуны).


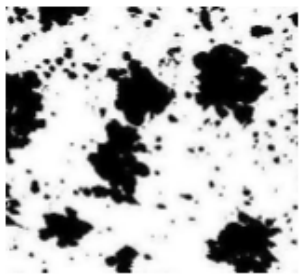
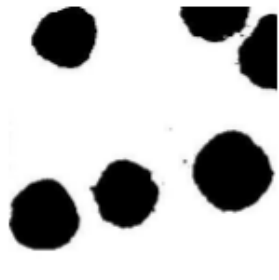
Серый чугун (металлическая основа и пластинчатый графит)	Ковкий чугун (металлическая основа и хлопьевидный графит)	Высокопрочный чугун (металлическая основа и шаровидный графит)
		

Рисунок 27 – Микроструктуры чугунов

Механические свойства серого, ковкого и высокопрочного чугунов определяются, главным образом, формой графита. Графитную составляющую можно считать пустотой, порой, трещиной, т.е. концентратором внутренних напряжений. Таким образом, свойства чугунов зависят от количеств, величины и характера распределения включений графита.

Используя диаграмму состояния железо-цементит и её фрагменты, представленные на рисунках 28-30, рассмотрим превращения в железоуглеродистых сплавах двенадцати различных концентраций, обозначенных на рисунках цифрами в кружках.

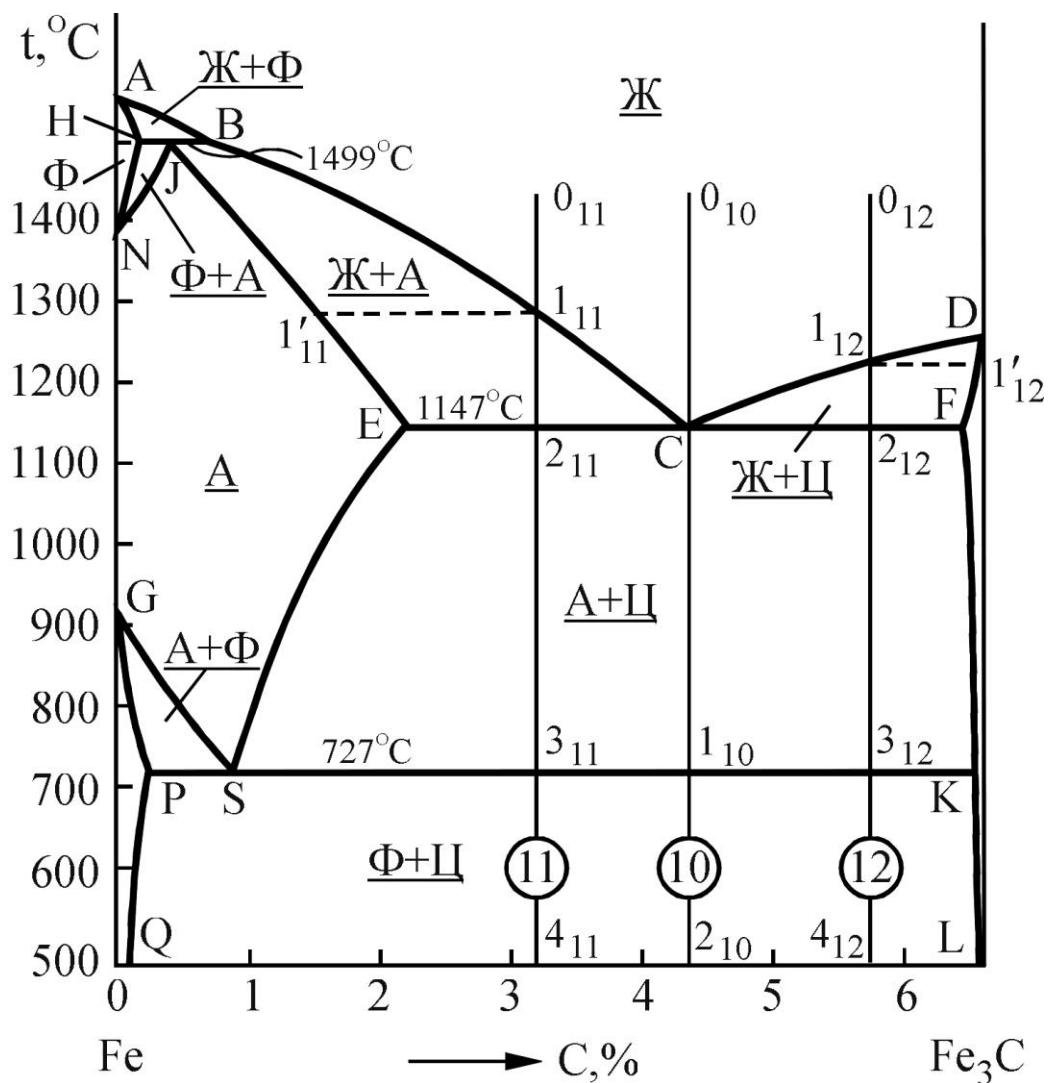


Рисунок 28 – Диаграмма состояния система железо-цементит

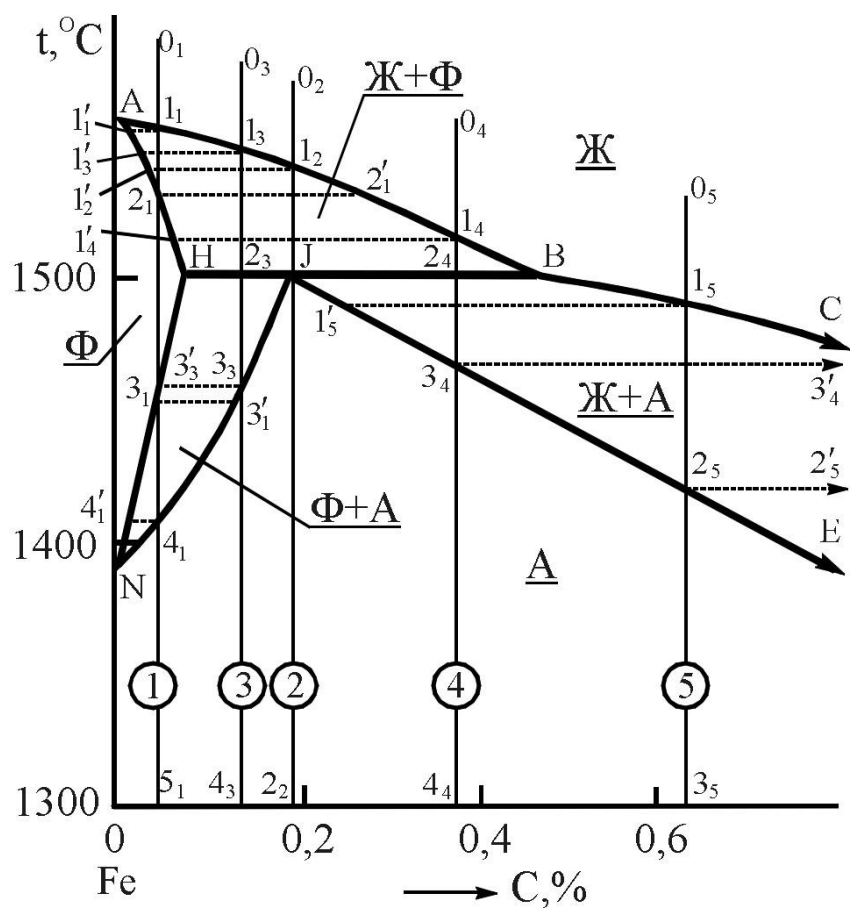


Рисунок 29 – Фрагмент диаграммы железо-цементит (сплавы 1...5)

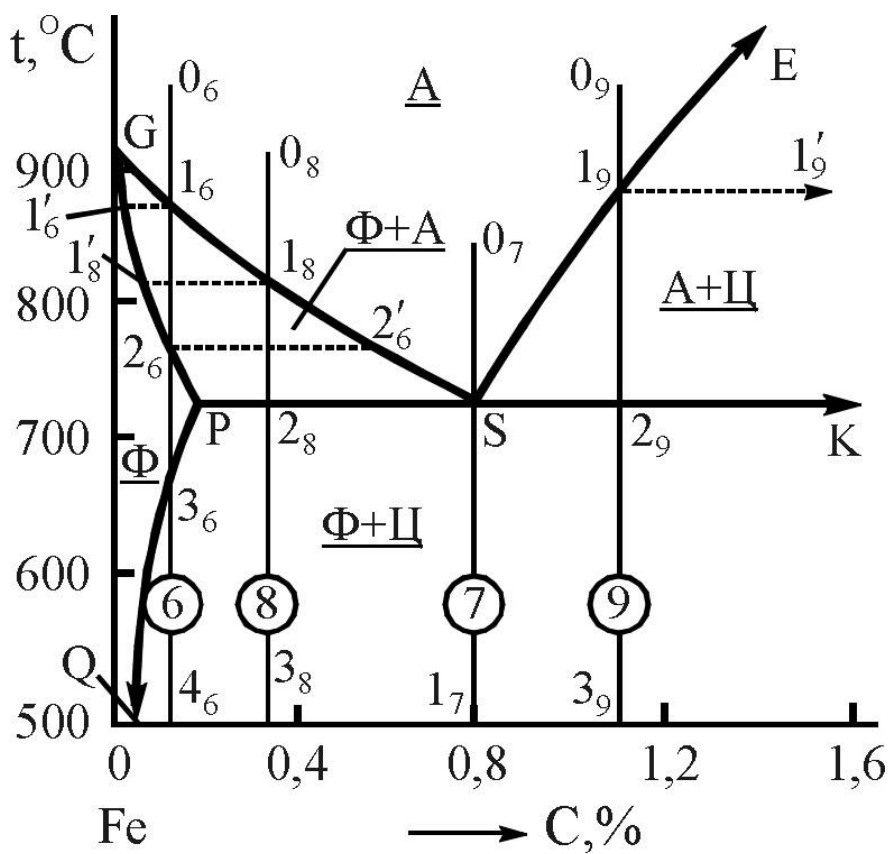


Рисунок 30 – Фрагмент диаграммы железо-цементит (сплавы 6...9)

В сплавах, содержащих углерода менее 0,1% (1, см. рис.20), при охлаждении из жидкого состояния последовательно протекают следующие превращения: в интервале температур 1_1-2_1 – первичная кристаллизация с образованием феррита, в интервале 3_1-4_1 фазовая перекристаллизация с образованием аустенита. В интервалах 2_1-3_1 и ниже точки 4_1 происходит охлаждение продуктов превращений, соответственно феррита и аустенита. Уравнения фазовых реакций и схематическое изображение структур в указанных интервалах температур показано на рисунке 31.

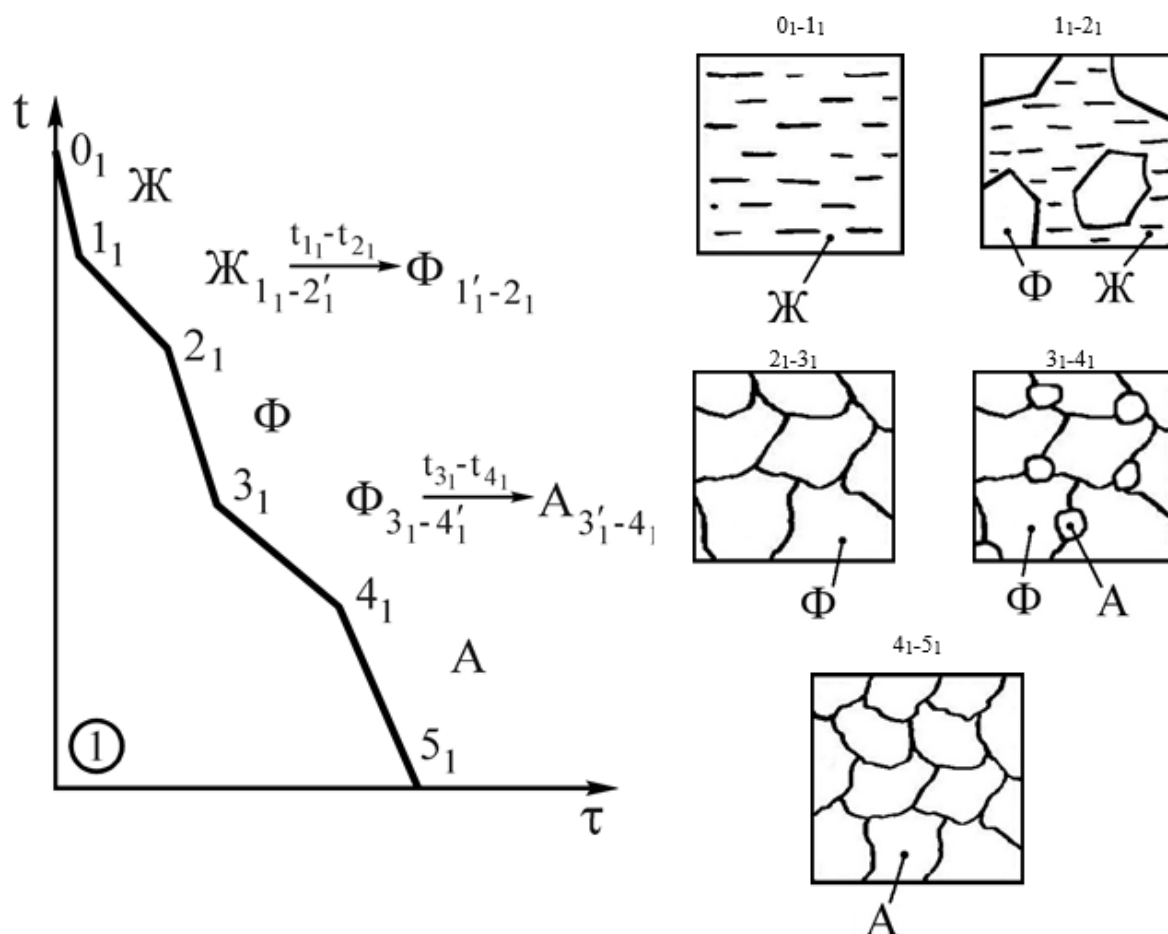


Рисунок 31 – Кривая охлаждения, фазовые реакции и схемы структур на всех этапах охлаждения сплава 1

При содержании углерода 0,16% (сплав 2, см. рис. 29) первичная кристаллизация происходит в интервале 1_2-J . При этом жидкость, оставаясь насыщенной, изменяет состав в диапазоне от 1_2 до В, а феррит - от $1'_2$ до Н. В двухфазной смеси Ж+Ф количество жидкости состава точки В ($Ж_В$) представлено

отрезком НJ, а количество феррита состава точки Н (Φ_H) отрезком JB.

При взаимодействии жидкости Ж_B и феррита Φ_H образуется аустенит состава точки J (A_J) (см. уравнение на рис.32). Эта нонвариантная перитектическая реакция распространяется на интервал концентрация углерода от точки Н (0,1% С) до точки В (0,5% С).

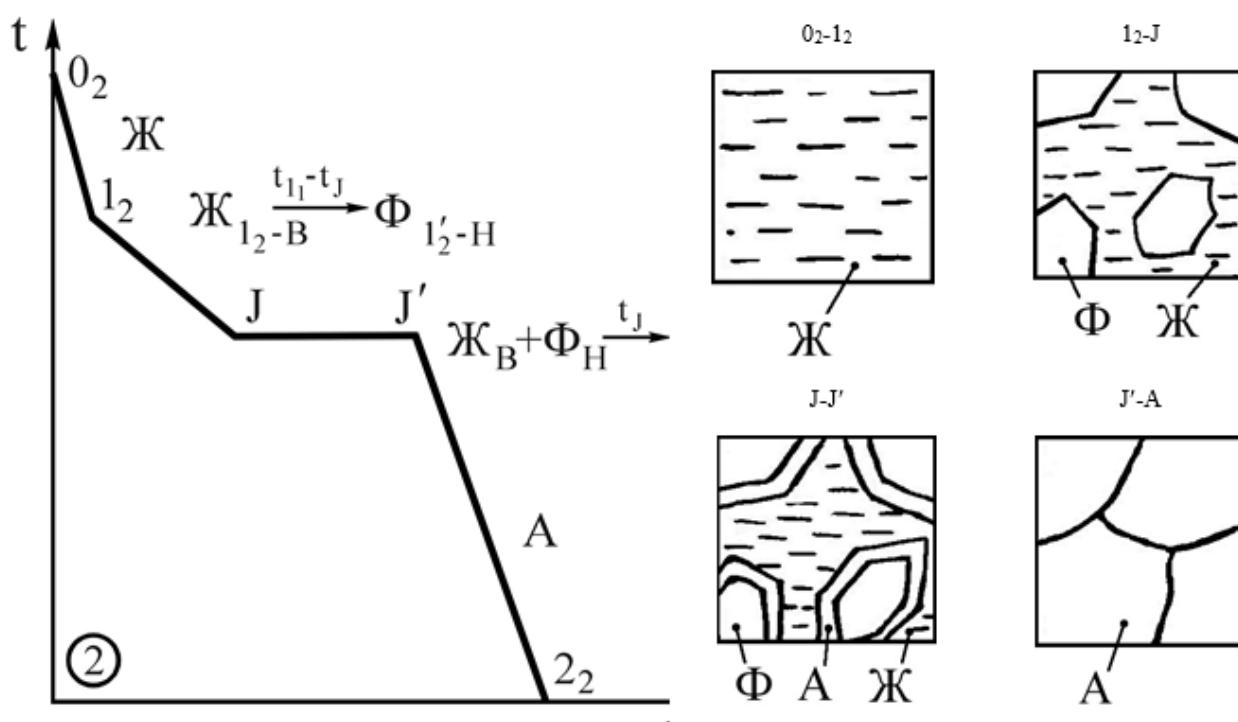


Рисунок 32 – Кривая охлаждения, фазовые реакции и схемы структур на всех этапах охлаждения сплава 2

В сплавах типа 3 ($<0,16\% \text{ C}$) и 4 ($>0,16\% \text{ C}$) (см. рис.20) перитектическое превращение протекает соответственно при избытке феррита или жидкости. Поэтому ниже 1499°C превращение в сплавах типа 3 протекает в форме фазовой перекристаллизации с образованием аустенита (рис.33), а в сплавах типа 4 - первичной кристаллизации с образованием аустенита (рис.34).

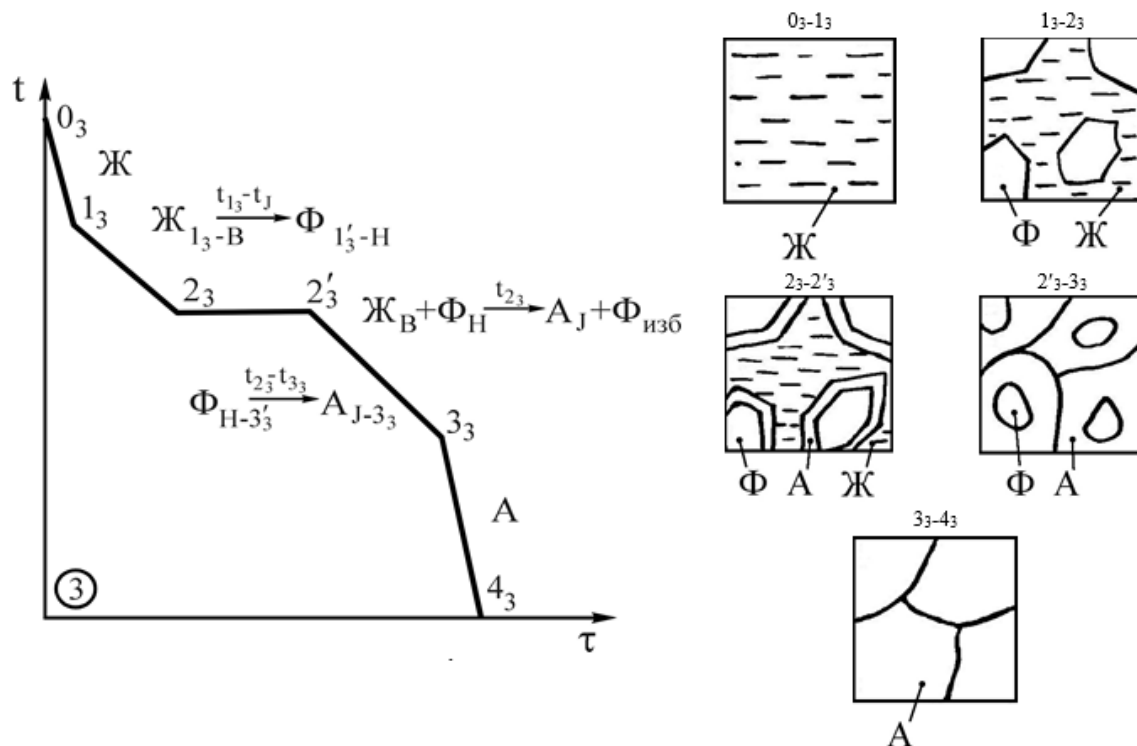


Рисунок 33 – Кривая охлаждения, фазовые реакции и схемы структур на всех этапах охлаждения сплава 3

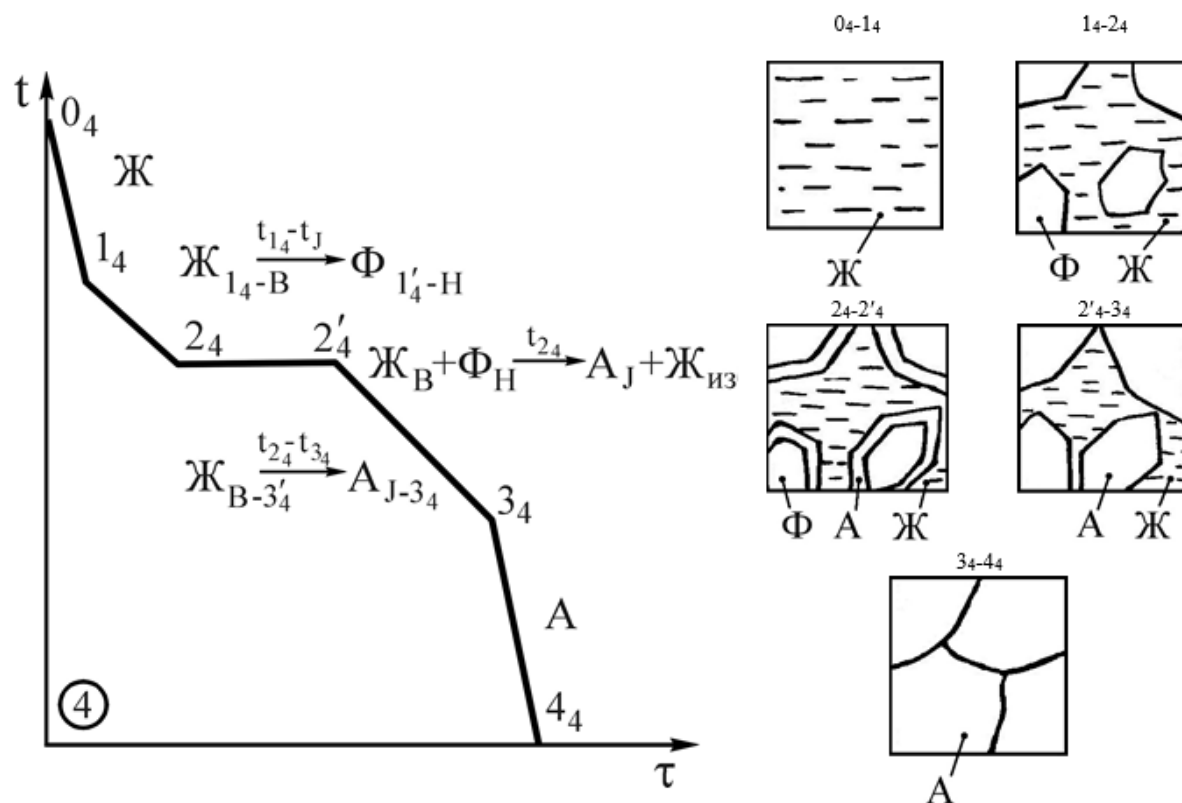


Рисунок 34 – Кривая охлаждения, фазовые реакции и схемы структур на всех этапах охлаждения сплава 4

В сплавах типа 5 (0,5-2,14% С, см. рис.29) имеет место первичная кристаллизация с образованием аустенита. При этом состав жидкости в условиях равновесной кристаллизации изменяется от точки 1_5 до точки $2'_5$, а аустенита - от точки $1'_5$ до точки 2_5 .

Как указывалось, формирование структуры стали при охлаждении до нормальной (комнатной) температуры проходит независимо от содержания углерода через состояние аустенита. При содержании углерода менее 0,025% (сплав типа 6, см. рис.30) аустенит в интервале температур 1_6-2_6 претерпевает фазовую перекристаллизацию с образованием феррита (рис.35). Образовавшийся феррит оказывается насыщенным и ниже температуры точки 3_6 , при дальнейшем охлаждении из него выделяется цементит. При этом состав феррита изменяется в соответствии с линией его насыщения до точки Q (0,0067% С).

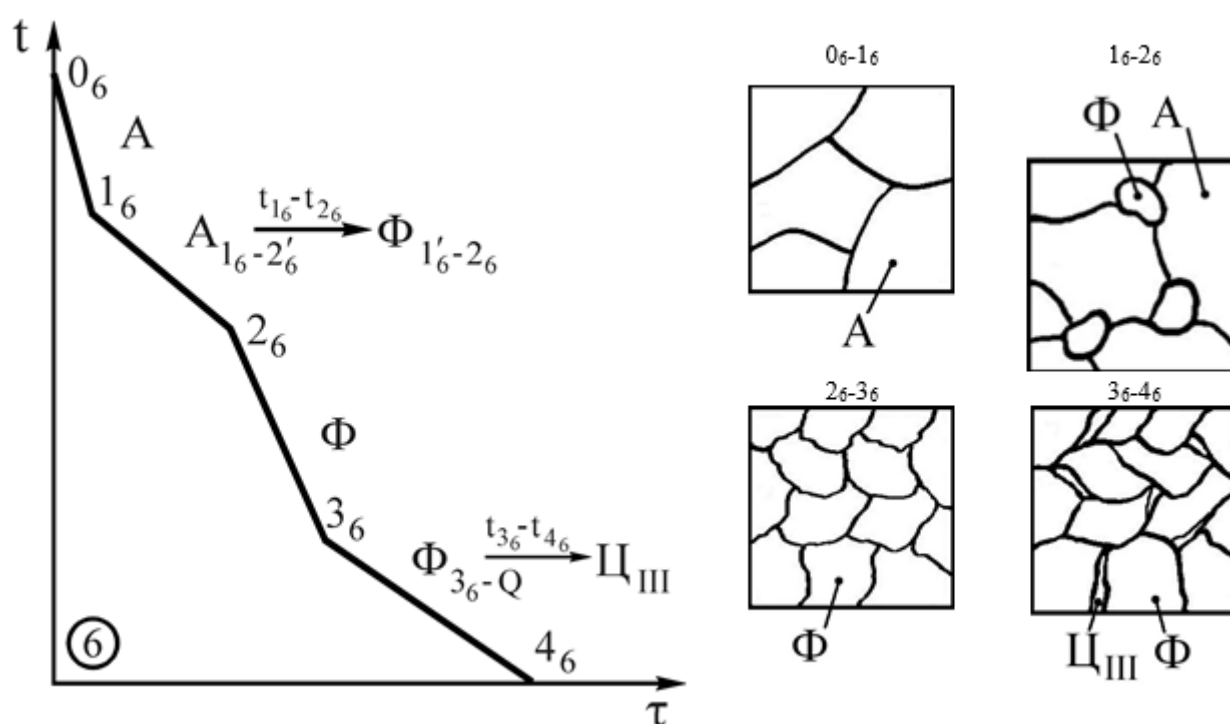


Рисунок 35 – Кривая охлаждения, фазовые реакции и схемы структур сплава 6

При содержании углерода в стали 0,8% (сплав 7, см. рис.30) аустенит при температуре 727°C (точка S) оказывается насыщенным и железом, и углеродом. Поэтому при этой температуре происходит распад аустенита с образованием

эвтектоидной смеси феррита и цементита, которая называется перлитом (П, см.рис.36). В интервале температур ниже 727°C из ферритной составляющей перлита в соответствии с линией PQ выделяется третичный цементит Ц_{III} , соединяющийся с цементитом перлита. Сталь состава точки S (0,8% C) называется эвтектоидной.

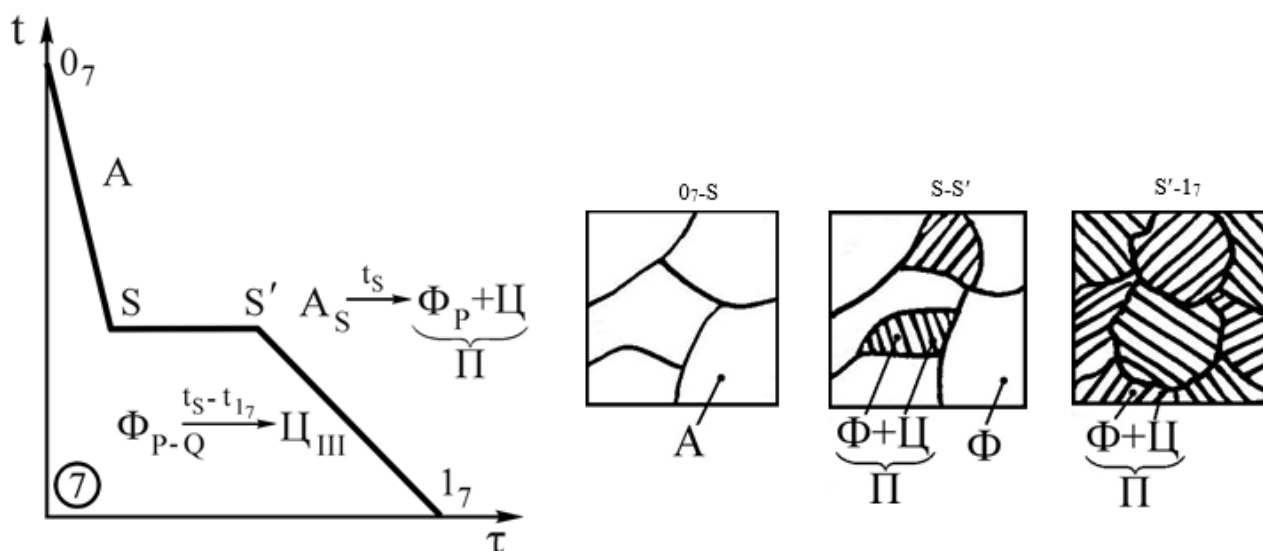


Рисунок 36 – Кривая охлаждения, фазовые реакции и схемы структур сплава 7

При охлаждении аустенита доэвтектоидной стали (сплав 8, см. рис.30) в интервале температур 1_8-2_8 происходит фазовая перекристаллизация. При этом на уровне температуры 727°C аустенит в двухфазной смеси $\text{A}+\text{Ф}$ приобретает эвтектоидный состав и при постоянной температуре превращается в перлит (см. реакции на рис.37). Таким образом, ниже 727°C доэвтектоидная сталь представлена перлитом и избыточной фазой - ферритом. В соответствии с линией PQ в этой стали ниже 727°C также выделяется третичный цементит Ц_{III} .

Из аустенита эвтектоидной стали (сплав 9, рис.30) ниже температуры линии ES (точка 1_9) выделяется цементит (Ц_{II}) и при температуре 727°C , достигая эвтектоидного состава, превращается в перлит (см. уравнения на рис.38). Следовательно, в структуре эвтектоидной стали также содержится перлит.

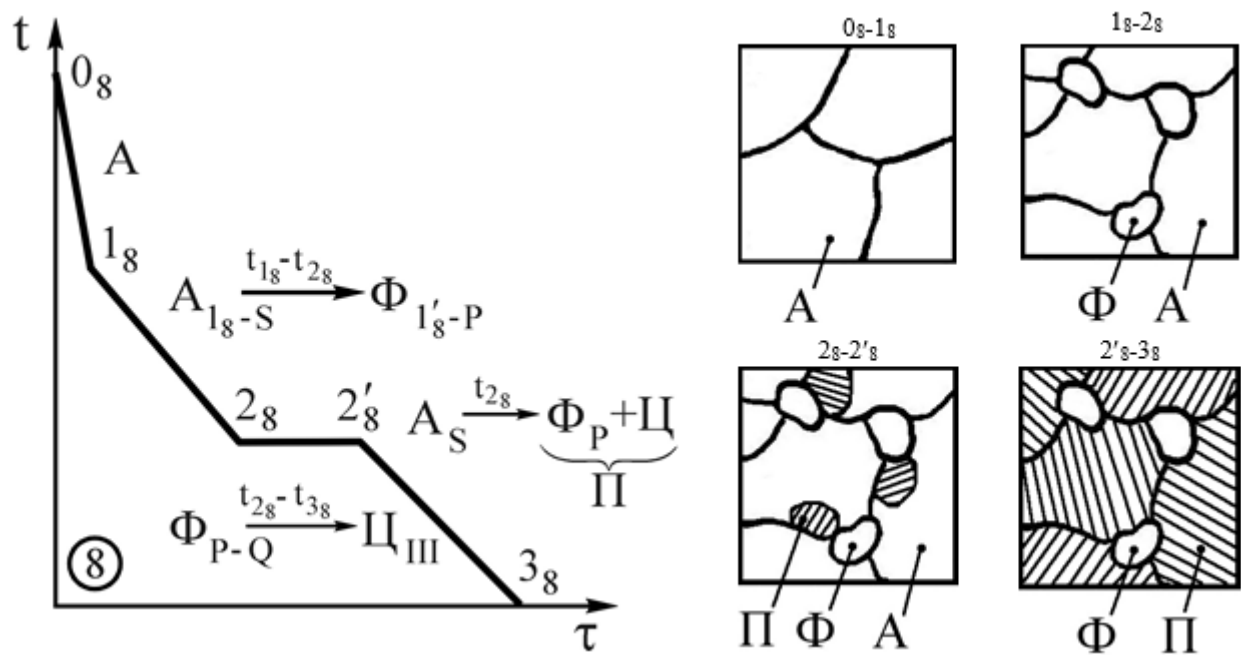


Рисунок 37 – Кривая охлаждения, фазовые реакции и схемы структур сплава 8

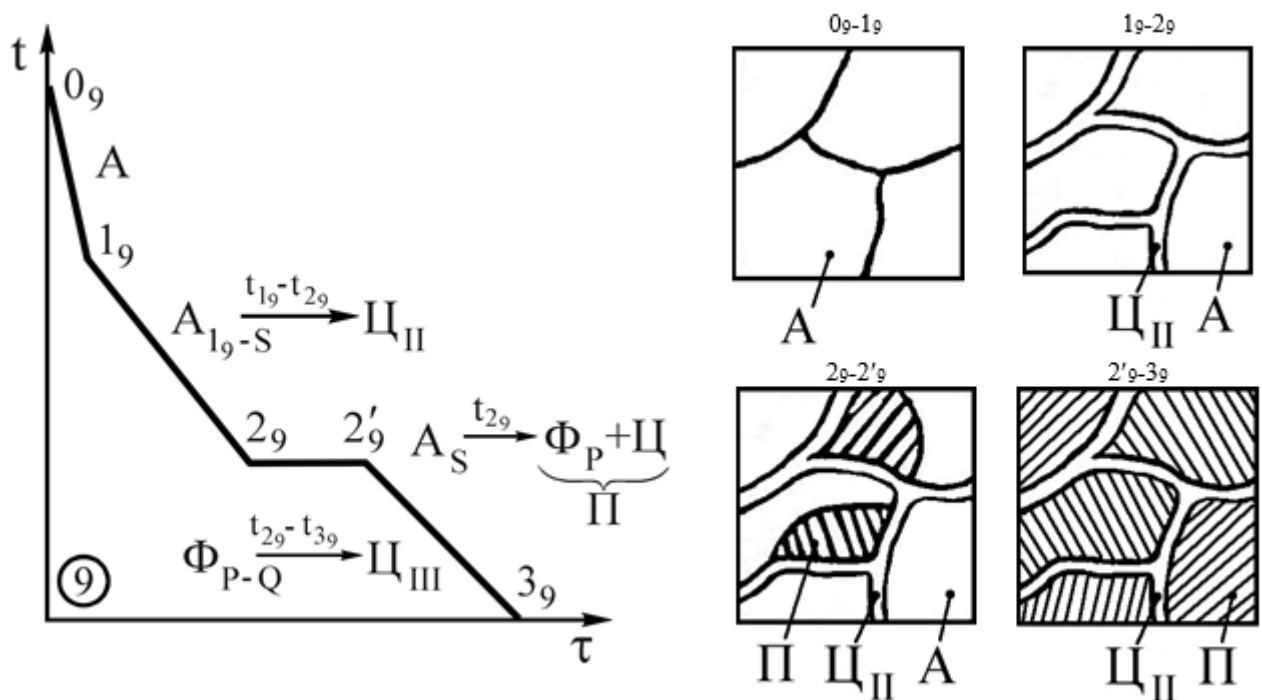


Рисунок 38 – Кривая охлаждения, фазовые реакции и схемы структур сплава 9

Таким образом, в равновесных условиях при нормальной температуре эвтектоидная сталь представлена перлитом, доэвтектоидная - перлитом и избыточным ферритом, эаэвтектоидной - перлитом и избыточным цементитом в виде сетки по границам зерен перлита.

Эвтектический чугун (сплав 10, см. рис.28) в процессе кристаллизации распадается с образованием смеси аустенита состава точки Е и цементита. Такое превращение называется эвтектическим, а продукт превращения - смесь цементита и аустенита - ледебуритом (эвтектикой). Эвтектическое превращение, будучи трехфазным, протекает при постоянной температуре (рис.39). В соответствии с линией ES из аустенита ледебурита при охлаждении в интервале $1147-727^{\circ}\text{C}$ выделяется вторичный цементит и при температуре 727°C превращается в перлит.

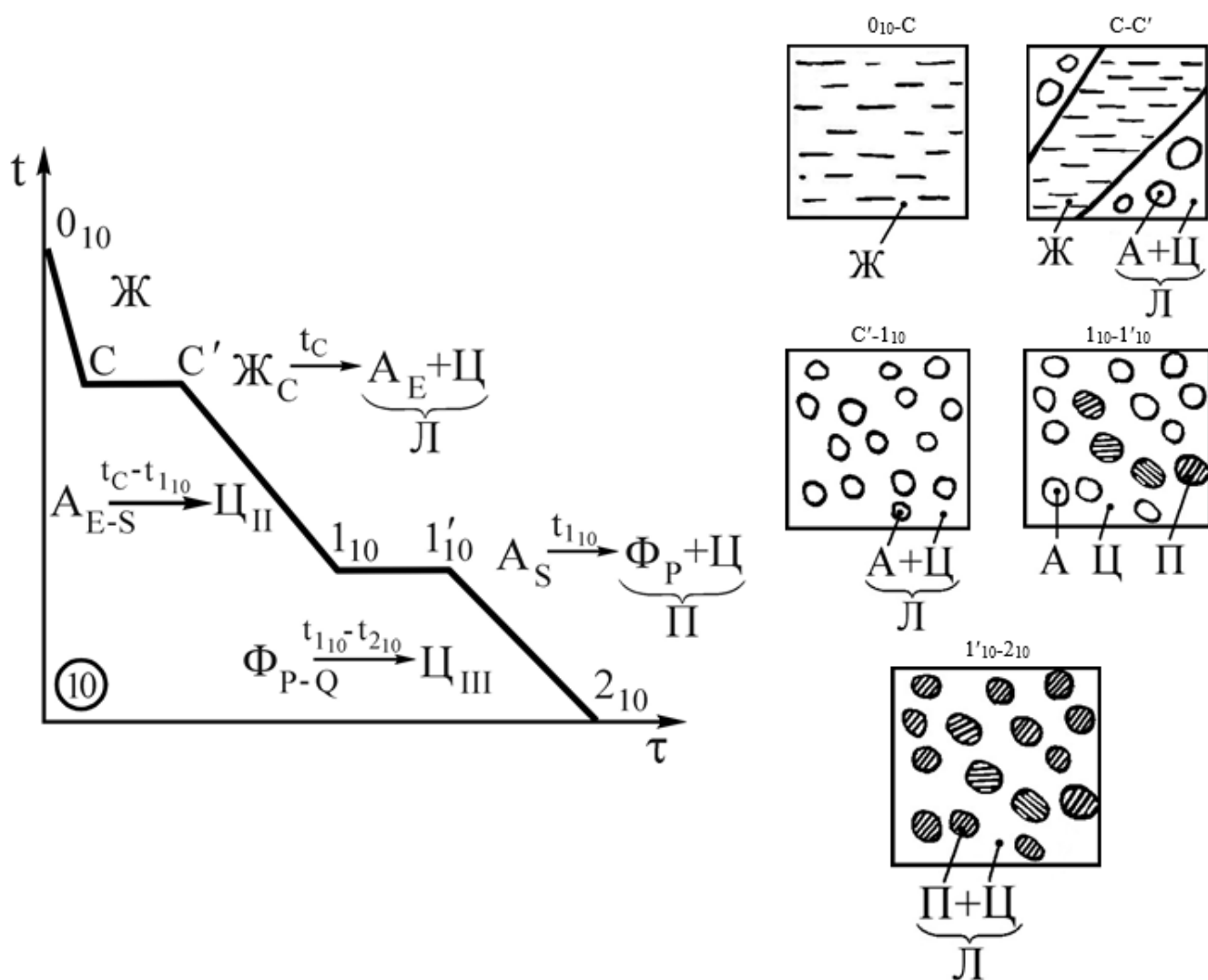


Рисунок 39 – Кривая охлаждения, фазовые реакции и схемы структур сплава 10

В доэвтектическом чугуне (см. рис.28, сплав 11) описанным превращениям предшествует первичная кристаллизация с образованием аустенита (рис.40).

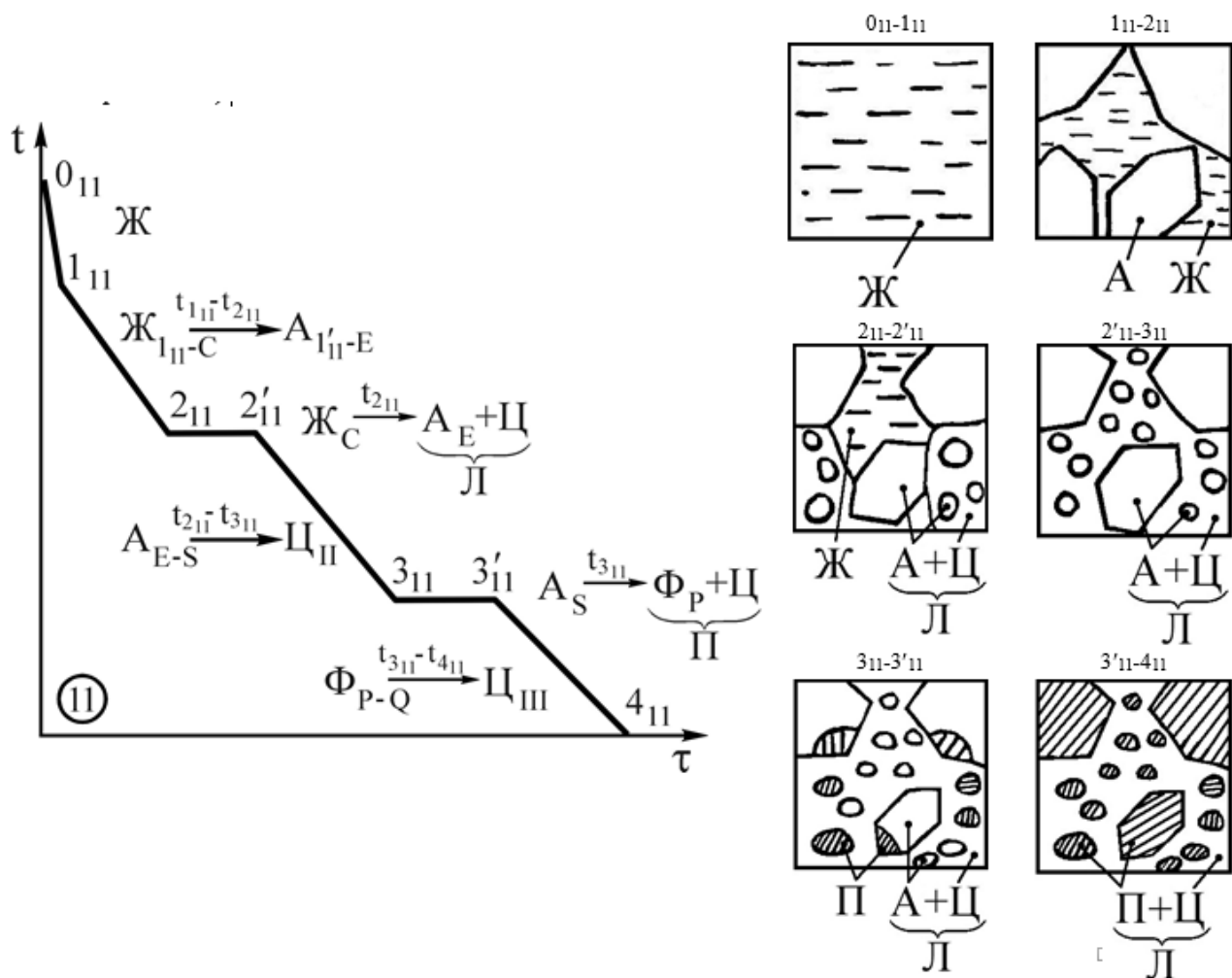


Рисунок 40 – Кривая охлаждения, фазовые реакции и схемы структур сплава 11

В заэвтекктическом чугуна (см. рис.28, сплав 12) продуктом первичной кристаллизации является цементит (рис.41). При этом на уровне температур 1147°C жидкость в смесях Ж+А и Ж+Ц приобретает эвтекктический состав и превращается в ледебурит.

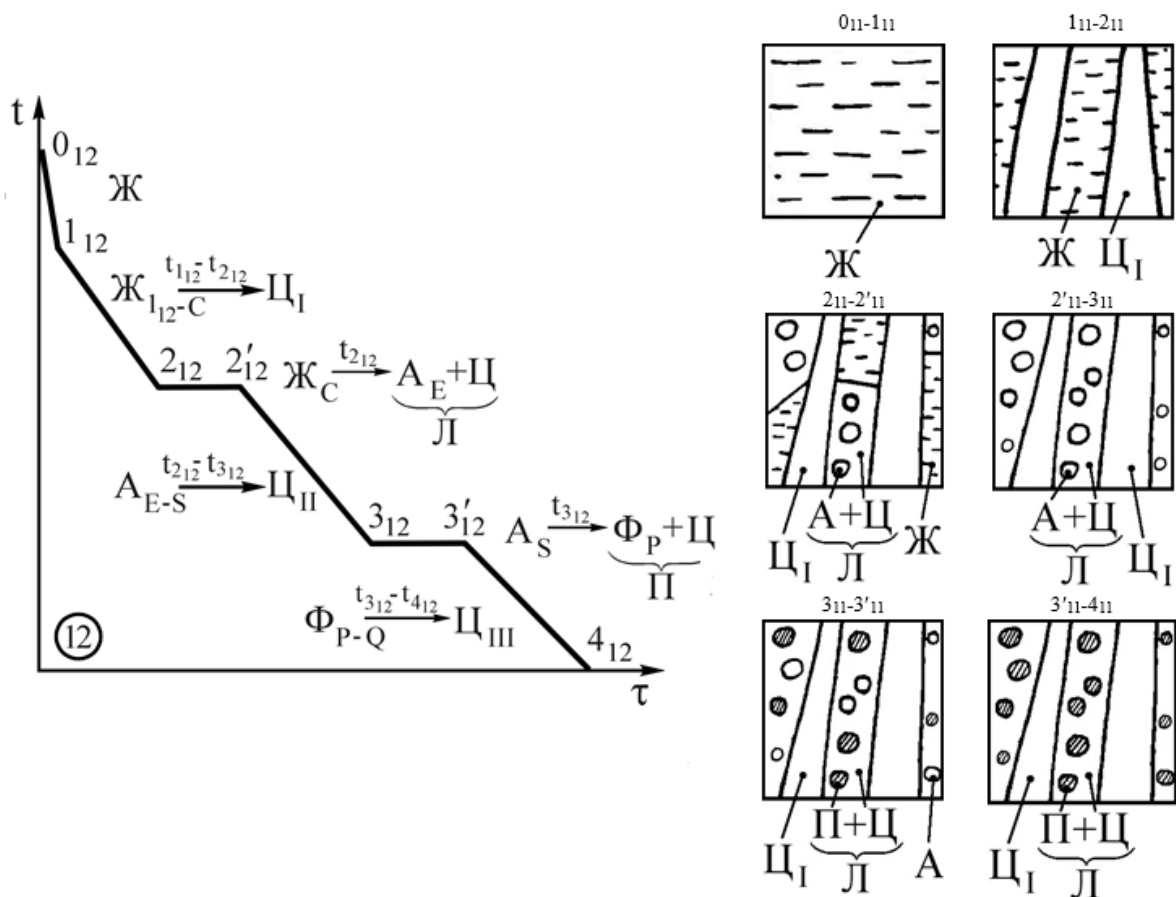


Рисунок 41 – Кривая охлаждения, фазовые реакции и схемы структур сплава 12

Таким образом, кристаллизация всех сплавов в интервале содержания углерода от 2,14 до 6,67% завершается эвтектическим превращением при одинаковой температуре на линии ECF – 1147°C (см. рис.28), всем чугунам свойственно также выделение из аустенита вторичного цементита в интервале 1147-727°C, протекание эвтектоидного превращения при температуре 727°C и выделение ферритом третичного цементита ниже 727°C. Формирование структуры чугуна при охлаждении из жидкого состояния сопряжено с протеканием двух невариантных превращений эвтектического и эвтектоидного. Поэтому на кривых охлаждения образуются две изотермические площадки при температурах 1147°C и 727°C (см. рис. 39 -41).

Структура эвтектического чугуна при нормальной температуре представлена ледебуритом, доэвтектического - ледебуритом и перлитом, заэвтектического - ледебуритом и первичным цементитом.

Методика выполнения курсовой работы

Цель и задачи курсовой работы

Целью выполнения курсовой работы является овладение методикой анализа диаграмм состояния двойных сплавов, формирования умений применения диаграмм состояния для иллюстрации процессов, происходящих при нагреве и охлаждении сплавов, а также выработка навыков определения структуры и фазового состава сплавов.

Тема курсовой работы

Общая тема курсовой работы «Диаграммы состояния двойных сплавов». Задание на курсовую работу содержит два типовых задания и исходные данные, соответствующие варианту, определяемому суммой двух последних чисел номера зачётной книжки студента.

Определение варианта курсовой работы

Сумма двух последних чисел	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Сумма двух последних чисел	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Номер варианта	11	12	13	14	15	16	17	18	19

Примечание: на титульном листе курсовой работы студент указывает номер зачетной книжки и номер варианта.

Задание №1

В соответствии с номером варианта выберите сплав (таблица №1). Опишите химические элементы образующие данный сплав (название элемента, кристаллическое строение и его параметры, свойства, области применения). Опишите взаимодействие компонентов в жидком и твердом состояниях. Вычертите диаграмму состояния сплава и укажите структурные составляющие во всех областях диаграммы состояния (диаграммы состояния приведены в приложении А). Постройте кривые охлаждения для сплавов трех концентраций, указанных в таблице №1. Опишите происходящие превращения, с обязательной зарисовкой происходящих структурных изменений. Самостоятельно выберите температуру в произвольной двухфазной области диаграммы и определите состав и количественное соотношение фаз. Приведите примеры зависимости свойств от концентрации компонентов данной системы.

Задание №2

В соответствии с номером варианта выберите концентрацию углерода в железоуглеродистом сплаве (таблица №2). Опишите компоненты сплава (название, кристаллические строения и их параметры, свойства компонентов и их взаимодействие). Определите области применения железоуглеродистых сплавов данной концентрации и опишите основные химические элементы, используемые для легирования сплава данной концентрации (название элемента, кристаллическое строение, свойства, цели легирования и принципы достижения цели). Вычертите диаграмму состояния системы железо-цементит и укажите на ней фазовые области. Опишите фазы и структурные составляющие системы. На диаграмме состояния системы железо-цементит проведите линию заданного состава сплава, постройте кривую охлаждения и опишите происходящие превращения, с обязательной зарисовкой происходящих структурных изменений. Приведите уравнения фазовых реакций. Изобразите вероятную структуру сплава для каждого этапа охлаждения. Опишите свойства сплава данной концентрации в отожженном состоянии и возможные методы упрочнения.

Таблица 1

Вариант	Сплав	Номер рисунка в приложении	Концентрация сплава		
			Сплав 1	Сплав 2	Сплав 3
1	Алюминий - медь	A.1	Cu -3%	Cu -17%	Cu -42%
2	Алюминий - кремний	A.2	Si -5%	Si -11,7%	Si -55%
3	Кадмий-цинк	A.3	Zn-5%	Zn-75%	Zn-98%
4	Медь- серебро	A.4	Ag-4%	Ag-35%	Ag-85%
5	Олово-цинк	A.5	Zn-4%	Zn-8%	Zn-65%
6	Сурьма - германий	A.6	Ge-8%	Ge-65%	Ge-97%
7	Свинец - сурьма	A.7	Sb-8%	Sb-13%	Sb-65%
8	Магний - германий	A.8	Ge-15%	Ge-60%	Ge-85%
9	Свинец - олово	A.9	Sn-8%	Sn-45%	Sn-75%
10	Медь - мышьяк	A.10	As-8%	As-21%	As-37%
11	Свинец - магний	A.11	Mg-15%	Mg-45%	Mg-85%
12	Магний - кальций	A.12	Ca-15%	Ca-45%	Ca-65%
13	Алюминий - германий	A.13	Ge-2%	Ge-55%	Ge-75%
14	Серебро - итрий	A.14	γ -15%	γ -65%	γ -85%
15	Алюминий - скандий	A.15	Sc-5%	Sc -11,7%	Sc -55%
16	Платина - сурьма	A.16	Sb-15%	Sb-55%	Sb-85%
17	Титан- серебро	A.17	Ag-22%	Ag-45%	Ag-75%
18	Цезий - висмут	A.18	Bi-35%	Bi-55%	Bi-75%
19	Алюминий - стронций	A.19	Sr-15%	Sr -45%	Sr -85%

Таблица 2

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Содержание углерода, %	0,1	0,2	0,4	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3

Вариант	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Содержание углерода, %	2,3	2,8	3,5	4	4,3	4,5	4,8	5,1	5,5

Перечень рекомендуемых информационных ресурсов

1. Гуляев А.П. Металловедение.- М.: Металлургия, 1986. 544с.
2. Захаров А.М. Диаграммы состояния двойных и тройных систем.- М.: Металлургия, 1990. 240с.
3. Конструкционные материалы: Справочник /Б.Н. Арзамасов, В.А. Брострем, Н.А. Н.А. Буше и др.; Под общ.ред. Б.Н. Арзамасова.-М.: Машиностроение, 1990. 688 с.
4. Лахтин Ю.М. Металловедение и термическая обработка металлов.- М.: Металлургия, 1984. 360 с.
5. Материаловедение / Арзамасов Б.Н., Сидорин И.Н., Косолапов Г.Ф. и др. - М.: Машиностроение, 1986. 384с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Диаграммы состояния сплавов

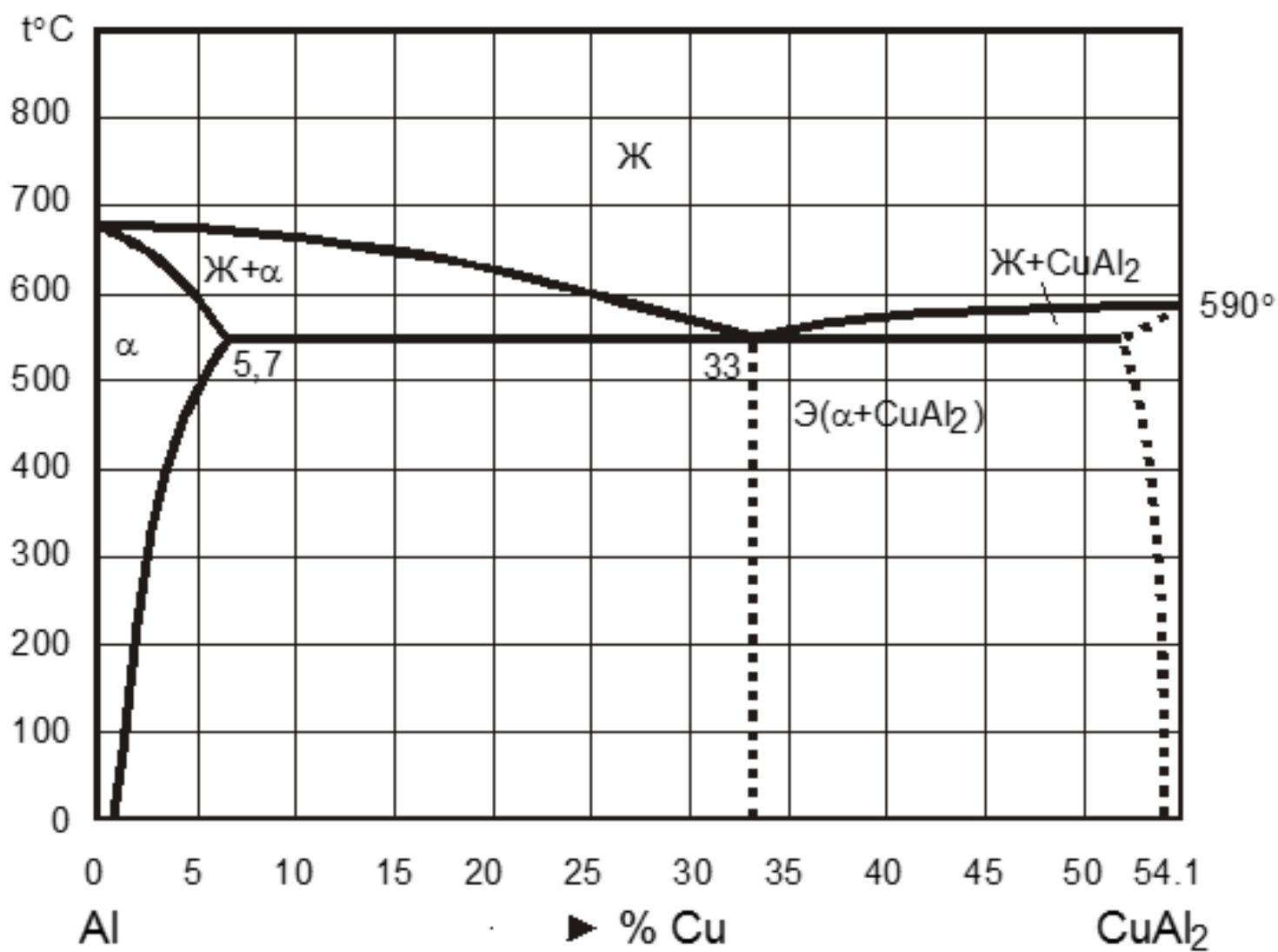


Рисунок А.1 – Диаграмма состояния системы Al – Cu

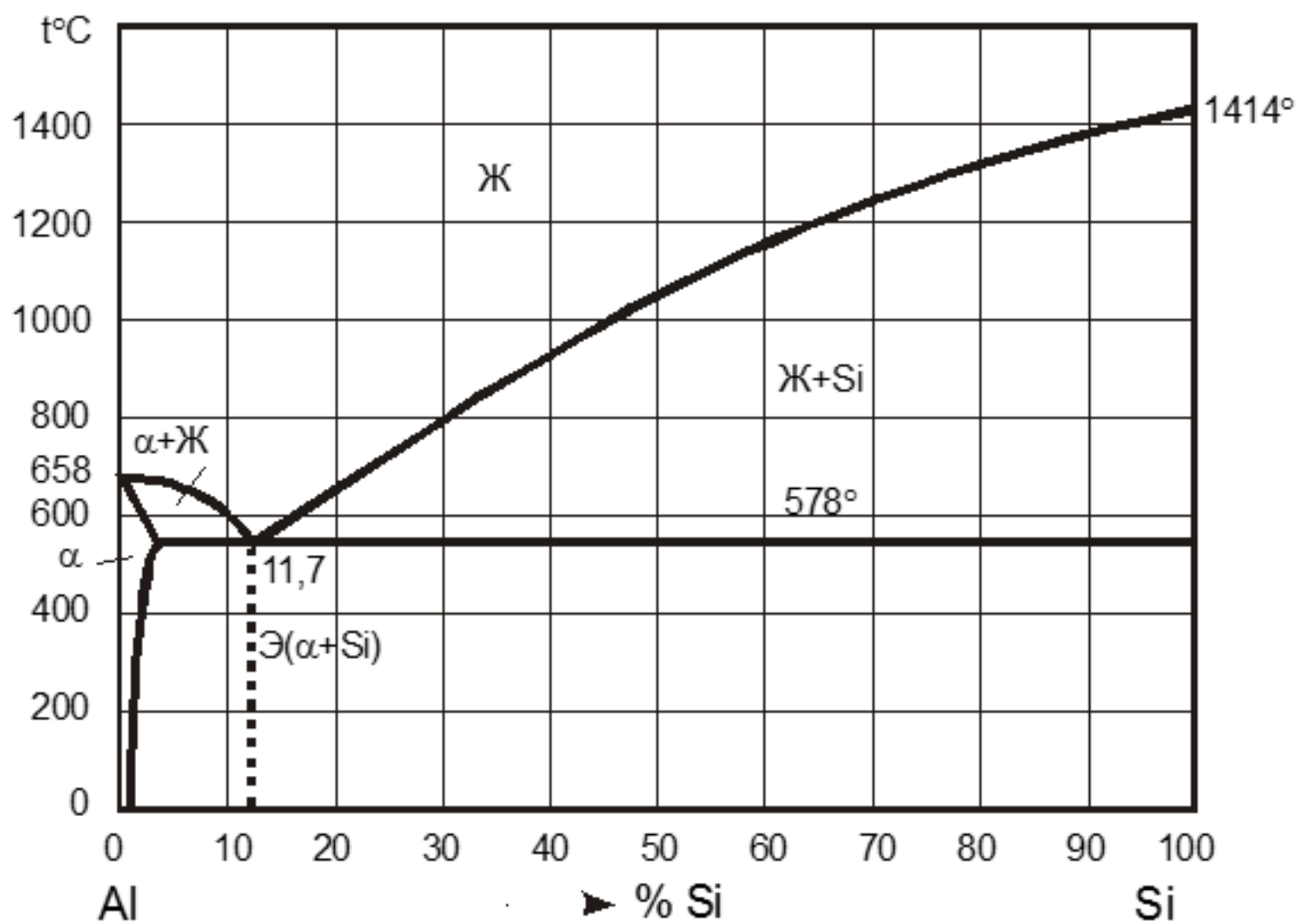


Рисунок А.2 – Диаграмма состояния системы Al - Si

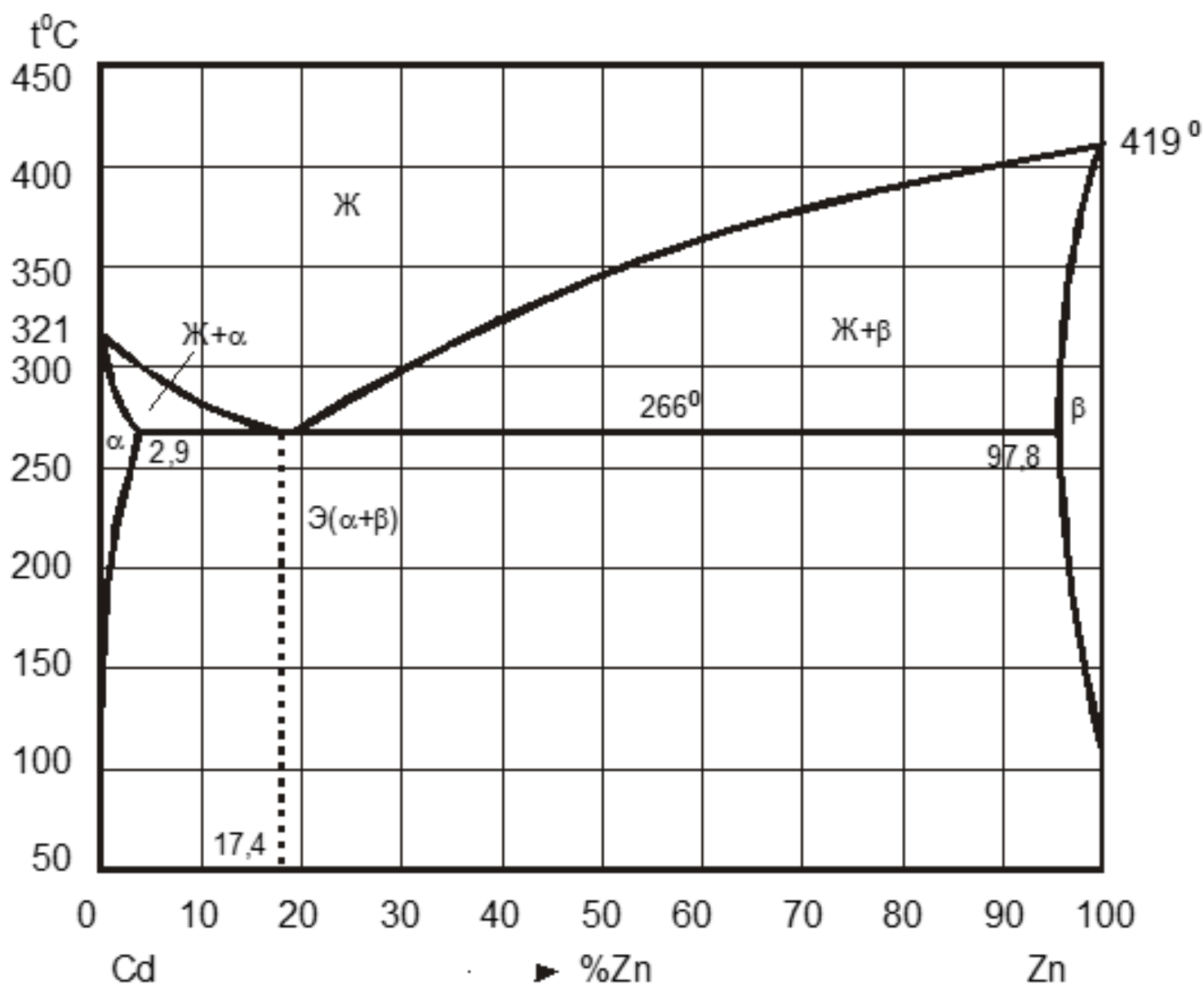


Рисунок А.3 – Диаграмма состояния системы Cd - Zn

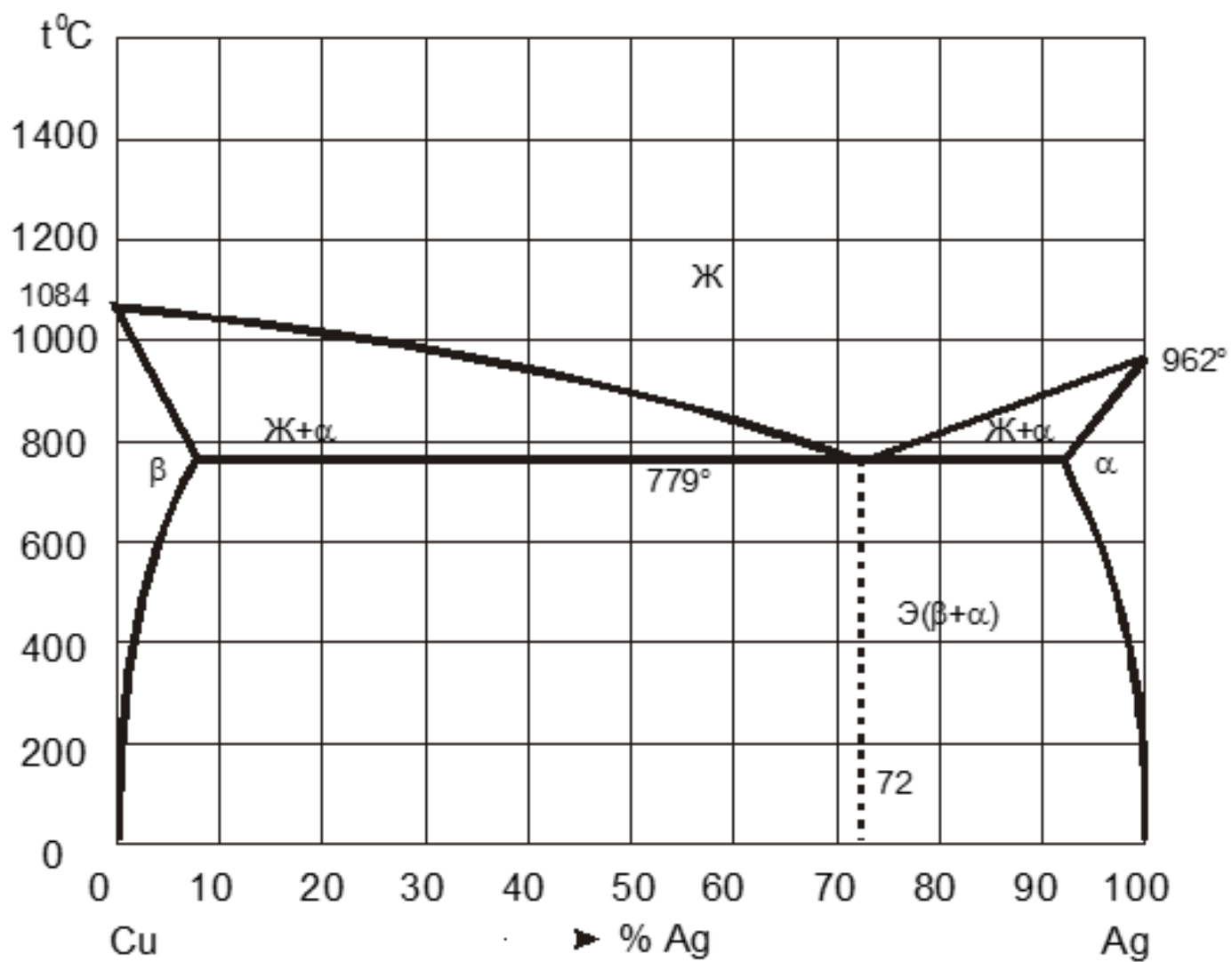


Рисунок А.4 – Диаграмма состояния системы Cu – Ag

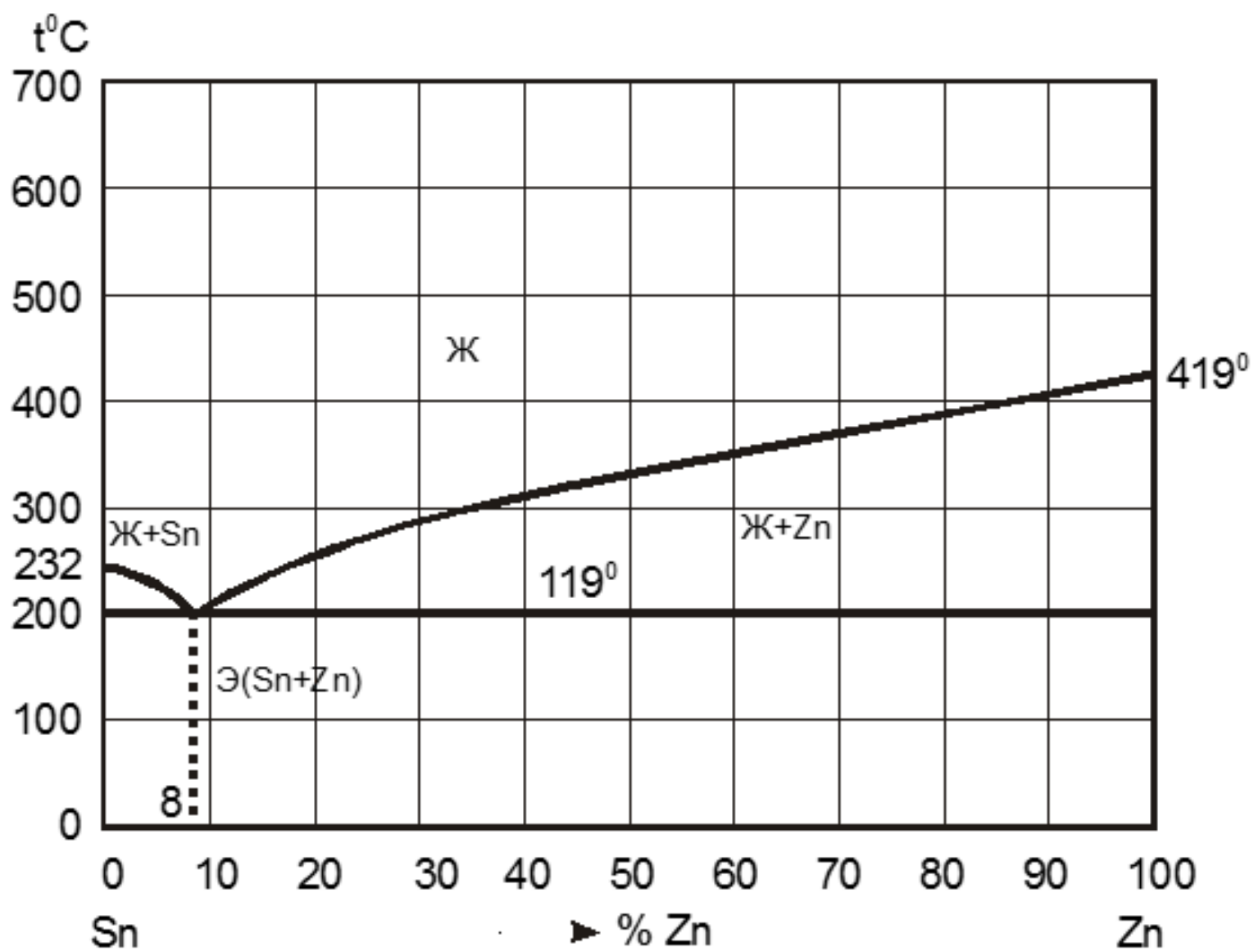


Рисунок А.5 – Диаграмма состояния системы Sn – Zn

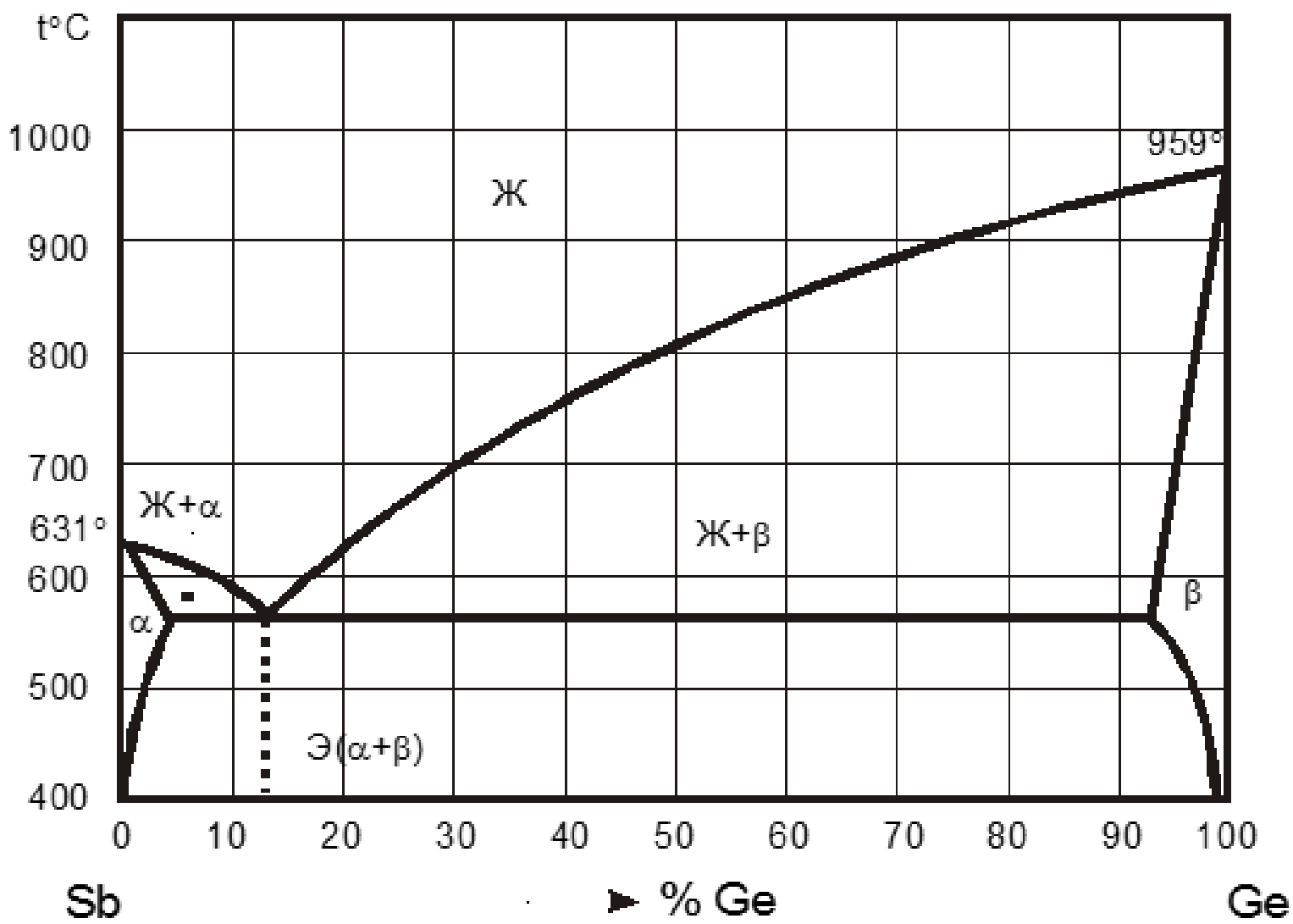


Рисунок А.6 – Диаграмма состояния системы Sb – Ge

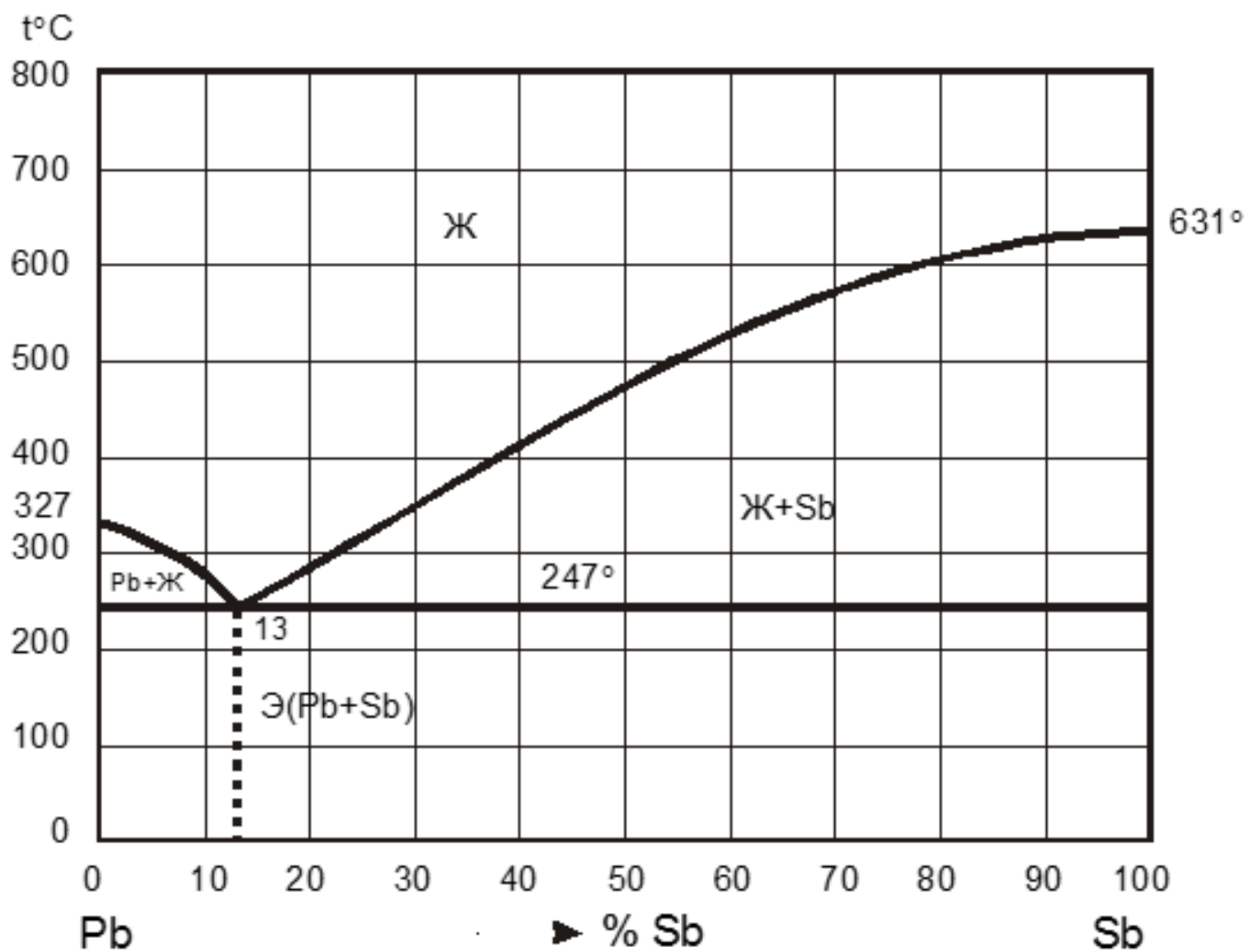


Рисунок А.7 – Диаграмма состояния системы Pb – Sb

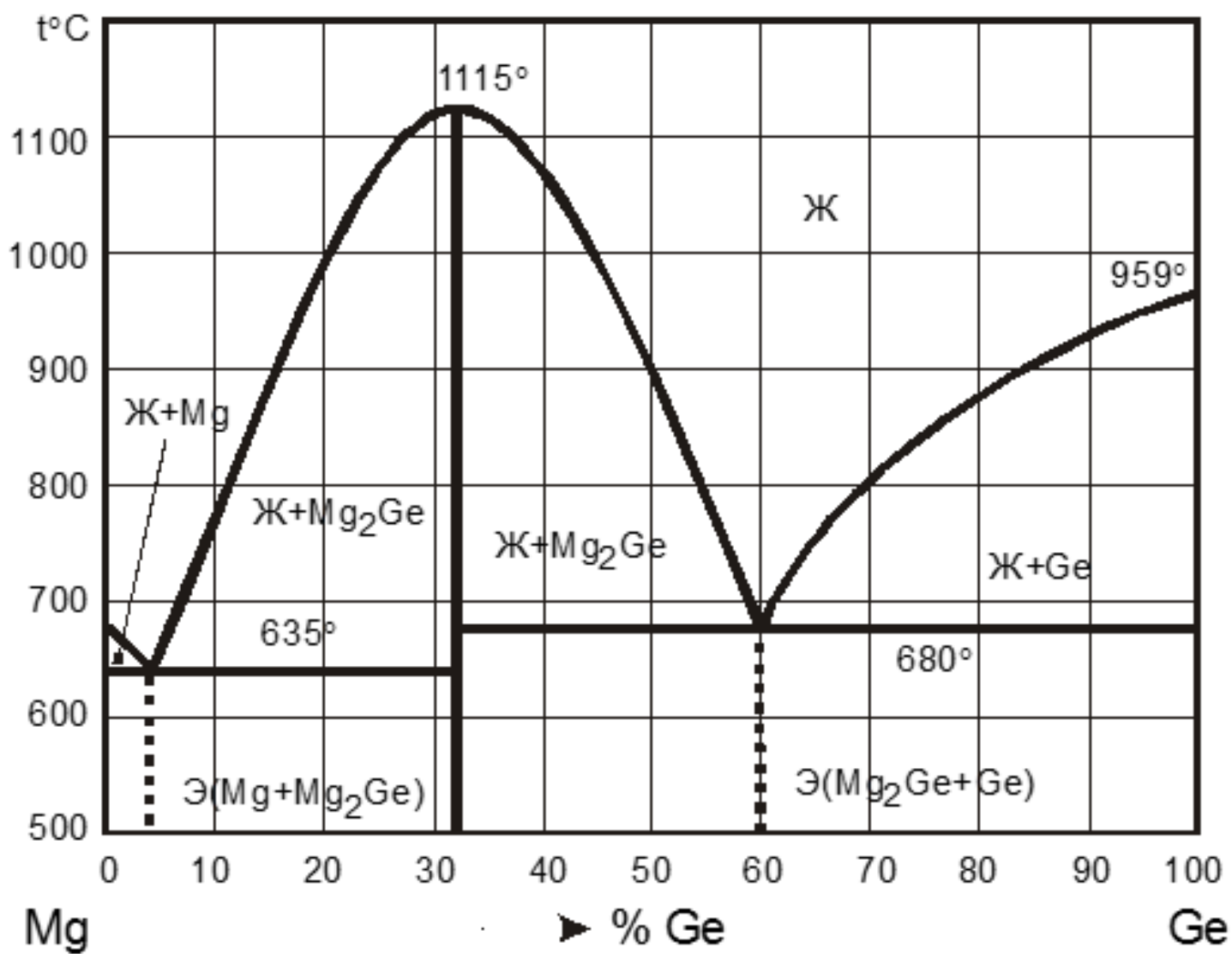


Рисунок А.8 – Диаграмма состояния системы Mg – Ge

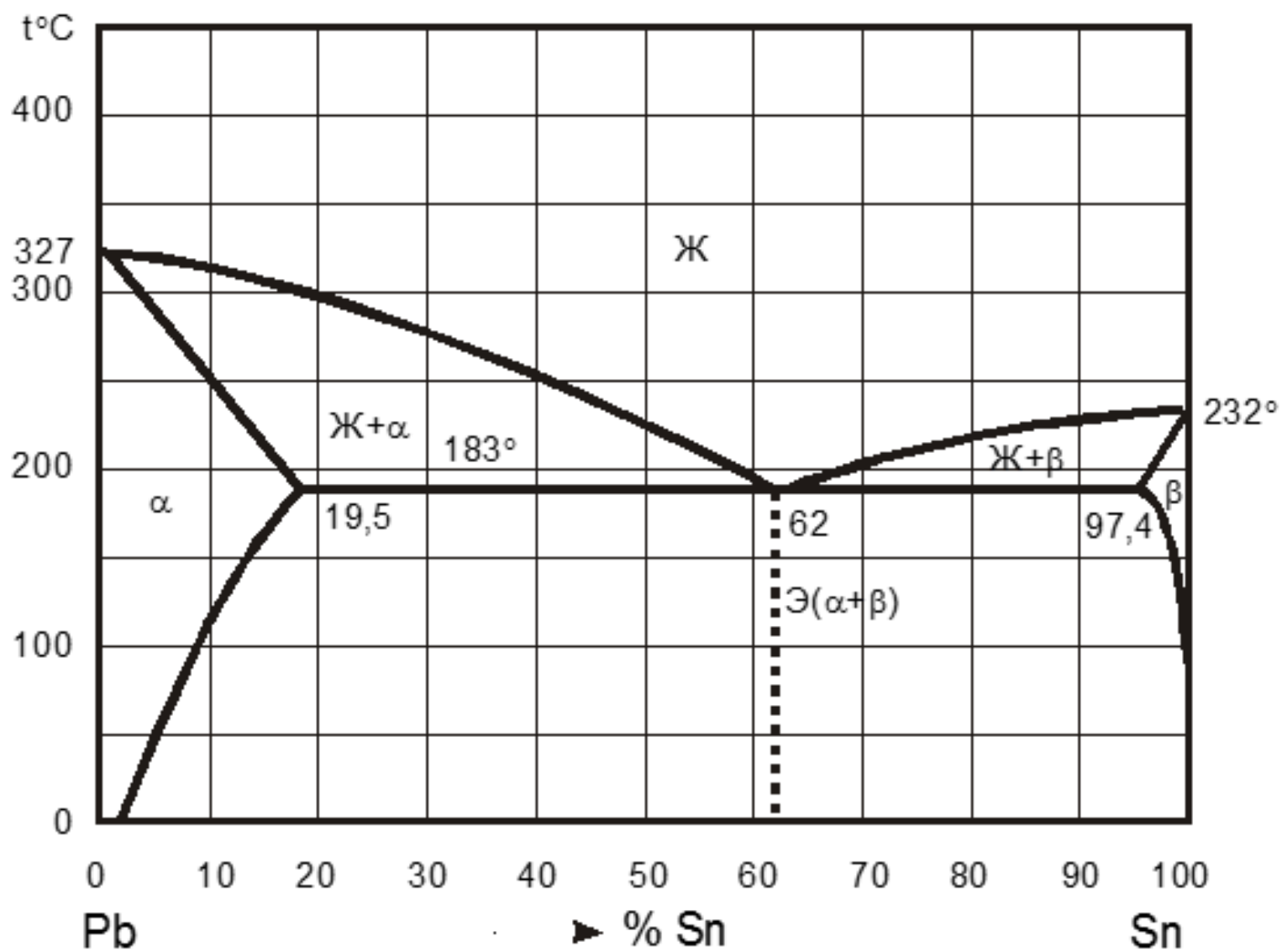


Рисунок А.9 – Диаграмма состояния системы Pb – Sn

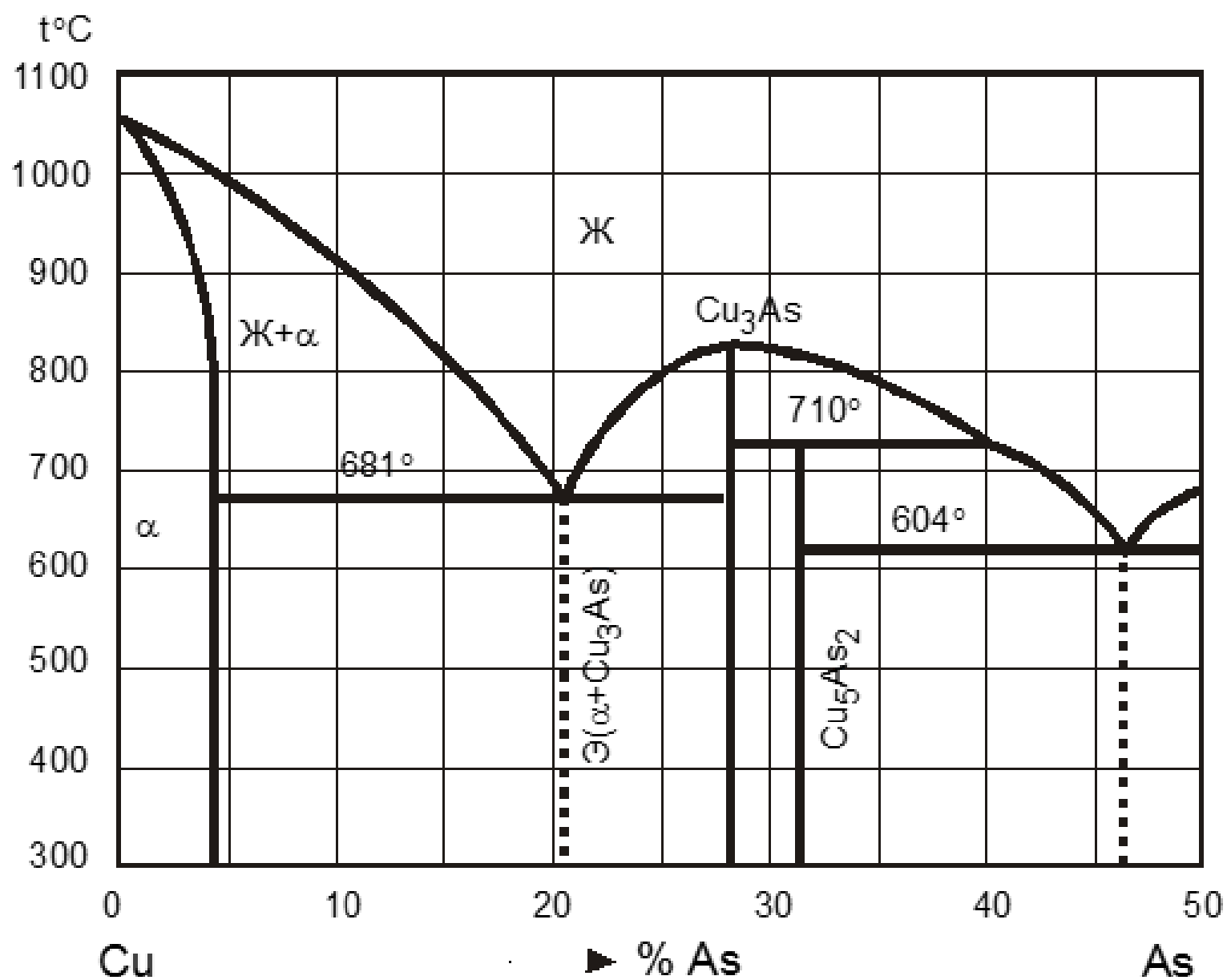


Рисунок А.10 – Диаграмма состояния системы Cu – As

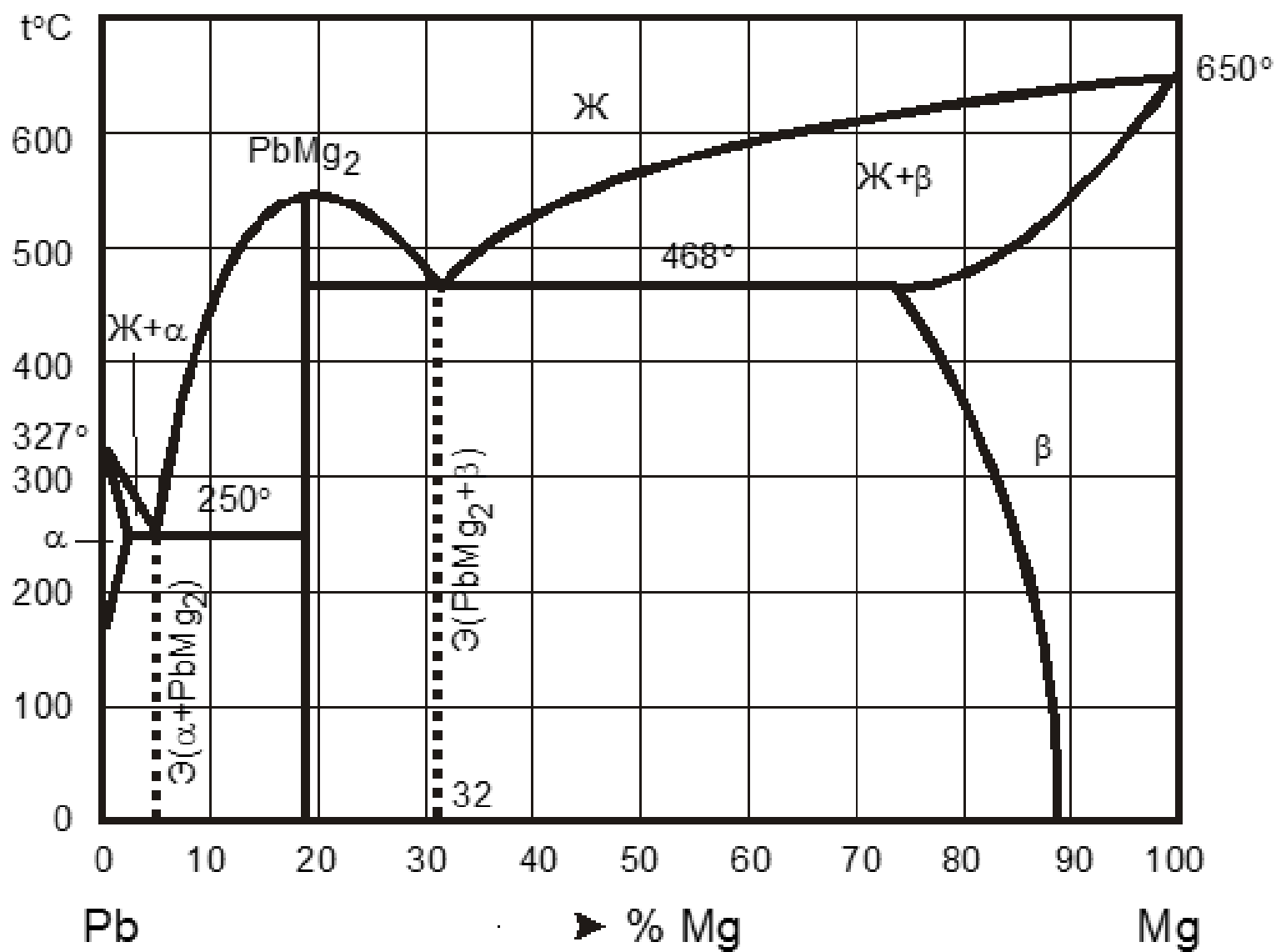


Рисунок А.11 – Диаграмма состояния системы Pb – Mg

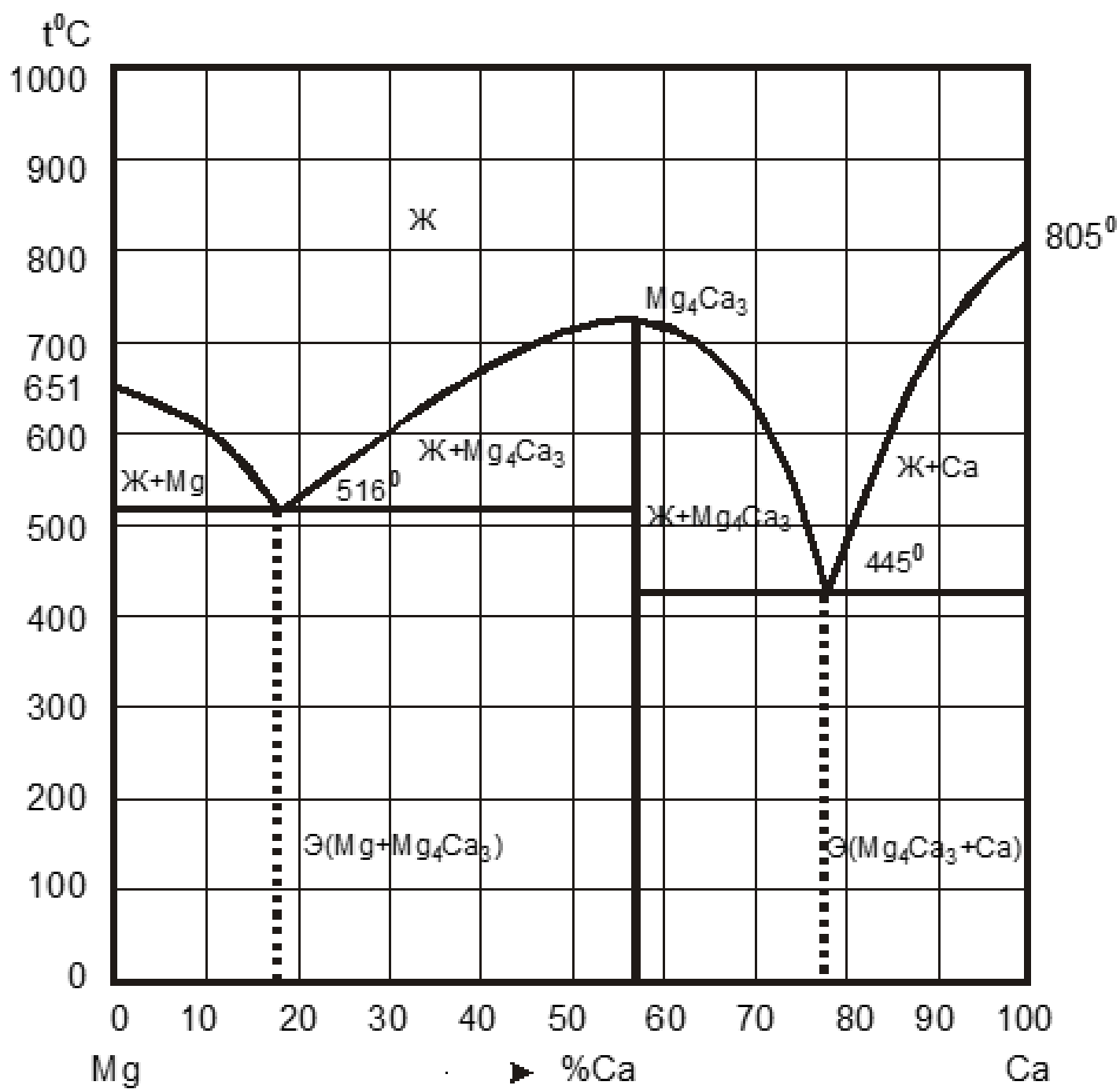


Рисунок А.12 – Диаграмма состояния системы Mg - Ca

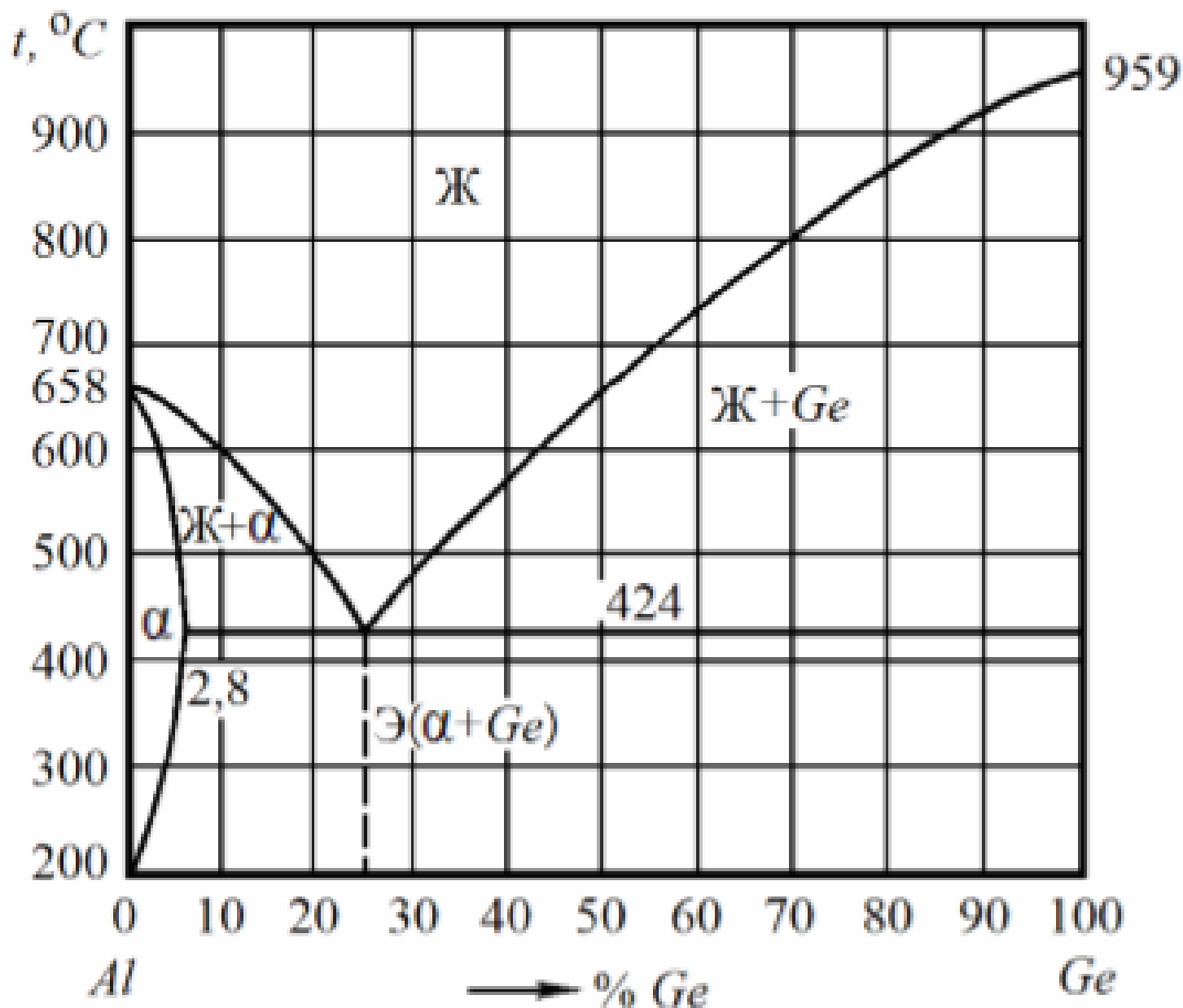


Рисунок А.13 – Диаграмма состояния системы Al– Ge

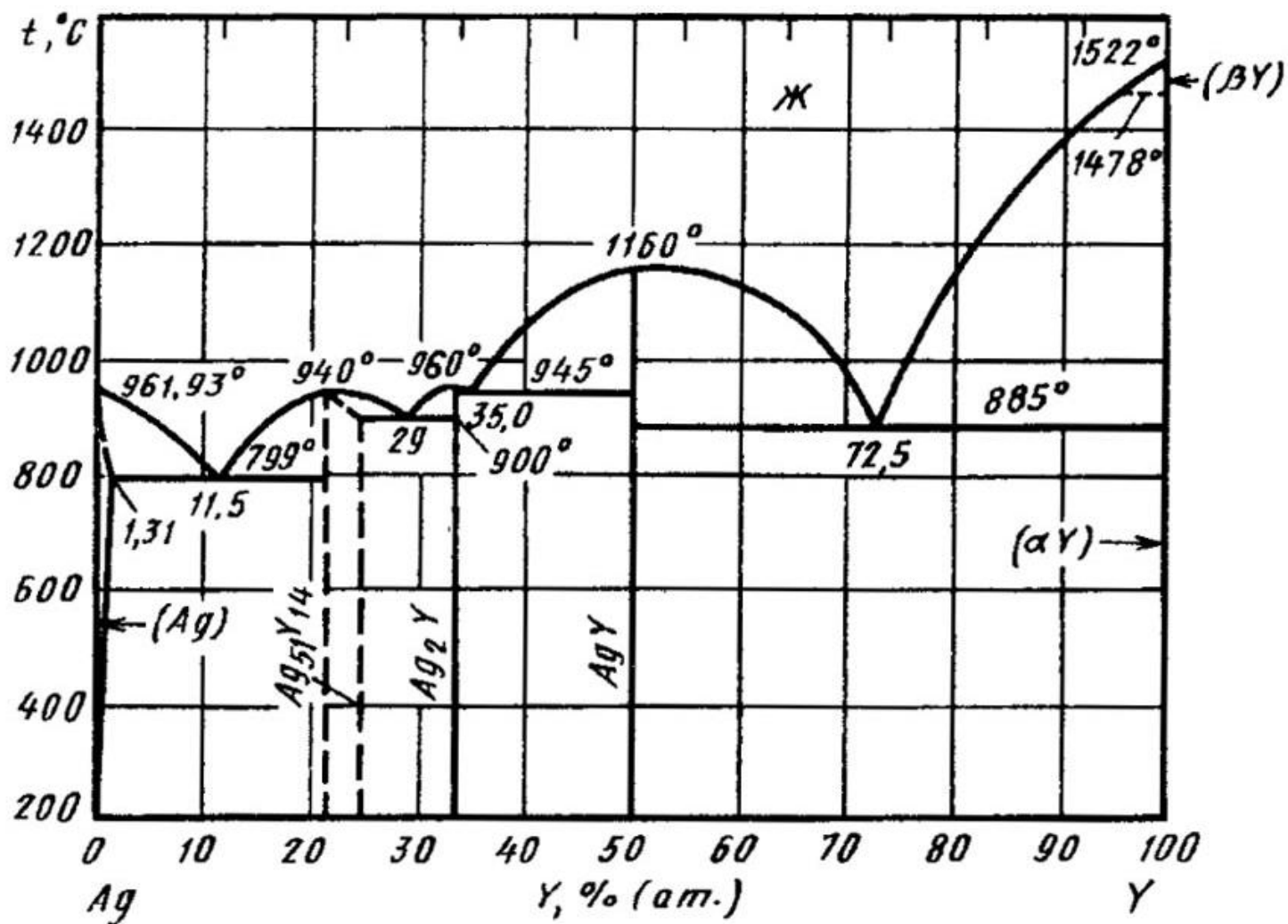


Рисунок А.14 – Диаграмма состояния системы $\text{Ag} - \gamma$

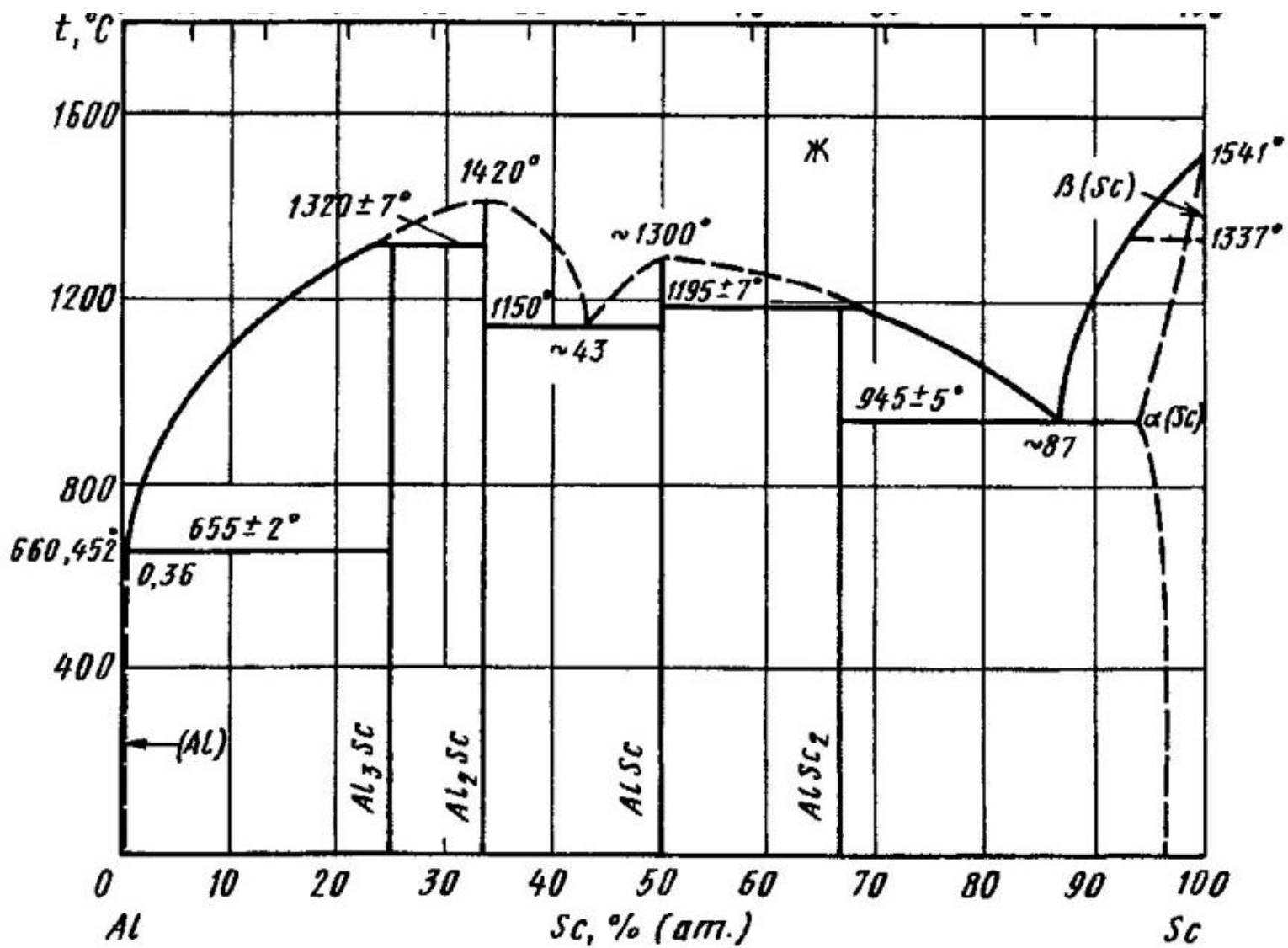


Рисунок А.15 – Диаграмма состояния системы Al – Sc

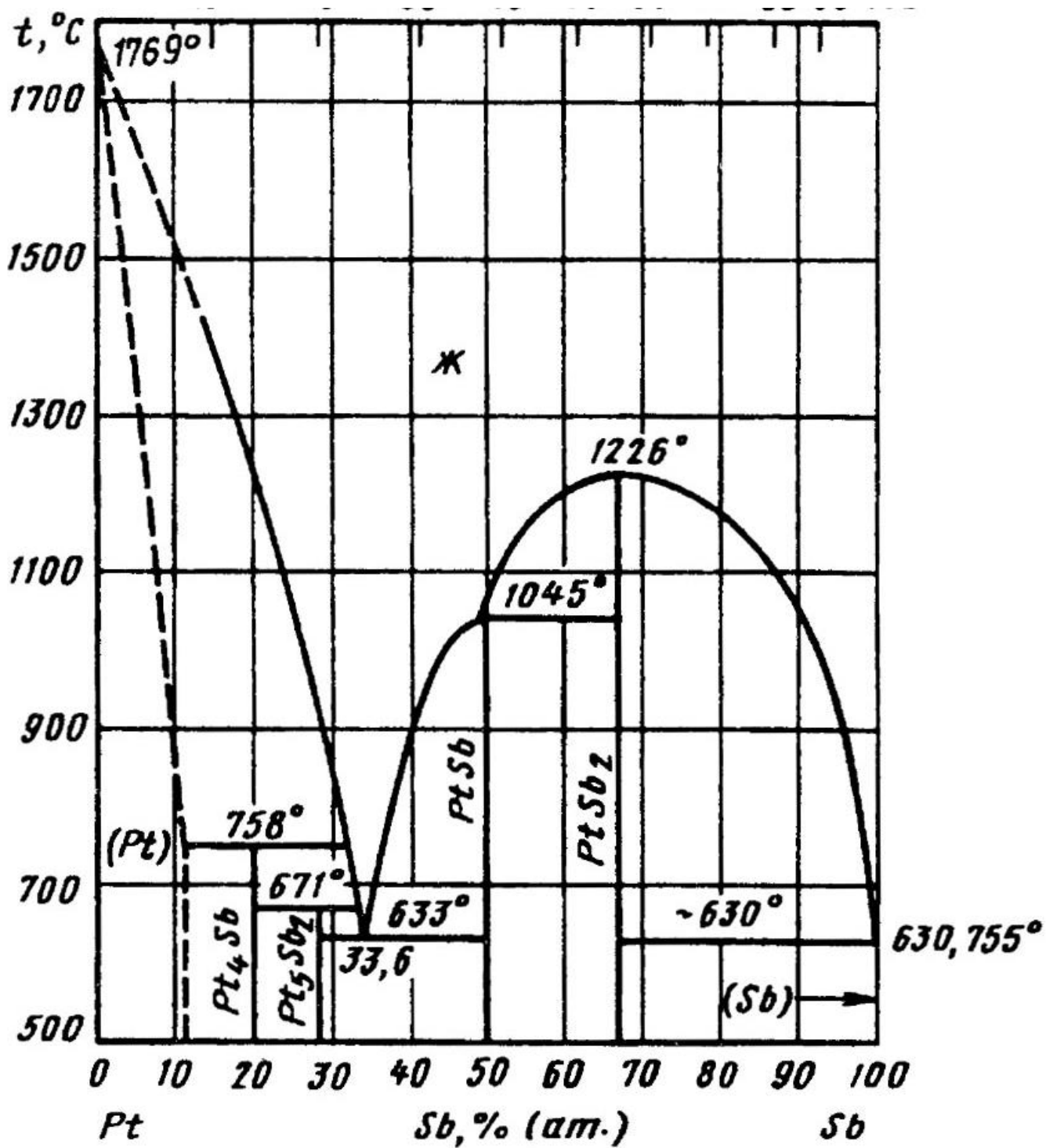


Рисунок А.16 – Диаграмма состояния системы Pt – Sb

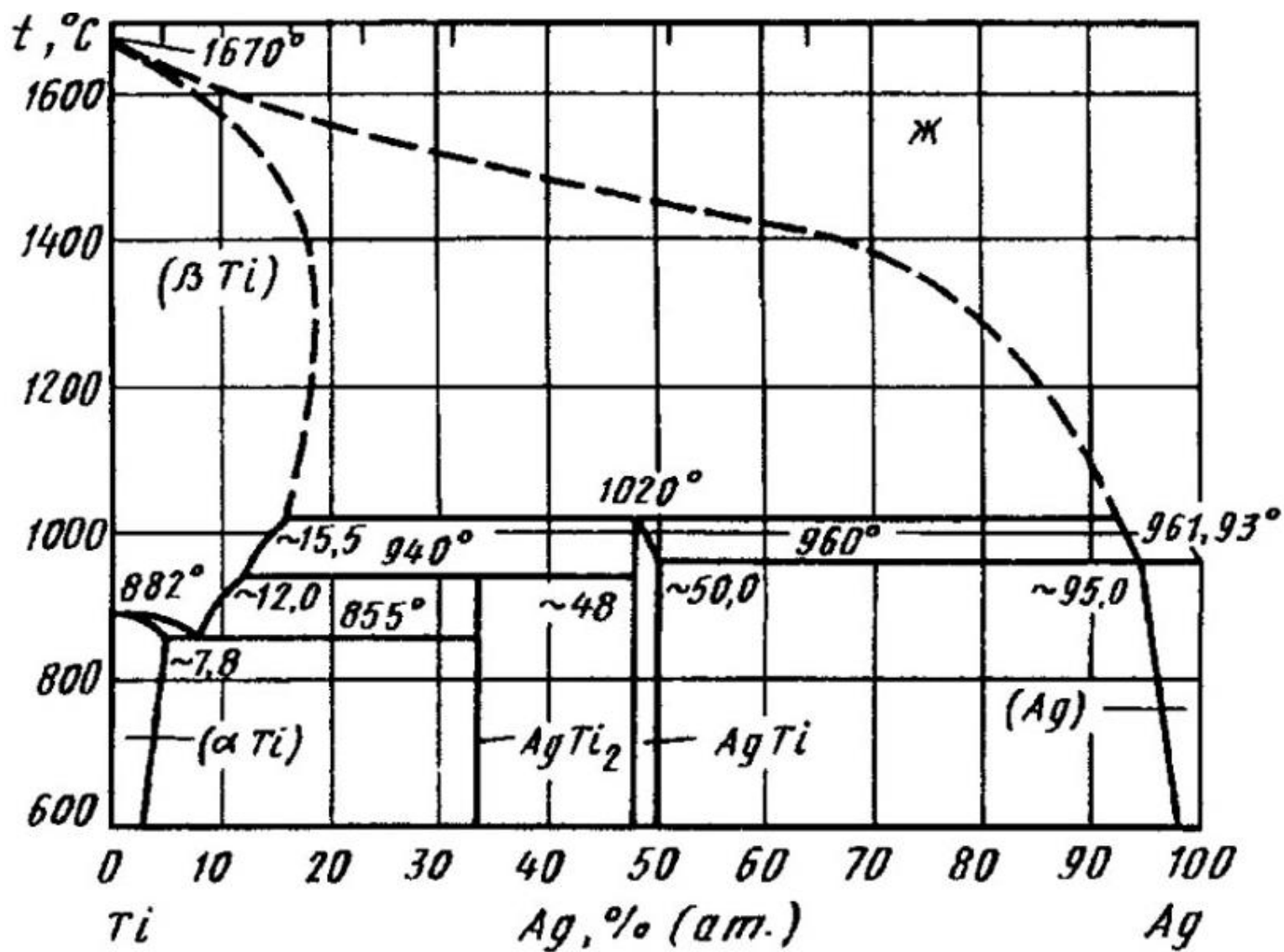


Рисунок А.17 – Диаграмма состояния системы Ti – Ag

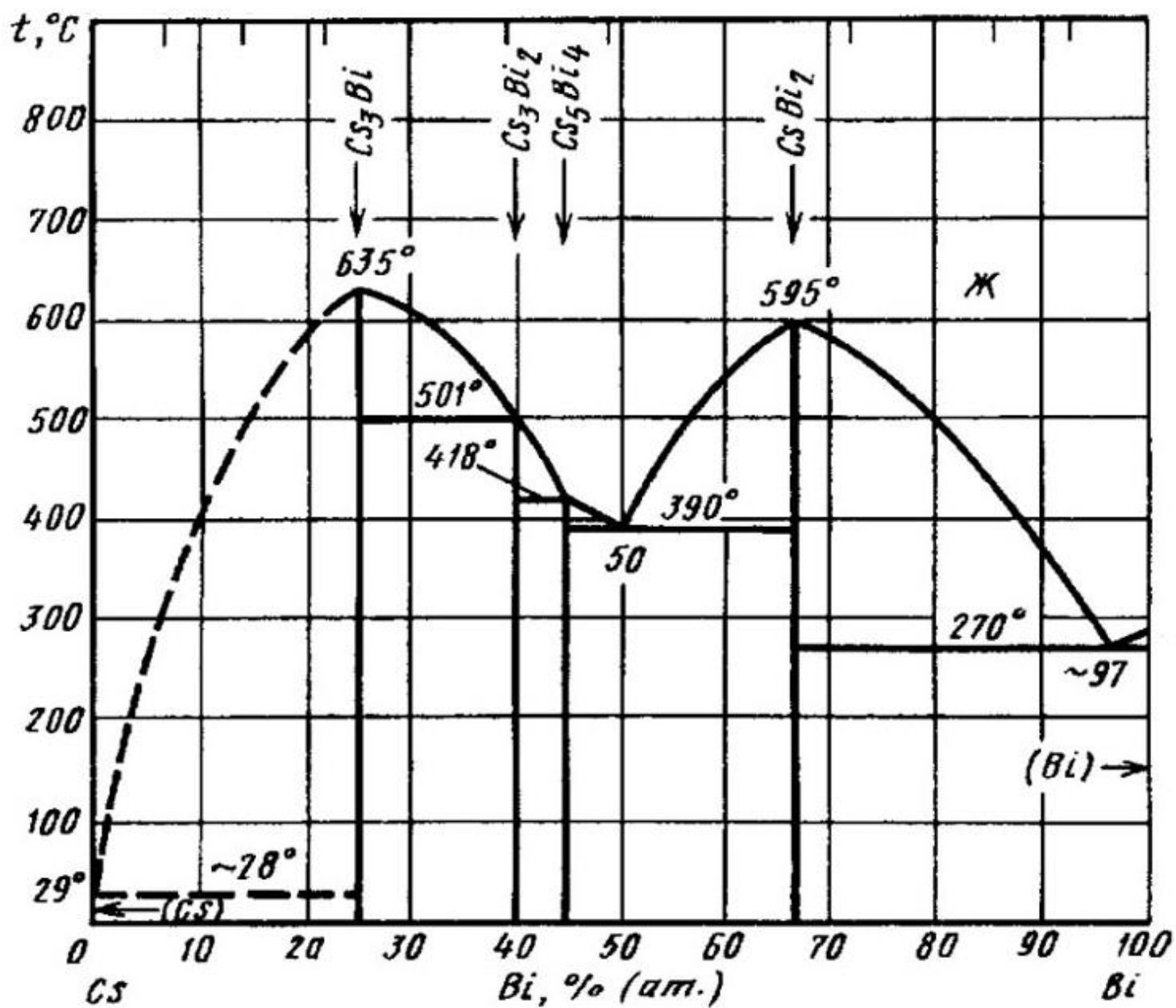


Рисунок А.18 – Диаграмма состояния системы Cs – Bi

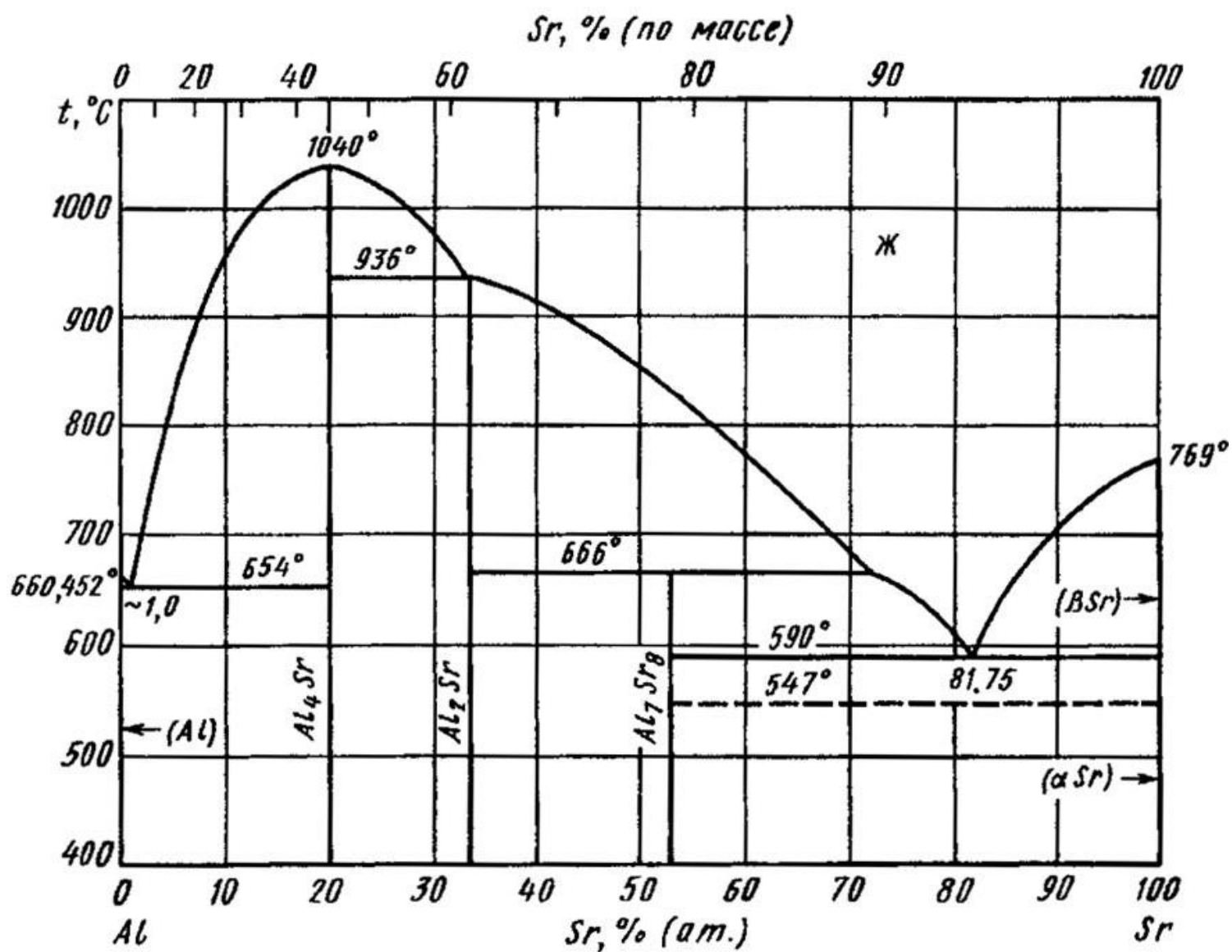


Рисунок А.19 – Диаграмма состояния системы Al – Sr

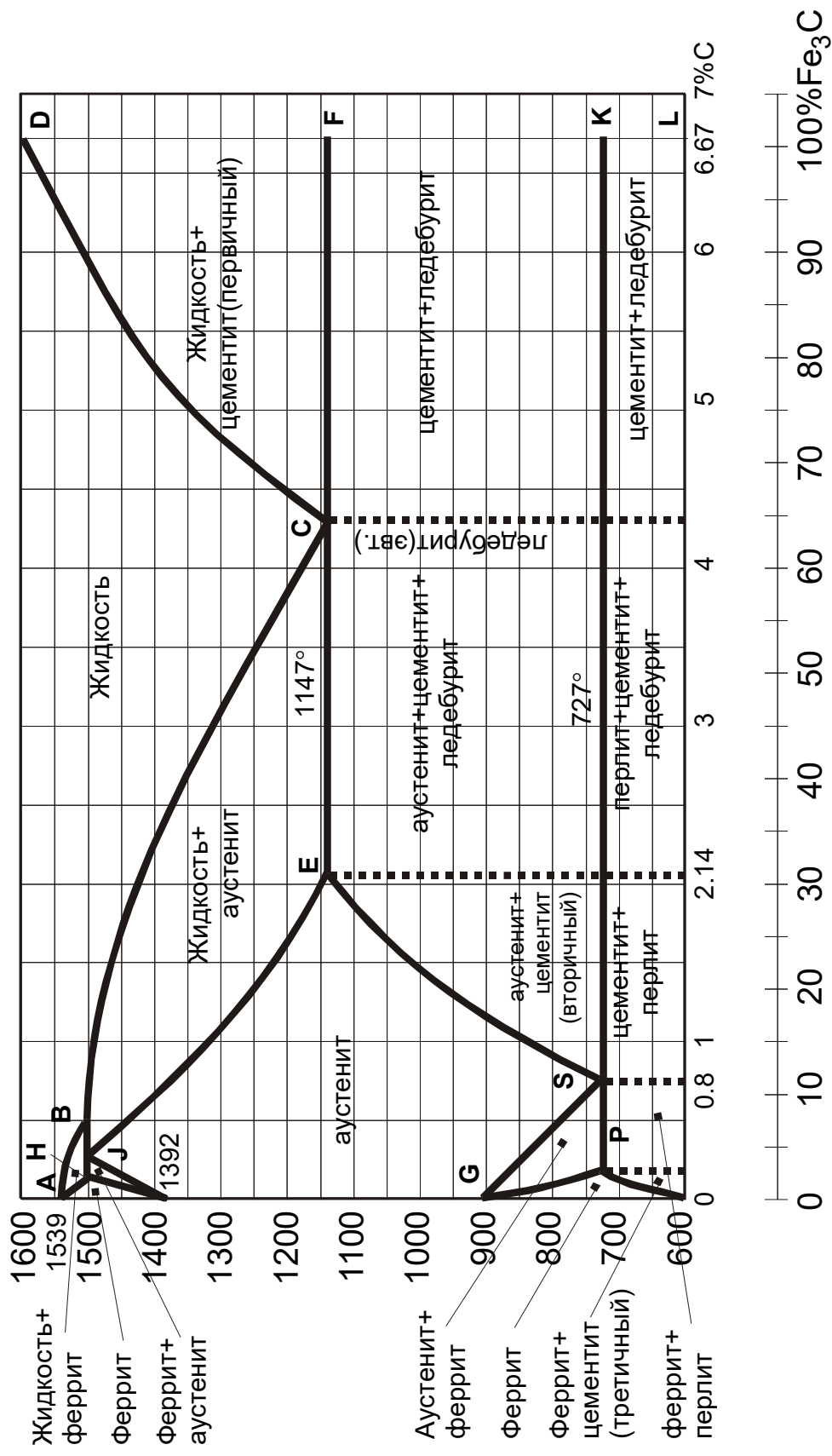


Рисунок А.15 - Диаграмма состояния железо-цементит