

видны пять критических точек (см. рис. 77). По структуре этот сплав принципиально не отличается от предыдущего сплава 3.

Если фигуративная точка сплава находится в области $p_1 a_1 c_1 p_2$, как, например, сплава 5 (см. рис. 76, б), то такой сплав кристаллизуется аналогично сплаву 4, но в твердом состоянии не претерпевает фазовых превращений. Следовательно, число критических точек у сплава 5 будет на одну меньше, чем у сплава 4 (см. рис. 77), а по структуре — это граничный α -раствор. Наконец, если фигуративная точка сплава располагается на перитектической кривой $p_1 p_2$, как, например, сплава 6, то такой сплав кристаллизуется в интервале температур как твердый α -раствор (для протекания перитектической реакции $Ж + \beta \rightarrow \alpha$ в сплаве нет β -кристаллов) и на кривой охлаждения имеет две критические точки (см. рис. 77).

Изотермические и политермические разрезы этой системы принципиально не отличаются от разрезов предыдущей системы с моновариантным эвтектическим равновесием (см. рис. 73 и 74).

Глава 11. ДИАГРАММЫ СОСТОЯНИЯ СИСТЕМ С БИ-, МОНО- И НОНВАРИАНТНЫМИ РАВНОВЕСИЯМИ

Как отмечено в гл. 8 (см. § 33), невариантное равновесие в тройной системе — это равновесие четырех различных фаз. Ниже рассмотрены две тройные системы с наиболее распространенными четырехфазными равновесиями — эвтектическим и перитектическим. О тройных системах с четырехфазными равновесиями других типов см. в гл. 13 и 14.

§ 40. Диаграмма состояния системы с невариантным эвтектическим равновесием

1. Диаграмма состояния

Тройная система $A - B - C$ с невариантным эвтектическим равновесием ограничена тремя аналогичными двойными системами $A - B$, $B - C$ и $A - C$ эвтектического типа (рис. 79). Граничные α -, β - и γ -растворы на основе компонентов участвуют в бивариантных равновесиях $Ж \rightleftharpoons \alpha$, $Ж \rightleftharpoons \beta$ и $Ж \rightleftharpoons \gamma$, моновариантных эвтектических равновесиях $Ж \rightleftharpoons \alpha + \beta$, $Ж \rightleftharpoons \alpha + \gamma$ и $Ж \rightleftharpoons \beta + \gamma$ и, наконец, в невариантном эвтектическом равновесии $Ж_E \rightleftharpoons \alpha_a + \beta_b + \gamma_c$.

По числу граничных растворов можно назвать три поверхности ликвидуса $A'e_1E'e_2$, $B'e_2E'e_3$ и $C'e_1E'e_3$, которые проектируются в области первичной кристаллизации Ae_1Ee_2 , Be_2Ee_3 и Ce_1Ee_3 . Названные поверхности пересекаются по трем эвтектическим кривым $e_1'E'$, $e_2'E'$ и $e_3'E'$, а эти кривые сходятся в эвтектической точке E' (на плос-

кости концентрационного треугольника кривые e_1E , e_2E , e_3E и точка E).

Кривые e'_1E' , e'_2E' и e'_3E' (вместе с кривыми максимальной растворимости a'_5a' и c'_2c' , a'_2a' и b'_2b' , b'_5b' и c'_5c') характеризуют эвтектические равновесия $\mathcal{J} = \alpha + \gamma$, $\mathcal{J} = \alpha + \beta$ и $\mathcal{J} = \beta + \gamma$, а точка E' (вместе с точками a' , b' и c') – соответственно равновесие $\mathcal{J}_E = \alpha_a + \beta_b + \gamma_c$. Если трехфазные эвтектические равновесия реализуются в интервалах температур $t_{e_1} - t_E$, $t_{e_2} - t_E$ и $t_{e_3} - t_E$, а участвующие в них фазы могут в определенных пределах изменять свои составы (см. § 38), то четырехфазное равновесие – только при постоянной температуре t_E (или $t_{E'}$) и неизменных составах всех четырех равновесных фаз \mathcal{J}_E , α_a , β_b и γ_c ($b = k - \phi + 1 = 3 - 4 + 1 = 0!$).

Поверхность солидуса имеет сложное строение. Три поверхности $A'a_2a'a'_5$, $B'b_2b'b'_5$ и $C'c_2c'c'_5$ отвечают температурам конца кристаллизации α -, β - и γ -растворов, три линейчатые поверхности $a'_5a'c'_2c'_5$, $a'_2a'b'b'_2$ и $b'_5b'c'c'_5$ – температурам конца кристаллизации эвтектик $\alpha + \gamma$, $\alpha + \beta$ и $\beta + \gamma$ и, наконец, плоскость треугольника $a'b'c'$ при температуре t_E – температуре кристаллизации эвтектики $\alpha_a + \beta_b + \gamma_c$. На плоскость концентрационного треугольника (рис. 80, а) эти поверхности проектируются соответственно в области Aa_2aa_5 , Bb_2bb_5 и Cc_2cc_5 , a_5acc_2 , a_2abb_2 и b_5bcc_5 и треугольник abc (проекции линейчатых поверхностей показаны сплошными линиями).

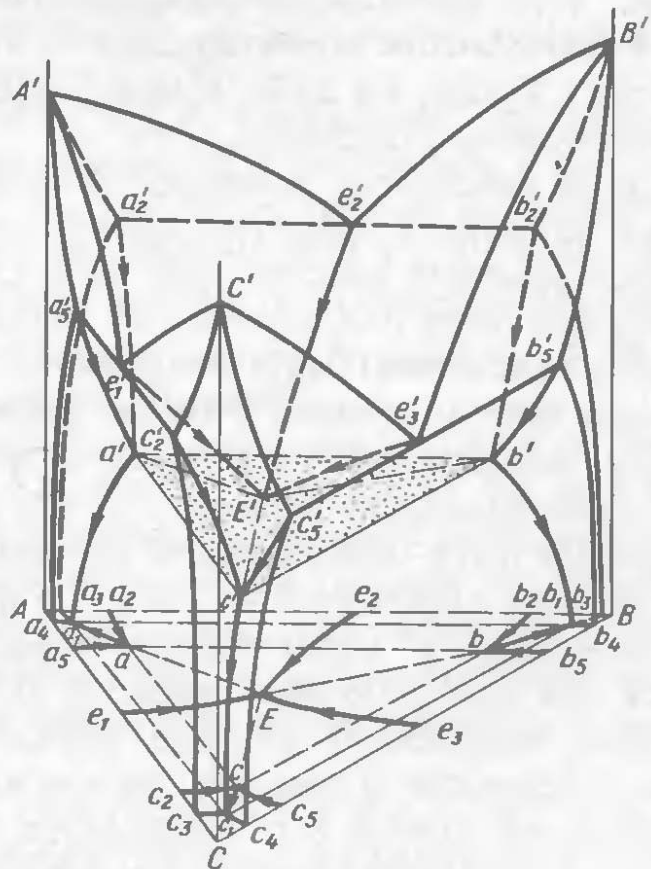


Рис. 79

Между поверхностями ликвидуса и солидуса имеются еще три линейчатые поверхности $a'_5a'E'c'_2c'_5$, $a'_2a'E'b'b'_2$ и $b'_5b'E'c'c'_5$, отвечающие температурам начала кристаллизации эвтектик $\alpha + \gamma$, $\alpha + \beta$ и $\beta + \gamma$. Каждая из этих поверхностей, как и в системе с моновариантным эвтектическим равновесием (см. рис. 75), состоит из двух частей: $a'_5a'E'e_1$ и $e_1E'c'_2c'_5$, $a'_2a'E'e_2$ и $e_2E'b'b'_2$, $b'_5b'E'e_3$ и $e_3E'c'c'_5$, распо-

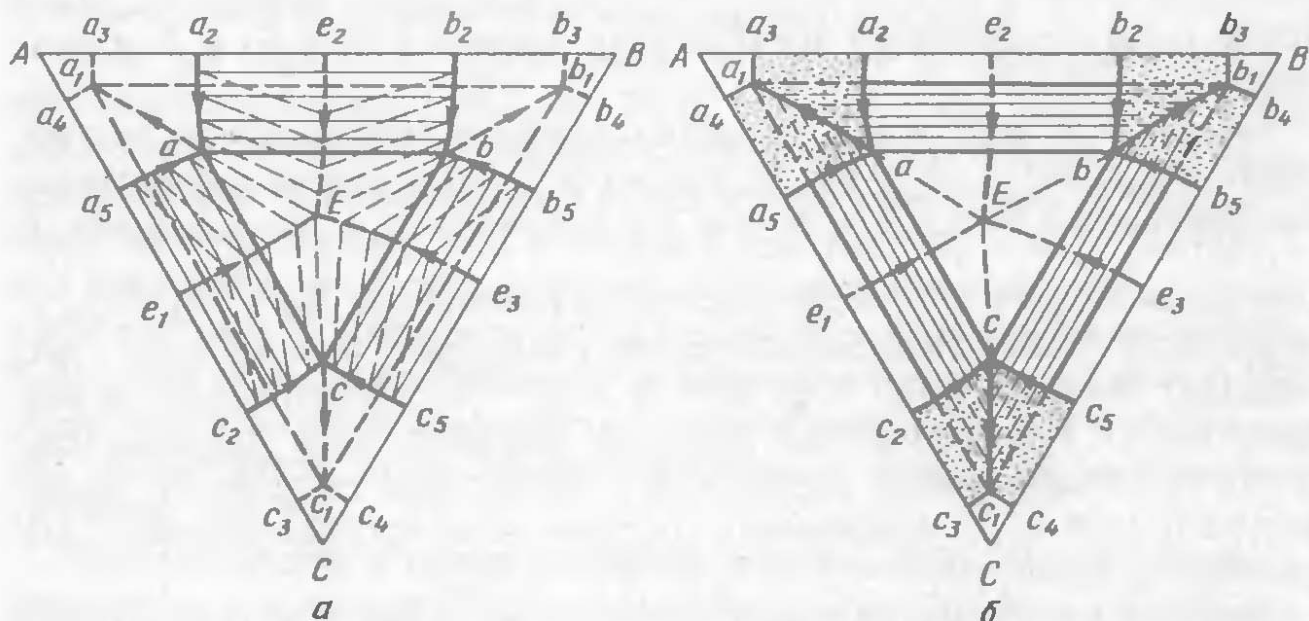


Рис. 80

ложенных по обе стороны от эвтектических кривых e'_1E' , e'_2E' и e'_3E' . На плоскость концентрационного треугольника (см. рис. 80, а) эти поверхности проектируются соответственно в области a_5aEe_1 и e_1Ecc_2 , a_2aEe_2 и e_2Ebb_2 , b_5bEe_3 и e_3Ecc_5 (отдельные коноды показаны пунктирными отрезками).

Если линейчатые поверхности начала и конца кристаллизации двойных эвтектик в пространственной диаграмме состояния рассечь горизонтальными плоскостями, то в сечениях получится ряд конодных треугольников (см. рис. 80, а). Большие стороны этих треугольников (сплошные линии) будут следами от сечения линейчатых поверхностей конца кристаллизации, а малые (пунктирные линии) — следами от сечения поверхностей начала кристаллизации этих эвтектик.

Политермические кривые c'_2c' и a'_5a' , a'_2a' и b'_2b' , b'_5b' и c'_5c' , соединяющие точки максимальной растворимости c'_2 и a'_5 , b'_2 и a'_2 , b'_5 и c'_5 в двойных системах А — С, А — В и В — С с вершинами a' , b' и c' треугольника $a'b'c'$, характеризуют переменные составы α -, β - и γ -растворов при кристаллизации эвтектик $\alpha + \beta$, $\alpha + \gamma$ и $\beta + \gamma$. Эти кривые также изображают влияние одного компонента на максимальную растворимость в твердом состоянии второго компонента в третьем. Например, кривая c'_2c' показывает, как влияет компонент В на максимальную растворимость компонента А в компоненте С (γ -раствор насыщен только относительно α -раствора), кривая a'_5a' — как влияет тот же компонент В на максимальную растворимость компонента С в компоненте А (α -раствор насыщен только относительно γ -раствора), и т.д. На плоскость концентрационного треугольника эти политермы максимальной растворимости проектируются соответственно в кривые c_2c и a_5a , a_2a и b_2b , b_5b и c_5c (см. рис. 80, а).

Точки a' , b' и c' (или a , b и c), изображающие составы α_a , β_b и γ_c -растворов при кристаллизации эвтекики $J_E \rightarrow \alpha_a + \beta_b + \gamma_c$ характеризуют максимальную совместную растворимость двух компонентов в третьем при эвтектической температуре t_E . Так, точка a' (или a) отвечает максимальной растворимости компонентов B и C в компоненте A (α -раствор насыщен относительно β - и γ -растворов), точка b' (или b) — растворимости компонентов A и C в компоненте B (β -раствор насыщен относительно α - и γ -растворов) и, наконец, точка c' (или c) — растворимости компонентов A и B в компоненте C (γ -раствор насыщен относительно α - и β -растворов).

Взаимная растворимость компонентов A , B и C при комнатной температуре (на плоскости концентрационного треугольника) изображается изотермами растворимости c_3c_1 и a_4a_1 , a_3a_1 и b_3b_1 , b_4b_1 и c_4c_1 и точками совместной растворимости a_1 , b_1 и c_1 .

Через пары политерм и изотерм растворимости a'_2a' и a_3a_1 , a'_5a' и a_4a_1 , b'_2b' и b_3b_1 , b'_5b' и b_4b_1 , c'_2c' и c_3c_1 , c'_5c' и c_4c_1 в пространственной диаграмме (см. рис. 88) проходят шесть политермических поверхностей сольвуса $a'_2a'a_1a_3$ и $a'_5a'a_1a_4$, $b'_2b'b_1b_3$ и $b'_5b'b_1b_4$, $c'_2c'c_1c_3$ и $c'_5c'c_1c_4$, каждая из которых изображает влияние одного компонента на растворимость второго компонента в третьем при разных температурах. Например, поверхность $a'_5a'a_1a_4$ показывает, как влияет компонент B на растворимость компонента C в компоненте A при разных температурах, поверхность $a'_2a'a_1a_3$ — как влияет компонент C на растворимость компонента B в компоненте A , и т.д. На плоскость концентрационного треугольника (см. рис. 80, б) эти поверхности проектируются соответственно в области $a_5aa_1a_4$ и $a_2aa_1a_3$, $b_5bb_1b_4$ и $b_2bb_1b_3$, $c_5cc_1c_4$ и $c_2cc_1c_3$ (затемнены точками).

Перечисленные пары поверхностей сольвуса пересекаются по трем политермическим кривым $a'a_1$, $b'b_1$ и $c'c_1$ (см. рис. 79) или aa_1 , bb_1 и cc_1 (см. рис. 80, б), которые изображают изменение максимальной совместной растворимости двух компонентов в третьем при понижении температуры от эвтектической t_E до комнатной. Например, кривая $a'a_1$ (или aa_1) показывает, как изменяется совместная растворимость компонентов B и C в компоненте A в интервале температур $t_E - t_{\text{комн}}$ и т.д.

Через кривые $a'a_1$, $b'b_1$ и $c'c_1$ (или стороны $a'b'$ и a_1b_1 , $a'c'$ и a_1c_1 , $b'c'$ и b_1c_1 конодных треугольников $a'b'c'$ и $a_1b_1c_1$) в пространственной диаграмме состояния (см. рис. 79) проходят еще три линейчатые поверхности сольвуса $a_1a'b'b_1$, $b_1b'c'c_1$ и $a_1a'c'c_1$, каждая из которых характеризует переменную растворимость одного компонента в двух других при температурах от эвтектической t_E до комнатной. Так, линейчатая поверхность $a_1a'c'c_1$ изображает переменную растворимость компонента B в компонентах A и C , поверхность $a_1a'b'b_1$ — раствори-

мость компонента C в компонентах A и B и, наконец, поверхность $b_1b'sc_1$ — растворимость компонента A в компонентах B и C . На плоскость концентрационного треугольника (см. рис. 80, б) эти линейчатые поверхности проектируются в области a_1acc_1 , a_1abb_1 и b_1bcc_1 (выделены сплошными линиями).

Таким образом, по каждой из кривых $a'a_1$, $b'b_1$ и $c'c_1$ в пространственной диаграмме состояния (см. рис. 79) пересекаются две обычные и две линейчатые поверхности сольвуса. Так, по кривой $a'a_1$ пересекаются поверхности $a_5a'a_1a_4$ и $a_2a'a_1a_3$, $a_1a'c'c_1$ и $a_1a'b'b_1$ и т.д. Максимальная растворимость одного компонента в двух других в твердом состоянии также наблюдается при эвтектической температуре t_E , а минимальная растворимость — при комнатной температуре.

О характере пересечения эвтектических кривых в эвтектической точке E см. в гл. 15 (§ 59). Из правила центра тяжести треугольника следует, что эвтектическая точка E должна располагаться внутри треугольника abc (см. рис. 80).

2. Фазовые превращения в сплавах

Сплавы областей $Aa_3a_1a_4$, $Bb_3b_1b_4$ и $Cc_3c_1c_4$ (рис. 81, а) кристаллизуются как α -, β - и γ -растворы, в твердом состоянии не претерпевают фазовых превращений и на кривых охлаждения имеют по две критические точки (см. § 34). Например, жидкая фаза и α -кристаллы в сплаве 1 из области $Aa_3a_1a_4$ претерпевают такие же качественные и количественные изменения, как и в сплаве-растворе M (см. рис. 57).

Однофазными при высокой, а затем двухфазными при низких температурах становятся сплавы, расположенные в областях $a_3a_1a_7a_2$ и $a_4a_1a_6a_5$, $b_3b_1b_7b_2$ и $b_4b_1b_6b_5$, $c_3c_1c_7c_2$ и $c_4c_1c_6c_5$. Так, сплавы областей $a_3a_1a_7a_2$ и $a_4a_1a_6a_5$ заканчивают кристаллизацию как α -растворы, но при охлаждении в твердом состоянии из них выделяются соответственно вторичные β - или γ -кристаллы. На кривых охлаждения эти сплавы имеют по три критические точки. Например, фазовые превращения в сплаве 2 из области $a_3a_1a_7a_2$ (см. рис. 81, а) не отличаются от превращений в аналогичном сплаве 1 из системы с моновариантным эвтектическим равновесием (см. § 38).

В сплавах областей $a_5a_6c_7c_2$, $a_2a_7b_7b_2$ и $b_5b_6c_6c_5$ помимо первичных α -, β - или γ -кристаллов выделяется одна из эвтектик $\alpha + \gamma$, $\alpha + \beta$ или $\beta + \gamma$, а в твердом состоянии — вторичные кристаллы тех же растворов, которые образуют соответствующую эвтектику. Например, сплав 3 из области $a_5a_6c_7c_2$ (см. рис. 81, а) претерпевает такие же превращения, что и аналогичный сплав 3 из системы с моновариантным эвтектическим равновесием (см. § 38). На кривых охлаждения такие сплавы имеют по три критические точки. Если в областях $a_5a_6c_7c_2$, $a_2a_7b_7b_2$ и $b_5b_6c_6c_5$ фигуративные точки сплавов распола-

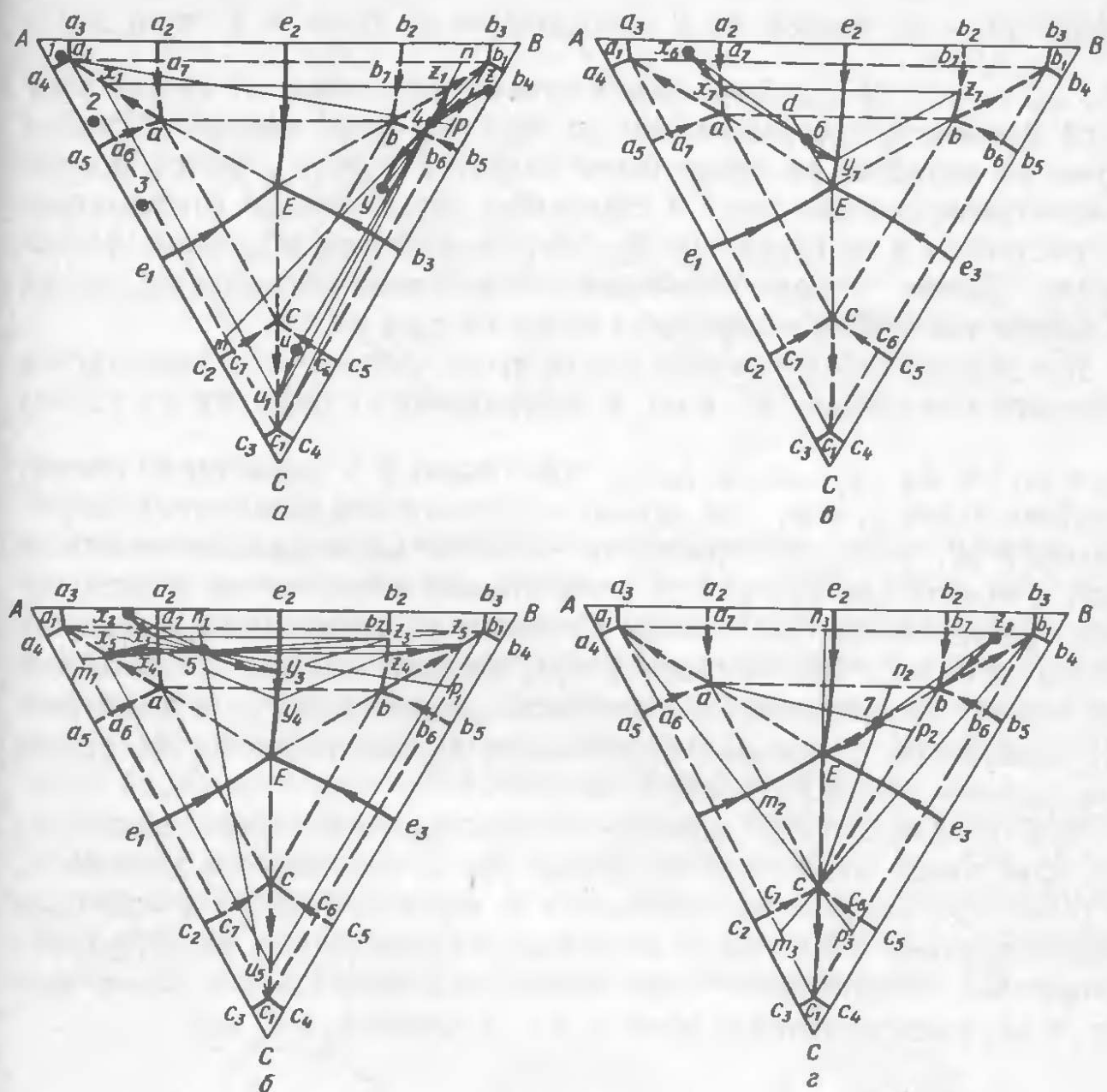


Рис. 81

гаются на эвтектических кривых e_1E , e_2E или e_3E , то в них отсутствуют первичные кристаллы, а остальные превращения остаются прежними. На кривых охлаждения такие сплавы имеют по две критические точки (см., например, аналогичный сплав 4 из системы с моновариантным эвтектическим равновесием — § 38).

Однофазными при высокой, затем двух- и трехфазными при низких температурах (в результате вторичной кристаллизации) становятся сплавы, расположенные в областях a_1aa_7 и a_1aa_6 , b_1bb_7 и b_1bb_6 , c_1cc_7 и c_1cc_6 . Покажем это на примере сплава 4 из области bb_1b_6 (см. рис. 81, а).

При первичной кристаллизации состав β -кристаллов в этом сплаве изменится по кривой $z4$ в направлении от точки z к точке 4, а состав

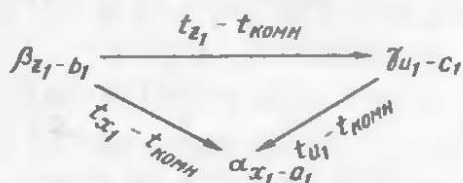
жидкости — по кривой 4у в направлении от точки 4 к точке у или

$J_4 - y \xrightarrow{t_4 - t_y} \beta_z - 4$. Дальнейшее охлаждение сплава не сопровождается фазовыми превращениями до тех пор, пока его фигуративная точка не окажется на поверхности сольвуса $b_5 b b_1 b_4$. В этот момент β -кристаллы состава точки 4 становятся насыщенными относительно γ -кристаллов и из первичных β -начнут выделяться вторичные γ -кристаллы. Состав первых вторичных γ -кристаллов определится точкой u , расположенной на поверхности сольвуса $c_5 c c_1 c_4$.

При дальнейшем понижении температуры составы β - и γ -кристаллов изменятся по кривым $4z_1$ и uu_1 в направлении от точек 4 и u к точкам

z_1 и u_1 , т.е. $\beta_4 - z_1 \xrightarrow{t_4 - t_{z_1}} \gamma_u - u_1$. Как только β - и γ -кристаллы примут составы точек z_1 и u_1 на кривых максимальной совместной растворимости bb_1 и cc_1 , эти кристаллы окажутся насыщенными не только друг относительно друга, но и относительно α -кристаллов. В этот момент фигуративная точка сплава 4 попадет на линейчатую поверхность сольвуса $b_1 b c c_1$ или на сторону $z_1 u_1$ первого конодного треугольника $x_1 z_1 u_1$, изображающего равновесие первичных β_{z_1} - и вторичных β_{u_1} -кристаллов с новыми вторичными α_{x_1} -кристаллами. Их состав определится точкой x_1 на кривой aa_1 .

При охлаждении до комнатной температуры состав первичных β_{z_1} -кристаллов изменится по кривой bb_1 в направлении от точки z_1 к точке b_1 , а составы выделяющихся из них вторичных γ - и α -кристаллов (вторичные α -кристаллы выделяются также из уже выделившихся вторичных γ -кристаллов — см. выше) — соответственно по кривым cc_1 и aa_1 в направлении от точек u_1 и x_1 к точкам c_1 и a_1 или



При комнатной температуре равновесие всех β_{b_1} , γ_{c_1} и α_{a_1} -кристаллов изобразит конодный треугольник $a_1 b_1 c_1$. Фигуративная точка сплава 4 со стороны $z_1 u_1$ треугольника $x_1 z_1 u_1$ "переместится" внутрь этого треугольника.

На кривой охлаждения сплав 4 имеет четыре критические точки (рис. 82), а в структуре — главным образом три структурные составляющие: первичные β - и вторичные γ и α -кристаллы, которые располагаются по границам и внутри β -кристаллов (рис. 83, а). Доли этих структурных составляющих можно оценить с помощью правила центра тяжести треугольника. При комнатной температуре доли первичных β_{b_1}

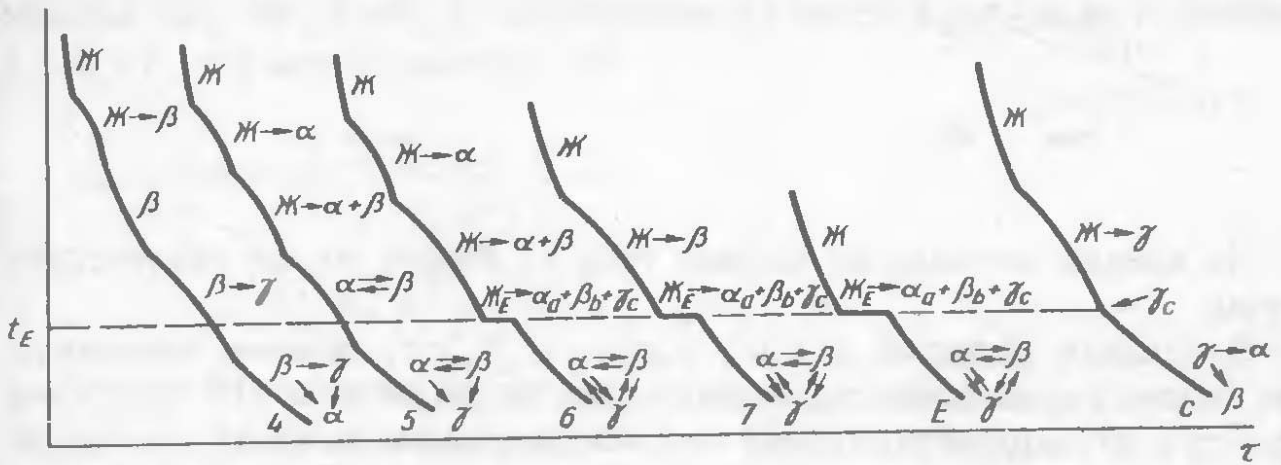


Рис. 82

и вторичных γ_{c_1} - и α_{a_1} -кристаллов определяются соответственно отношениями отрезков $4m/mb_1$, $4n/nc_1$ и $4p/pa_1$. Чтобы найти долю вторичных γ_{u_1} -кристаллов до начала их совместного выделения со вторичными α_{x_1} -кристаллами, воспользуемся правилом рычага, т.е. отношением отрезков $4z_1/z_1u_1$. Отсюда долю вторичных γ_{c_1} -кристаллов, выделившихся из β_{b_1} -кристаллов совместно с α_{a_1} -кристаллами, можно найти по разности отношений отрезков $(4n/nc_1 - 4z_1/z_1u_1)$.

Сходные превращения протекают также в сплавах, расположенных на кривых максимальной совместной растворимости aa_1 , bb_1 и cc_1 , однако выделение вторичных β и γ , α и γ или α и β -кристаллов в этих сплавах происходит не поэтапно, а одновременно. Например, в сплаве x_1 вторичную кристаллизацию можно записать как

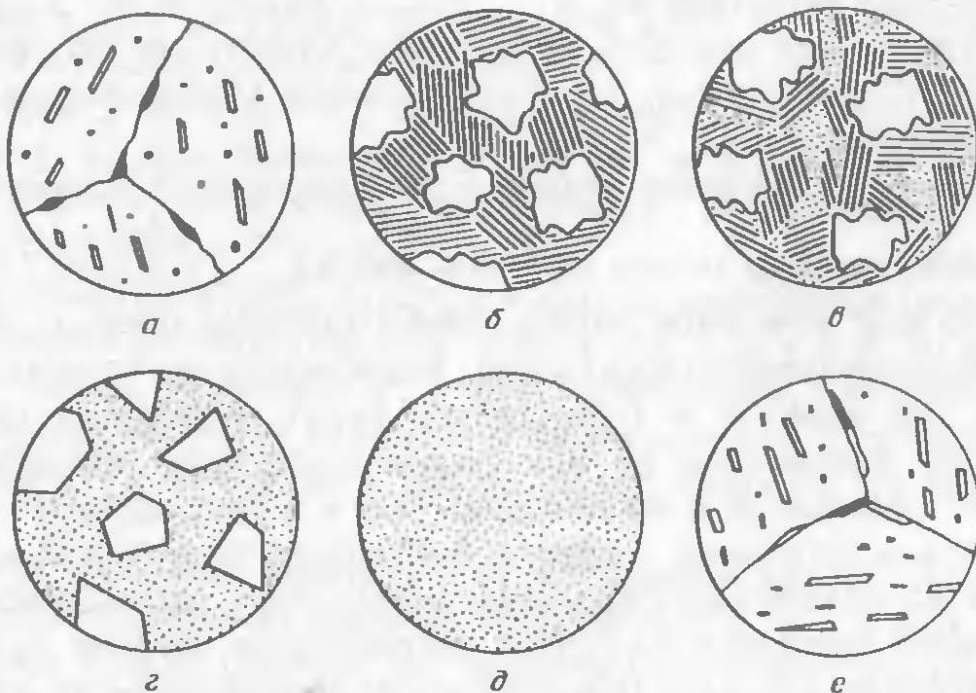
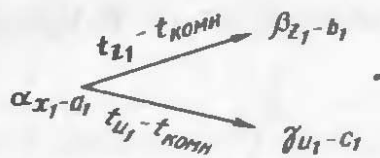


Рис. 83



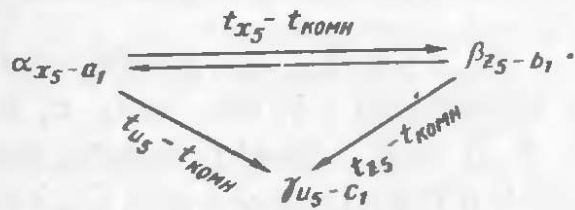
На кривых охлаждения сплавы типа x_1 имеют по три критические точки.

В сплавах областей a_7abb_7 , a_6acc_6 и b_6bcc_6 помимо первичных α , β или γ -кристаллов выделяется одна из эвтектик $\alpha + \beta$, $\alpha + \gamma$ или $\beta + \gamma$, а в твердом состоянии – сначала вторичные кристаллы тех же твердых растворов, из которых состоит эвтектика, а затем – вторичные кристаллы третьего твердого раствора. Иными словами, эти сплавы становятся трехфазными $\alpha + \beta + \gamma$ только в результате вторичной кристаллизации, тройная же эвтектика $J_E \rightarrow \alpha_a + \beta_b + \gamma_c$ в этих сплавах не кристаллизуется. На кривых охлаждения такие сплавы имеют по четыре критические точки. Примером может служить сплав 5 из области a_7abb_7 (см. рис. 81, б).

Первичную кристаллизацию этого сплава можно записать как $J_5 - y_3 \xrightarrow{t_5 - t_{y_3}} \alpha_{x_2 - x_3}$. Начальной стадии кристаллизации эвтектики $\alpha + \beta$ отвечает первый конодный треугольник $x_3y_3z_3$ (фигуративная точка сплава находится на его малой стороне x_3y_3), конечной стадии – последний треугольник $x_4y_4z_4$ (фигуративная точка сплава "переместилась" на его большую сторону x_4z_4). В этот момент, согласно правилу центра тяжести треугольника, в сплаве 5 исчезает жидкость J_{y_4} и кристаллизация эвтектики $J_{y_3} - y_4 \xrightarrow{t_{y_3} - t_{y_4}} \alpha_{x_3 - x_4} + \beta_{z_3 - z_4}$ заканчивается. Исчезающая жидкость не успевает принять состав эвтектической точки E . Следовательно, температура конца кристаллизации сплава 5 выше эвтектической ($t_{y_4} > t_E$).

Дальнейшее охлаждение сплава 5 сопровождается вторичной кристаллизацией, которую можно записать как $\alpha_{x_4 - x_5} \xleftrightarrow{t_{x_4} - t_{x_5}} \beta_{z_4 - z_5}$. Как только все α - и β -кристаллы примут составы точек x_5 и z_5 , они станут насыщенными относительно γ -кристаллов и, начиная с этого момента, из всех α и β -кристаллов будут выделяться вторичные γ -кристаллы. Кроме того, из α - и β -кристаллов будут продолжать выделяться вторичные β - и α -кристаллы. Как и в предыдущем сплаве 4, состав первых вторичных γ -кристаллов определится точкой u_5 , расположенной на кривой максимальной совместной растворимости cc_1 . Фигуративная точка сплава 5 пока находится на стороне x_5z_5 конодного треугольника $x_5z_5u_5$. При понижении температуры до комнатной составы α , β и γ -кристаллов разного происхождения изменятся по

кривым aa_1 , bb_1 и cc_1 в направлении от точек x_5 , z_5 и u_5 к точкам a_1 , b_1 и c_1 , что можно записать как



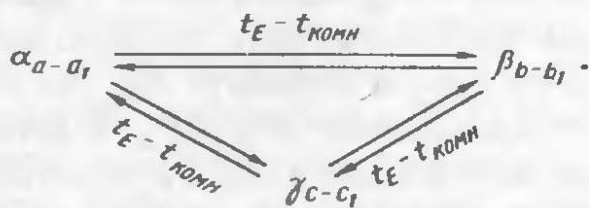
Кривая охлаждения сплава 5 с четырьмя критическими точками показана на рис. 82, а структура – на рис. 83, б. В структуре этого сплава видны главным образом четыре структурные составляющие: первичные α -кристаллы, колонии эвтектики $\alpha + \beta$, вторичные β -внутри первичных α -кристаллов и, наконец, вторичные γ -внутри первичных α -кристаллов и на границах между первичными α - и эвтектическими β -кристаллами. Выделений вторичных β из эвтектических α -кристаллов и наоборот, а также вторичных γ из эвтектических α - и β -кристаллов на фоне эвтектики $\alpha + \beta$ практически не видно (см. также § 9).

Для оценки долей различных структурных составляющих в сплаве 5 воспользуемся правилами рычага и центра тяжести треугольника. Доли первичных α -кристаллов и эвтектики $\alpha + \beta$ можно найти в момент окончания первичной кристаллизации: доля первичных α_{x_3} -кристаллов определится отношением отрезков $5y_3/x_3y_3$, а жидкости $Ж_{y_3}$ (из которой выделяется эвтектика $\alpha + \beta$) – отношением $5x_3/x_3y_3$. В момент окончания кристаллизации эвтектики $\alpha + \beta$ доли всех α_{x_4} -кристаллов (первичных и эвтектических) и эвтектических β_{z_4} -кристаллов определятся отношениями отрезков $5z_4/x_4z_4$ и $5x_4/x_4z_4$. Очевидно, по разности $(5z_4/x_4z_4 - 5y_3/x_3y_3)$ можно найти долю α_{x_4} -кристаллов, выделяющихся только в составе эвтектики $\alpha + \beta$. Наконец, при комнатной температуре доли всех α_{a_1} -кристаллов (первичных, эвтектических и вторичных), β_{b_1} -кристаллов (эвтектических и вторичных) и γ_{c_1} -кристаллов (только вторичных) определятся отношениями отрезков $5p_1/a_1p_1$, $5m_1/b_1m_1$ и $5n_1/n_1c_1$.

Если в областях a_7abb_7 , b_6bcc_6 и a_6acc_7 фигуративные точки сплавов располагаются на эвтектических кривых e_1E , e_2E и e_3E , то в сплавах не будет только первичных α -, β - или γ -кристаллов, а остальные фазовые превращения будут аналогичны превращениям в сплавах типа 5. На кривых охлаждения такие сплавы будут иметь по три критические точки.

Наконец, в сплавах треугольника abc помимо первичных α -, β или γ -кристаллов и одной из двойных эвтектик $\alpha + \beta$, $\alpha + \gamma$ и $\beta + \gamma$ кристаллизуется самая сложная по фазовому составу структурная составляющая – тройная эвтектика $\alpha + \beta + \gamma$, а в твердом состоянии также протекает вторичная кристаллизация.

В частности, в сплаве b (см. рис. 81, в) после выделения первичных α -кристаллов ($J_{b-y_7} \xrightarrow{t_6 - t_{y_7}} \alpha_{x_6 - x_7}$) кристаллизуется эвтектика $\alpha + \beta$. Ее кристаллизация ($J_{y_7 - E} \xrightarrow{t_{y_7} - t_E} \alpha_{x_7 - a} + \beta_{z_7 - b}$) заканчивается при температуре t_E , когда жидкость принимает состав точки E , а α - и β -кристаллы – составы точек a и b . В этот момент фигуративная точка сплава b находится внутри конодного треугольника aEb . Согласно правилу центра тяжести этого треугольника, доля оставшейся жидкости J_E (из которой должна выделиться тройная эвтектика $\alpha + \beta + \gamma$) определится отношением отрезков bd/dE , отношение же bE/dE характеризует долю твердой части сплава (состава точки d), состоящей из уже выпавших первичных α -кристаллов и эвтектики $\alpha + \beta$. По окончании кристаллизации тройной эвтектики $J_E \xrightarrow{t_E} \alpha_a + \beta_b + \gamma_c$ в сплаве b начинается вторичная кристаллизация, т.е. выделение из α , β и γ -кристаллов разного происхождения различных вторичных кристаллов. В интервале температур $t_E - t_{\text{комн}}$ составы всех α , β и γ -кристаллов изменятся по кривым aa_1 , bb_1 и cc_1 в направлении от точек a , b и c к точкам a_1 , b_1 и c_1 , что можно записать как



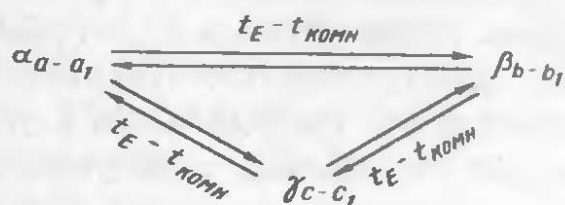
Другими словами, вторичные β -кристаллы выделяются из α -кристаллов (первичных и входящих в двойную и тройную эвтектики) и γ -кристаллов (входящих в тройную эвтектику), вторичные γ -кристаллы – из тех же α -кристаллов и β -кристаллов (входящих в двойную и тройную эвтектики) и, наконец, вторичные α -кристаллы – из β -кристаллов (входящих в двойную и тройную эвтектики) и γ -кристаллов (входящих в тройную эвтектику).

Кривая охлаждения сплава b с тремя критическими точками – двумя перегибами и одной горизонтальной площадкой (при температуре t_E – показана на рис. 82. Под микроскопом в этом сплаве (рис. 83, в) видны главным образом пять структурных составляющих: первичные α -кристаллы, двойная $\alpha + \beta$ и тройная $\alpha + \beta + \gamma$ -эвтектики и выделения вторичных β и γ -кристаллов внутри первичных α -кристаллов. Колонии двойной эвтектики $\alpha + \beta$ располагаются вокруг первичных α -кристаллов, а тройная эвтектика $\alpha + \beta + \gamma$ – между колониями двойной эвтектики $\alpha + \beta$. Обычно двойная эвтектика имеет более грубое, а тройная эвтектика – более дисперсное строение. Вторичные α , β и γ -кристаллы

внутри колоний двойной и тройной эвтектик не видны из-за дисперсного строения этих структурных составляющих и небольших количеств вторичных выделений.

Если в треугольнике abc фигуративная точка сплава располагается на одной из эвтектических кривых e_1E , e_2E или e_3E , то в таком сплаве отсутствуют только первичные кристаллы, остальные же фазовые превращения аналогичны превращениям в сплавах типа b (см. выше). На кривых охлаждения эти сплавы имеют по две критические точки.

Если в треугольнике abc фигуративная точка сплава располагается на одной из линий aE , bE или cE , то в таком сплаве не будет только соответствующей двойной эвтектики. В частности, фазовые превращения в сплаве 7 (см. рис. 81, z) можно записать в три стадии: $J_{7-E} \xrightarrow{t_7 - t_E} \beta_{z_7} - b$ (первичная кристаллизация), $J_E \xrightarrow{t_E} \alpha_a + \beta_b + \gamma_c$ (кристаллизация тройной эвтектики) и



(вторичная кристаллизация). Кривая охлаждения сплава 7 с двумя критическими точками показана на рис. 82. В структуре этого сплава (см. рис. 83, z) видны главным образом четыре структурные составляющие: первичные β -кристаллы, эвтектика $\alpha + \beta + \gamma$ и вторичные α - и γ -внутри первичных β -кристаллов. Как и в предыдущих сплавах, на фоне дисперсной эвтектики $\alpha + \beta + \gamma$ вторичные выделения α -, β - и γ -кристаллов заметить трудно.

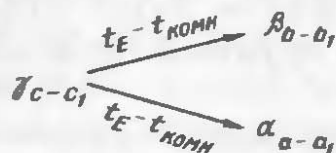
Доли первичных β -кристаллов и эвтектики $\alpha + \beta + \gamma$ в сплаве 7 можно определить при температуре t_E , когда эвтектика еще не начала кристаллизоваться. По правилу рычага, доли β_b -кристаллов и жидкости J_E (или эвтектики $\alpha + \beta + \gamma$) характеризуют отношения отрезков $7E/bE$ и $7b/bE$. В момент окончания кристаллизации эвтектики $\alpha + \beta + \gamma$ доля всех β -кристаллов (первичных и эвтектических) измеряется отношением отрезков $7m_2/m_2b$, долю же только эвтектических β_b -кристаллов можно найти по разности $(7m_2/m_2b - 7E/bE)$, а аналогичных α_a - и γ_c -кристаллов — соответственно по отношениям отрезков $7p_2/p_2a$ и $7n_1/n_2c$.

Сплав, отвечающий по составу точке E (см. рис. 81, z), кристаллизуется при температуре t_E : из жидкости выделяется только одна структурная составляющая — эвтектика $\alpha_a + \beta_b + \gamma_c$. При охлаждении в интервале температур $t_E - t_{\text{комн}}$ в этом сплаве протекают те же процессы

вторичной кристаллизации, что и в предыдущих сплавах 6 и 7 (см. выше). На кривой охлаждения сплав E имеет одну критическую точку – горизонтальную площадку при температуре t_E (рис. 82). В структуре этого сплава обычно видна только эвтектика $\alpha + \beta + \gamma$ (рис. 83, д).

В заключение рассмотрим фазовые превращения в сплавах, отвечающих по составу точкам максимальной совместной растворимости a , b и c . В частности, для сплава c эти превращения можно записать

в две стадии: $J_c - E \xrightarrow{t'_c - t_E} \gamma_{u_0} - c$ (первичная кристаллизация) и



(вторичная кристаллизация). Кристаллизация этого сплава заканчивается при температуре t_E , когда исчезающая жидкость принимает состав точки E (а первичные γ -кристаллы – состав точки c), и при этой же температуре начинается вторичная кристаллизация. На кривой охлаждения сплав c имеет две критические точки (см. рис. 82), а в структуре – три структурные составляющие: первичные γ - и вторичные α - и β -кристаллы (рис. 83, е). Доли этих составляющих легко найти по правилу центра тяжести треугольника – они измеряются отношениями отрезков ss_1/c_1n_3 , cp_3/a_1p_3 и cm_3/b_1m_3 .

3. Изотермические разрезы

Изотермические разрезы рассматриваемой системы (рис. 84) построены в предположении, что компоненты A , B и C плавятся при 800, 750 и 700 °С, эвтектики e_1, e_2 и e_3 – при 400, 600 и 500 °С и эвтектика E – соответственно при 300 °С.

При 400 °С (рис. 84, а) следы от сечения поверхностей ликвидуса α -, β - и γ -растворов изображаются изотермами e_1y , yy_1 и e_1y_1 , а поверхностей солидуса этих растворов – изотермами a_3x , zz_1 и c_2u_1 . Пары этих изотерм ограничивают двухфазные области $J + \alpha$, $J + \beta$ и $J + \gamma$, в сплавах которых зафиксированы равновесия $J \rightleftharpoons \alpha$, $J \rightleftharpoons \beta$ и $J \rightleftharpoons \gamma$. Малые стороны xu и yz , u_1y_1 и y_1z_1 конодных треугольников xuz и $u_1y_1z_1$, ограничивающих трехфазные области $J + \alpha + \beta$ и $J + \beta + \gamma$, представляют собой следы от сечения линейчатых поверхностей начала кристаллизации эвтектик $\alpha + \beta$ и $\beta + \gamma$, а большие стороны – следы от сечения линейчатых поверхностей конца кристаллизации этих эвтектик. Конодный треугольник xuz изображает эвтектическое равновесие жидкости J_y с α_x - и β_z -кристаллами, а треугольник $u_1y_1z_1$ – аналогичное равновесие жидкости J_{y_1} с β_{z_1} - и γ_{u_1} -кристаллами.

Следы от сечения различных поверхностей сольвуса представлены изотермами растворимости x_1 и z_2 , u_1u_2 и z_1z_3 . Эти изотермы ограничивают двухфазные области $\alpha + \beta$ и $\beta + \gamma$, в сплавах которых закончилась кристаллизация соответствующих двойных эвтектик и началась вторичная кристаллизация. Иными словами, названные изотермы растворимости изображают соответственно составы равновесных α - и β -, β - и γ -кристаллов в сплавах областей x_1xz_2 и $u_2u_1z_1z_3$.

Изотермический разрез при 300°C (t_E) можно построить в двух вариантах. Первый из них (рис. 84, б) изображает фазовые равновесия в сплавах перед началом эвтектической реакции $J_E \rightarrow \alpha_a + \beta_b + \gamma_c$. Во всех сплавах треугольника abc присутствует жидкость J_E , которая находится в двух- и трехфазных равновесиях с α_a -, β_b - и γ_c -кристаллами составов точек a , b и c . Изотермы растворимости x_2a и z_4b , z_5b и u_3c , u_4c и x_3a (границы двухфазных областей $\alpha + \beta$, $\beta + \gamma$ и $\alpha + \gamma$) представляют собой следы от сечения поверхностей сольвуса и изображают составы равновесных α -, β - и γ -кристаллов в соответствующих двухфазных сплавах.

Второй вариант этого разреза (относящийся к моменту окончания эвтектической реакции $J_E \rightarrow \alpha_a + \beta_b + \gamma_c$) от рассмотренного первого варианта будет отличаться только тем, что в сплавах треугольника abc исчезнет жидкость J_E и они станут трехфазными $\alpha + \beta + \gamma$. При комнатной температуре трехфазная область $\alpha + \beta + \gamma$ примет размеры треугольника $a_1b_1c_1$ за счет уменьшения размеров однофазных α -, β -, γ - и двухфазных $\alpha + \beta$, $\beta + \gamma$ - и $\alpha + \gamma$ -областей.

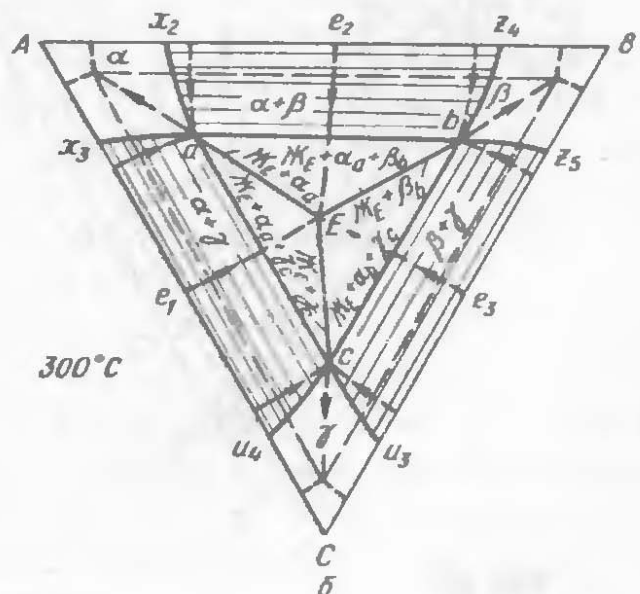
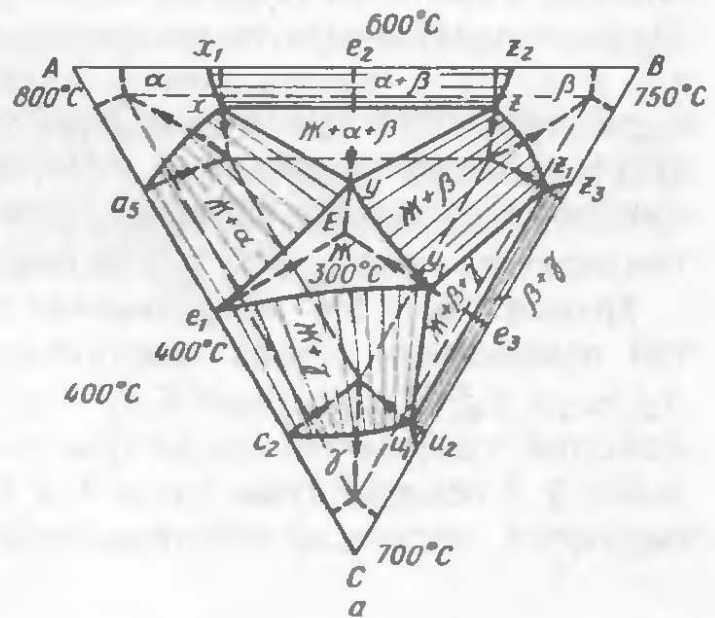


Рис. 84

4. Политермические разрезы

Сложное строение диаграммы состояния (см. рис. 79) и многообразие фазовых превращений в различных сплавах подтверждает политермический разрез Ak , на котором можно отметить восемь характерных сплавов (рис. 85, а). Сплавы участка $A - 5$ находятся в области Ae_1Ee_2 первичной кристаллизации α -раствора, а сплавы участка $5 - k$ - в области Be_2Ee_3 кристаллизации β -раствора, поэтому кривая ликвидуса состоит из двух ветвей $A'5'$ и $5'k'$ (рис. 85, б), каждая из которых - это след от сечения соответствующей поверхности ликвидуса. Кривые ликвидуса $A'5'$ и $5'k'$ пересекаются в точке $5'$, расположенной на эвтектической кривой e_2E при температуре ниже t_{e_2} , но выше t_E .

Солидус разреза Ak состоит из четырех различных участков. Кривая $A'3'$ представляет собой след от сечения поверхности конца кристаллизации α -раствора (область Aa_2aa_3), кривые $3'4'$ и $7'k'$ - следы от сечения линейчатых поверхностей конца кристаллизации эвтектик $\alpha + \beta$ и $\beta + \gamma$ (соответственно области a_2abb_2 и b_5bcc_5) и, наконец, горизонталь $4'7'$ при температуре t_E - след от сечения плоскости кристаллизации эвтектики $\alpha + \beta + \gamma$ (треугольник abc). Точка $3'$ на кривой максимальной растворимости a_2a (см. рис. 85, а) находится при температуре ниже t_{e_2} (или t_{a_2}), но выше t_E .

Кривые $3'5'$ и $5'6'$ представляют собой следы от сечения линейчатой поверхности начала кристаллизации эвтектики $\alpha + \beta$ (области a_2aEe_2 и e_2Ebb_2), а кривая $6'k_1$ - соответственно след от сечения линейчатой поверхности начала кристаллизации эвтектики $\beta + \gamma$ (область b_5bEe_3). В общем случае точки $3'$ и $5'$ располагаются при разных температурах, поскольку политермический разрез Ak не совпадает ни с

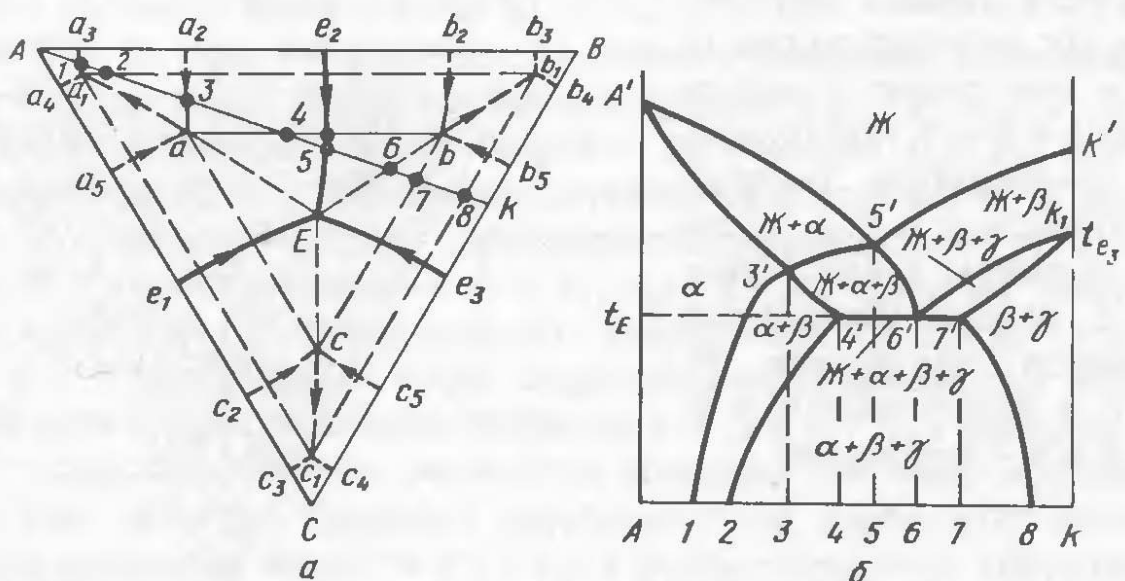


Рис. 85

одной из конод, образующих линейчатую поверхность начала кристаллизации эвтектики $\alpha + \beta$.

При температурах ниже солидуса вертикальная плоскость разреза пересекает три поверхности сольвуса. Кривая $3'1$ является следом от сечения поверхности переменной растворимости компонента B в компоненте A (область $a_2aa_1a_3$), а кривые $4'2$ и $7'8$ — следами от сечения линейчатых поверхностей переменной растворимости компонента C в компонентах A и B (область a_1abb_1) и компонента A в компонентах B и C (область b_1bcc_1). Стоит также отметить, что горизонталь $4'7'$ представляет собой вырожденную четырехфазную область $Ж + \alpha + \beta + \gamma$.

§ 41. Диаграмма состояния системы с инвариантным перитектическим равновесием

1. Диаграмма состояния

Тройная система $A - B - C$ с инвариантным перитектическим равновесием $Ж_p + \alpha_a \rightleftharpoons \beta_b + \gamma_c$ образована двойными системами $A - C$ и $B - C$ эвтектического и системой $A - B$ перитектического типов (рис. 86) и сочетает в себе элементы строения предыдущих тройных систем с граничными растворами (см. §§ 38 - 40).

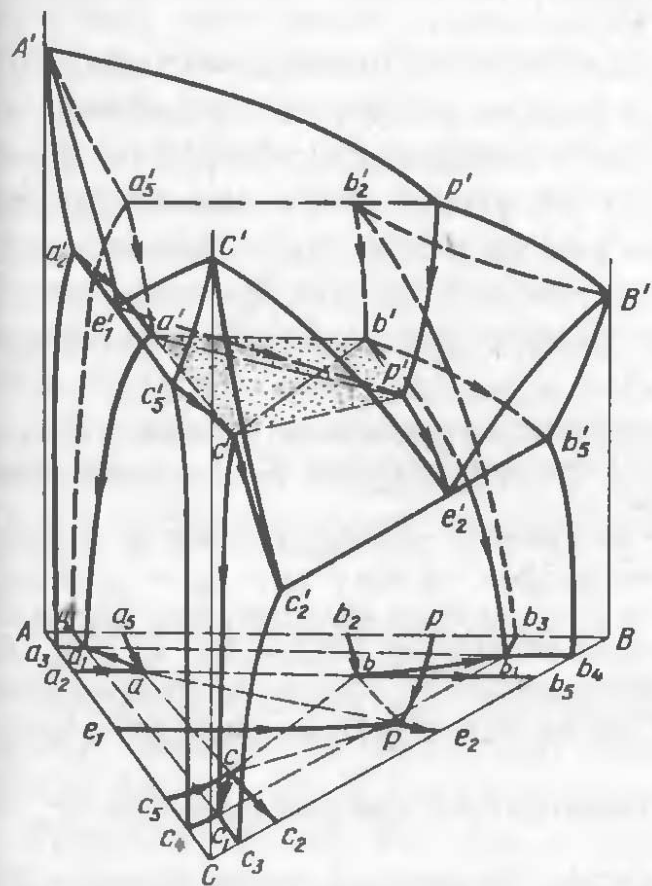


Рис. 86

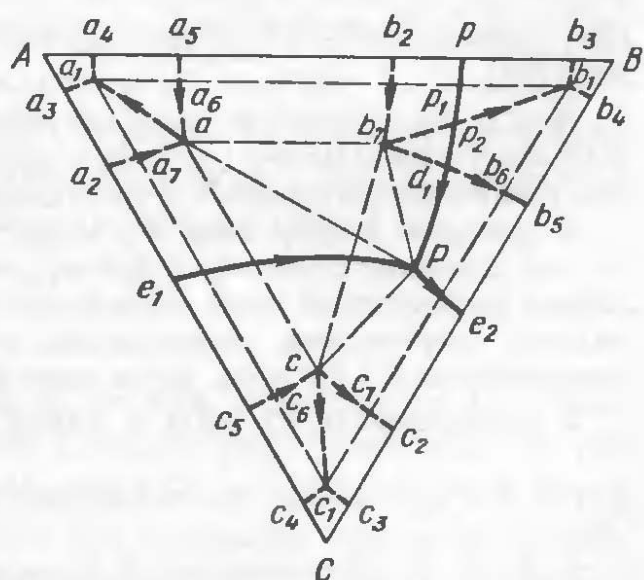


Рис. 87