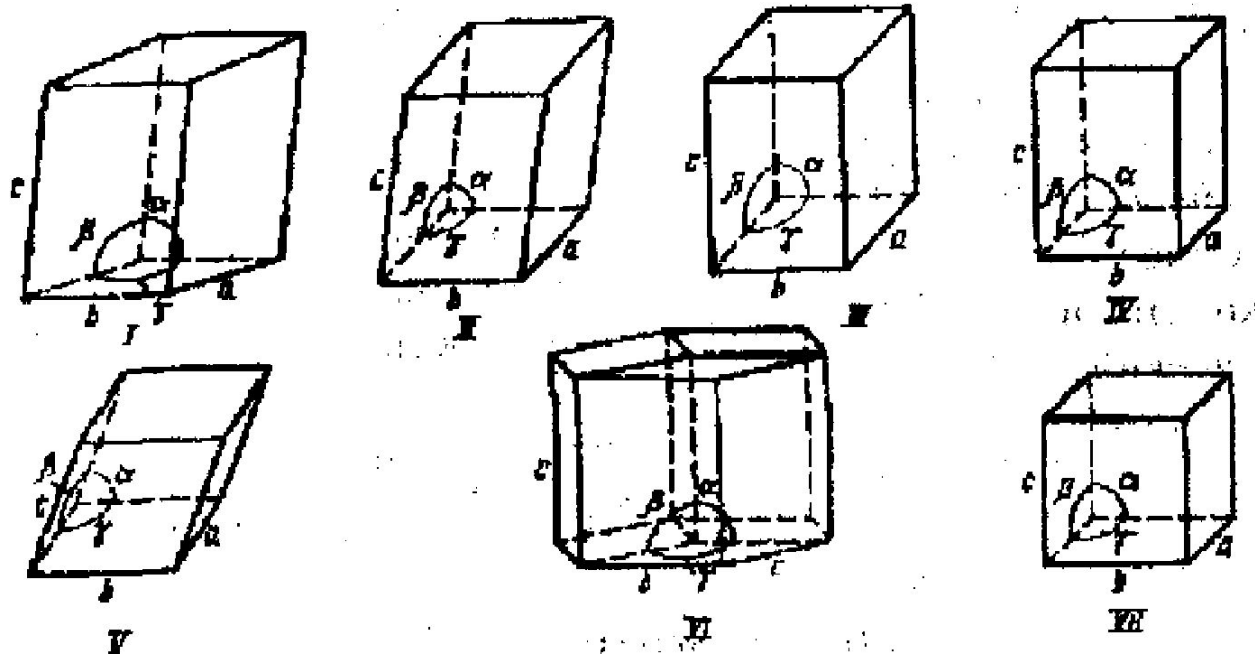


# Материалы электронной техники



I – триклинная ( $a \neq b \neq c$ ;  $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$ ); II – моноклинная ( $a \neq b \neq c$ ;  $\alpha = \beta = 90^\circ$ );  
III – ромбическая ( $a \neq b \neq c$ ;  $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ );  
IV – тетрагональная ( $a = b \neq c$ ;  $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ ); V – тригональная ( $a = b = c$ ;  $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$ );  
VI – гексагональная ( $a = b \neq c$ ;  $\alpha = \beta = 90^\circ$ );  
VII – кубическая ( $a = b = c$ ;  $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ ).

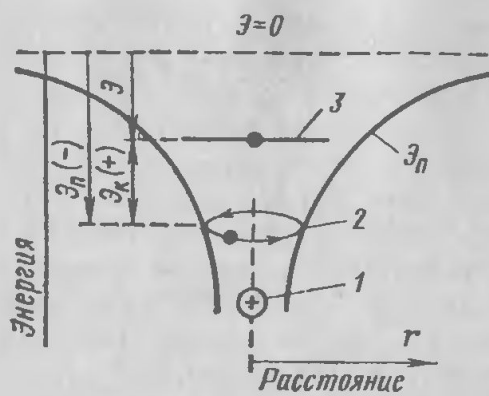


Рис. 1.3. Энергетические соотношения для простейшей модели атома водорода:

1 — ядро; 2 — орбита с электроном (для ваглядности показана с наклоном); 3 — энергетический уровень электрона

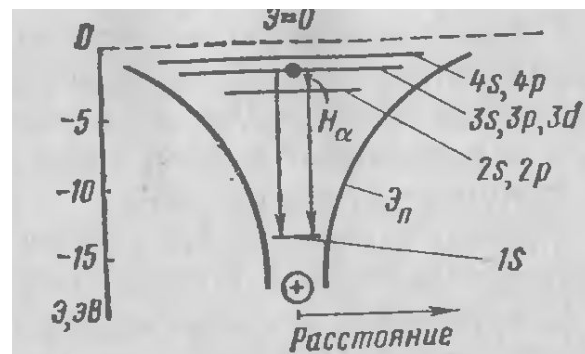


Рис. 1.4. Энергетические уровни атома водорода

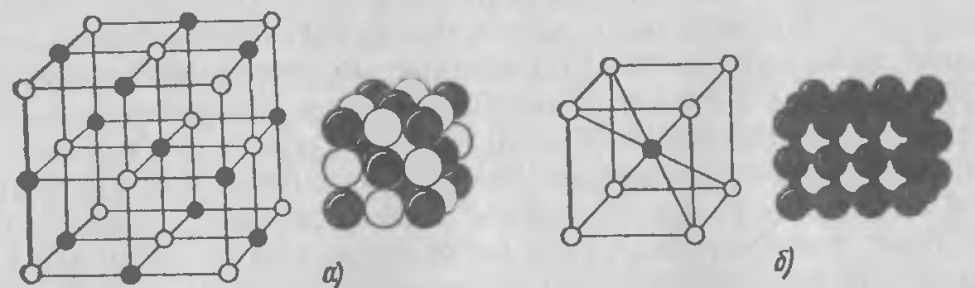


Рис. 1.8. Структура и плотная упаковка ионов хлористого натрия (а) и структура и неплотная упаковка ионов хлористого цезия (б)

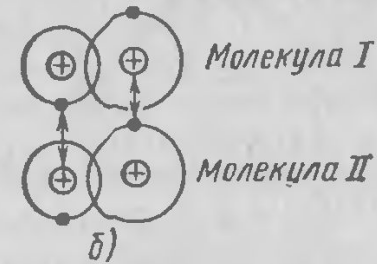
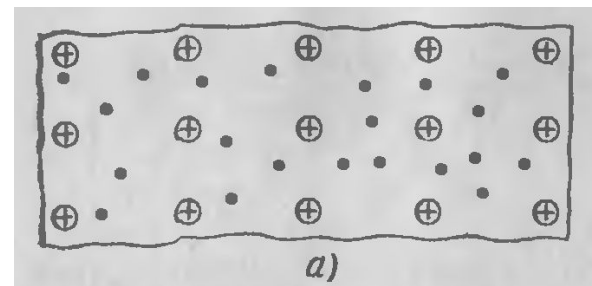
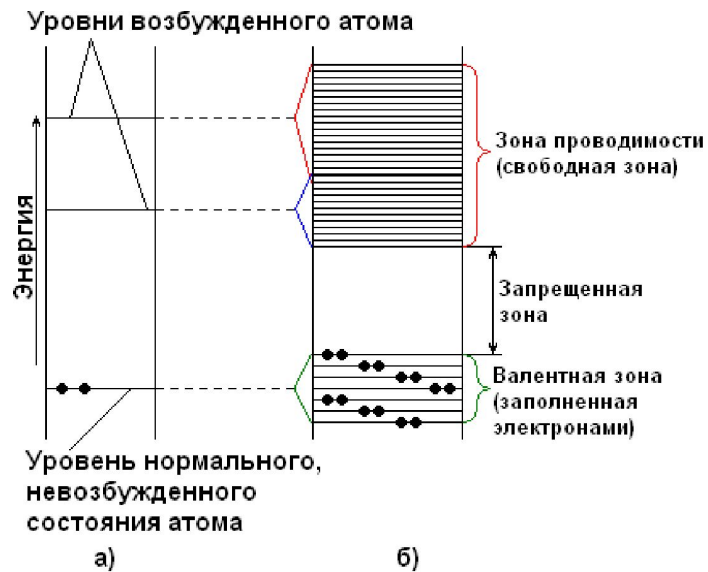
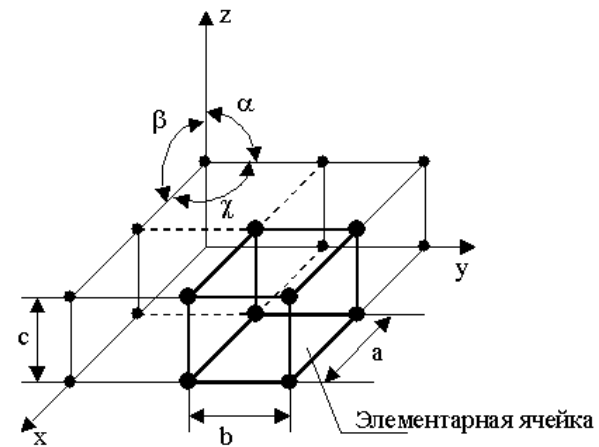


Рис. 1.9. Схема строения металлического проводника (а) и образования межмолекулярной связи Ван-дер-Ваальса (б)



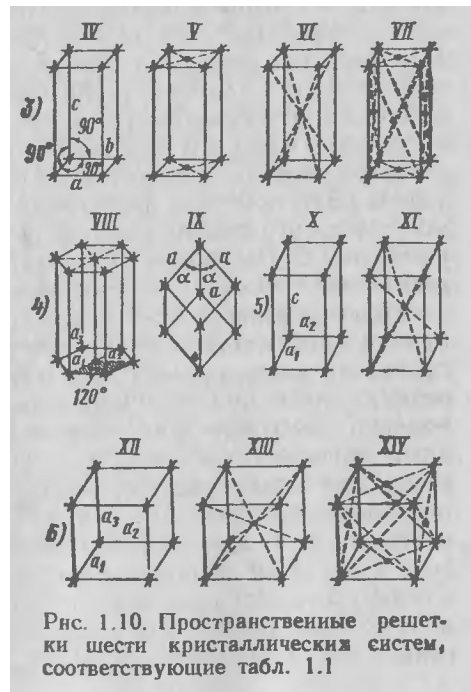
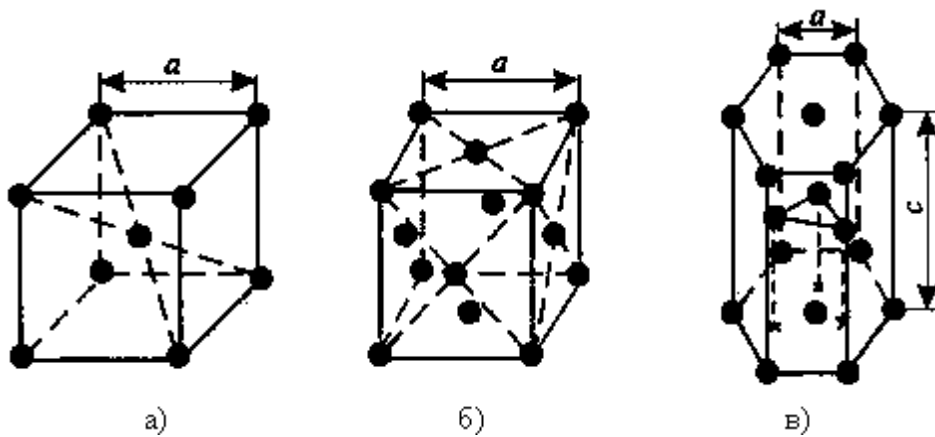


Рис. 1.10. Пространственные решетки шести кристаллических систем, соответствующие табл. 1.1

Таблица 1.1. Пространственные решетки кристаллических систем

| Кристаллическая система          | Пространственная решетка     | Соотношение между осевыми углами и осевыми единицами          |
|----------------------------------|------------------------------|---|
| 1. Триклинная                    | I — простая                  | $a \neq b \neq c; \alpha \neq \beta \neq \gamma = 90^\circ$   |
| 2. Моноклинная                   | II — простая                 | $a \neq b \neq c; a = \gamma = 90^\circ; \beta \neq 90^\circ$ |
| 3. Ромбическая (орторомбическая) | III — базоцентрированная     | $a \neq b \neq c; a = \beta = \gamma = 90^\circ$              |
|                                  | IV — простая                 |   |
|                                  | V — базоцентрированная       |   |
| 4. Гексагональная                | VI — объемноцентрированная   | $a = b \neq c; a = \beta = 90^\circ; \gamma = 120^\circ$      |
|                                  | VII — гранецентрированная    |   |
| 5. Тетрагональная                | VIII — простая               | $a = b \neq c; a = \beta = \gamma = 90^\circ$                 |
|                                  | IX — ромбоэдрическая         |   |
|                                  | XI — объемноцентрированная   |   |
| 6. Кубическая                    | X — простая                  | $a = b = c; a = \beta = \gamma = 90^\circ$                    |
|                                  | XII — простая                |   |
|                                  | XIII — объемноцентрированная |   |
|                                  | XIV — гранецентрированная    |   |

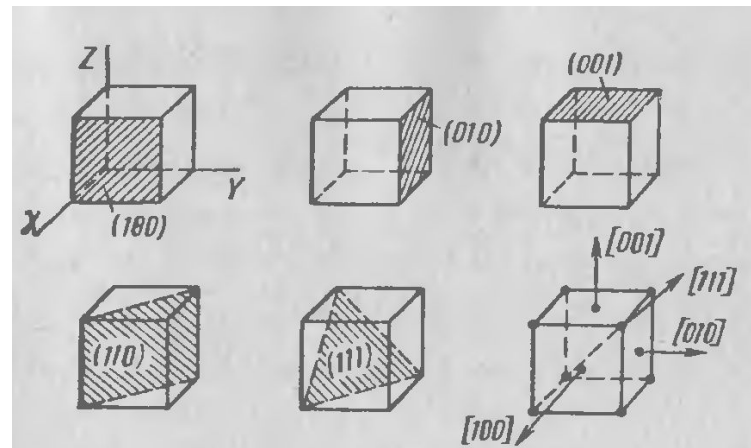
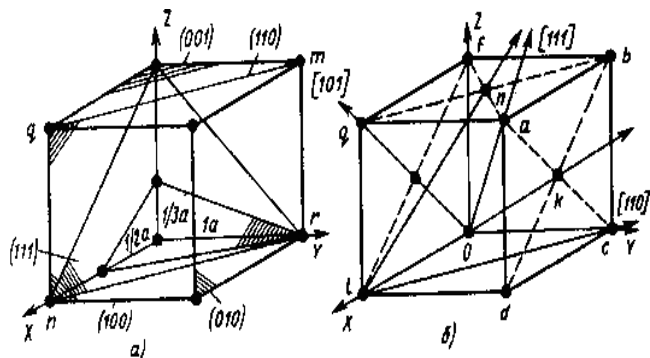
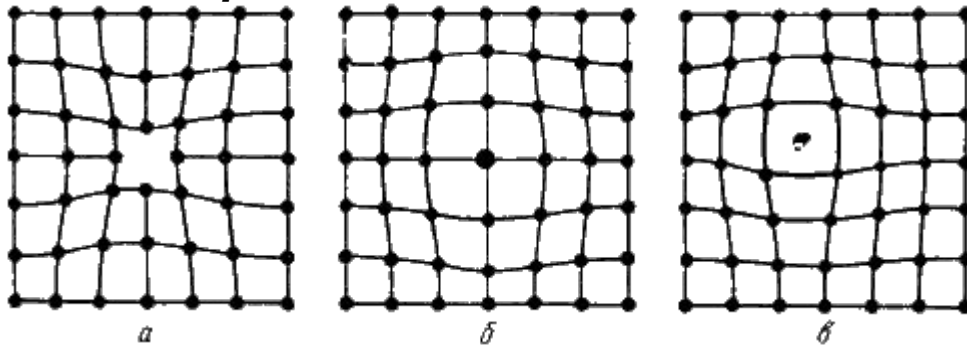


Рис. 1.11. Примеры обозначения кристаллографических плоскостей и направлений в кубических кристаллах с помощью индексов Миллера

## Точечные дефекты



## Простейшие виды дислокаций – краевые и винтовые

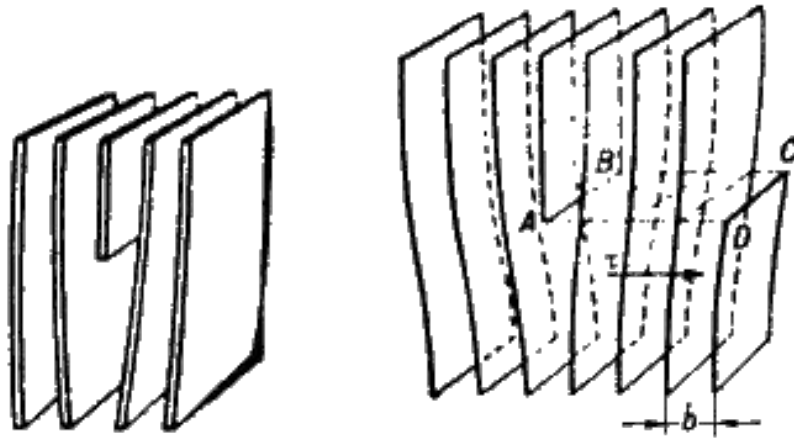


Рис. 2.2. Краевая дислокация (а) и механизм ее образования (б)

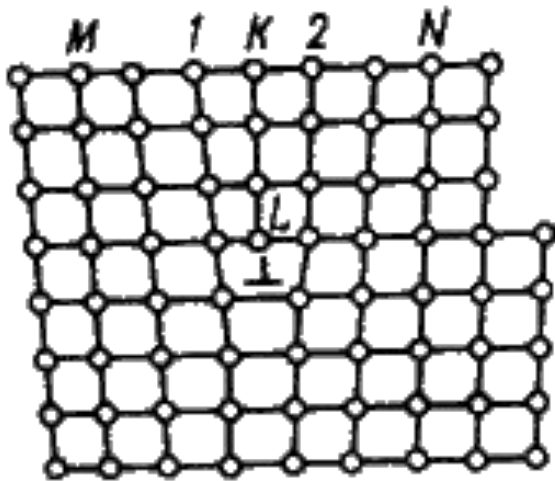


Рис. 2.3. Искажения в кристаллической решетке при наличии краевой дислокации

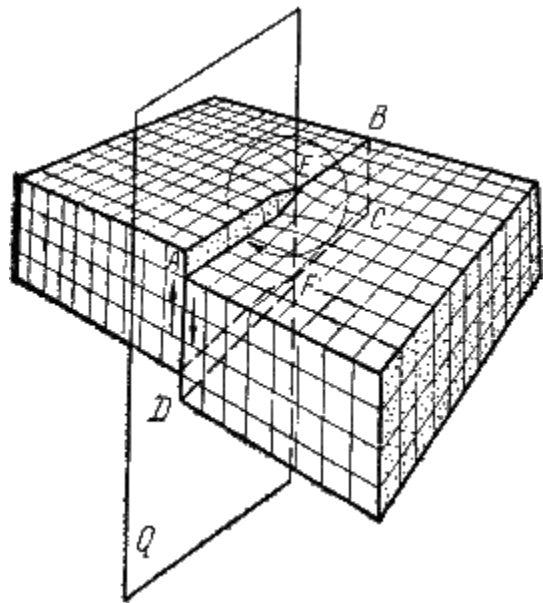


Рис. 2.4. Механизм образования винтовой дислокации

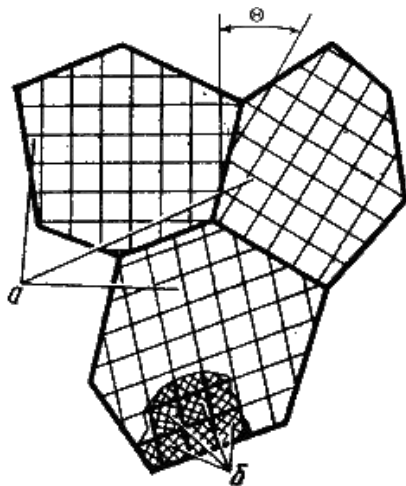
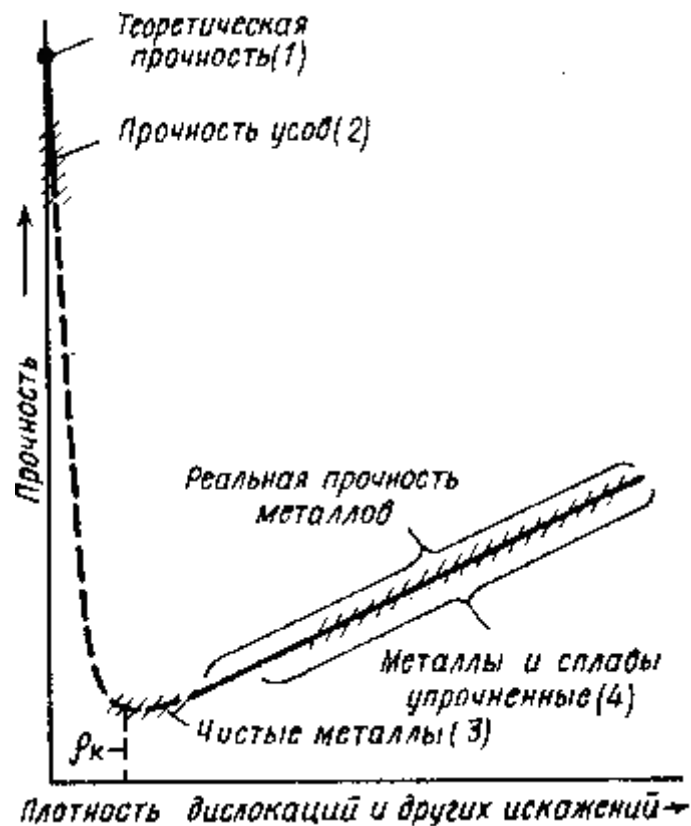


Рис. 2.6. Разориентация зерен и блоков в металле

$$\rho = \frac{\sum l}{V} \quad (\text{см}^{-2}; \text{м}^{-2})$$

Плотность дислокаций в кристалле определяется как среднее число линий дислокаций, пересекающих внутри тела площадку площадью  $1 \text{ м}^2$ , или как суммарная длина линий дислокаций в объеме  $1 \text{ м}^3$



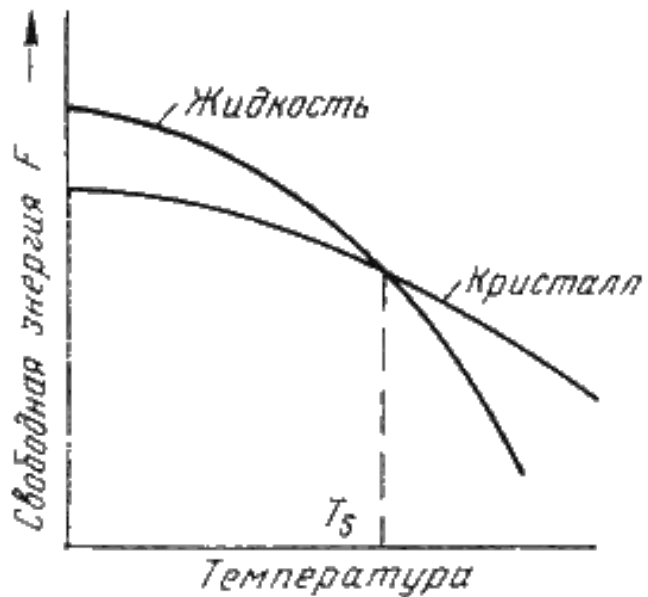


Рис.3.1. Изменение свободной энергии в зависимости от температуры

$$\Delta T = T_{\text{теор}} - T_{\text{эф.}}$$

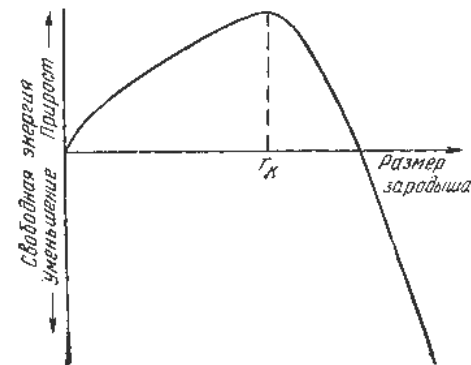


Рис.3.3. Зависимость энергии системы от размера зародыша твердой фазы

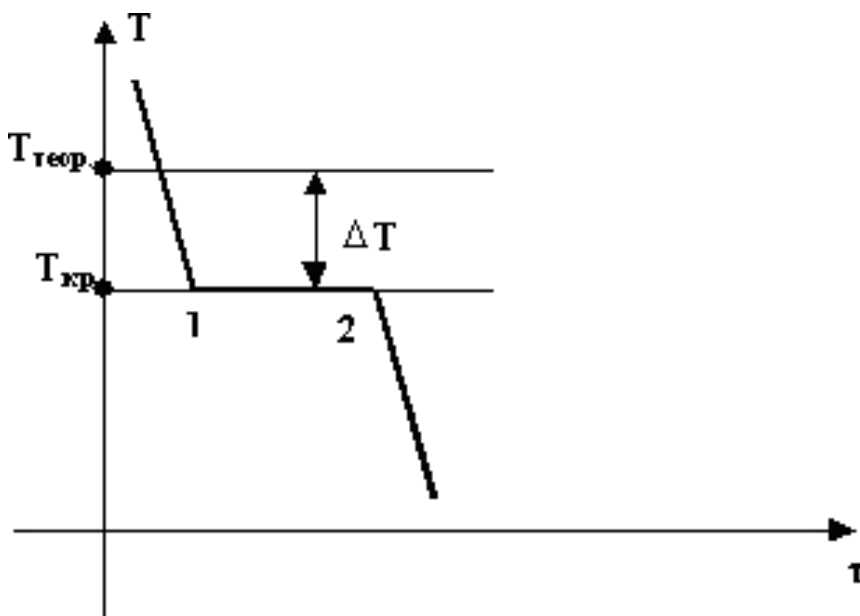


Рис.3.2. Кривая охлаждения чистого металла

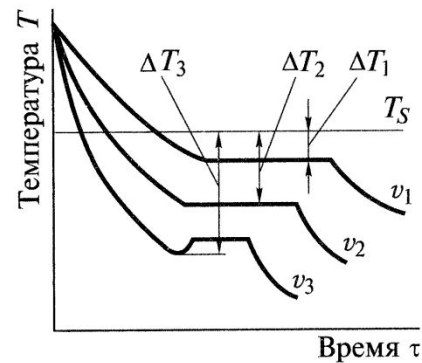


Рис. 2.12. Кривые охлаждения чистого металла:

$\Delta T_1, \Delta T_2, \Delta T_3$  — степени переохлаждения при скоростях охлаждения  $v_1, v_2, v_3$  соответственно ( $v_1 < v_2 < v_3$ )



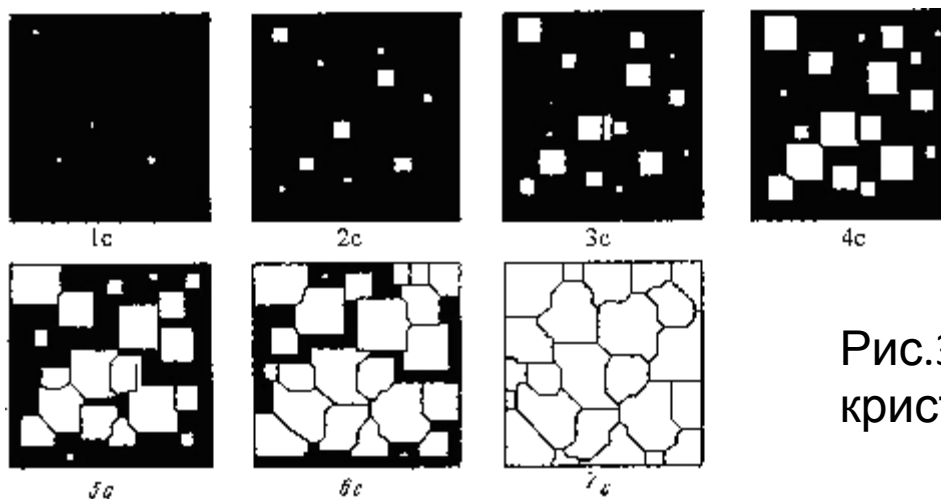


Рис.3.4. Модель процесса кристаллизации

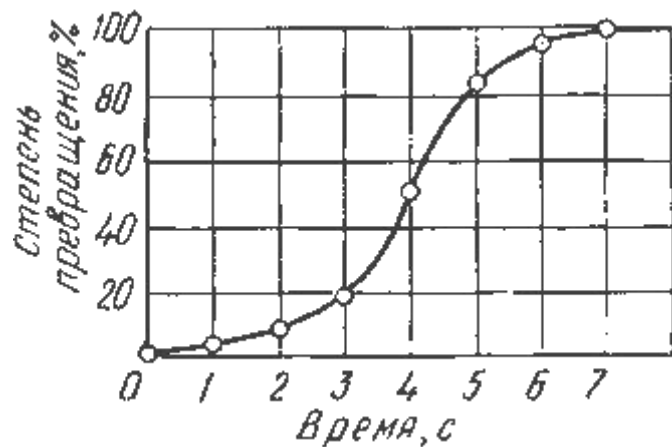


Рис. 3.5. Кинетическая кривая процесса кристаллизации



Рис. 3.6. Зависимость числа центров кристаллизации (а) и скорости роста кристаллов (б) от степени переохлаждения

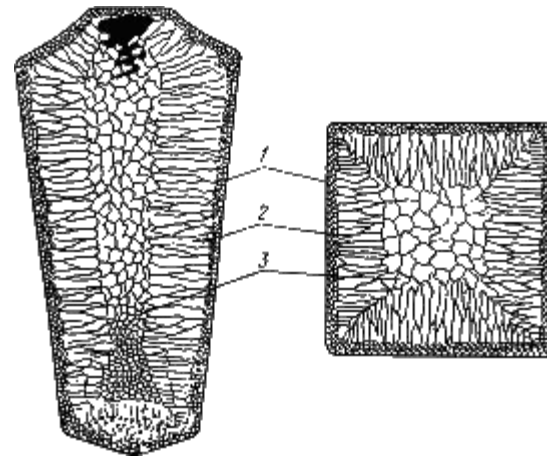


Рис. 3.7. Схема стального слитка Слиток состоит из трех зон: мелкокристаллическая корковая зона; зона столбчатых кристаллов; внутренняя зона крупных равноосных кристаллов.

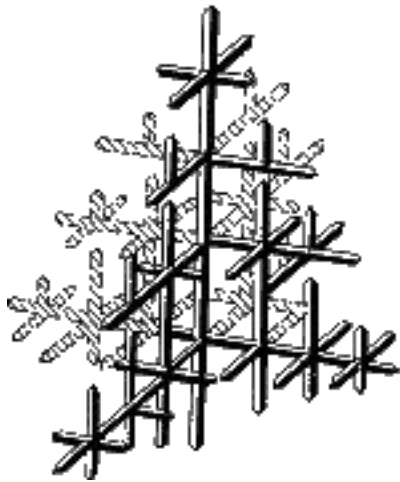


Рис.3.8. Схема дендрита по Чернову Д.К

# Физическая природа электропроводности металлов

$$n = \frac{d}{A} N_0 \quad (1) \quad \text{где } d \text{ – плотность материала; } A \text{ – атомная масса; } N_0 \text{ – число Авогадро, } N_0 = 6,022045 \cdot 10^{23}$$

$$\frac{m \bar{U}^2}{2} = \frac{3}{2} kT \quad (2) \quad \text{где } \bar{U} \text{ – средняя скорость теплового движения; } k \text{ – постоянная Больцмана, } m \text{ – масса свободного электрона.}$$

$$j = env, \quad (3) \quad \text{где } v \text{ – средняя скорость направленного движения носителей заряда (скорость дрейфа), } e \text{ – заряд электрона.}$$

$$\bar{U} \gg v \quad \alpha = eE/m, \quad (4) \quad v_{\max} = \alpha \tau_0, \quad (5) \quad \bar{U} \gg v \quad \tau_0 = l / \bar{U}$$

$$j = e^2 n l E / m \bar{U}, \quad (7) \quad j = \sigma E, \quad (8) \quad \sigma = \left( \frac{e}{m} \tau \right) (N_e e) = \mu_e (N_e e), \quad (9)$$

$$l = \tau (v_{th} + v_D). \quad (10) \quad v_{th} \gg v_D.$$

$$v_{th} = \left( \frac{3kT}{m} \right)^{1/2} \simeq 10^5 \text{ м/с.}$$

| Проводниковый материал       | $\rho$               | , (ом·см) | $\sigma = \frac{1}{\rho}$ |
|------------------------------|----------------------|-----------|---------------------------|
| Серебро (химически чистое)   | $1,47 \cdot 10^{-6}$ |           | $6,8 \cdot 10^5$          |
| Медь (химически чистая)      | $1,55 \cdot 10^{-6}$ |           | $6,45 \cdot 10^5$         |
| Медь (техническая)           | $1,7 \cdot 10^{-6}$  |           | $5,9 \cdot 10^5$          |
| Вольфрам                     | $5,3 \cdot 10^{-6}$  |           | $1,9 \cdot 10^5$          |
| Платина                      | $9,8 \cdot 10^{-6}$  |           | $1,0 \cdot 10^5$          |
| Железо (химически чистое)    | $9,60 \cdot 10^{-6}$ |           | $1,04 \cdot 10^5$         |
| Железо (техническое)         | $12 \cdot 10^{-6}$   |           | $8,3 \cdot 10^4$          |
| Свинец                       | $20 \cdot 10^{-6}$   |           | $5,0 \cdot 10^4$          |
| Никелин (сплав Cu, Ni и Mn)  | $40 \cdot 10^{-6}$   |           | $2,5 \cdot 10^4$          |
| Манганин (сплав Cu, Ni и Mn) | $43 \cdot 10^{-6}$   |           | $2,3 \cdot 10^4$          |
| Константан (сплав Cu и Mn)   | $50 \cdot 10^{-6}$   |           | $2,0 \cdot 10^4$          |
| Ртуть                        | $94,1 \cdot 10^{-6}$ |           | $1,06 \cdot 10^4$         |
| Нихром (сплав Ni и Cu)       | $110 \cdot 10^{-6}$  |           | $9,1 \cdot 10^3$          |
| Алюминий Al                  | $2,8 \cdot 10^{-6}$  |           |                           |

$$\lambda_T = (1/2)kn \bar{U} \bar{l} \quad (9)$$

$$\lambda_T / 3k^2 e^{-2} T = L_0 T \quad L_0 = \lambda_T / (\sigma T) = (\pi^2/3)(k/e)^2 = 2,45 \cdot 10^{-8} \text{ B}^2 \text{K}^{-2}$$

$$C_V = C_{\text{перш}} + C_e = 3R + (3/2)kN_0 = (9/2)R \quad F(\mathcal{E}) = A \exp \left[ -\frac{\mathcal{E}}{kT} \right] \quad (10)$$

$$F(\mathcal{E}) = [1 + \exp(\mathcal{E} - \mathcal{E}_F) / kT]^{-1} \quad (11) \quad \varphi_F = \mathcal{E}_F / e \quad \text{Электрохимический потенциал}$$

Место для формулы.

$$\lambda = h / (m_0 u) \quad \rho \text{ - тепловой фактор}$$

$$\bar{l}_T = k_{\text{упр}} / 2\pi NkT, \quad (12) \quad \alpha_\rho = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dT} \quad (13)$$

$$\rho = \rho_0 [1 + \alpha_\rho (T - T_0)] \quad (14)$$

$$\rho = \rho_T + \rho_{\text{ост}} \quad (15)$$

$$\beta = \rho_{300} / \rho_{4,2} \quad (16)$$

$$\rho = \rho_0 (1 \pm \varphi \sigma)$$

$$\text{где } \varphi = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial \sigma}$$

$$C = K - \Phi + 2$$

$$C = K - \Phi + 1$$

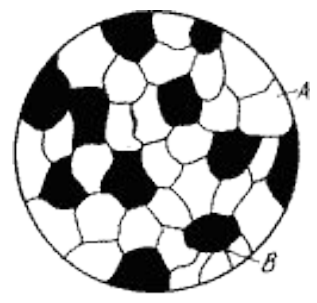


Рис. 4.1. Схема микроструктуры механической смеси

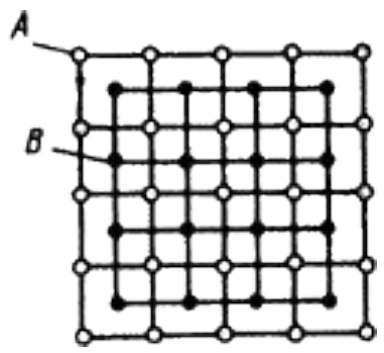


Рис. 4.2. Кристаллическая решетка химического соединения

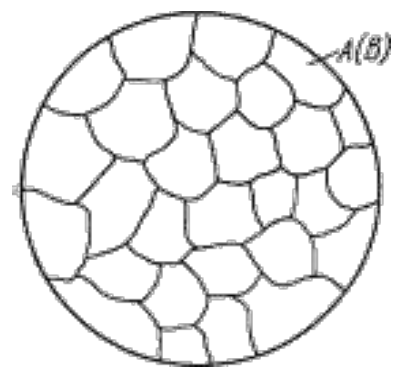


Рис.4.3. Схема микроструктуры твердого раствора

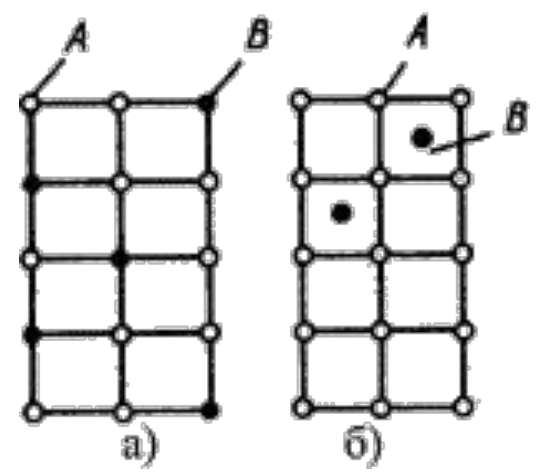


Рис.4.4. Кристаллическая решетка твердых растворов замещения (а), внедрения (б)

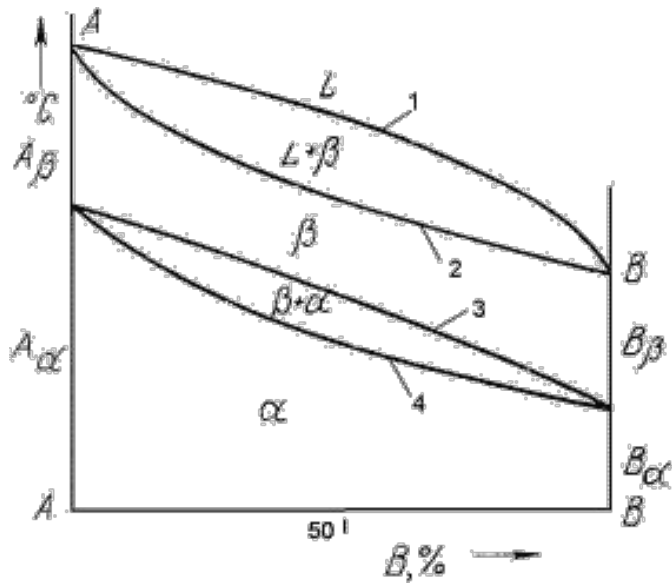


Рис. 4.5. Диаграмма состояния

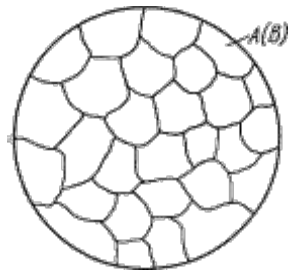


Рис. 5.2. Схема микроструктуры сплава – однородного твердого раствора

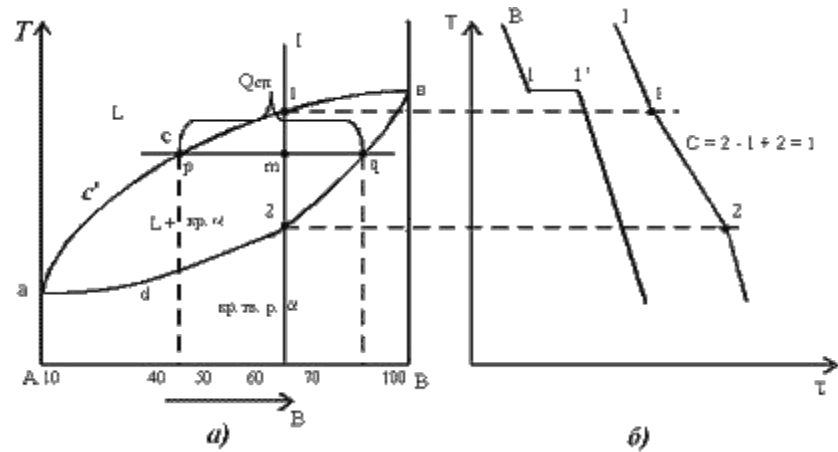


Рис.5.1 Диаграмма состояния сплавов с неограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии (а); кривые охлаждения типичных сплавов (б)

$$Q_{жв} = \frac{pm}{pq} \cdot 100\% \quad Q_{ж} = \frac{mq}{pq} \cdot 100\%$$

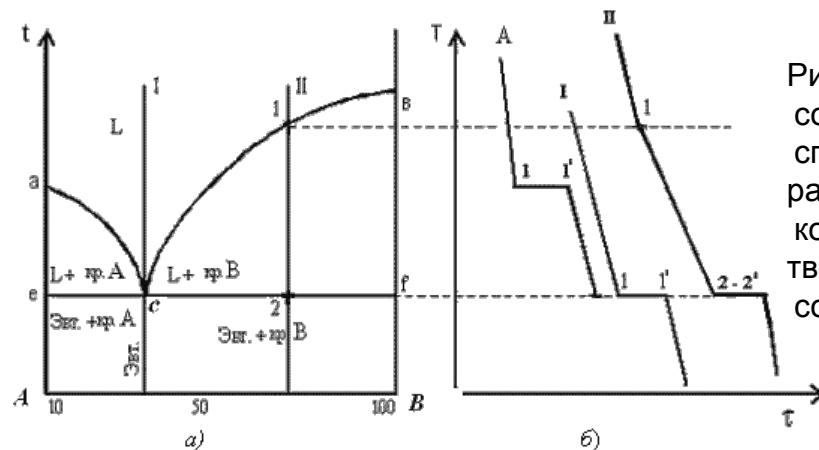


Рис. 5.3. Диаграмма состояния сплавов с отсутствием растворимости компонентов в твердом состоянии (а) и кривые

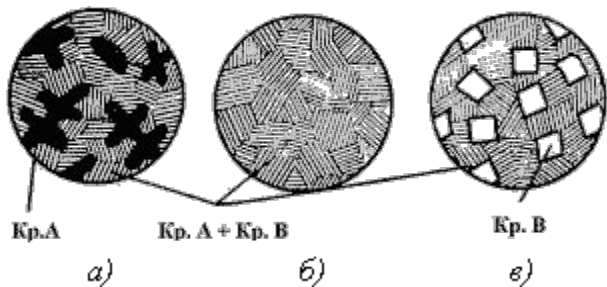


Рис. 5.4. Схема микроструктур сплавов: а – доэвтектического, б – эвтектического, в – заэвтектического

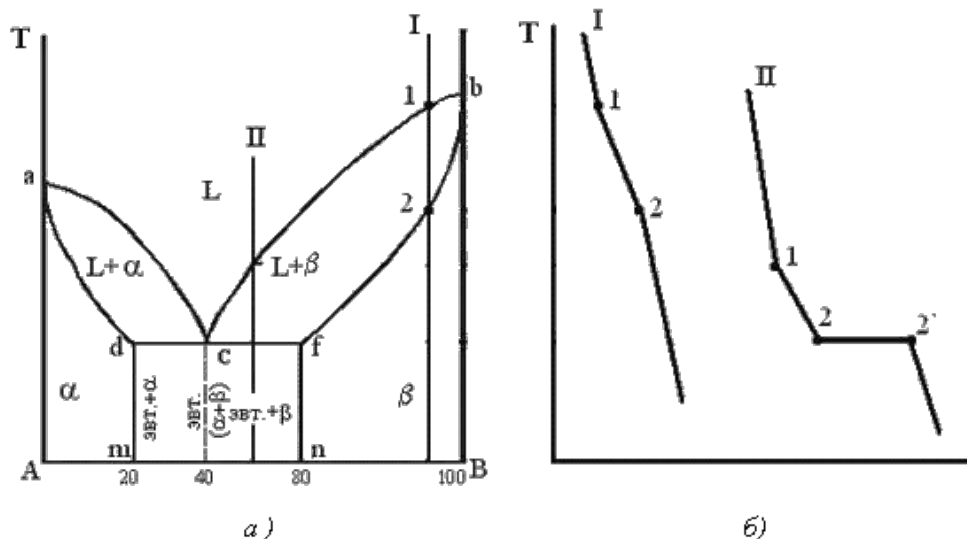


Рис. 5.5 Диаграмма состояния сплавов с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии (а) и кривые охлаждения типичных сплавов (б)

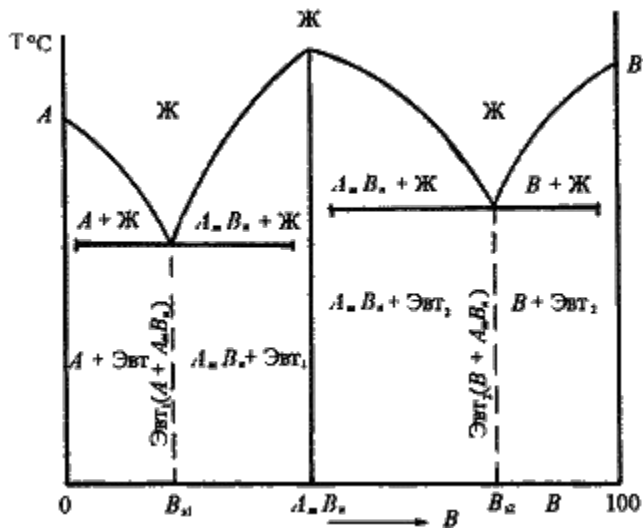


Рис. 5.6. Диаграмма состояния сплавов, компоненты которых образуют химические соединения

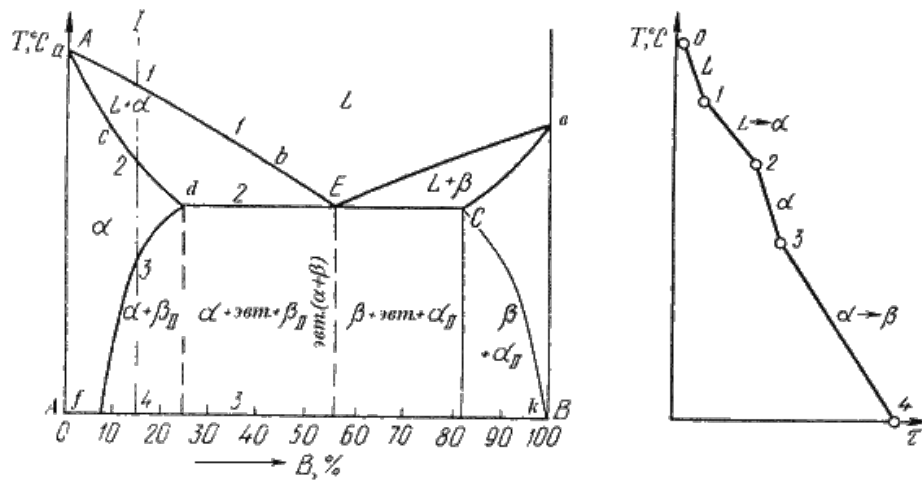


Рис. 5.7. Диаграмма состояния сплавов, испытывающих фазовые превращения в твердом состоянии (а) и кривая охлаждения сплава (б)



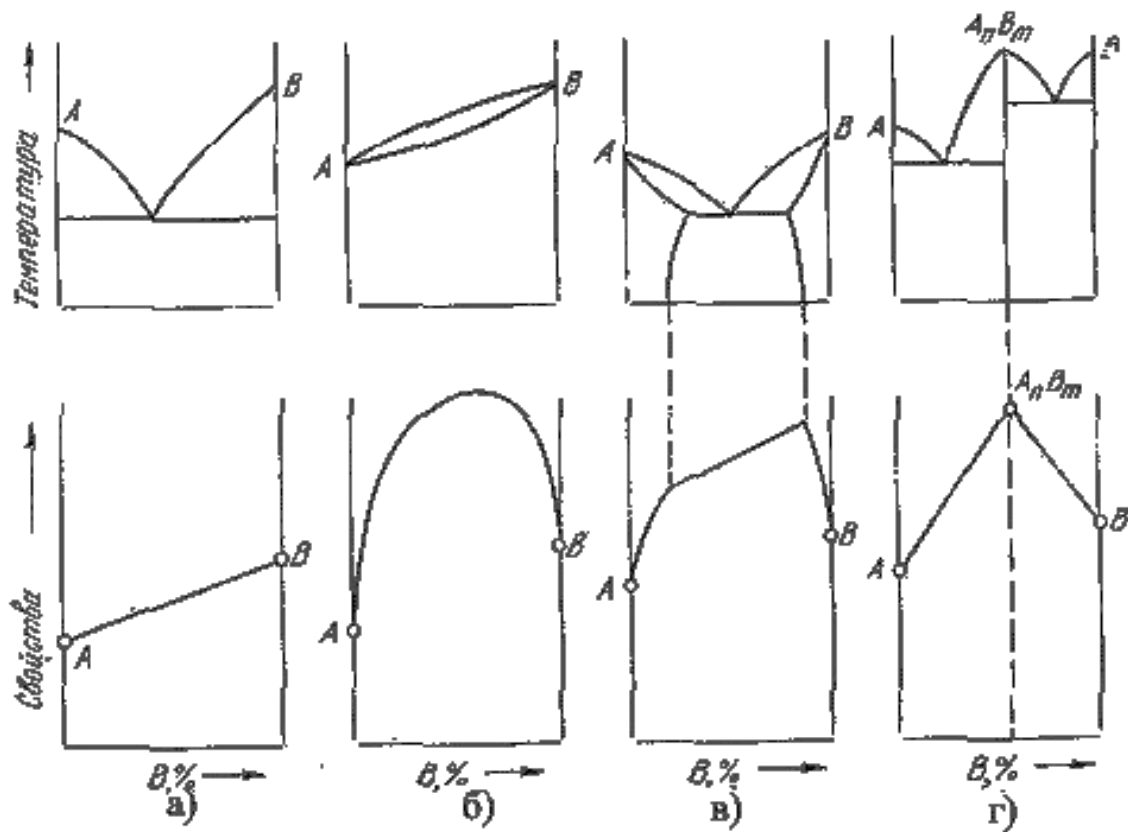


Рис. 5.8. Связь между свойствами сплавов и типом диаграммы состояния

## Электрические свойства металлических сплавов

$$\rho_{СПЛ} = \rho_T + \rho_{ОСТ}, \quad (3.1)$$

$$\rho_{ОСТ} = C \cdot X_A \cdot X_B = C \cdot X_B \cdot (1 - X_B), \quad (3.2)$$

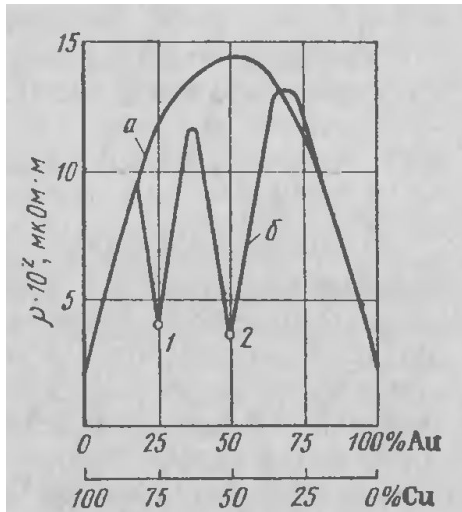


Рис. 2.8. Зависимость удельного сопротивления от состава сплавов Au — Cu:

*a* — для неупорядоченных сплавов (после закалки); *b* — для упорядоченных сплавов (после отжига); 1 — соответствует сплаву Cu<sub>3</sub>Au; 2 — CuAu

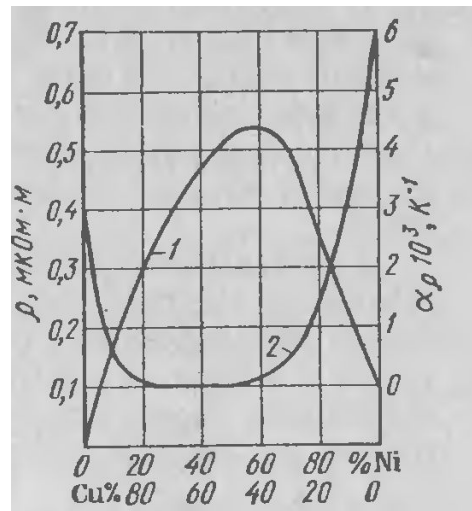


Рис. 2.9. Зависимость удельного сопротивления (1) и температурного коэффициента удельного сопротивления (2) медно-никелевых сплавов от процентного содержания компонентов

$$TK\rho_{\text{спл}} = \frac{1}{\rho_{\text{спл}}} \frac{d\rho_{\text{спл}}}{dT} = \frac{1}{\rho_{\text{спл}} + \rho_T} \frac{d\rho_T}{dT} \quad (3.3)$$

$$TK\rho_{\text{спл}} = \frac{1}{1 + \rho_{\text{ост}}/\rho_T} \frac{1}{\rho_T} \frac{d\rho_T}{dT} \approx \frac{TK\rho_{\text{мет}}}{1 + \rho_{\text{ост}}/\rho_T} \quad (3.4)$$

$$\rho_{\text{ост}} = C \cdot X_B$$

$$\gamma = \frac{1}{\rho} = \gamma_0 \left[ 1 + \frac{\Theta_V}{(1 - \Theta_V)/3 + \gamma_0/(\gamma_1 - \gamma_0)} \right]$$

$$\Phi = L \cdot i, \quad e_L = -L \frac{di}{dt}, \quad i = I_m \sin \omega t; \quad e_L = -\omega L I_m \cos \omega t.$$

$$J_x(z) = J_0 \exp(-z/\Delta), \quad J = \mathbf{y} \cdot \mathbf{E}, \quad \Delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \mu_0}} = \sqrt{\frac{1}{\pi f \gamma \mu \mu_0}},$$

$$J = \Pi \int_0^{\infty} J_0 \exp(-z/\Delta) dz = J_0 \Pi \Delta,$$

$$S_{\Theta} = \Pi \Delta = \Pi d \Delta.$$

$$k_R = \frac{R_1}{R_0} = \frac{S_0}{S_{\Theta}} = \frac{\pi d^2 / 4}{\pi d \Delta} = \frac{d}{4}.$$

$$R_s = \rho / \Delta,$$

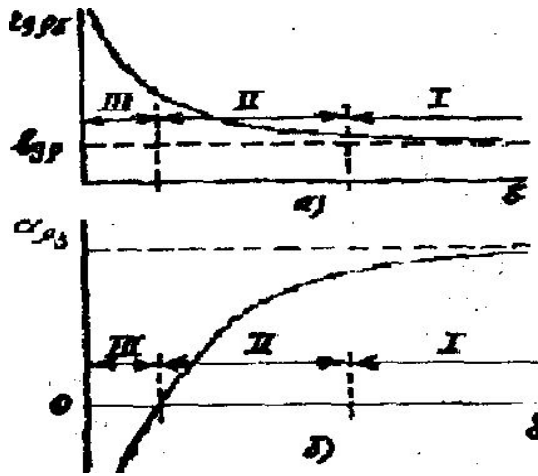


Рисунок 8 – Зависимости удельного сопротивления (а) и температурного коэффициента удельного сопротивления (б) тонкой металлической пленки от её толщины

$$1/l_\delta = 1/l + 1/l_s,$$

$$\rho = \frac{m_n U_F}{e^2 n l} = \rho_T + \frac{m_n U_F S_{II} \cdot N_{II}}{e^2 n}$$

$$\rho_\delta = \frac{m_n U_F}{e^2 n l_\delta} = \rho \left( 1 + \frac{l}{\delta} \right), \quad (3.5) \quad \rho_\delta = \rho \left[ 1 + \frac{3}{8} (1 - F_0) \frac{l}{\delta} \right] \quad \text{для } \delta/l_\delta > 1$$

$$\rho_\delta = \rho \left[ \frac{4}{3} \frac{l}{8} \frac{1 - F_0}{1 + F_0} \left( \ln \frac{l}{8} \right)^{-1} \right] \quad \text{для } \delta/l_\delta \ll 1$$

$$R_\square = \rho_\delta / \delta$$

$$R = R_\square \cdot l_0 / d_0$$

$$\lambda / \gamma = L_0 / T,$$

$$L_0 = \frac{\pi \cdot k}{(3 \cdot e^2)}.$$

$$TKl = \frac{1}{l} \frac{dl}{dT},$$

$$TKR = TK\rho - TKl. \quad (3.6)$$

$$U = \alpha_T (T_2 - T_1),$$

$$\alpha_T \approx \pi^2 \cdot \frac{k}{e} \cdot \frac{kT}{\mathcal{E}_f},$$

