

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені Ігоря СІКОРСЬКОГО»

Л. Д. Тарасова

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО ТА КОНСТРУКЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ

ПРАКТИКУМ

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра
за освітніми програмами «Медична інженерія», «Регенеративна та
біофармацевтична інженерія» спеціальності 163 «Біомедична інженерія»*

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2022

Рецензенти: *Отиченко О. М., канд. техн. наук, науковий співробітник відділу функціональних матеріалів медичного призначення Інституту проблем матеріалознавства імені І. М. Францевича НАН України*

Беспалова О. Я., канд. біол. наук, доцент кафедри трансляційної медичної біоінженерії КПІ ім. Ігоря Сікорського

Відповідальний редактор *Соломін А. В. канд. фіз.-мат. наук, доцент, доцент кафедри біомедичної інженерії КПІ ім. Ігоря Сікорського*

Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 6 від 24.06.2022 р.) за поданням Вченої ради Факультету біомедичної інженерії (протокол № 10 від 31.05.2022 р.)

Електронне мережне навчальне видання

Тарасова Лариса Дмитрівна

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО ТА КОНСТРУКЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ

ПРАКТИКУМ

Матеріалознавство та конструкційні матеріали: Практикум [Електронний ресурс]: навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освітніми програмами «Медична інженерія», «Регенеративна та біофармацевтична інженерія» спеціальності 163 «Біомедична інженерія» / Л. Д. Тарасова; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 2560 Кбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 143 с.

Практикум містять необхідний теоретичний матеріал, приклади розв'язування завдань, завдання для самостійного опрацювання, контрольні питання. Представлений матеріал може використовуватися здобувачами вищої освіти для самостійної роботи при дистанційному вивченні курсу «Матеріалознавство та конструкційні матеріали», при виконанні практичних завдань, а також при підготовці до екзамену або заліку.

© Л.Д. Тарасова, 2022

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022

ЗМІСТ

ЗМІСТ	3
ПЕРЕДМОВА	4
1. Практичне заняття № 1. Кристалічна будова металів і сплавів	5
2. Практичне заняття № 2. Індекссування вузлів, напрямків і площин у кристалічних ґратках	18
3. Практичне заняття № 3. Ретикулярна, лінійна і площинна щільність кристалічних структур	29
4. Практичне заняття № 4. Енергія утворення та рівноважна концентрація точкових дефектів	37
5. Практичне заняття № 5. Механічні властивості матеріалів	44
6. Практичне заняття № 6. Пластична деформація і механізми зміцнення	57
7. Практичне заняття № 7. Кількісний склад металевих сплавів	64
8. Практичне заняття № 8. Діаграма стану системи, компоненти якої утворюють неперервний ряд рідких і твердих розчинів	70
9. Практичне заняття № 9. Діаграма стану системи з відсутністю взаємної розчинності компонентів у твердому стані	76
10. Практичне заняття № 10. Діаграми стану системи з обмеженою розчинністю компонентів у твердому стані	83
11. Практичне заняття № 11. Діаграма стану системи з хімічними сполуками та проміжними фазами	92
12. Практичне заняття № 12. Діаграма стану системи залізо – цементит	99
13. Практичне заняття № 13. Дифузійні процеси при хіміко-термічній обробці сталі	108
14. Практичне заняття № 14. Кінетика фазових перетворень	117
15. Практичне заняття № 15. Графічні методи оцінки довговічності полімерів	123
16. Практичне заняття № 16. Композиційні матеріали	132
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	143

ПЕРЕДМОВА

Навчальна дисципліна «Матеріалознавство та конструкційні матеріали» відноситься до нормативних освітніх компонентів циклу професійної підготовки, базується на знаннях окремих розділів математики, загальної фізики та неорганічної хімії і складає необхідний фундамент для подальшого опанування дисциплін за спеціальністю 163 Біомедична інженерія. Під час вивчення дисципліни студенти набувають вмінь і досвіду практичного застосування знань з матеріалознавства для обґрунтованого вибору конструкційних матеріалів, з наперед заданими властивостями.

Практикум з курсу «Матеріалознавство та конструкційні матеріали» спрямований на формування фахових компетентностей у відповідності до освітньо-професійних програм «Медична інженерія», «Регенеративна та біофармацевтична інженерія». Тематика практичних робіт відповідає тематиці розділів курсу лекцій і зосереджена на виконанні практичних завдань. Кожне практичне заняття присвячено певному класу матеріалів, а саме: металам, сплавам, полімерним матеріалам, композитам. На початку кожного практичного заняття даються стислі теоретичні відомості та основні формули. Далі наводяться приклади виконання завдань, потім завдання для самостійного опрацювання і контрольні питання. Відповідь на всі контрольні питання потребує ретельного ознайомлення з відповідним теоретичним матеріалом, який викладено в лекціях або має бути розглянуто студентом в рамках самостійної роботи.

Звіт з кожного практичного заняття оформлюється відповідно до його змісту та повинен містити такі розділи: титульна сторінка; мета роботи; виконання практичних завдань, призначених для самостійного опрацювання; відповіді на контрольні питання. Оцінювання практичних робіт здійснюється за наявності належно оформленої роботи згідно з рейтинговою системою оцінювання результатів навчання з дисципліни «Матеріалознавство та конструкційні матеріали».

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 1

КРИСТАЛІЧНА БУДОВА МЕТАЛІВ І СПЛАВІВ

Мета роботи: ознайомлення з кристалічною будовою металів і сплавів, визначення основних характеристик кристалічних ґраток і теоретичної густини металів.

СТИСЛІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Кристали – це тверді тіла, в яких атоми або молекули мають чітку тривимірну періодичність. Для характеристики внутрішньої структури кристалів користуються поняттям кристалічної ґратки (решітки).

Кристалічна ґратка - періодична тривимірна структура, в якій атоми (іони) займають фіксовані положення і перебувають на певних відстанях.

Найменший об'єм кристала, при трансляції якого по координатним осям відтворюється вся кристалічна решітка, називається елементарною кристалічною коміркою.

Геометрична будова елементарних комірок характеризує кристалографічну структуру речовини. Тому, за формою зручніше класифікувати елементарні комірки, а не кристали.

Параметри кристалічної комірки

Комірка характеризується параметрами a , b , c - періодами кристалічної ґратки (відстанями між атомами, що розташовані на ребрах комірки, спрямованими вздовж осей x , y , z відповідно) і кутами між координатними осями - α (між x і z), β (між y і z), γ (між x і y). Період решітки дорівнює відстані між найближчими однойменними атомами. Базис комірки – це сукупність координат вузлів атомів, що входять до складу елементарної комірки.

Тип елементарної комірки

В залежності від кількості та розміщення вузлів розрізняють наступні елементарні комірки: прості, базоцентровані, гранецентровані, об'ємноцентровані (рис. 1.1).

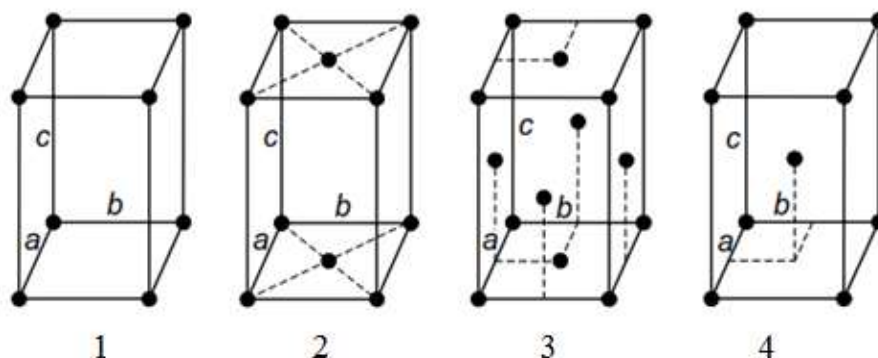


Рис. 1.1 – Основні типи елементарних комірок: 1 – проста, 2 – базоцентрована, 3 – гранецентрована, 4 - об'ємноцентрована

В елементарній комірці простої решітки атоми (іони) розташовані тільки у вершинах. У складних – вони можуть знаходитися також усередині многогранника або на його гранях. Метали мають складні кристалічні ґратки. Найбільш поширеними є наступні:

- об'ємноцентрована кубічна (ОЦК),
- гранецентрована кубічна (ГЦК),
- гексагональна щільного пакування (ГЩП).

В елементарній комірці ОЦК атоми знаходяться у вершинах куба та усередині нього – в точці перетину просторових діагоналей (рис. 1.2).

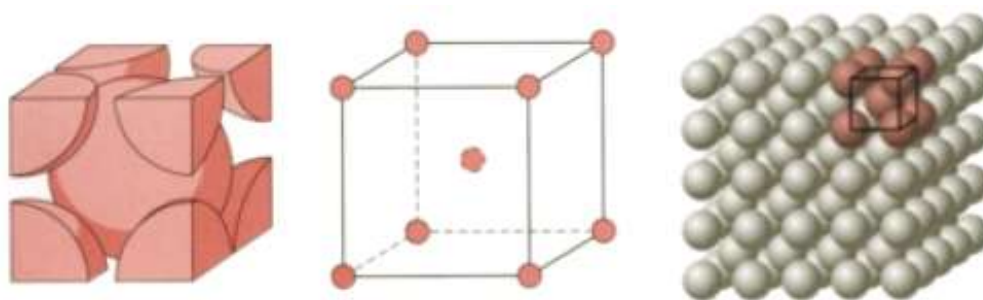


Рис. 1.2 – Об'ємноцентрована кубічна (ОЦК) кристалічна структура

В комірці ГЦК (рис. 1.3) атоми знаходяться у вершинах куба і в центрі кожної грані.

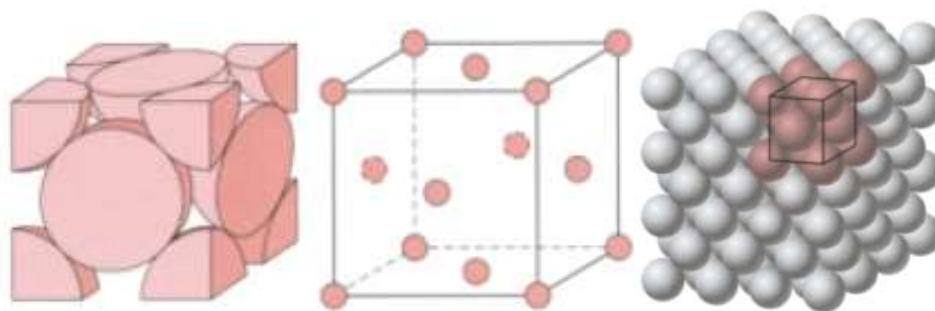


Рис. 1.3 – Гранецентрована кубічна (ГЦК) кристалічна структура

В комірці ГЦП (рис. 1.4) атоми знаходяться у вершинах правильної шестигранної призми, в центрі кожної її основи і, крім того, три атоми розміщені усередині призми.

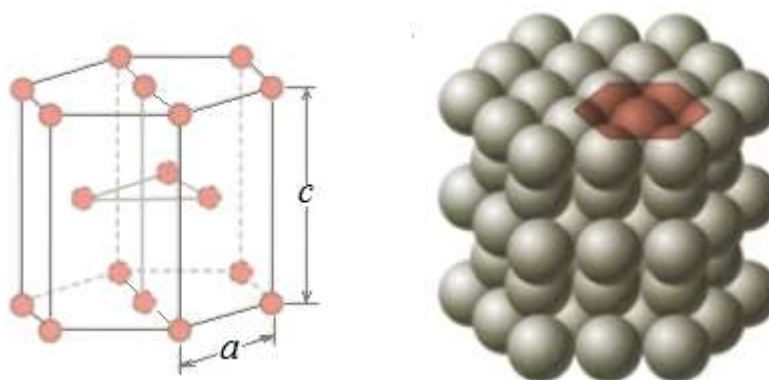


Рис. 1.4 – Гексагональна щільного пакування (ГЦП) кристалічна структура

Поліморфізм

У деяких металів (Fe, Sn, Ti та ін.) при зміні температури змінюється форма кристалічної решітки. Існування тієї самої речовини в різних кристалічних формах (модифікаціях) називають поліморфізмом (алотропією), а перехід з однієї модифікації в іншу – поліморфним перетворенням.

Внаслідок поліморфного перетворення утворюються нові кристалічні зерна, що мають інший розмір і форму. Тому таке перетворення називають перекристалізацією. Поліморфні модифікації позначають α , β , γ , ...

Поліморфне перетворення супроводжується стрибкоподібною зміною всіх властивостей металів і сплавів, а саме: питомого об'єму, теплоємності, теплопровідності, електропровідності, магнітних властивостей, механічних і хімічних властивостей і т. д.

Модель твердих куль

Для опису кристалічних решіток з будь-яким типом зв'язку зручно використовувати модель твердих куль, тобто вважати атоми або іони нестисливими кулями певного радіуса, укладеними у просторі до зіткнення. Надалі, будемо називати ці уявні тверді кулі атомами.

В моделі твердих куль для будь-якої структури вводять дві характеристики: координаційне число і коефіцієнт компактності (щільність пакування).

Координаційне число

Число атомів, що знаходяться в кристалічній решітці на рівній найменшій відстані від даного атома називається координаційним.

Кожен атом простої кубічної решітки має 6 найближчих атомів, розташованих на відстані довжини ребра куба (на відстані a періоду решітки). Координаційне число такої решітки позначають K_6 .

В ОЦК-решітці найменша відстань між атомами дорівнює $d = 0,5 a\sqrt{3}$. На цій відстані від даного атома знаходяться 8 атомів. Координаційне число такої решітки K_8 .

У ГЦК і ГЦП решітках кожен атом має 12 найближчих. Відповідно координаційні числа K_{12} і Γ_{12} . Чим вище координаційне число, тим щільніше просторова кристалічна решітка матеріалу.

Параметри елементарної комірки визначаються розмірами атомів, що утворюють її. При цьому вважають, що атоми, які представляють у вигляді твердих куль, торкаються один одного в напрямках комірки з найбільш щільним їх розташуванням.

Коефіцієнт компактності (щільність пакування)

Коефіцієнт компактності – це відношення об'єму атомів V_A , що належать комірці, до об'єму всієї комірки V_K . При визначенні кількості атомів, що належать комірці, треба враховувати не тільки кількість атомів, а також долю їх належності до комірки за допомогою коефіцієнтів:

1 - для атома, розташованого усередині комірки;

1/2 - для атомів, розташованих на гранях комірки;

1/8 - для атомів, що знаходяться у вершинах кубічної комірки;

1/6 - для атомів, що знаходяться у вершинах ГЦП-комірки.

Наприклад, на одну елементарну комірку ОЦК-гратки припадає два атоми: один атом у центрі куба й один атом по об'єму вносять атоми, що розташовані у вершинах (кожний атом у вершині куба одночасно належить восьми суміжним елементарним коміркам і на дану комірку припадає лише 1/8 об'єму цього атома, а на всю комірку $1/8 \times 8 = 1$ атом).

На елементарну комірку ГЦК-гратки припадають чотири атоми, з них один атом вносять атоми, що розташовані у вершинах куба, а три вносять атоми, що знаходяться на гранях ($1/2 \times 6 = 3$), тому що кожний з таких атомів належить двом граткам.

Теоретична густина

Кристалічна структура металу впливає на його густину. Теоретична густина визначається за формулою:

$$\rho = \frac{n A_M}{V_K N_A}, \quad (1.1)$$

де n – кількість атомів, що належать елементарній комірці;

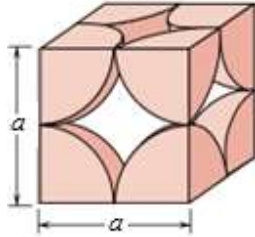
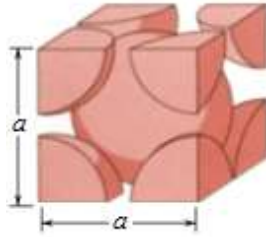
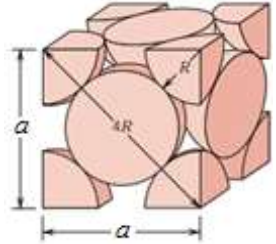
A_M – молярна маса металу, г/моль;

V_K – об'єм елементарної комірки;

N_A – число Авогадро, $N_A = 6,023 \cdot 10^{23}$ ат/моль (кількість атомів в одному молі)

Основні характеристики кубічних кристалічних комірок наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

№	Основні характеристики кристалічної комірки з радіусом атомів R і параметром a	ПК Проста кубічна 	ОЦК Об'ємно-центрована кубічна 	ГЦК Гранецентрована кубічна 
1.	Кількість атомів n , що належать одній комірці	1	2	4
2.	Об'єм атомів, що належать одній комірці V_A	$V_A = \frac{4}{3} \pi R^3$	$V_A = \frac{8}{3} \pi R^3$	$V_A = \frac{16}{3} \pi R^3$
3.	Залежність між параметром a кубічної комірки і радіусом R атома	$a = 2R$	$a = \frac{4}{3} R\sqrt{3}$	$a = 2R\sqrt{2}$
4.	Об'єм елементарної комірки $V_K = a^3$	$V_K = 8R^3$	$V_K = \frac{64R^3\sqrt{3}}{9}$	$V_K = 16R^3\sqrt{2}$
5.	Коефіцієнт компактності $K = V_A / V_K$	$\frac{1}{6} \pi = 0,52$	$\frac{\sqrt{3}}{8} \pi = 0,68$	$\frac{\sqrt{2}}{6} \pi = 0,74$

ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ЗАВДАНЬ

1. Визначити об'єм елементарної комірки ГЦК через атомний радіус R .

Розв'язання

Період комірки дорівнює відстані між центрами найближчих однойменних атомів.

Для елементарної комірки ГЦК період

дорівнює a . Встановимо залежність між періодом комірки a і атомним радіусом R . Згідно з теоремою Піфагора маємо:

$$a^2 + a^2 = (4R)^2$$

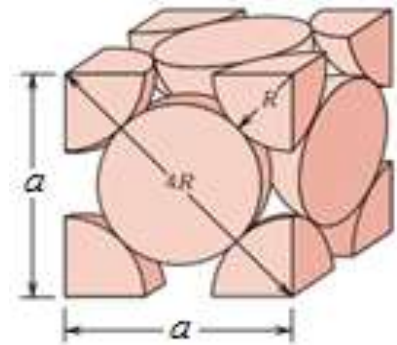
$$2a^2 = 16R^2$$

$$a = 2R\sqrt{2}$$

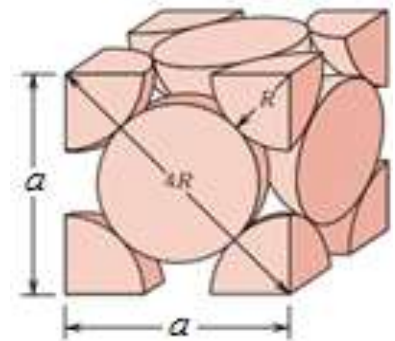
Об'єм комірки дорівнює:

$$V_K = a^3 = (2R\sqrt{2})^3 = 16R^3\sqrt{2}$$

Відповідь: $V_K = 16R^3\sqrt{2}$



2. Мідь має атомний радіус $0,128 \text{ нм}$ ($1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м} = 10^{-7} \text{ см}$), кристалічну структуру ГЦК і молярну масу $63,5 \text{ г/моль}$. Визначити теоретичну густину міді та порівняти її з табличним значенням.



Розв'язання

Теоретична густина визначається за формулою (1.1).

Для комірки ГЦК: $n = 4$; $A_{Cu} = 63,5 \text{ г/моль}$; $N_A = 6,023 \cdot 10^{23} \text{ ат/моль}$;

$$R = 0,128 \text{ нм} = 0,128 \cdot 10^{-9} \text{ м}$$

Визначимо об'єм елементарної ГЦК комірки.

З цієї метою встановимо залежність між параметром комірки і радіусом атомів:

$$a^2 + a^2 = (4R)^2; \quad a = 2R\sqrt{2}; \quad V_K = a^3 = (2R\sqrt{2})^3 = 16R^3\sqrt{2}$$

Знайдемо теоретичну густину міді:

$$\rho = \frac{n A_{Cu}}{V_K N_A} = \frac{n A_{Cu}}{(16 R^3 \sqrt{2}) N_A} = \frac{4 \cdot 63,5 \left[\frac{г}{моль} \right]}{16 (0,128 \cdot 10^{-7})^3 \sqrt{2} [см^3] \cdot 6,023 \cdot 10^{23} \left[\frac{1}{моль} \right]} =$$

$$= 8,887 \frac{г}{см^3} = 8887 \frac{кг}{м^3}$$

Відповідь: $\rho = 8887 \frac{кг}{м^3}$

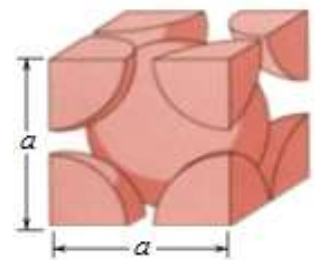
З довідкових джерел густина міді становить 8 900 кг/м³. Відхилення складає:

$$\frac{8900 - 8887}{8900} 100 \% = 0,146 \%$$

ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОГО ОПРАЦЮВАННЯ

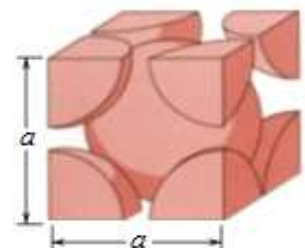
1. Довести, що довжина ребра комірки ОЦК і атомний радіус пов'язані співвідношенням:

$$R = \frac{\sqrt{3}}{4} a$$



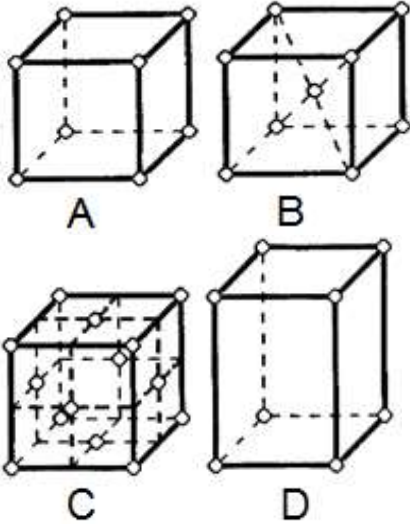
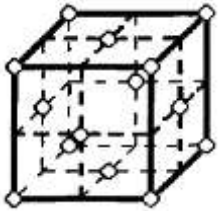
2. Алюміній має ГЦК-гратку і атомний радіус 0,143 нм. Визначити параметр елементарної комірки.

3. Хром має ОЦК-решітку і атомний радіус 0,125 нм. Визначити параметр елементарної комірки.

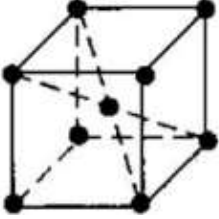
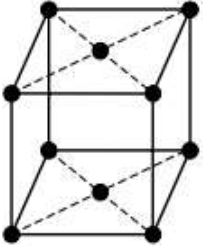
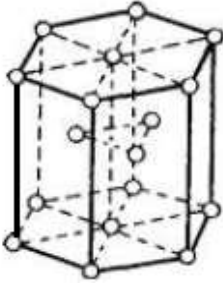


4. Нікель має ГЦК-гратку і атомний радіус 0,1246 нм. Визначити параметр елементарної комірки.																
5. Тантал має ОЦК-гратку і атомний радіус 0,143 нм. Визначити параметр елементарної комірки.																
6. Вольфрам має ОЦК-гратку і атомний радіус 0,1371 нм. Визначити параметр елементарної комірки.																
7. Довести, що відстань між центром пори і центром атома простої кубічної комірки дорівнює $R\sqrt{3}$.																
8. Деякий гіпотетичний метал має просту кубічну кристалічну структуру, молярну масу 70,4 г/моль, атомний радіус 0,126 нм. Визначити його теоретичну густину.																
9. Густина родію 12,41 г/см ³ , атомний радіус 0,1345 нм. Яку кристалічну структуру має родій, ГЦК чи ОЦК?																
10. В таблиці наведено молярну масу, густину та атомний радіус для трьох гіпотетичних металів. Який тип гратки вони мають? ОЦК, ГЦК, ПК?																
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Метал</th> <th>Молярна маса, г/моль</th> <th>Густина, г/см</th> <th>Радіус атома, нм</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>А</td> <td>77,4</td> <td>8,22</td> <td>0,125</td> </tr> <tr> <td>В</td> <td>107,6</td> <td>13,42</td> <td>0,133</td> </tr> <tr> <td>С</td> <td>127,3</td> <td>9,23</td> <td>0,142</td> </tr> </tbody> </table>	Метал	Молярна маса, г/моль	Густина, г/см	Радіус атома, нм	А	77,4	8,22	0,125	В	107,6	13,42	0,133	С	127,3	9,23	0,142
Метал	Молярна маса, г/моль	Густина, г/см	Радіус атома, нм													
А	77,4	8,22	0,125													
В	107,6	13,42	0,133													
С	127,3	9,23	0,142													

ТЕСТОВІ ЗАВДАННЯ

<p>1. Які з представлених на рисунку елементарних комірок відносяться до простих?</p> <div style="text-align: center;">  </div>	<p>a. B і C. b. A і C. c. B і D. d. A і D.</p>
<p>2. Елементарна комірка це ...</p>	<p>a. Тип кристалічної решітки, характерний для даного хімічного елемента. b. Мінімальний об'єм кристала, при трансляції якого по координатним осям можна відтворити всю решітку. c. Кристалічна комірка, що містить один атом. d. Бездефектна, за виключенням точкових дефектів, область кристалічної решітки.</p>
<p>3. Здатність металу існувати в різних кристалічних модифікаціях це ...</p>	<p>a. Поліморфізм. b. Ізометрія. c. Анізотропія. d. Текстура.</p>
<p>4. Скільки атомів належить елементарній комірці, що представлена на рисунку?</p> <div style="text-align: center;">  </div>	<p>a. 14. b. 12. c. 8. d. 6. e. 4.</p>

<p>5. Характеристика кристалічної решітки, що визначає кількість однотипних атомів, що знаходяться на найменшій рівній відстані від будь-якого атома це ...</p>	<p>a. Ретикулярна густина. b. Параметр решітки. c. Коефіцієнт компактності. d. Координаційне число.</p>
<p>6. Координаційне число кристалічної решітки, що представлена на рисунку, дорівнює ...</p>	<p>a. 3 b. 6. c. 8 d. 12 e. 16.</p>
<p>7. Координаційне число кристалічної решітки, що представлена на рисунку, дорівнює ...</p>	<p>a. 4 b. 6. c. 8 d. 12 e. 16.</p>
<p>8. Змінення якої характеристик кристалічної решітки призведе до підвищення її щільності</p>	<p>a. Збільшення параметрів решітки. b. Зменшення кількості пор в елементарній комірці. c. Збільшення кількості атомів в комірці. d. Збільшення координаційного числа.</p>
<p>9. Характеристика кристалічної решітки, яка визначається відношенням об'єму атомів, що належать елементарній комірці, до об'єму всієї комірки це ...</p>	<p>a. Коефіцієнт компактності. b. Координаційне число. c. Ретикулярна густина. d. Параметр решітки.</p>
<p>10. Залежність властивостей кристала від кристалографічного напрямку називається:</p>	<p>a. поліморфізмом b. текстурою c. анізотропією d. алотропією</p>

<p>11. Скільки атомів належить елементарній комірці, що представлена на рисунку?</p> 	<p>a. 1 b. 2. c. 9 d. 6. e. 4.</p>
<p>12. Для якої з наведених комірок коефіцієнт компактності складає 74 % ?</p>	<p>a. ПК b. ОЦК c. ГЦК d. ГЦП</p>
<p>13. Скільки атомів належить елементарній комірці, що представлена на рисунку?</p> 	<p>a. 9 b. 6 c. 4 d. 2 e. 1</p>
<p>14. Який відсоток від об'єму ОЦК-комірки займають пори</p>	<p>a. 68 % b. 48 % a. 52 % b. 32 %</p>
<p>15. Скільки атомів належить елементарній комірці, що представлена на рисунку?</p> 	<p>a. 3 b. 6 c. 8 d. 12 e. 17.</p>
<p>16. В чому суть атомно-кристалічної будови металів?</p>	<p>a. атоми розташовуються хаотично; b. атоми зберігають ближній порядок; c. атоми розташовані закономірно; d. атоми розташовані в геометрично правильному порядку</p>

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Дайте визначення елементарній комірці та охарактеризуйте її параметри.
2. Накресліть схематично гранецентровану і об'ємноцентровану кубічні решітки. Чим вони відрізняються?
3. Назвіть і охарактеризуйте основні типи кристалічних решіток для сполук з металічним типом зв'язку.
4. В чому полягає суть моделі твердих куль.
5. Виведіть залежність між радіусом R атома і параметром a об'ємноцентрованої кубічної комірки.
6. Виведіть залежність між параметром гранецентрованої кубічної комірки і радіусом R атома.
7. Що розуміють під координаційним числом атома (іона)?
8. Скільки атомів належить кожній з кристалічних комірок ПК, ОЦК, ГЦК? Поясніть, як визначається кількість атомів, що належить коміркам ПК, ОЦК, ГЦК.
9. Охарактеризуйте коефіцієнт компактності. Наведіть приклади.
10. У чому полягає суть поліморфізму? Наведіть приклади цього явища.
11. Як визначається теоретична густина. Наведіть формулу і дайте необхідні пояснення.

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 2

ІНДЕКСУВАННЯ ВУЗЛІВ, НАПРЯМКІВ І ПЛОЩИН У КРИСТАЛІЧНИХ ГРАТКАХ

Мета роботи: навчитися і набути досвіду індексувати вузли, напрямки і площини кристалічних ґраток; визначати належність прямої до певної площини; розраховувати кути між атомними площинами та відстані між паралельними площинами.

СТИСЛІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Основні елементи кристалічних ґраток - це вузли, напрямки вузлових атомних рядів, а також атомно-кристалічні площини. Для їх позначення застосовують спеціальні кристалографічні символи. Символ складається із трьох або чотирьох чисел, записаних у спеціальних для кожного структурного елемента дужках.

Вузли, напрямки і площини у кристалічній решітці прийнято позначати трійками чисел h , k , l – індексами Міллера.

Індекси вузла – координати вузла, що виражені в одиницях параметрів комірки (рис. 2.1). Записується індекс вузла у подвійних квадратних дужках: $[[001]]$ або без дужок 001. Знак мінус пишеться над цифрою.

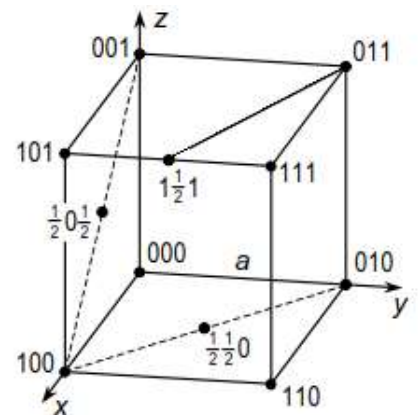


Рис. 2.1 – Індекси вузлів

За **індекси напрямку**, що проходить через початок координат (рис. 2.2), приймають координати першого вузла, що лежить на цьому напрямку. Індеси напрямків записуються в одинарні квадратні дужки: $[100]$, $[111]$. Якщо який-небудь з індесів від'ємний, то мінус ставлять над цифрою, наприклад $[0\bar{1}\bar{1}]$. Індеси напрямку завжди представляють у вигляді трьох простих цілих чисел, при цьому, замість $[01\frac{1}{2}]$ пишуть $[021]$, замість $[\bar{2}\bar{2}\bar{4}]$ пишуть $[\bar{1}\bar{1}\bar{2}]$.

Якщо напрямок не проходить через початок координат (рис. 2.3), то потрібно скористатися векторним правилом – від координат кінця вектора напрямку відняти відповідні координати початку вектора напрямку.

Індеси напрямку описують нескінченну пряму. В ряді випадків необхідно задати вектор певної довжини. Координатами вектора є його проєкції на осі координат. При записі вектора прийнято залишати у дужках індеси напрямку (три простих цілих числа), уздовж якого розташований вектор, а загальний множник виносити перед дужками. Наприклад:

$$\left[a, -\frac{1}{2}a, 0 \right] = \frac{1}{2}a [2\bar{1}0]$$

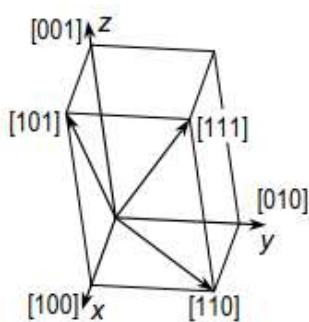


Рис. 2.2 – Індеси напрямків, що проходить через початок координат

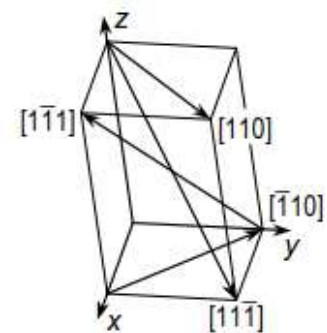
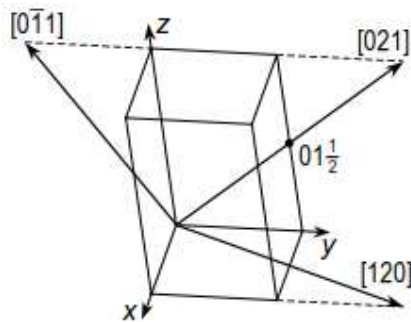
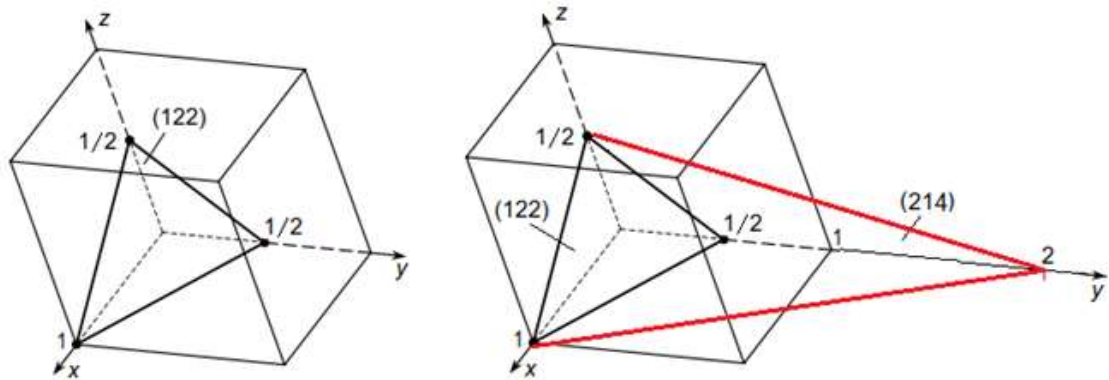


Рис. 2.3 – Індеси напрямків, що не проходять через початок координат

Індесами площини, що не проходить через початок координат (рис. 2.4), є три цілих числа, які є оберненими величинами відрізків, що

відсікаються даною площиною на координатних осях. За одиниці довжини відрізків приймають параметри комірки a, b, c . Індеси площини беруть у круглі дужки. Наприклад, площина відсікає на осях x, y, z відповідно відрізки $1, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}$. Індеси цієї площини будуть мати вигляд (122). Індеси площин завжди приводять до трьох простих цілих чисел.



$$h:k:l = \frac{1}{1} : \frac{1}{\frac{1}{2}} : \frac{1}{\frac{1}{2}} = 1:2:2 \rightarrow (122)$$

$$h:k:l = \frac{1}{1} : \frac{1}{\frac{1}{2}} : \frac{1}{\frac{1}{2}} = \frac{1}{1} : \frac{1}{\frac{1}{2}} : \frac{2}{1} = \frac{2}{2} : \frac{1}{2} : \frac{4}{2} = 2:1:4 \rightarrow (214)$$

Рис. 2.4 – Визначення індесів площини

Якщо площина паралельна одній з осей (перетинається з нею в нескінченності), то відповідний індекс дорівнює нулю ($1 / \infty = 0$). Приклади індексації площин наведено на рис. 2.5.

Це ми спостерігаємо на схемах:

- **b, f** - площини паралельні осі z ;
- **c** - площина одночасно паралельна осям x і z ;
- **d, g** - площини паралельні осі y .

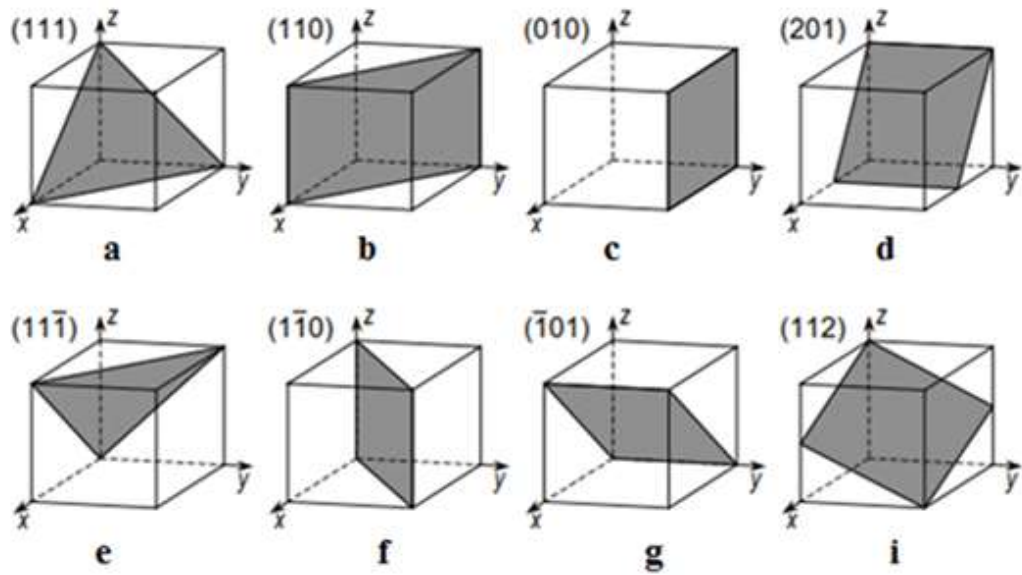


Рис. 2.5 – Приклади визначення індексів площин кубічних комірок

Якщо початок координат лежить у площині, як на схемі **f**, тоді площину зсуваємо вліво, паралельно до самої себе, до перетинання з осями x , y або зсуваємо систему координат вправо на один параметр вздовж осі y (рис. 2.6).

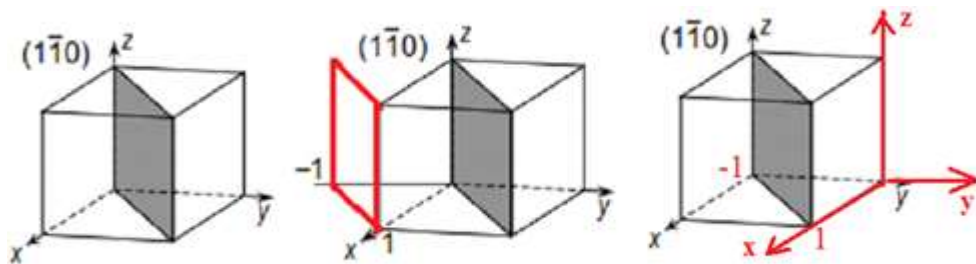


Рис. 2.6 – Приклад визначення індексів площини кубічної комірки, схема **f**

У випадку, як на схемі **e**, площину зсуваємо донизу паралельно до самої себе на один параметр або зсуваємо систему координат вгору на один параметр вздовж осі z (рис. 2.7).

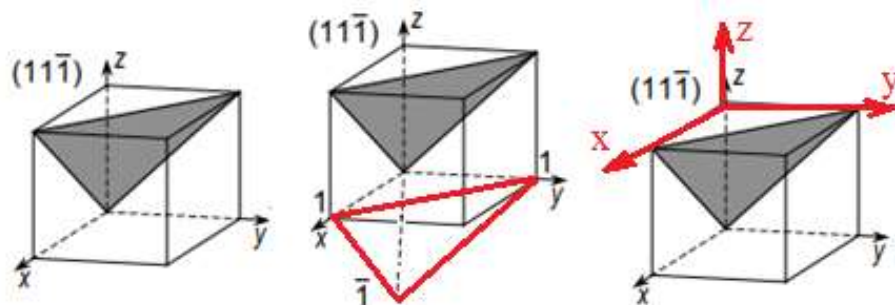


Рис. 2.7 – Приклад визначення індексів площини кубічної комірки, схема **e**

У випадку, як на схемі **i**, площину зсуваємо донизу, паралельно до самої себе вздовж осі z , до перетинання з осями x, y (рис. 2.8).

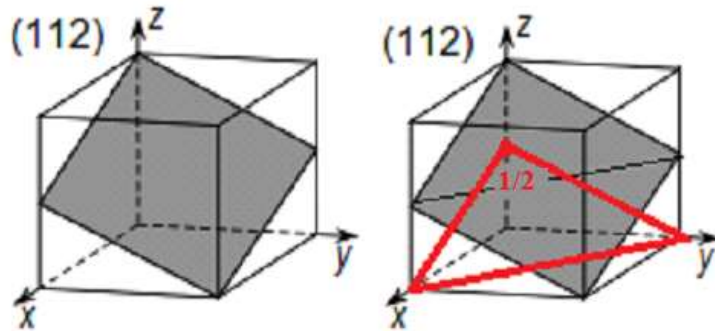


Рис. 2.8 – Приклад визначення індексів площини кубічної комірки, схема **i**

Основні формули кристалографії кубічних кристалів

Індекси нормалі до площини збігаються з індексами самої площини, тобто:

$$[h k l] \perp (h k l) \quad (2.1)$$

Відстань між сусідніми паралельними атомними площинами $(h k l)$ дорівнює:

$$d = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}, \quad (2.2)$$

де a – параметр комірки.

Кут між двома напрямками $[h_1 k_1 l_1]$ і $[h_2 k_2 l_2]$ знаходять за правилом скалярного добутку:

$$\cos \varphi = \frac{h_1 h_2 + k_1 k_2 + l_1 l_2}{\sqrt{h_1^2 + k_1^2 + l_1^2} \cdot \sqrt{h_2^2 + k_2^2 + l_2^2}} \quad (2.3)$$

Наприклад, для напрямків $[01\bar{1}]$ і $[12\bar{1}]$:

$$\cos \varphi = \frac{0 \cdot 1 + 1 \cdot 2 + (-1) \cdot (-1)}{\sqrt{0^2 + 1^2 + (-1)^2} \cdot \sqrt{1^2 + 2^2 + (-1)^2}} = \frac{3}{\sqrt{2} \sqrt{6}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \rightarrow \varphi = 30^\circ$$

Кут між двома площинами дорівнює куту між їх нормаллями і може бути знайдений за формулою (2.3).

Умова приналежності прямої $[h_1k_1l_1]$ до площини $(h_2k_2l_2)$ має вигляд:

$$h_1h_2 + k_1k_2 + l_1l_2 = 0 \quad (2.4)$$

Для кубічних кристалів ця ж умова визначає перпендикулярність двох напрямків або двох площин.

ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ЗАВДАНЬ

1. Чи належить пряма $[123]$ до площини $(11\bar{1})$?

Розв'язання

Приналежність прямої $[123]$ до площини $(11\bar{1})$ перевіримо за допомогою формули (2.4):

$$h_1h_2 + k_1k_2 + l_1l_2 = 0$$

$$1 \cdot 1 + 2 \cdot 1 + 3 \cdot \bar{1} = 0$$

Відповідь: Пряма $[123]$ належить до площини $(11\bar{1})$.

2. До системи площин $\{111\}$ кубічного кристала входять площини:

$(111), (\bar{1}11), (1\bar{1}1), (11\bar{1}), (\bar{1}\bar{1}1), (\bar{1}1\bar{1}), (1\bar{1}\bar{1}), (\bar{1}\bar{1}\bar{1})$. Які з цих площин паралельні?

Розв'язання

Кут між двома площинами дорівнює куту між їх нормаллями. В свою чергу, індекси нормалі до площини збігаються з індексами самої площини. Тому, для розв'язку задачі використовуємо формулу (2.3):

$$\cos \varphi = \frac{h_1h_2 + k_1k_2 + l_1l_2}{\sqrt{h_1^2 + k_1^2 + l_1^2} \cdot \sqrt{h_2^2 + k_2^2 + l_2^2}}$$

Площини будуть паралельними, якщо:

$$\varphi = 0^\circ \rightarrow \cos 0^\circ = 1$$

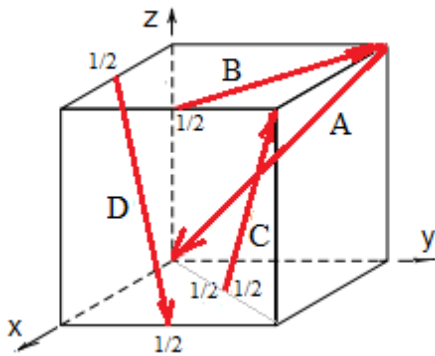
$$\varphi = 180^\circ \rightarrow \cos 180^\circ = -1$$

Відповідь: Для заданої системи площин це можливо, коли чисельник формули (2.3) буде дорівнювати 3 або -3. Тобто, має виконуватися умова:

$$h_1 h_2 + k_1 k_2 + l_1 l_2 = \pm 3$$

ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОГО ОПРАЦЮВАННЯ

1. Визначити індекси напрямків A, B, C, D в елементарній кубічній комірці.



2. Знайти кут між напрямками:

$$[001] \text{ і } [\bar{1}01]$$

$$[101] \text{ і } [2\bar{2}1]$$

$$[\bar{1}22] \text{ і } [01\bar{1}]$$

$$[121] \text{ і } [\bar{2}11]$$

3. Знайдіть відрізки, які відсікають на осях координат площини (110), (111), (112) у кубічній решітці. Побудуйте названі площини.

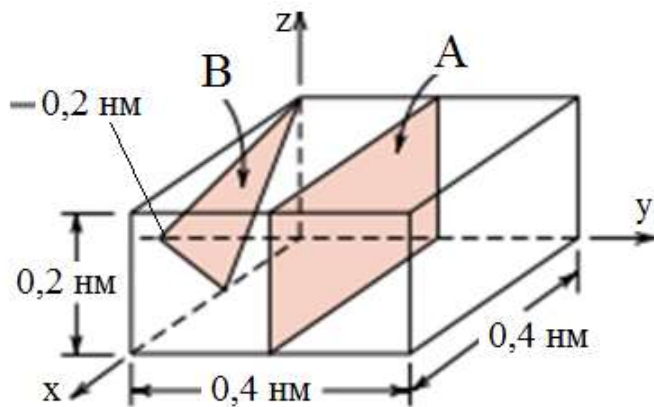
4. Визначте індекси площини, що відсікає по координатним осям відрізки $x = 2a$, $y = 3b$, $z = 6c$.

5. Визначте індекси площини, що паралельна осі x і відсікає відрізки 2 і $\frac{1}{2}$, відповідно, по осях y і z .

6. Знайдіть індекси Міллера для площини, якій належать вузли з індексами: $[[100]]$, $[[010]]$, $[[002]]$.

7. Чи належить пряма $[221]$ до площини (110) ?

8. Визначте індекси площин A і B в тетрагональній комірці

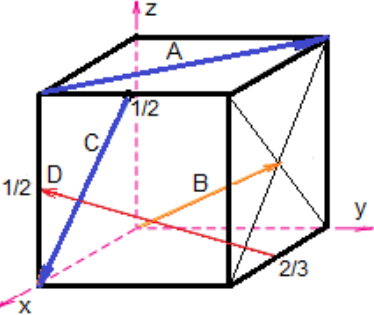
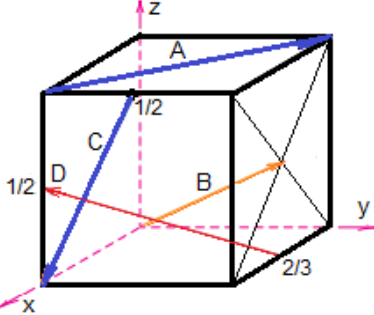
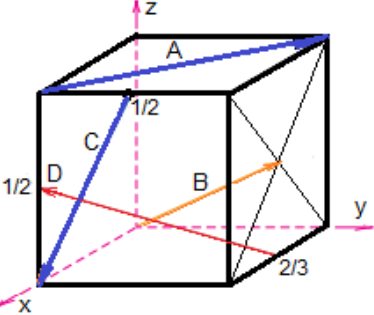
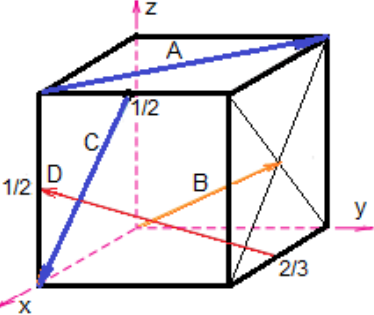


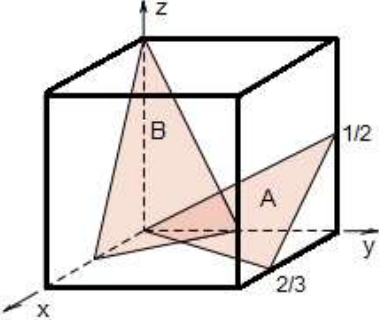
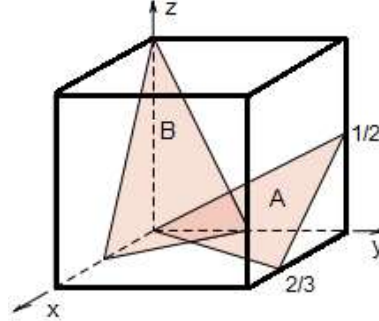
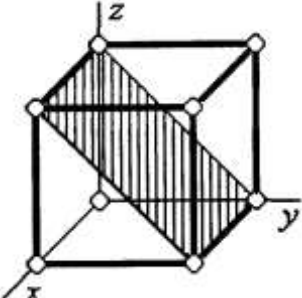
9. Визначте індекси площини, що відсікає відрізки 2 \AA , 3 \AA , 4 \AA на відповідних осях координат орторомбічного кристала з параметрами: $a : b : c = 4 : 3 : 2$

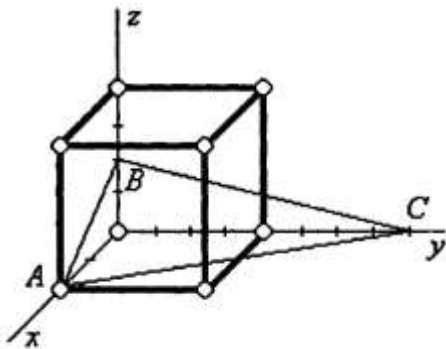
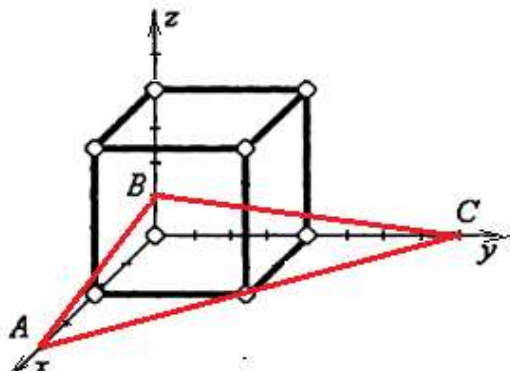
10. Показати напрямки на схемі кубічної комірки:

$[\bar{1}10]$, $[\bar{1}\bar{2}1]$, $[0\bar{1}2]$, $[1\bar{3}3]$

ТЕСТОВІ ЗАВДАННЯ

<p>1. Кристалографічні індекси напрямку В ...</p> 	<p>a. $[\bar{1}21]$ b. $[122]$ c. $[212]$ d. $[121]$</p>
<p>2. Кристалографічні індекси напрямку А ...</p> 	<p>a. $[1\bar{1}0]$ b. $[\bar{1}10]$ c. $[111]$ d. $[121]$</p>
<p>3. Кристалографічні індекси напрямку С ...</p> 	<p>a. $[012]$ b. $[120]$ c. $[201]$ d. $[0\bar{1}2]$</p>
<p>4. Кристалографічні індекси напрямку D ...</p> 	<p>a. $[\bar{2}63]$ b. $[023]$ c. $[\bar{2}\bar{6}3]$ d. $[322]$</p>

<p>5. Якщо площина паралельна одній з осей, то відповідний індекс дорівнює ...</p>	<p>a. 1 b. $\bar{1}$ c. ∞ d. 0</p>
<p>6. Кристалографічні індекси площини А ...</p> 	<p>a. $(\bar{3}12)$ b. $(3\bar{2}4)$ c. (321) d. (243)</p>
<p>7. Кристалографічні індекси площини В ...</p> 	<p>a. (221) b. (112) c. (321) d. (212)</p>
<p>8. Кристалографічні індекси заштрихованої площини ...</p> 	<p>a. (111) b. (220) c. (100) d. (011)</p>

<p>9. Кристалографічні індекси площини ABC ...</p> 	<p>a. (241) b. (12 ½) c. (214) d. (1 ½ 2)</p>
<p>10. Кристалографічні індекси площини ABC ...</p> 	<p>a. (118) b. (112) c. (214) d. (481)</p>

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Як визначити індекси вузлів та записати їх кристалографічний символ?
2. Як визначити індекси напрямків, що *проходять* через початок координат, та записати їх кристалографічний символ?
3. Як визначити індекси напрямків, що *не проходять* через початок координат?
4. Поясніть, як визначити кут між двома напрямками. Наведіть приклад.
5. Як визначити індекси площин та записати їх кристалографічний символ?
6. Як визначити індекси площини, якщо площина паралельна одній з осей або двом осям. Наведіть приклади.
7. Як знайти символ площини, що проходить через початок координат?
8. Поясніть, як довести приналежності прямої до певної площини кристалічної комірки.

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 3

РЕТИКУЛЯРНА, ЛІНІЙНА І ПЛОЩИННА ЩІЛЬНІСТЬ КРИСТАЛІЧНИХ СТРУКТУР

Мета роботи: навчитися і набути досвіду розраховувати ретикулярну, лінійну і площинну щільність; знаходити індекси напрямків і площин найбільш щільного пакування, вздовж яких відбувається ковзання при пластичній деформації.

СТИСЛІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

У різних напрямках кристалічної структури різні відстані між атомами та сили міжатомного зв'язку, що є причиною відмінності у властивостях кристала залежно від напрямку, в якому ця властивість виміряна. Ця властивість кристалів називається анізотропією.

В будь-якому кристалі існують напрямки і площини з різною щільністю в розташуванні атомів. Для знаходження цих напрямків і площин визначають ретикулярну, лінійну або площинну щільність.

Параметр, що характеризує заповненість атомних площин, одержав назву ретикулярної (атомної) щільності. Він виражається кількістю атомів, що припадають на одиницю площі відповідної атомної площини і визначається за формулою:

$$n_s = \frac{n}{S}, \quad (3.1)$$

де n – кількість атомів на атомній площині; S - площа атомної площини.

Частка площі, яку займають атоми на відповідній атомній площині називається площинною щільністю.

Частка довжини, яку займають атоми на відповідному напрямку називається лінійною щільністю.

Використання кількісної оцінки заповненості атомних площин за допомогою ретикулярних, площинних і лінійних щільностей дозволяє оцінити роль структурного фактора у формуванні властивостей кристала.

Для виявлення щільно заповнених атомних площин порівнюють значення щільностей різних атомних площин кристала і відбирають за відповідними максимальними значеннями.

Розглянемо розташування атомів на площинах (010), (110), (111) у простій кубічній комірці (рис. 3.1).

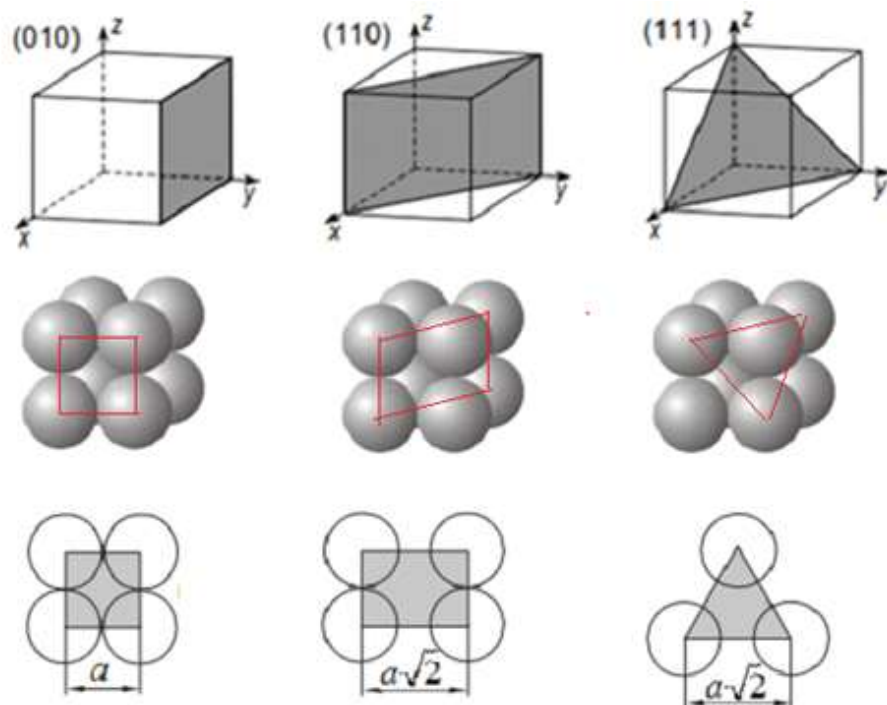


Рис. 3.1 – Розташування атомів на площинах (010), (110), (111) у простій кубічній комірці

Ретикулярна щільність для цих площин складає:

$$n_s(010) = \frac{n_{(010)}}{S_{(010)}} = \frac{\frac{1}{4} \cdot 4}{a^2} = \frac{1}{a^2}$$

$$n_s(110) = \frac{n_{(110)}}{S_{(110)}} = \frac{\frac{1}{4} \cdot 4}{a \cdot a\sqrt{2}} = \frac{1}{a^2\sqrt{2}} = 0,707 \frac{1}{a^2}$$

$$n_s(111) = \frac{n_{(111)}}{S_{(111)}} = \frac{\frac{1}{6} \cdot 3}{\frac{1}{2}(a\sqrt{2})^2 \sin 60^\circ} = \frac{1}{(a\sqrt{2})^2 \frac{\sqrt{3}}{2}} = \frac{1}{a^2 \sqrt{3}} = 0,577 \frac{1}{a^2}$$

Отже, з отриманих розрахунків видно, що площина (010) в ПК-комірці є площиною найщільнішого пакування:

$$n_s(010) > n_s(110) > n_s(111)$$

На рисунках 3.2, 3.3, 3.4 представлено розташування атомів в площинах найщільнішого пакування в комірках ОЦК, ГЦК і ГЦП.

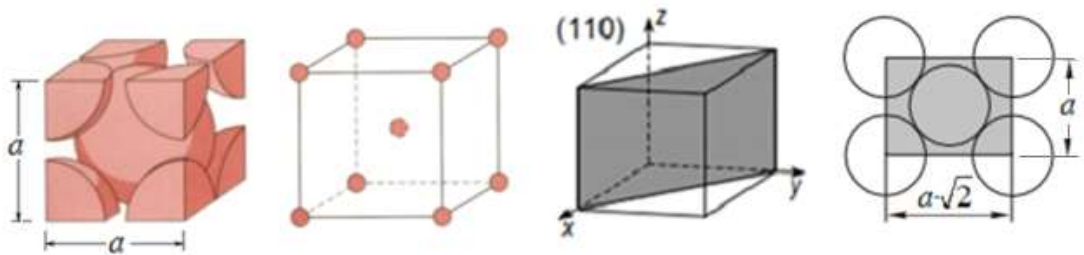


Рис. 3.2 – Розташування атомів в площині (110) комірки ОЦК

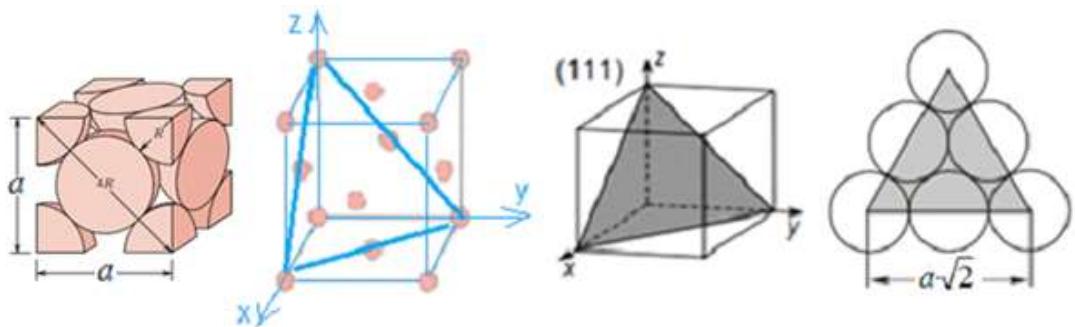


Рис. 3.3 – Розташування атомів в площині (111) комірки ГЦК

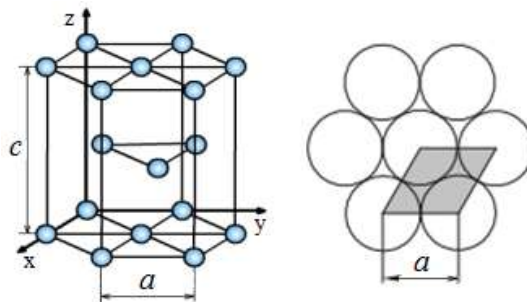
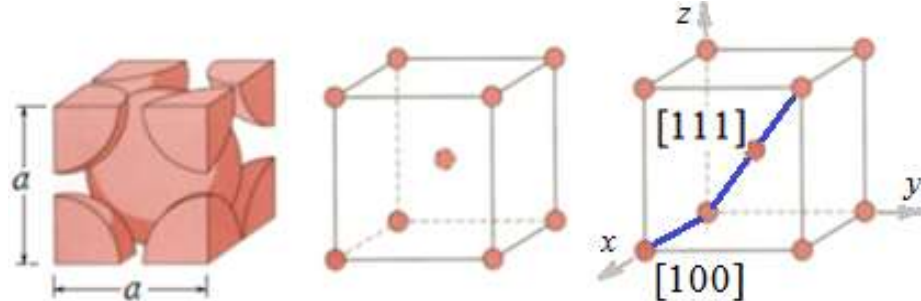


Рис. 3.4 – Розташування атомів в ГЦП комірці

ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ЗАВДАНЬ

1. Визначити лінійну щільність $\rho_{[111]}$ і $\rho_{[100]}$ напрямків $[111]$ і $[100]$ для комірки ОЦК.

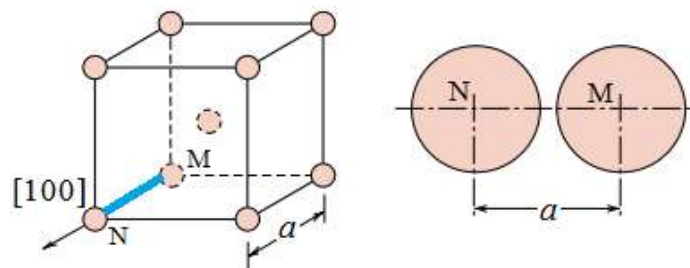


Розв'язання

Напрямок $[111]$ співпадає з просторовою діагоналлю комірки. Вздовж цієї діагоналі 3 атоми торкаються один одного. Тому довжина просторовою діагоналі дорівнює $4R$. Лінійна щільність напрямку $[111]$ для ОЦК комірки дорівнює:

$$\rho_{[111]} = \frac{4R}{4R} = 1$$

Напрямок $[100]$ лежить вздовж осі x . Довжина напрямку $[100]$ в межах комірки дорівнює параметру комірки a .

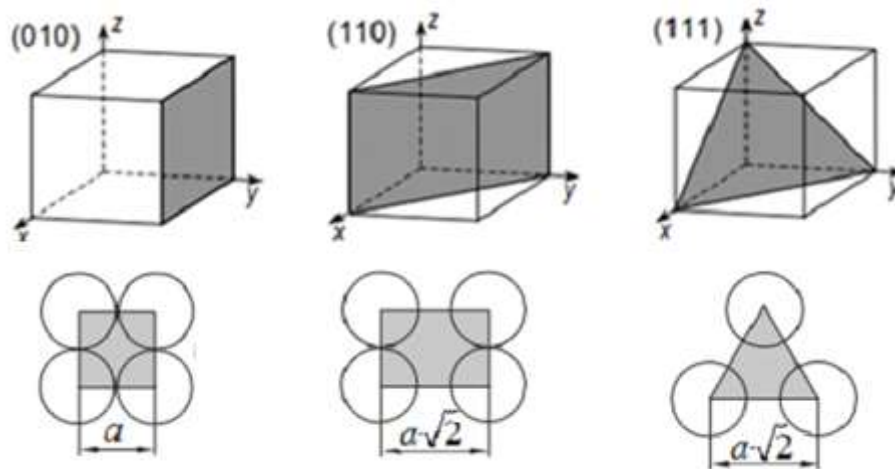


Лінійна щільність напрямку $[100]$ для ОЦК комірки дорівнює:

$$\rho_{[110]} = \frac{2R}{a} = \frac{2R}{4R \sqrt{3}} = 0,866$$

Відповідь: $\rho_{[111]} = 1$, $\rho_{[100]} = 0,866$

2. Визначити площинну щільність площин (010), (110), (111) для ПК комірки.



Розв'язання

Залежність між параметром a і радіусом R атома для комірки ПК складає:

$$a = 2R$$

$$\rho_{(010)} = \frac{n_{(010)} \cdot \pi R^2}{S_{(010)}} = \frac{1 \cdot \pi R^2}{4R^2} = 0,785$$

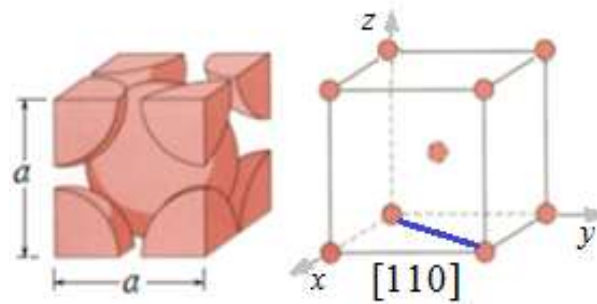
$$\rho_{(110)} = \frac{n_{(110)} \cdot \pi R^2}{S_{(110)}} = \frac{1 \cdot \pi R^2}{a \cdot a\sqrt{2}} = \frac{\pi R^2}{4R^2\sqrt{2}} = \frac{\pi}{4\sqrt{2}} = 0,555$$

$$\rho_{(111)} = \frac{n_{(111)} \cdot \pi R^2}{S_{(111)}} = \frac{\frac{1}{2} \cdot \pi R^2}{\frac{1}{2}(a\sqrt{2})^2 \sin 60^\circ} = \frac{\pi R^2}{(a\sqrt{2})^2 \frac{\sqrt{3}}{2}} = \frac{\pi R^2}{4R^2\sqrt{3}} = \frac{\pi}{4\sqrt{3}} = 0,453$$

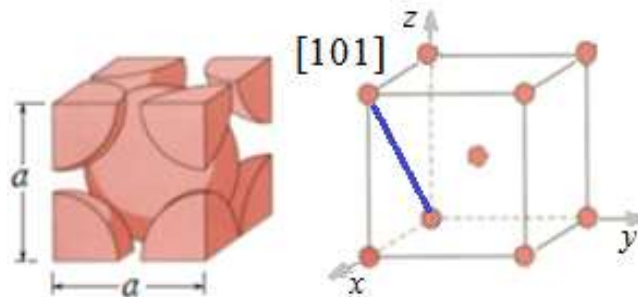
Відповідь: Площинні щільності на площинах (010), (110), (111) для ПК комірки відповідно дорівнюють: 0,785; 0,555; 0,453.

ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОГО ОПРАЦЮВАННЯ

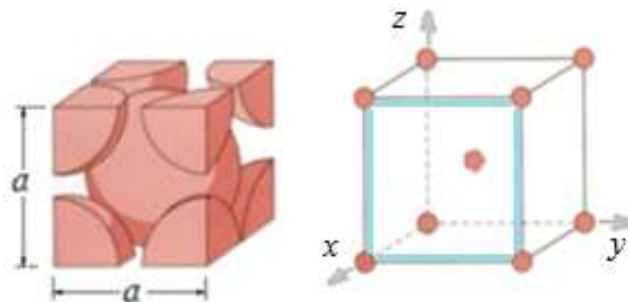
1. Визначити лінійну щільність напрямку $[110]$ для комірки ОЦК.



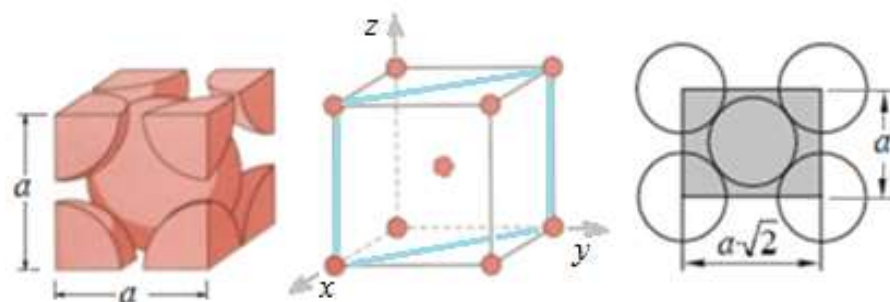
2. Визначити лінійну щільність напрямку $[101]$ для комірки ОЦК.



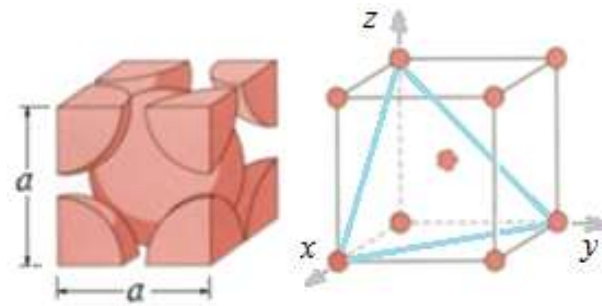
3. Визначити площинну щільність площини (100) для комірки ОЦК.



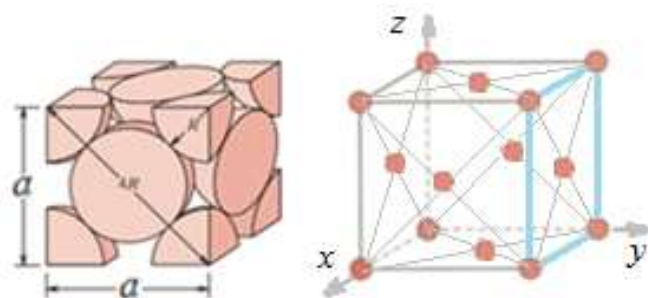
4. Визначити площинну щільність площини (110) для комірки ОЦК.



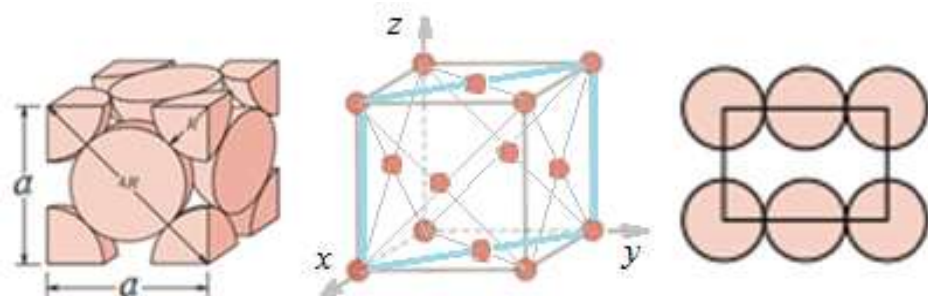
5. Визначити площинну щільність площини (111) для комірки ОЦК.



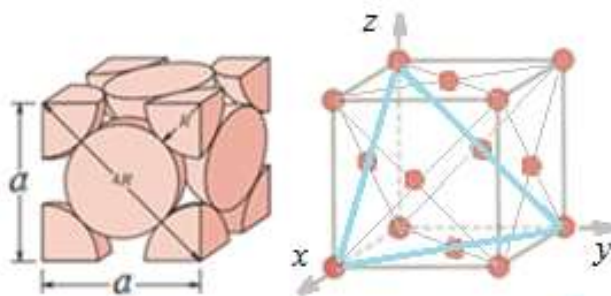
6. Визначити площинну щільність площини (010) для комірки ГЦК.



7. Визначити площинну щільність площини (110) для комірки ГЦК.



8. Визначити площинну щільність площини (111) для комірки ГЦК.



КОНТРОЛНІ ПИТАННЯ

1. Охарактеризуйте ретикулярну щільність.
2. Як знайти найбільш щільно паковану площину в комірці?
3. Яка різниця між ретикулярною, лінійною і площинною щільністю?
4. Назвіть основну причину анізотропії кристалів і поясніть свою думку.
5. Проаналізуйте лінійну щільність різних кристалографічних напрямків у простій комірці.
6. Проаналізуйте ретикулярну щільність різних кристалографічних площин у комірці хімічного елемента Na.
7. Проаналізуйте ретикулярну щільність різних кристалографічних площин у комірці хімічного елемента Cu.

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 4

ЕНЕРГІЯ УТВОРЕННЯ ТА РІВНОВАЖНА КОНЦЕНТРАЦІЯ ТОЧКОВИХ ДЕФЕКТІВ

Мета роботи: розглянути механізми утворення вакансій і міжвузлових атомів; навчитися і набути досвіду визначати рівноважну кількість вакансій, їх концентрацію та енергію утворення вакансій.

СТИСЛІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Одним з поширених недосконалостей кристалічної будови є наявність точкових дефектів: вакансій, міжвузлових атомів і домішок (рис. 4.1).

Вакансія – відсутність атомів у вузлах кристалічної решітки, «дірки», які утворилися в результаті різних причин. Утворюється при переході атомів з поверхні в навколишнє середовище або з вузлів решітки на поверхню (границі зерен, порожнечі, тріщини тощо), в результаті пластичної деформації, при бомбардуванні тіла атомами або частинками високих енергій (опромінення в циклотроні або нейтронне опромінення в ядерному реакторі). Концентрація вакансій в значній мірі визначається температурою тіла. Переміщаючись по кристалу, поодинокі вакансії можуть зустрічатися і об'єднуватися в дивакансії. Скупчення багатьох вакансій може призвести до утворення пор і порожнеч.

Міжвузловий (міжвузловинний) атом – це атом, що вийшов з вузла решітки і зайняв місце між вузлами. При цьому, на місці де був атом, утворюється вакансія.

Домішкові атоми завжди присутні в металі, так як практично неможливо виплавити хімічно чистий метал. Вони можуть мати розміри більше або менше розмірів основних атомів і розташовуються у вузлах решітки або між вузлами.

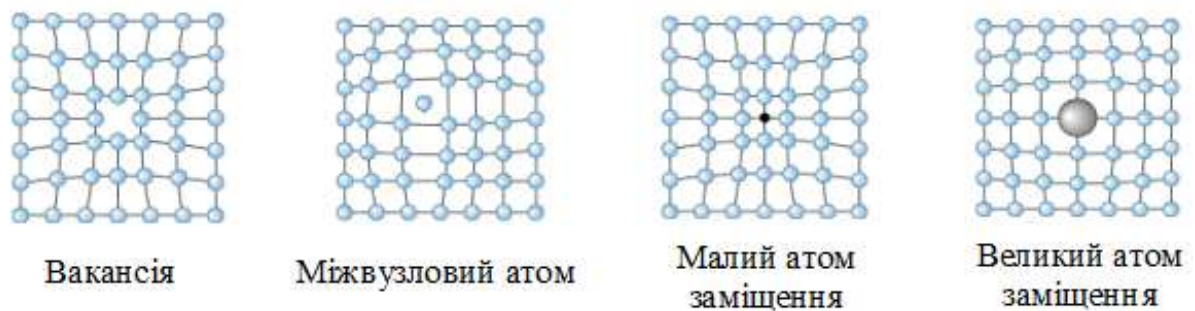


Рис. 4.1 – Точкові дефекти

Точкові дефекти викликають незначні спотворення решітки, що може призвести до зміни таких властивостей металів як електропровідність, магнітні властивості.

Наявність точкових дефектів сприяє процесам дифузії та фазовим перетворенням у твердому стані. Утворення точкових дефектів всіх типів вимагає витрати енергії. Енергія утворення однієї вакансії або міжвузлового атома, як правило, має порядок декількох електронвольт, але енергія утворення міжвузлового атома в 1,5-2 рази більше, ніж енергія утворення вакансії. Ця енергія витрачається на розрив зв'язків при утворенні точкового дефекту і на спотворення решітки навколо дефекту, викликане зміщенням атомів з рівноважних положень. Розглядаючи кристал, як суцільне пружне середовище, можна довести, що напруження навколо точкового дефекту убують пропорційно $1/r^3$, де r – відстань від дефекту.

Енергія утворення точкового дефекту може бути знижена за рахунок об'єднання простих точкових дефектів у групи або комплекси. Наприклад, процес взаємодії між вакансією і міжвузловим атомом, що веде до їх взаємної анігіляції, найбільш енергетично вигідний, але й об'єднання двох вакансій в одну дивакансію також енергетично вигідно, тому що при цьому зменшується число обірваних зв'язків.

Рівноважна кількість вакансій N_V для даної кількості атомів N у зразку матеріалу зростає з температурою T і визначається за формулою Больцмана:

$$N_V = N \exp\left(-\frac{Q_V}{kT}\right), \quad (4.1)$$

де N – число атомів в одиниці об'єму;

Q_V – енергія, що необхідна для утворення вакансії, еВ/атом;

T – абсолютна температура в Кельвінах;

k – стала Больцмана, $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \left[\frac{\text{Дж}}{\text{атом}} \cdot \text{К} \right] = 8,62 \cdot 10^{-5} \left[\frac{\text{еВ}}{\text{атом}} \cdot \text{К} \right]$

$$N = \frac{N_A}{A_M} \rho \frac{\left[\frac{\text{атом}}{\text{моль}} \right] \cdot \left[\frac{\text{г}}{\text{см}^3} \right]}{\left[\frac{\text{г}}{\text{моль}} \right]} = \frac{N_A}{A_M} \rho \left[\frac{\text{атом}}{\text{см}^3} \right], \quad (4.2)$$

де N_A – число Авогадро, $N_A = 6,023 \cdot 10^{23}$ (кількість атомів в одному молі);

ρ – густина, г/см³, кг/м³;

A_M – атомна маса, г/моль.

Густина визначається за відомою формулою:

$$\rho = \frac{nA_M}{V_K N_A}, \quad (4.3)$$

де n – кількість атомів в елементарній комірці; V_K – об'єм елементарної комірки.

Рівноважну концентрацію вакансій розраховують за формулою:

$$C_V = \frac{N_V}{N} = \exp\left(-\frac{Q_V}{kT}\right) = e^{-\frac{Q_V}{kT}} \quad (4.4)$$

$$\ln C_V = -\frac{Q_V}{kT} \quad (4.5)$$

Енергія утворення вакансії визначається за формулою:

$$Q_v = -kT \ln C_v \quad (4.6)$$

Якщо відома рівноважна концентрація вакансій при різних температурах, наприклад при T_1 і T_2 , можна знайти енергію їх утворення із наступного співвідношення:

$$\frac{\ln C_{v_1}}{\ln C_{v_2}} = \frac{-\frac{Q_{v_1}}{kT_1}}{-\frac{Q_{v_2}}{kT_2}} = \frac{Q_{v_1}}{Q_{v_2}} \cdot \frac{T_2}{T_1} \quad (4.7)$$

Рівноважна концентрація міжвузлових атомів визначається за формулою, що аналогічна (4):

$$C_I = \exp\left(-\frac{Q_I}{kT}\right), \quad (4.8)$$

де C_I – атомна частка міжвузлових атомів;

Q_I – енергія утворення міжвузлового атома, еВ/атом.

ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ЗАВДАНЬ

1. Визначити рівноважну кількість вакансій в кубічному метрі міді при 1000 °С. Енергія утворення вакансії 0,9 еВ/атом; молекулярна маса та густина міді при 1000 °С відповідно становить 63,5 г/моль і 8,4 г/см³.

Розв'язання

Рівноважна кількість вакансій в одиниці об'єму міді визначається за формулою (4.1):

$$N_v = N \exp\left(-\frac{Q_v}{kT}\right)$$

Спочатку визначимо число атомів в одному кубічному сантиметрі міді за формулою (4.2):

$$N = \frac{N_A \rho \left[\frac{\text{атом}}{\text{моль}} \right] \cdot \left[\frac{\text{г}}{\text{см}^3} \right]}{A_M \left[\frac{\text{г}}{\text{моль}} \right]} = \frac{6,023 \cdot 10^{23} \cdot 8,4}{63,5} = 0,8 \cdot 10^{23} \left[\frac{\text{атом}}{\text{см}^3} \right]$$

Визначимо число атомів в одному кубічному метрі, враховуючи що $\text{см}^3 = 10^{-6} \text{ м}^3$

$$N = 0,8 \cdot 10^{23} \left[\frac{\text{атом}}{\text{см}^3} \right] = 0,8 \cdot 10^{29} = 8 \cdot 10^{28} \left[\frac{\text{атом}}{\text{м}^3} \right]$$

Рівноважна кількість вакансій в кубічному метрі міді, що утворюється при температурі $1000 \text{ }^\circ\text{C} = 1273 \text{ К}$, дорівнює:

$$\begin{aligned} N_v &= N \exp\left(-\frac{Q_v}{kT}\right) = 8 \cdot 10^{28} \exp\left(-\frac{0,9}{8,62 \cdot 10^{-5} \cdot 1273}\right) = \\ &= 8 \cdot 10^{28} \exp(-8,2) = \frac{8 \cdot 10^{28}}{e^{8,2}} \approx 2,2 \cdot 10^{25} \text{ вак/м}^3 \end{aligned}$$

Відповідь: $2,3 \cdot 10^{25} \text{ вак/м}^3$

2. Для якого з наведених металів енергія утворення вакансій буде вище: алюміній, вольфрам, мідь, залізо?

Розв'язання

Енергія утворення вакансії визначається за формулою (4.6):

$$Q_v = -kT \ln C_v = -kT \ln \frac{N_v}{N} = kT \ln \frac{N}{N_v}$$

Згідно з цією формулою, затрати енергії на утворення вакансій будуть вище для того металу, температура плавлення якого найвища. Найвища температура плавлення у вольфраму $3420 \text{ }^\circ\text{C}$;

Відповідь: вольфрам

ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОГО ОПРАЦЮВАННЯ

<p>1. Розташуйте елементи Al, Nb, Ni, Sn у порядку передбачуваного зростання енергії утворення вакансій.</p>
<p>2. Визначити рівноважну кількість вакансій в 1 см^3 свинцю при його температурі плавлення $327 \text{ }^\circ\text{C}$. Вважати, що енергія утворення вакансії дорівнює $0,55 \text{ eV/атом}$. Густина свинцю $11,34 \text{ г/см}^3$, атомна маса $207,2 \text{ г/моль}$.</p>
<p>3. Рівноважна концентрація вакансій при температурі 927°C дорівнює 10^{-5}. Оцінити енергію утворення вакансії в Дж і eV.</p>
<p>4. Визначити рівноважну кількість вакансій в кубічному метрі заліза при $850 \text{ }^\circ\text{C}$ за наступних умов: енергія утворення вакансії $1,08 \text{ eV/атом}$; густина та атомна маса заліза відповідно становить $7,65 \text{ г/см}^3$ та $55,85 \text{ г/моль}$.</p>
<p>5. Знайдіть відношення концентрацій вакансій з енергіями утворення $0,5$ та $1,0 \text{ eV}$ при певній температурі.</p>
<p>6. Визначити енергію утворення вакансій у сріблі, враховуючи, що рівноважна концентрація вакансій при $800 \text{ }^\circ\text{C}$ становить $3,6 \times 10^{23} \text{ м}^{-3}$. Молярна маса та густина для срібла відповідно складають $107,9 \text{ г/моль}$ та $9,5 \text{ г/см}^3$.</p>

КОНТРОЛНІ ПИТАННЯ

1. Охарактеризуйте точкові дефекти кристалічної будови. Як вони впливають на властивості кристалів?
2. Поясніть механізм утворення вакансій за Шотткі та механізм утворення вакансії та міжвузлового атома за Френкелем.
3. Наведіть формулу для визначення рівноважної кількості вакансій у матеріалі за певної температури і дайте необхідні пояснення.
4. Назвіть типи твердих розчинів і надайте коротке визначення та/або схематичний ескіз кожного.
5. Чим відрізняється твердий розчин заміщення від твердого розчину проникнення?
6. Охарактеризуйте поверхневі дефекти кристалічної будови. Як вони впливають на властивості кристалів?

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 5

МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ МАТЕРІАЛІВ

Мета роботи: ознайомитися з методикою випробування матеріалів на розтяг; навчитися визначати по умовній діаграмі характеристики пружності, міцності та пластичності твердих матеріалів, а саме: межу пропорційності, пружності, текучості, міцності та відповідні ним деформації, модуль пружності, відносне видовження і відносне звуження при розриві.

СТИСЛІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Деформації розтягу-стиску виникає, коли до стержня з початковою довжиною l_0 уздовж його осі прикладені протилежно спрямовані сили F . При цьому відбувається переміщення перерізів уздовж осі стержня, який при розтягуванні видовжується на величину Δl , а при стискуванні коротшає на Δl . Величина Δl називається абсолютною поздовжньою деформацією. Відносна поздовжня деформація (далі - деформація) дорівнює:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (5.1)$$

При пружній деформації осевого розтягу-стиску, має місце залежність, яку називають законом Гука:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (5.2)$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{N}{A_0 E} = \frac{F}{A_0 E},$$

де σ - нормальне напруження;

E – модуль Юнга (або модуль пружності I роду);

N – внутрішня поздовжня сила, що виникає в результаті дії зовнішньої сили F , $N = F$;

A_0 – початкова площа поперечного перерізу зразка.

Залежність між модулем Юнга і жорсткістю k (коефіцієнтом пружності) зразка:

$$E = \frac{kL_0}{A_0} \quad (5.3)$$

При паралельному з'єднанні n пружних тіл з жорсткостями $k_1, k_2, k_3, \dots, k_n$, жорсткість системи дорівнює сумі:

$$k = k_1 + k_2 + k_3 + \dots + k_n$$

При послідовному з'єднанні n пружних тіл з жорсткостями $k_1, k_2, k_3, \dots, k_n$, загальна жорсткість визначається з рівняння:

$$k^{-1} = k_1^{-1} + k_2^{-1} + k_3^{-1} + \dots + k_n^{-1}$$

Розтяг або стиск супроводжуються зміною поперечних розмірів. Відношення відносної поперечної деформації до відносної поздовжньої деформації за абсолютною величиною, в межах дії закону Гука, називається коефіцієнтом Пуассона μ . Для різних матеріалів коефіцієнтом Пуассона знаходиться в межах $0 \leq \mu \leq 0,5$.

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\text{попер}} &= \frac{\Delta d}{d_0} = -\mu \frac{\Delta L}{L_0} \\ \varepsilon_{\text{попер}} &= -\mu \varepsilon_{\text{позд}} \end{aligned} \quad (5.4)$$

$$\mu = \left| \frac{\varepsilon_{\text{попер}}}{\varepsilon_{\text{позд}}} \right|$$

Об'ємна деформація ε_V визначається за формулами:

$$\varepsilon_V \approx \varepsilon_X + \varepsilon_Y + \varepsilon_Z \quad (5.5)$$

$$\varepsilon_V = \frac{\Delta V}{V_0} = \frac{V - V_0}{V_0} = \frac{V}{V_0} - 1 \quad \rightarrow \quad V = V_0(\varepsilon_V + 1), \quad (5.6)$$

де ε_x - поздовжня деформація вздовж осі x;

$\varepsilon_y, \varepsilon_z$ - поперечні деформації відповідно вздовж осі y і z;

V_0 – початковий об'єм зразка;

V – об'єм деформованого зразка.

Потенційна енергія пружної деформації при розтягу-стиску:

$$U = \frac{F \cdot \Delta L}{2}$$

Питома потенційна енергія пружної деформації (щільність потенційної енергії) становить:

$$u = \frac{U}{V_0} = \frac{F \Delta l}{2V_0} = \frac{F \Delta l}{2A_0 l_0} = \frac{1}{2} \varepsilon \sigma = \frac{1}{2} \varepsilon^2 E = \frac{\sigma^2}{2E}, \quad (5.7)$$

В області пластичних деформацій виконується закон сталості об'єму зразка, тобто $V_i = V_0$. Виходячи з цієї умови, маємо:

$$A_i l_i = A_0 l_0 \quad (5.8)$$

Пластичність характеризується відносним видовженням δ (поздовжня деформація в момент розриву) і відносним звуженням ψ (поперечна відносна деформація в момент розриву):

$$\delta = \frac{l_K - l_0}{l_0}, \quad (5.9)$$

$$\psi = \frac{A_0 - A_K}{A_0}, \quad (5.10)$$

де: l_0 і A_0 - початкові довжина і площа поперечного перерізу зразка;

l_K і A_K - кінцева довжина і площа поперечного перерізу зразка.

Залежність між відносним звуженням і відносною деформацією має вигляд:

$$\psi_i = \frac{\varepsilon_i}{1 + \varepsilon_i} \quad (5.11)$$

На рисунку 5.1 наведено типову умовну діаграму залежності напруження від деформації при випробуванні зразків на розтяг.

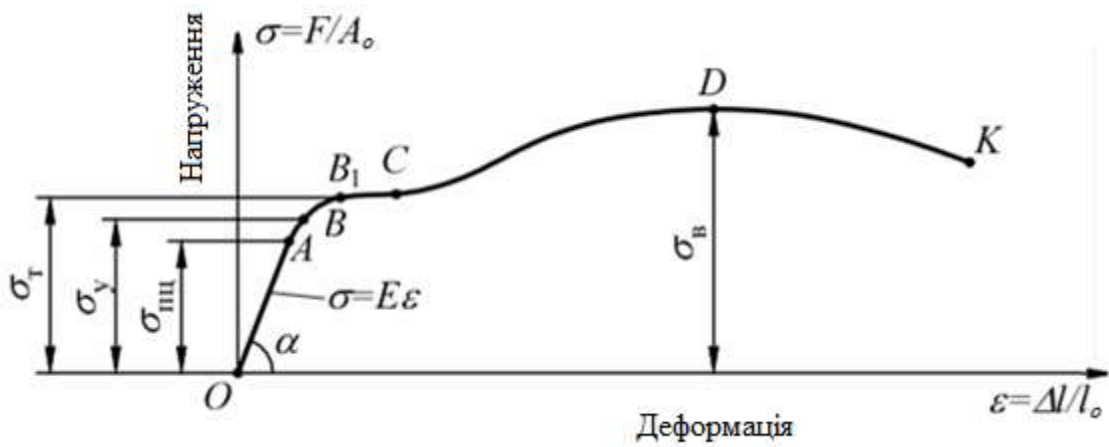


Рис. 5.1 – Умовна діаграма при випробуванні зразків на розтяг

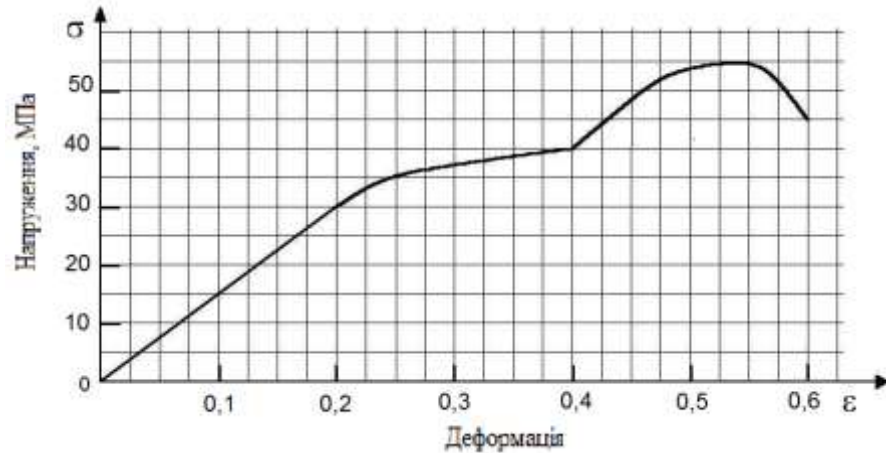
ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ЗАВДАНЬ

1. По умовній діаграмі напружено-деформованого стану металевого циліндричного зразка визначити:

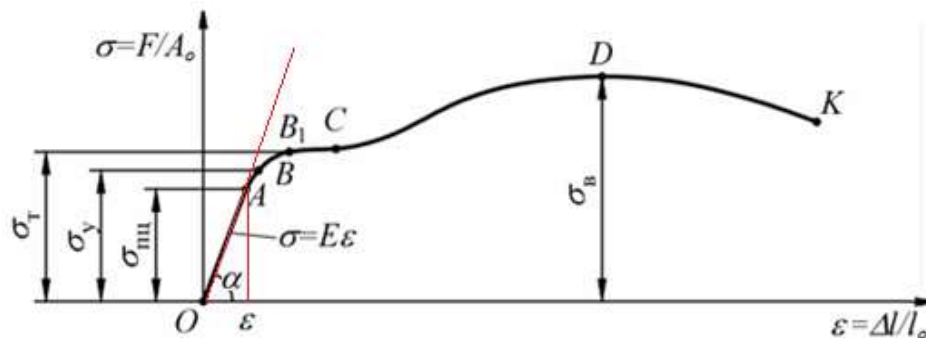
A. Модуль пружності матеріалу;

B. Довжину зразка в момент розриву при початковій довжині 10 см;

C. Потенційну енергію пружної деформації.



Розв'язання



A. Модуль пружності визначимо, використовуючи закон Гука. На графіку знайдемо межу пружності σ_{III} – максимальне напруження, до якого справедливий закон Гука, тобто спостерігається пряма пропорційна залежність між напруженням і деформацією. Межа пропорційності становить $\sigma_{III} = 30 \text{ МПа}$. Цьому напруженню відповідає деформація 0,2. Модуль пружності дорівнює:

$$E = \frac{\sigma_{III}}{\varepsilon} = \frac{30}{0,2} = 150 \text{ МПа}$$

В. Довжину зразка в момент розриву, що відбувається при деформації $\varepsilon = 0,6$, знайдемо за формулою (5.1):

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0}$$

$$L = L_0(\varepsilon + 1) = 10(0,6 + 1) = 16 \text{ см}$$

С. Щільність пружної енергії дорівнює:

$$u = \frac{U}{V} = \frac{\Delta L \cdot F}{2V} = \frac{\Delta L \cdot F}{2SL_0} = \frac{1}{2}\varepsilon\sigma = \frac{1}{2}\varepsilon^2 E = \frac{\sigma^2}{2E}$$

З наведених формул обираю наступну:

$$u = \frac{1}{2}\varepsilon\sigma,$$

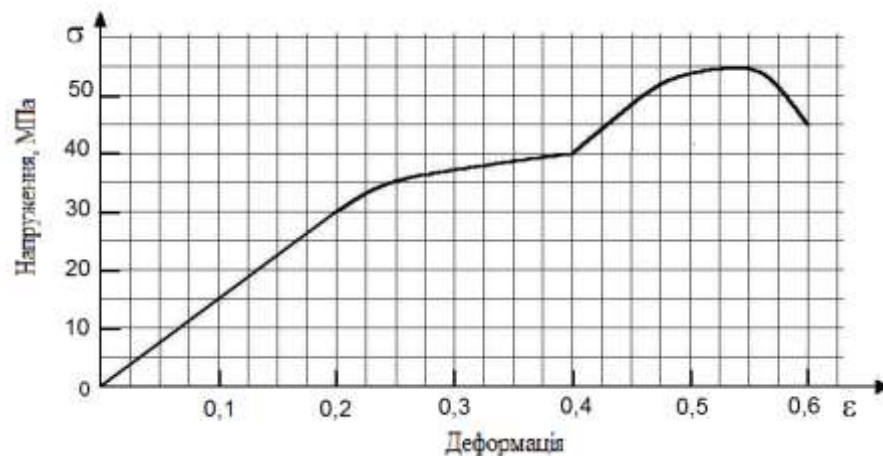
де $\sigma = \sigma_{\text{пл}} = 30 \text{ МПа}$, $\varepsilon = 0,2$.

$$u = \frac{1}{2}0,2 \cdot 30 = 3 \text{ МПа} = 3 \frac{\text{МДж}}{\text{м}^3}$$

Відповідь:

- А. 150 МПа
- В. 16 см
- С. 3 МДж/м³

2. По представленій умовній діаграмі визначити відносне звуження зразка на момент розриву за умови сталості об'єму зразка, тобто $V_i = V_0$.



Розв'язання

З умови задачі маємо:

$$V_i = V_0; \quad A_i l_i = A_0 l_0; \quad \frac{A_i}{A_0} = \frac{l_0}{l_i}$$

Відносне звуження дорівнює:

$$\psi_i = \frac{A_0 - A_i}{A_0} = 1 - \frac{A_i}{A_0} = 1 - \frac{l_0}{l_i} \quad (1)$$

Деформація дорівнює:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l_i - l_0}{l_0} = \frac{l_i}{l_0} - 1 \quad (2)$$

З рівняння (2) знайдемо відношення $\frac{l_0}{l_i}$:

$$\frac{l_i}{l_0} = 1 + \varepsilon; \quad \rightarrow \quad \frac{l_0}{l_i} = \frac{1}{1 + \varepsilon} \quad (3)$$

Підставивши (3) в рівняння (1), отримаємо формулу, яка дозволяє визначити відносне звуження, як функцію деформації зразка:

$$\psi_i = 1 - \frac{l_0}{l_i} = 1 - \frac{1}{1 + \varepsilon_i} = \frac{\varepsilon_i}{1 + \varepsilon_i} \quad (4)$$

На момент розриву деформація складає $\varepsilon = 0,6$. Отже, відносне звуження на момент розриву дорівнює:

$$\psi_K = \frac{\varepsilon_K}{1 + \varepsilon_K} = \frac{0,6}{1 + 0,6} = 0,375 = 37,5\%$$

Відповідь: $\psi_K = 37,5\%$

3. По умовній діаграмі напружено-деформованого стану металевого циліндричного зразка визначити:

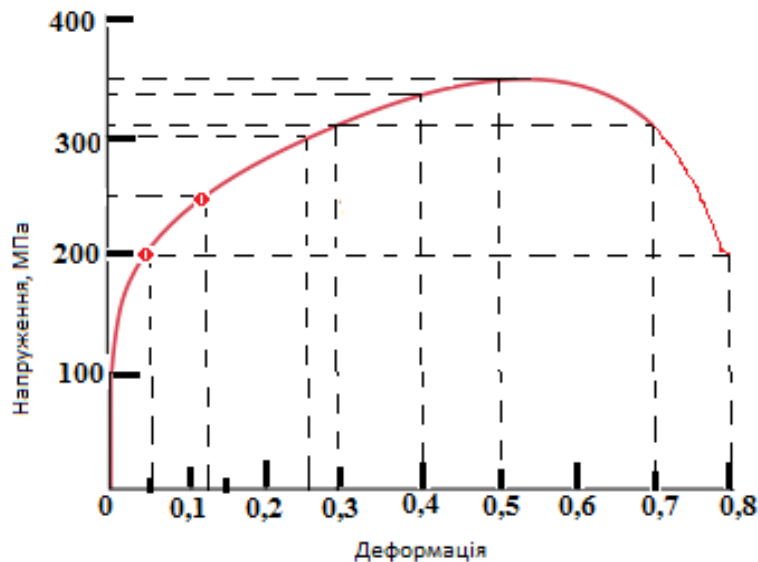
Д. Максимальне навантаження, яке може витримати зразком з початковим діаметром 12 мм;

Е. Відносне звуження зразка на момент утворення шийки;

Ф. Діаметр зразка в місці розриву при початковому діаметрі 12 мм;

Г. Видовження зразка матеріалу при деформації 0,5 і початковій довжині 120 мм;

Н. Усереднений модуль пружності в інтервалі деформацій 0,05...0,125.



Розв'язання

А. Максимальне навантаження на зразок припадає при напруженні, що дорівнює границі міцності $\sigma_B = 350$ МПа. Максимальне навантаження, яке може бути витримане циліндричним зразком, що має початковий діаметр 12 мм складає:

$$F = \sigma A_0 = \sigma \left(\frac{d_0}{2} \right)^2 \pi = 350 \cdot 10^6 \left(\frac{12 \cdot 10^{-3}}{2} \right)^2 \pi = 39584 \text{ Н}$$

В. Відносне звуження зразка на момент утворення шийки, тобто при $\varepsilon = 0,5$, визначимо за формулою (5.11):

$$\psi = \frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon} = \frac{0,5}{1 + 0,5} = 0,333 = 33,3\%$$

С. Діаметр зразка в місці розриву при початковому діаметрі 12 мм знайдемо, використовуючи формулу (5.10):

$$\psi_K = \frac{A_0 - A_K}{A_0} = 1 - \frac{A_K}{A_0} = 1 - \left(\frac{d_K}{d_0} \right)^2; \rightarrow d_K = d_0 \sqrt{1 - \psi_K}$$

Відносне звуження ψ_K зразка при розриві, тобто при деформації $\varepsilon = 0,8$, визначимо за формулою (5.11):

$$\psi_K = \frac{\varepsilon_K}{1 + \varepsilon_K} = \frac{0,8}{1 + 0,8} = 0,444 = 44,4\%$$

$$d_K = d_0 \sqrt{1 - \psi_K} = 12 \sqrt{1 - 0,444} = 8,95 \text{ мм} \approx 9 \text{ мм}$$

D. Видовження Δl зразка матеріалу при деформації 0,5 і початковій довжині 120 мм знайдемо за формулою (5.1):

$$\Delta l = \varepsilon l_0 = 0,5 \cdot 120 = 60 \text{ мм}$$

E. Усереднений модуль пружності в інтервалі деформацій 0,05...0,125 визначимо з наступних міркувань:

Деформації 0,05 відповідає напруження 200 МПа;

Деформації 0,125 відповідає напруження 250 МПа.

Усереднений модуль пружності знайдемо за формулою (5.2):

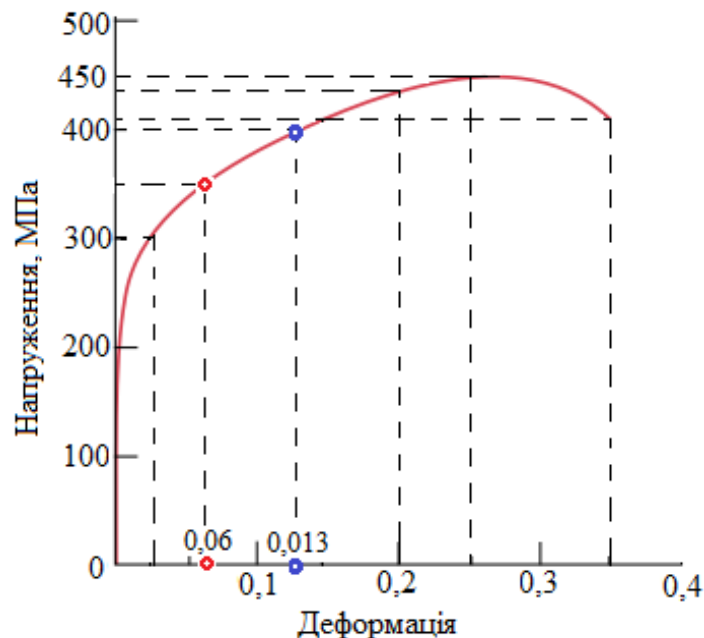
$$E = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \varepsilon} = \frac{250 - 200}{0,125 - 0,05} = \frac{50}{0,075} = 667 \text{ МПа}$$

Відповідь:

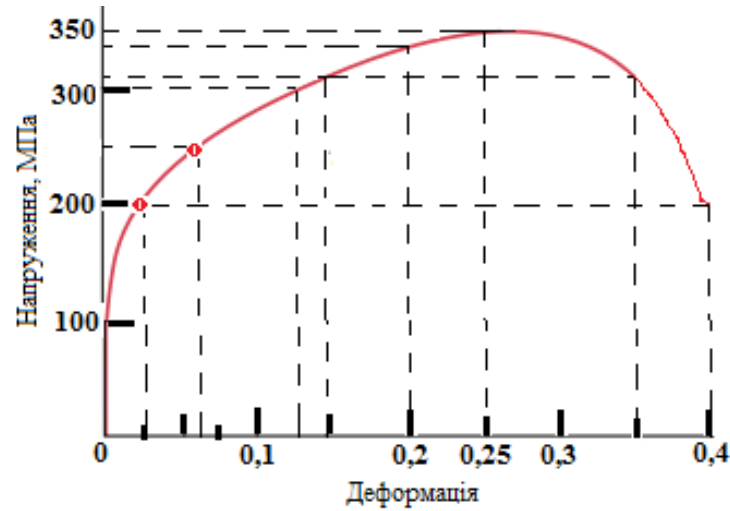
- A. 39584 Н
- B. 0,333=33,3%
- C. 9 мм
- D. 60 мм
- E. 667 МПа

ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОГО ОПРАЦЮВАННЯ

1. По умовній діаграмі напружено-деформованого стану латунного циліндричного зразка визначити:
- Максимальне навантаження, яке може витримати зразком з початковим діаметром 12 мм;
 - Абсолютну деформацію зразка з початковою довжиною 120 мм при напруженні 350 МПа;
 - Початкову довжину зразка, якщо безпосередньо перед розривом його довжина дорівнює 270 мм;
 - Відносне звуження зразка при напруженні 400 МПа за умови, що об'єм зразка не змінюється;
 - У скільки разів збільшується довжина зразка матеріалу безпосередньо перед розривом.

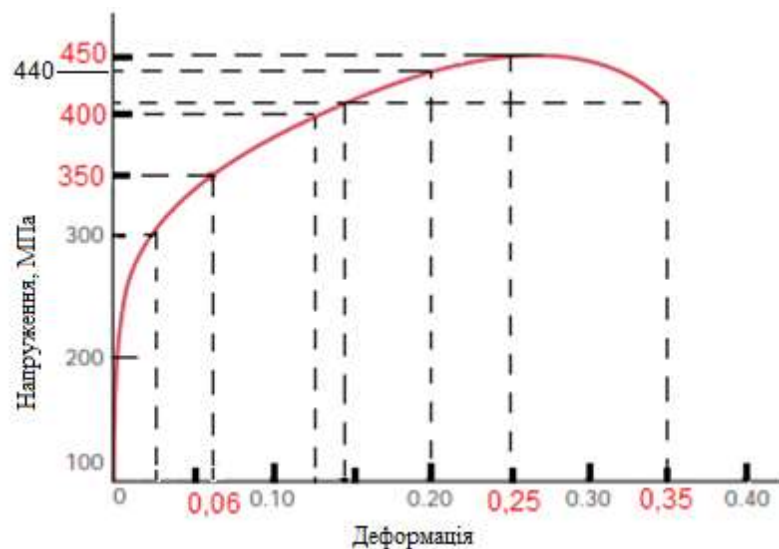


2. По умовній діаграмі напружено-деформованого стану металевого циліндричного зразка визначити:
- Максимальне навантаження, яке може витримати зразком з початковим діаметром 10 мм;
 - Відносне звуження зразка на момент його розриву;
 - Діаметр зразка в місці розриву при початковому діаметрі 10 мм;
 - У скільки разів збільшується довжина зразка матеріалу безпосередньо перед розривом;
 - Абсолютну деформацію зразка з початковою довжиною 50 мм при відносній деформації 0,05.

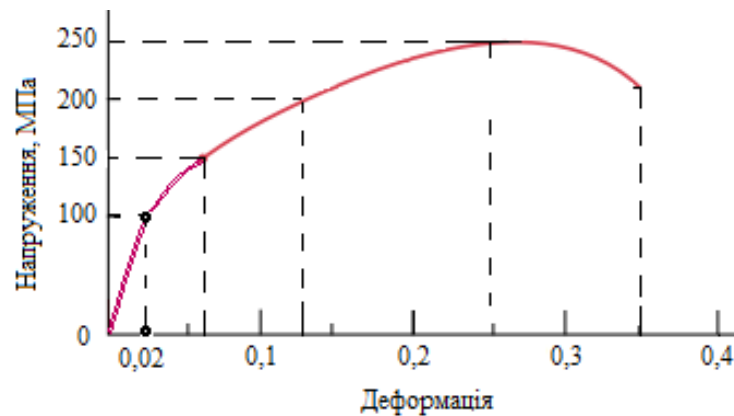


3. По умовній діаграмі напружено-деформованого стану сталевого циліндричного зразка визначити:

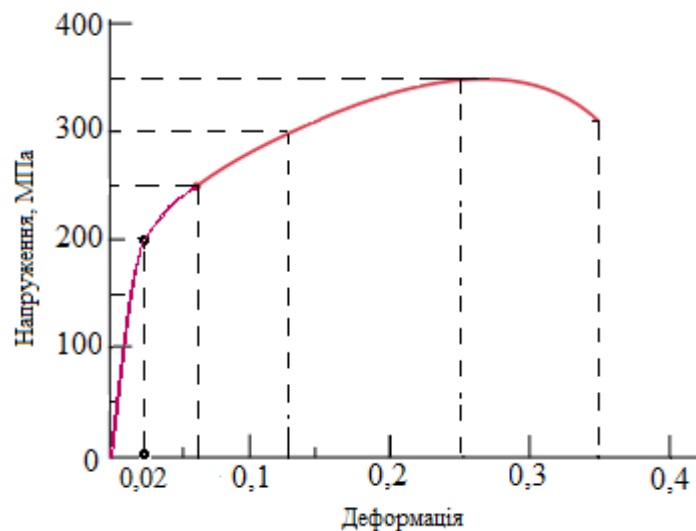
- A. Абсолютну деформацію зразка з початковою довжиною 140 мм при напруженні 350 МПа;
- B. Максимальне навантаження, яке може витримати зразком з початковим діаметром 14 мм;
- C. Відносне звуження зразка при напруженні 450 МПа за умови, що об'єм зразка не змінюється;
- D. Поперечну деформацію зразка при поздовжній деформації 6% і коефіцієнті Пуассона 0,35;
- E. Діаметр зразка з початковим діаметром 14 мм безпосередньо перед розривом.



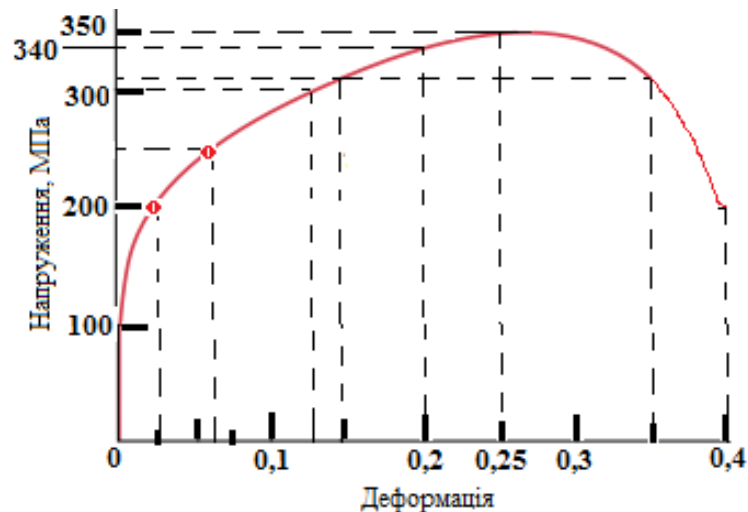
4. По умовній діаграмі напружено-деформованого стану сталевого циліндричного зразка визначити:
- A. Модуль пружності першого роду;
 - B. Щільність пружної енергії зразка при деформації 0,02;
 - C. Максимальне навантаження, яке може витримати зразком з початковим діаметром 16 мм;
 - D. Відносне звуження зразка на момент його розриву;
 - E. Жорсткість зразка з початковим діаметром 16 мм і початковою довжиною 160 мм.



5. По умовній діаграмі напружено-деформованого стану сталевого циліндричного зразка визначити:
- A. Щільність пружної енергії зразка при напруженні 100 МПа;
 - B. Відносне звуження зразка на момент утворення шийки;
 - C. Діаметр зразка в місці розриву при початковому діаметрі 8 мм;
 - D. Довжину зразка з початковою довжиною 80 мм безпосередньо перед розривом;
 - E. Поперечну деформацію зразка при поздовжній деформації 2% і коефіцієнті Пуассона 0,25.



6. По умовній діаграмі напружено-деформованого стану латунного циліндричного зразка визначити:
- Усереднений модуль пружності в інтервалі деформацій 0,2 і 0,25;
 - У скільки разів збільшується довжина зразка матеріалу безпосередньо перед розривом;
 - Початкову довжину зразка, якщо безпосередньо перед розривом його довжина дорівнює 280 мм;
 - Абсолютну деформацію зразка з початковою довжиною 200 мм при напруженні 350 МПа;
 - Відносне звуження зразка при деформації 0,25 за умови, що об'єм зразка не змінюється.



КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

- Що таке деформація? Які види деформації бувають?
- Які види механічних випробувань існують?
- Чому випробування на розтяг застосовуються найбільш широко у порівнянні з іншими методами випробувань?
- Охарактеризуйте методи випробувань на розтяг та характеристики, що визначаються при цих випробуваннях.
- Виведіть залежність між відносним звуженням і відносною деформацією в процесі пластичної деформації.

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 6

ПЛАСТИЧНА ДЕФОРМАЦІЯ І МЕХАНІЗМИ ЗМІЦНЕННЯ

Мета роботи: ознайомитися з основними механізмами пластичної деформації металів; навчитися визначати фактор Шміда; напруження зсуву τ , що виникає в системі ковзання; напруження розтягу при певному значенні напруження зсуву.

СТИСЛІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Під дією напружень, менших за межу пружності, в металах виникає пружна деформація. Якщо навантажити метал вище межі пружності, виникає пластична залишкова деформація. При розвантаженні первісна форма та розміри зразка не відновлюються, тому що відбувається незворотній зсув одних частин кристала відносно інших.

При холодній пластичній деформації монокристалів в різних кристалографічних напрямках, отримують різні криві напруження-деформація. Наприклад, межа текучості кристалів цинку, в залежності від орієнтації осі розтягу, може змінюватися в 6 і навіть більше, а максимальне видовження змінюється від декількох відсотків до декількох сотень відсотків. Результати випробувань на розтяг відображають зміни пластичних властивостей кристалів в залежності від кристалографічного напрямку.

Основним механізмом пластичної деформації є ковзання, яке відбувається під дією зсувних напружень вздовж щільноупакованих атомних площин і напрямків, коли зсувне напруження перевищує критичне.

В реальних кристалах зсувні напруження, що необхідні для зсуву, в 100...1000 разів менші за розрахункові (теоретичні), що зумовлено присутністю великої кількості дислокацій, які суттєво полегшують зсув.

Дислокації – лінійні дефекти кристалічної будови, що виникають при кристалізації і завжди існують у кристалах. Їх наявність значно спотворює

кристалічну гратку та знижує рівень зсувних напружень, необхідних для зсуву, за рахунок естафетного механізму розриву та відновлення міжатомних зв'язків. При великій кількості дислокацій можливе їх перетинання, утворення порогів, що зменшує їх рухливість та потребує для їх переміщення більших напружень. Кількісною характеристикою дислокацій є щільність – сумарна довжина усіх дислокаційних ліній, що містяться в одиниці об'єму.

Ковзання дислокацій відбувається по площинах ковзання в певних напрямках ковзання. Площина ковзання – це найбільш щільноупакована атомами площина кристалічної гратки (атомна площина з найбільшою ретикулярною / площинною щільністю). Напрямок ковзання – це напрямок, в якому відстані між атомами мінімальні (напрямок з найбільшою лінійною щільністю). Площина і напрямок ковзання, що лежить в цій площині, утворюють систему ковзання.

В металах з гратками:

- ОЦК (α -залізо, хром, вольфрам, молібден тощо) – система ковзання $\{110\}\langle 111\rangle$;
- ГЦК (γ -залізо, нікель, мідь, алюміній тощо) – система ковзання $\{111\}\langle 110\rangle$;
- ГЦП (магній, цинк, α -титан тощо) – система ковзання $\{0001\}\langle 1120\rangle$.

Метали з ГЦП граткою мають найменшу кількість систем ковзання, тому вони менш пластичні і важче піддаються деформації, ніж метали з ОЦК та ГЦК гратками.

Розглянемо кристал (рис. 6.1) з площею поперечного перерізу A , який піддається розтягу силою F , що створює напруження розтягу $\sigma = F / A$. Систему ковзання кристала утворює площина ковзання $A_s = A / \cos\phi$ і напрямок ковзання m , що лежить у площині A_s . Кут між напрямком розтягу та нормаллю n до площини ковзання позначений ϕ , кут між напрямком розтягу та напрямком m позначений λ .

Розкладемо силу F на дві складові: нормальну F_n до площини ковзання і дотичну F_s , що лежить у площині ковзання:

$$F_n = F \cos \phi$$

$$F_s = F \cos \lambda$$

Нормальне напруження на площині ковзання дорівнює:

$$\sigma_n = \frac{F_n}{A_s} = \frac{F \cos \phi}{\frac{A}{\cos \phi}} = \frac{F}{A} \cos^2 \phi = \sigma \cos^2 \phi$$

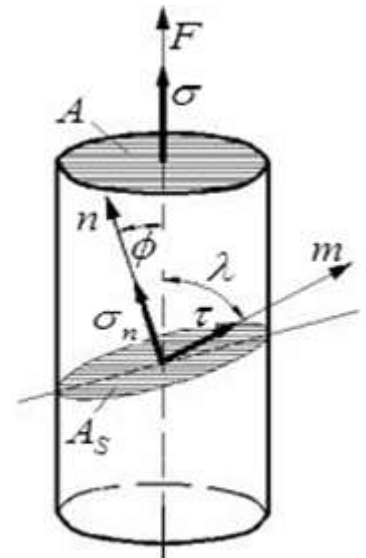


Рис. 6.1

Напруження зсуву τ на площині ковзання у заданому напрямку m визначимо з рівняння:

$$\tau = \frac{F_s}{A_s} = \frac{F \cos \lambda}{\frac{A}{\cos \phi}} = \frac{F}{A} \cos \lambda \cos \phi = \sigma \cos \lambda \cos \phi \quad (6.1)$$

Ковзання в заданій системі починається тоді, коли напруження розтягу σ досягає межі текучості σ_T , при цьому, зсувне напруження досягає критичного значення. Тобто, при $\sigma = \sigma_T$ рівняння (6.1) набуває вигляду:

$$\tau_{KP} = \sigma_T \cos \lambda \cos \phi \quad (6.2)$$

Формула (6.2) відображає закон критичних зсувних напружень (закон Шміда), який формулюється наступним чином: Кристали певного металу починають пластично деформуватися, коли зсувне напруження в площині ковзання у напрямку ковзання досягає певної критичної величини.

Величина $(\cos \lambda \cos \phi)$ називається фактором кристалографічної орієнтації, або фактором Шміда (Schmid Factor). Активна система ковзання має максимальний фактор Шміда. Залежність напруження зсуву τ від кутів ϕ і λ представлено на рис. 6.2

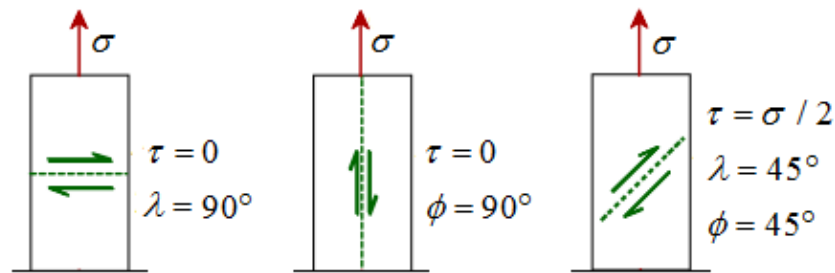


Рис. 6.2 – Залежність напруження зсуву τ від кутів ϕ і λ

ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ЗАВДАНЬ

1. Напруження розтягу $\sigma = 5$ кПа діє вздовж напрямку $[432]$ кубического кристала. Визначити напруження зсуву τ , що виникає в системі ковзання $(11\bar{1})[011]$.

Розв'язання

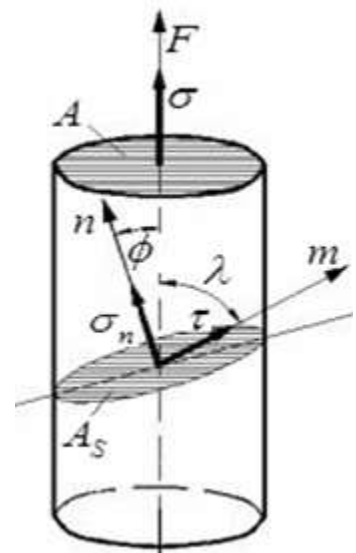
Для визначення напруження зсуву τ , необхідно розрахувати фактор Шміда ($\cos \lambda \cos \phi$).

Косинус кута λ між напрямком розтягу $[432]$ і напрямком ковзання $[011]$ знайдемо за формулою (2.3) практичного заняття № 2:

$$\cos \lambda = \frac{h_1 h_2 + k_1 k_2 + l_1 l_2}{\sqrt{h_1^2 + k_1^2 + l_1^2} \cdot \sqrt{h_2^2 + k_2^2 + l_2^2}} = \frac{4 \cdot 0 + 3 \cdot 1 + 2 \cdot 1}{\sqrt{16 + 9 + 4} \cdot \sqrt{2}} = \frac{5}{\sqrt{29} \cdot 2}$$

Косинус кута ϕ між напрямком розтягу $[432]$ і нормаллю до площини ковзання $(11\bar{1})$ знайдемо за формулою (2.3) практичного заняття № 2, беручи до уваги твердження (2.1), що індекси нормалі до площини збігаються з індексами самої площини:

$$\cos \phi = \frac{h_1 h_2 + k_1 k_2 + l_1 l_2}{\sqrt{h_1^2 + k_1^2 + l_1^2} \cdot \sqrt{h_2^2 + k_2^2 + l_2^2}} = \frac{4 \cdot 1 + 3 \cdot 1 + 2 \cdot (-1)}{\sqrt{16 + 9 + 4} \cdot \sqrt{3}} = \frac{5}{\sqrt{29} \cdot 3}$$

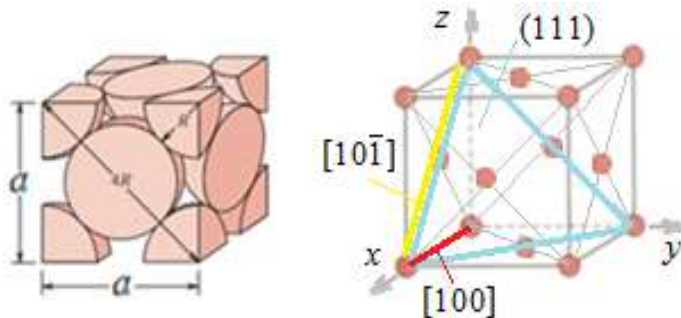


Напруження зсуву τ знайдемо за формулою (6.1):

$$\tau = \sigma \cos \varphi \cos \lambda = 5 \cdot \frac{5}{\sqrt{29 \cdot 3}} \cdot \frac{5}{\sqrt{29 \cdot 2}} = 1,76 \text{ кПа}$$

Відповідь: 1,76 кПа

2. Визначити величину фактора Шміда для системи ковзання $(111)[10\bar{1}]$ монокристала ГЦК і напрямку навантаження $[100]$.



Розв'язання

Косинус кута між напрямком навантаження $[100]$ і напрямком ковзання $[10\bar{1}]$ знайдемо за формулою (2.3):

$$\cos \lambda = \frac{h_1 h_2 + k_1 k_2 + l_1 l_2}{\sqrt{h_1^2 + k_1^2 + l_1^2} \cdot \sqrt{h_2^2 + k_2^2 + l_2^2}} = \frac{1 \cdot 1 + 0 \cdot 1 + 0 \cdot 1}{\sqrt{1} \cdot \sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

Косинус кута між напрямком навантаження $[100]$ і нормаллю $[111]$ до площини ковзання знайдемо за формулою (2.3), пам'ятаючи, що індекси нормалі до площини збігаються з індексами самої площини:

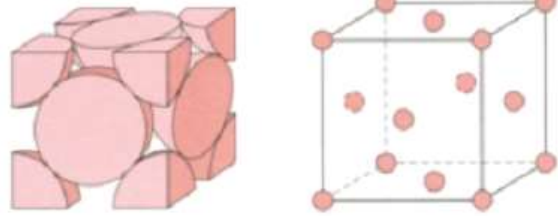
$$\cos \varphi = \frac{h_1 h_2 + k_1 k_2 + l_1 l_2}{\sqrt{h_1^2 + k_1^2 + l_1^2} \cdot \sqrt{h_2^2 + k_2^2 + l_2^2}} = \frac{1 \cdot 1 + 0 \cdot 1 + 0 \cdot 1}{\sqrt{1} \cdot \sqrt{3}} = \frac{1}{\sqrt{3}}$$

Величина фактора Шміда дорівнює:

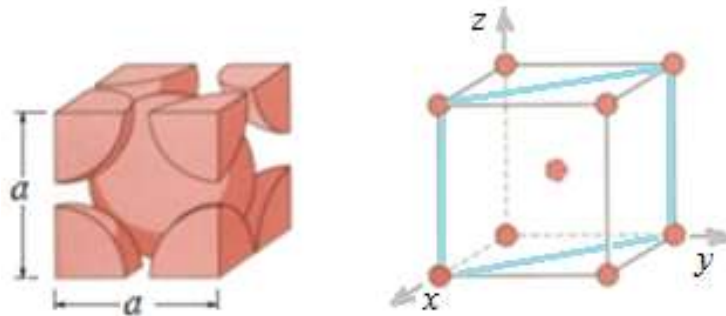
$$\cos \varphi \cos \lambda = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,408$$

Відповідь: $\cos \varphi \cos \lambda = 0,408$

ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОГО ОПРАЦЮВАННЯ

<p>1. Визначити величину фактора Шміда для системи ковзання $(111)[\bar{1}10]$ монокристала ГЦК і напрямку навантаження $[110]$.</p>	
<p>2. Визначити величину фактора Шміда для системи ковзання $(111)[\bar{1}10]$ монокристала ГЦК і напрямку навантаження $[120]$.</p>	
<p>3. Визначити напруження розтягу, що діє вздовж напрямку $[1\bar{1}0]$ кристала, якщо напруження зсуву в системі ковзання $(1\bar{1}\bar{1})[0\bar{1}1]$ дорівнює $\tau = 6 \text{ МПа}$.</p>	
<p>4. Монокристал із срібла, орієнтований таким чином, що напруження розтягу діє вздовж напрямку $[001]$. Якщо ковзання відбувається в системі $(111)[\bar{1}01]$ і починається при напруженні розтягу 1,1 МПа, розрахувати допустиме напруження зсуву.</p>	
<p>5. Одиночний кристал металу з кристалічною структурою ГЦК, орієнтований таким чином, що напруження розтягу діє паралельно напрямку $[110]$. Якщо допустиме зсувне напруження для цього матеріалу становить 1,75 МПа, визначити напруження розтягу, достатнього для ініціювання ковзання на площині (111) у напрямках: $[1\bar{1}0]$, $[10\bar{1}]$, $[01\bar{1}]$.</p>	

6. Монокристал металу з ОЦК ґраткою орієнтований таким чином, що напруження розтягу діє вздовж напрямку $[010]$.
- Розрахувати напруження зсуву в системі ковзання $(110)[\bar{1}11]$ при напруженні розтягу 52 МПа.
 - Якщо ковзання відбувається на площині (110) в напрямку $[\bar{1}11]$ і допустиме напруження зсуву становить 30 МПа, визначити напруження розтягу, що необхідне для ініціювання текучості.



КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Поясніть різницю між пружною та пластичною деформацією?
2. Охарактеризуйте основні механізми пластичної деформації та надайте схематичний ескіз кожного.
3. Дайте визначення дислокації та назвіть найпростіші види дислокацій.
4. Поясніть вплив щільності дислокацій на міцність металу і дайте роз'яснення, як визначають щільність дислокацій?
5. Сформулюйте закон критичних зсувних напружень.
6. Вкажіть системи ковзання для металів з ОЦК, ГЦК та ГЦП ґратками.
7. За яких умов, не відбувається рух дислокацій у площині ковзання.

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 7

КІЛЬКІСНИЙ СКЛАД МЕТАЛЕВИХ СПЛАВІВ

Мета роботи: ознайомитися із загальними характеристиками розчинів; навчитися визначити склад сплавів у масових, молярних і об'ємних частках та проводити відповідні розрахунки.

СТИСЛІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Питання теорії розчинів займає важливе місце в металознавстві. Утворення розчинів може суттєво впливати на напрямок та умови проходження реакцій. Фізико-хімічні та хімічні процеси, що відбуваються в процесі виробництва чавуну, сталі, кольорових металів та сплавів – це реакції у високотемпературних розчинах.

Розчин – це фізично однорідна система, що складається з двох або більшої кількості компонентів, вміст яких може змінюватися у широких межах.

Розчин складається з розчинника та розчинених речовин. Розчинником вважають той компонент, що міститься у надлишку або зберігає свій агрегатний стан після утворення розчину.

Розчини займають проміжне положення між хімічними сполуками та механічними сумішами. Від механічних сумішей вони відрізняються більшою однорідністю та існуванням сил хімічної взаємодії між частками компонентів розчину. Наявність такої взаємодії підтверджується виділенням або поглинанням тепла при утворенні розчинів, а також зміною об'єму розчину порівняно до суми об'ємів вихідних компонентів. На відміну від справжніх хімічних сполук сили взаємодії між молекулами та іонами у розчинах слабкіші, а сполуки, що існують у розчинах, не мають постійного складу.

Склад розчину характеризують відносним вмістом у ньому розчиненої речовини. Прийнято виражати склад розчинів через частки або концентрації.

Масова частка (масовий відсоток) – це відношення маси розчиненої речовини до загальної маси розчину

$$\omega_k = \frac{m_k}{\sum_{k=1}^n m_k} \quad (7.1)$$

Об'ємна частка – це відношення об'єму розчиненої речовини до загального об'єму розчину:

$$\varphi_k = \frac{V_k}{\sum_{k=1}^n V_k} \quad (7.2)$$

Молярна частка (молярний відсоток) – це відношення кількості молів розчиненої речовини до загальної кількості молів у системі, тобто до суми молів розчинника і всіх розчинених у ньому речовин. Для бінарного розчину:

$$\chi_k = \frac{n_k}{\sum_{k=1}^n n_k} \quad (7.3)$$

Молярна концентрація – це кількість молів розчиненої речовини в 1 л розчину:

$$C_x = \frac{n}{V} = \frac{m}{M V} \quad (7.4)$$

де n – кількість молів розчиненої речовини;

m – маса розчиненої речовини (г) в 1 л розчину;

M – молярна маса розчиненої речовини (г/моль);

V – об'єм розчину в літрах.

Масова концентрація (кг/м³, г/см³) – відношення маси розчиненої речовини до об'єму розчину V :

$$C = \frac{m_k}{\sum_{k=1}^n V_k} \quad (7.5)$$

ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ЗАВДАНЬ

1. Сплав містить 105 кг заліза, 0,2 кг вуглецю і 1 кг хрому. Визначити склад системи у масових частках (%).

Розв'язання

Склад системи у масових частках знайдемо за формулою (7.1):

$$\omega_k = \frac{m_k}{\sum_{k=1}^n m_k} \cdot 100$$

$$\omega_{Fe} = \frac{105}{105 + 0,2 + 1} \cdot 100 = 98,87\%$$

$$\omega_C = \frac{0,2}{105 + 0,2 + 1} \cdot 100 = 0,19\%$$

$$\omega_{Cr} = \frac{1}{105 + 0,2 + 1} \cdot 100 = 0,94\%$$

Відповідь: Склад системи: заліза 98,8%, вуглецю 0,19%, хрому 0,94%.

2. Склад сплаву у молярних частках складає 6 % Pb і 94 % Sn. Який склад сплаву у масових частках (%). Молярні маси речовин відповідно дорівнюють $M_{Pb} = 207,2$ г/моль, $M_{Sn} = 118,71$ г/моль.

Розв'язання

Встановимо залежність між масовою і молярною частками компонентів у двокомпонентному сплаві:

$$\omega_1 = \frac{m_1}{m_1 + m_2} = \frac{n_1 M_1}{n_1 M_1 + n_2 M_2} = \frac{\frac{n_1 M_1}{n_1 + n_2}}{\frac{n_1 M_1}{n_1 + n_2} + \frac{n_2 M_2}{n_1 + n_2}} = \frac{\chi_1 M_1}{\chi_1 M_1 + \chi_2 M_2}$$

$$\omega_2 = 1 - \omega_1$$

де ω_1 , χ_1 , M_1 - масова частка, молярна частка і молярна маса свинцю Pb.

ω_2 , χ_2 , M_2 - масова частка, молярна частка і молярна маса олова Sn.

Масова частка свинцю Pb дорівнює:

$$\omega_{Pb} = \frac{\chi_{Pb} M_{Pb}}{\chi_{Pb} M_{Pb} + \chi_{Sn} M_{Sn}} = \frac{6 \cdot 207,2}{6 \cdot 207,2 + 94 \cdot 118,71} = 0,1 = 10\%$$

Масова частка олова Sn складає:

$$\omega_{Sn} = 100\% - \omega_{Pb} = 100 - 10 = 90\%$$

Відповідь:

Склад сплаву Pb - Sn у масових частках: свинцю 10%, олова 90 %.

ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОГО ОПРАЦЮВАННЯ

1. Склад сплаву у масових частках складає 92,5 % Ag і 7,5 % Cu. Який склад сплаву у молярних частках (%). Молярні (атомні) маси речовин дорівнюють $M_{Ag} = 107,87$ г/моль, $M_{Cu} = 63,55$ г/моль.
2. Сплав містить 65 г Pb і 98 г Sn. Який склад сплаву в молярних частках? $M_{Pb} = 207,2$ г/моль, $M_{Sn} = 118,71$ г/моль.
3. Густина двох чистих металів А і В відповідно дорівнює 19,3 і 10,5 г/см³. Визначити масову частку металу А при його об'ємній частці 30 %.
4. Густина Sn і Pb відповідно дорівнює 7,24 і 11,23 г/см³. Визначити концентрацію олова у сплаві Sn-Pb і середню густина сплаву, при яких масова частка олова перевищує масову частку свинцю на 20 %.

<p>5. Ніобій утворює твердий розчин заміщення з ванадієм. Визначити масову частку ніобію, який необхідно додати до ванадію, щоб одержати сплав, який містить $1,55 \times 10^{22}$ атомів Nb / см^3. Густина чистого ніобію та ванадію відповідно становить 8,57 і 6,10 $\text{г}/\text{см}^3$.</p>
<p>6. З метою зменшення ваги літаків та підвищення їх ефективності, був розроблений алюмінієво-літєвий сплав з густиною 2,55 $\text{г}/\text{см}^3$. Визначити, при якій масовій частці літію це можливо? Густина чистих алюмінію і літію відповідно дорівнює 2,71 і 0,534 $\text{г}/\text{см}^3$.</p>
<p>7. Золото утворює твердий розчин заміщення зі сріблом. Визначити кількість атомів золота в кубічному сантиметрі сплаву Ag-Au, який містить 10 мас% Au і 90 мас% Ag. Густина чистого золота і срібла дорівнює 19,32 і 10,49 $\text{г}/\text{см}^3$, відповідно. Молярна маса золота 197,0 $\text{г}/\text{моль}$.</p>

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Дайте визначення поняттям: сплав, система, компонент, фаза.
2. Дайте характеристику механічним сумішам, хімічним сполукам, рідким і твердим розчинам, проміжним фазам.
3. Чим відрізняються між собою тверді розчини заміщення і проникнення?

4. Вивести залежності:
$$C_1 = \frac{\omega_1}{\frac{\omega_1}{\rho_1} + \frac{\omega_2}{\rho_2}}; \quad C_2 = \frac{\omega_2}{\frac{\omega_1}{\rho_1} + \frac{\omega_2}{\rho_2}},$$

де C_1, ω_1, ρ_1 і C_2, ω_2, ρ_2 – відповідно масова концентрація, масова частка і густина компонентів 1 і 2 бінарного твердого розчину.

5. Вивести залежності:
$$\omega_1 = \frac{\rho_1 \varphi_1}{\rho_1 \varphi_1 + \rho_2 \varphi_2}; \quad \omega_2 = \frac{\rho_2 \varphi_2}{\rho_1 \varphi_1 + \rho_2 \varphi_2}$$

де $\omega_1, \varphi_1, \rho_1$ і $\omega_2, \varphi_2, \rho_2$ – відповідно масова частка, об'ємна частка і густина компонентів 1 і 2 бінарного твердого розчину.

6. Вивести рівняння:
$$\rho_{CEP} = \frac{1}{\frac{\omega_1}{\rho_1} + \frac{\omega_2}{\rho_2}},$$

де ρ_{CEP} – середня густина бінарного твердого розчину;

ω_1, ρ_1 і ω_2, ρ_2 – відповідно масова частка і густина компонентів 1 і 2.

7. Вивести рівняння:
$$M_{CEP} = \frac{1}{\frac{\omega_1}{M_1} + \frac{\omega_2}{M_2}},$$

де M_{CEP} – середня молярна маса бінарного твердого розчину;

ω_1, M_1 і ω_2, M_2 – масова частка і молярна маса компонентів 1 і 2.

8. Вивести рівняння:
$$M_{CEP} = \chi_1 M_1 + \chi_2 M_2,$$

де M_{CEP} – середня молярна маса бінарного твердого розчину;

χ_1, M_1 і χ_2, M_2 – молярна частка і молярна маса компонентів 1 і 2.

9. Вивести залежності:
$$\chi_1 = \frac{1}{1 + \frac{M_1 \omega_2}{M_2 \omega_1}}; \quad \chi_2 = \frac{1}{1 + \frac{M_2 \omega_1}{M_1 \omega_2}},$$

де χ_1, M_1, ω_1 і χ_2, M_2, ω_2 – відповідно молярна частка і молярна маса і масова частка компонентів 1 і 2 бінарного твердого розчину.

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 8

ДІАГРАМА СТАНУ СИСТЕМИ, КОМПОНЕНТИ ЯКОЇ УТВОРЮЮТЬ НЕПЕРЕРВНИЙ РЯД РІДКИХ І ТВЕРДИХ РОЗЧИНІВ

Мета роботи: навчитися визначати склад і кількісне співвідношення фаз у будь-якій точці двофазної області діаграми; аналізувати діаграми стану систем, компоненти яких утворюють неперервний ряд рідких і твердих розчинів на прикладі сплаву вісмут-стибій.

СТИСЛІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Діаграми стану сплавів графічно показують залежність стану сплавів даної системи від концентрації (хімічного складу) та температури. Вони дозволяють визначати не лише температури кристалізації та плавлення, а й які саме перетворення можуть відбуватись у сплавах за різних температур, тобто характеризують стан сплаву.

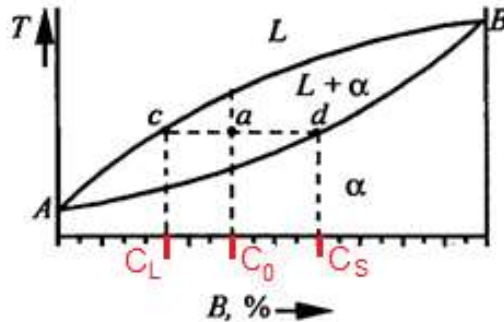
Перше правило відрізків

Щоб визначити склад фаз, тобто концентрації компонентів у фазах, які утворюють даний сплав, необхідно через задану точку (фігуративну точку), що характеризує стан сплаву і лежить у двофазній області діаграми стану, провести коноду – горизонтальний відрізок, що спирається своїми кінцями на фазові границі. Проекції кінців коноди на вісь концентрацій покажуть склад кожної з фаз, що знаходяться в рівновазі при заданій температурі.

Друге правило відрізків

Для знаходження кількісного співвідношення фаз (або відносної кількості фаз, або масових часток) необхідно через задану точку (фігуративну точку), що характеризує стан сплаву і лежить у двофазній області діаграми стану, провести коноду. Відношення довжини відрізка, що знаходиться між фігуративною точкою і одним із кінців коноди, до довжини всієї коноди

кількісно дорівнює відносній кількості фази, на границю з якої спирається інший кінець коноди. Друге правило відрізків можна сформулювати і так: Для того, щоб визначити кількісне співвідношення фаз W_L і W_S , через задану точку проводять горизонтальну лінію. Відрізки цієї лінії між заданою точкою і точками, які визначають склад фаз, обернено пропорційні кількості фаз.



Масова частка рідкої фази:

$$W_L = \frac{ad}{cd} = \frac{C_S - C_0}{C_S - C_L} \quad (8.1)$$

Масова частка твердої α -фази:

$$W_S = \frac{ac}{cd} = \frac{C_0 - C_L}{C_S - C_L} \quad (8.2)$$

$$W_L + W_S = 1 \quad (8.3)$$

Концентрація/маса компонента (або А, або В), який присутній в обох фазах, повинна дорівнювати концентрації/масі цього компонента в загальному сплаві:

$$W_L C_L + W_S C_S = C_0 \quad (8.4)$$

Правила відрізків дозволяють визначити концентрацію компонентів у фазах та відносну кількість фаз (масову частку W_L та W_S) при різних температурах у двофазовій області діаграми.

ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ЗАВДАНЬ

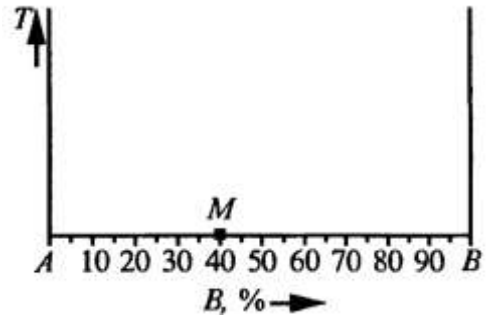
1. Яка концентрація компонента А в точці М?

Розв'язання

Концентрація компонента А в точці дорівнює:

$$100\% - 40\% = 60\%$$

Відповідь: 60%

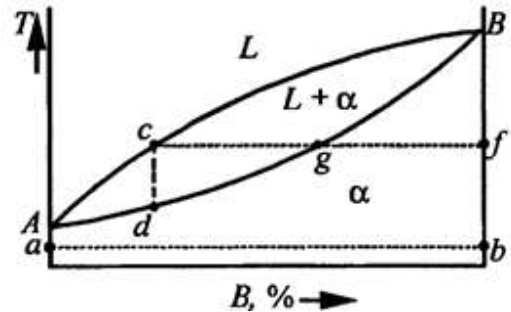


2. Який з відрізків, нанесених на діаграму станів, є конодою?
ab; cd; cf; cg; gf.

Розв'язання

Конодою має бути горизонтальний відрізок, що лежить у двофазній області і спирається своїми кінцями на фазові границі. Цим вимогам відповідає відрізок cg.

Відповідь: Відрізок cg – конода

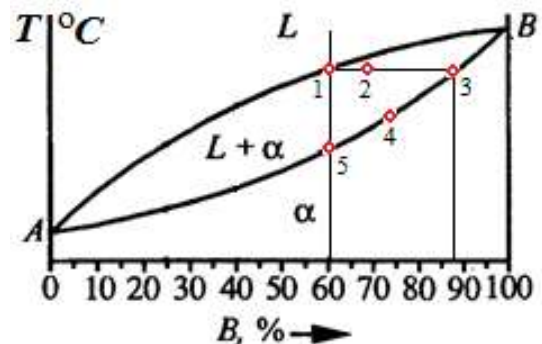


3. Як при кристалізації змінюється хімічний склад твердої фази сплаву, що містить 60 % компонента В?

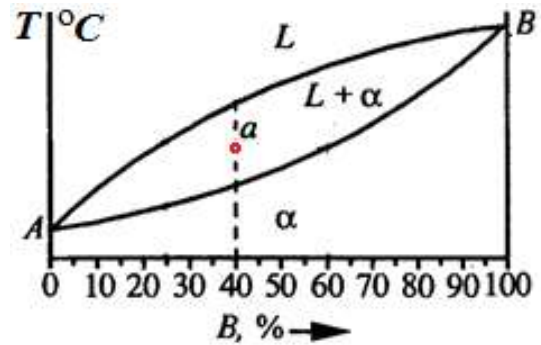
Розв'язання

На лінії ліквідус в точці 1 починається процес кристалізації. В процесі кристалізації розплаву масова частка твердої фази від т. 1 до т. 3 зростає від 0 до 100 %. Хімічний склад твердої фази в процесі охолодження змінюється вздовж лінії солідус від т. 3 до т. 5, тобто від 88% В до 60% В.

Відповідь: Хімічний склад твердої фази змінюється від 88% В до 60% В.



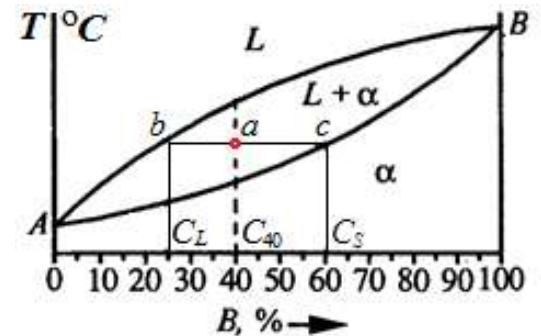
4. Сплав містить 40% компонента В. Визначити хімічний склад фаз сплаву при температурі, що відповідає точці a , та масову частку кожної фази.



Розв'язання

Через точку a проводимо коноду. З точок b і c опускаємо перпендикуляри на вісь концентрацій.

Хімічний склад *рідкої* фази сплаву 40% В при температурі, що відповідає точці a :



$$C_L = 25 \% B$$

Хімічний склад *твердої* фази сплаву 40% В при температурі, що відповідає точці a :

$$C_S = 60 \% B$$

Масова частка *рідкої* фази:

$$W_L = \frac{ac}{bc} = \frac{C_S - C_{40}}{C_S - C_L} = \frac{60 - 40}{60 - 25} = \frac{20}{35} = 0,571 = 57,1\%$$

Масова частка *твердої* фази:

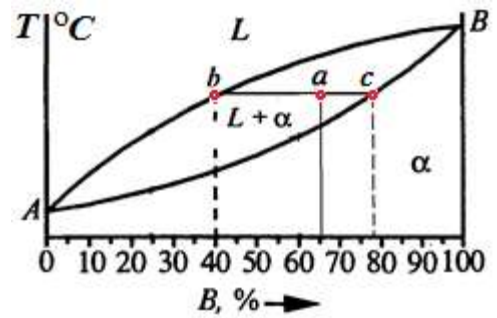
$$W_S = \frac{ab}{bc} = \frac{C_{40} - C_L}{C_S - C_L} = \frac{40 - 25}{60 - 25} = \frac{15}{35} = 0,429 = 42,9\%$$

Відповідь:

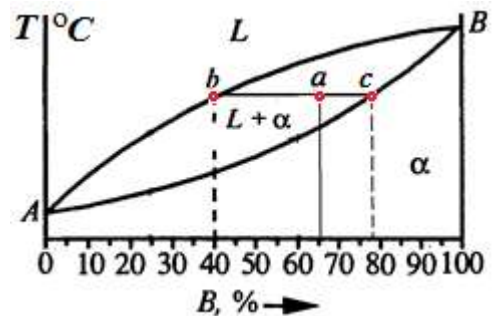
$$C_L = 25 \% B; C_S = 60 \% B; W_L = 57,1\%; W_S = 42,9\%$$

ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОГО ОПРАЦЮВАННЯ

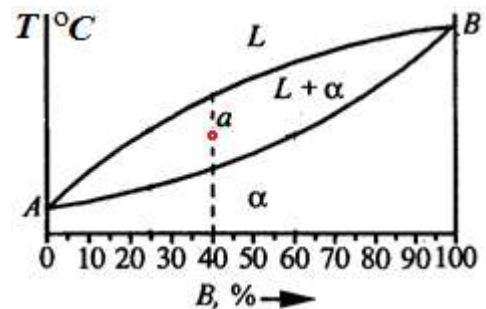
1. Конода розділена на два відрізки точкою, що показує склад сплаву. Відрізок прилеглий до лінії ліквідусу удвічі довше. Який відсоток *рідкої* фази у сплаві?



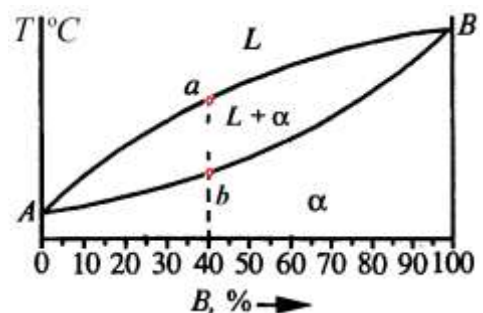
2. Конода розділена на два відрізки точкою *a*, що показує склад сплаву. Відрізок прилеглий до лінії ліквідусу удвічі довше. Який відсоток *твердої* фази у сплаві?



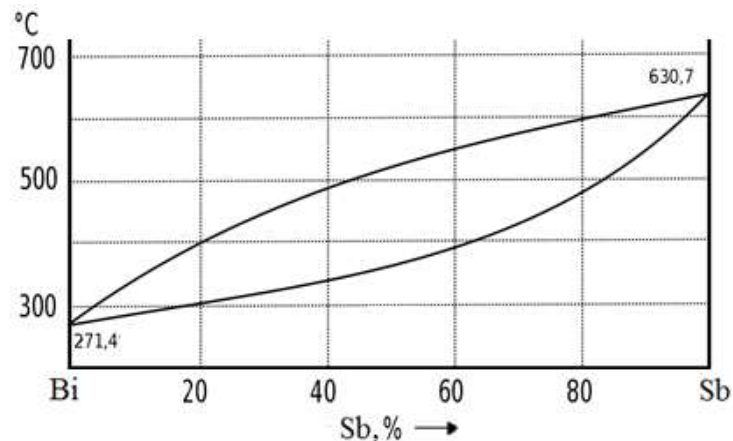
3. Визначити масову частку рідкого розчину W_L і твердого розчину W_S (α -фази) у сплаві з 40% компоненту B при температурі, що відповідає точці *a*.



4. Визначити хімічний склад твердої та рідкої фаз для точок *a* і *b* діаграми.



5. Опишіть перетворення по представленій діаграмі системи вісмут-стибій. Укажіть структурні складові в усіх областях діаграми. Поясніть характер зміни властивостей сплавів за допомогою правила Курнакова. Визначте хімічний склад сплаву 70% Sb при температурах 500 °C і 450 °C та відповідне кількісне співвідношення фаз.



КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. По якій лінії змінюється склад рідкої фази в процесі кристалізації?
2. За яким правилом визначається склад фаз?
3. В яких координатах будують криві охолодження сплавів?
4. Як називається перехід металу з рідкого або пароподібного стану у тверде з утворенням кристалічної структури?
5. Як називається лінія діаграми стану на якій лежать точки, що відповідають початку рівноважної кристалізації сплаву?
6. Як називається лінія діаграми стану на якій лежать точки, що відповідають кінцю рівноважної кристалізації сплаву?
7. Що означає проекція точки перетинання коноди з лінією солідусу на вісь концентрацій?
8. Що означає проекція точки перетинання коноди з лінією ліквідусу на вісь концентрацій?

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 9

ДІАГРАМА СТАНУ СИСТЕМИ З ВІДСУТНІСТЮ ВЗАЄМНОЇ РОЗЧИННОСТІ КОМПОНЕНТІВ У ТВЕРДОМУ СТАНІ

Мета роботи: навчитися аналізувати процеси, що відбуваються у сплавах, компоненти яких необмежено розчинні у рідкому стані та практично нерозчинні у твердому.

СТИСЛІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Діаграма стану сплавів, компоненти яких необмежено розчинні у рідкому стані та практично нерозчинні у твердому стані представлено на рисунку 9.1. На цій діаграмі лінії мають такі назви та фізичний зміст.

Лінія A_1CB_1 – лінія ліквідус – геометричне місце точок (температур) початку кристалізації сплавів даної системи. При цьому, по лінії A_1C починається кристалізація чистого компонента А, а по лінії CB_1 – чистого компонента В.

Лінія DCF – лінія солідус – геометричне місце точок кінця кристалізації. Крім того, лінія DCF має назву лінії *евтектичного перетворення*, суть якого полягає в тому, що рідка фаза, склад якої відповідає точці С діаграми, кристалізується з одночасним утворенням кристалів компонентів А і В.

Механічна суміш двох видів кристалів, які одночасно кристалізуються із рідкої фази, називається евтектикою. Евтектичний сплав має найнижчу температуру кристалізації серед сплавів даної системи.

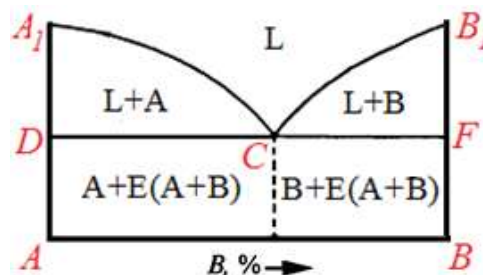


Рис. 9.1 – Діаграми сплавів, компоненти яких нерозчинні у твердому стані

Сплави, які розміщені нижче лінії евтектичного перетворення лівіше від точки С, називаються доевтектичними. Їх структура складається з окремих кристалів компонента А та евтектики.

Сплав, який за хімічним складом відповідає точці С діаграми, називається евтектичним і його структура повністю складається з евтектики.

Сплави, які розміщені нижче лінії евтектичного перетворення правіше від точки С діаграми, називаються заевтектичними. Їх структура складається з окремих кристалів компонента В та евтектики.

Склад і кількісне співвідношення фаз у будь-якій двофазній області діаграми стану можна визначити за допомогою першого і другого правила відрізків.

Для визначення хімічного складу компонентів у сплаві, що відповідає точці «е» (рис. 9.2 б), через цю точку проводять горизонтальну лінію до перетину з лініями, що обмежують цю область. Проекції точок d і f перетину колоди з лініями діаграми на вісь концентрації показують хімічний склад компонентів сплаву.

Для визначення кількісного співвідношення фаз визначають довжину відрізків коноди від заданої точки «е» діаграми до точок, що відповідають складу фаз. Довжини цих відрізків дорівнюють різниці відповідних концентрацій і обернено пропорційні масовим часткам фаз.

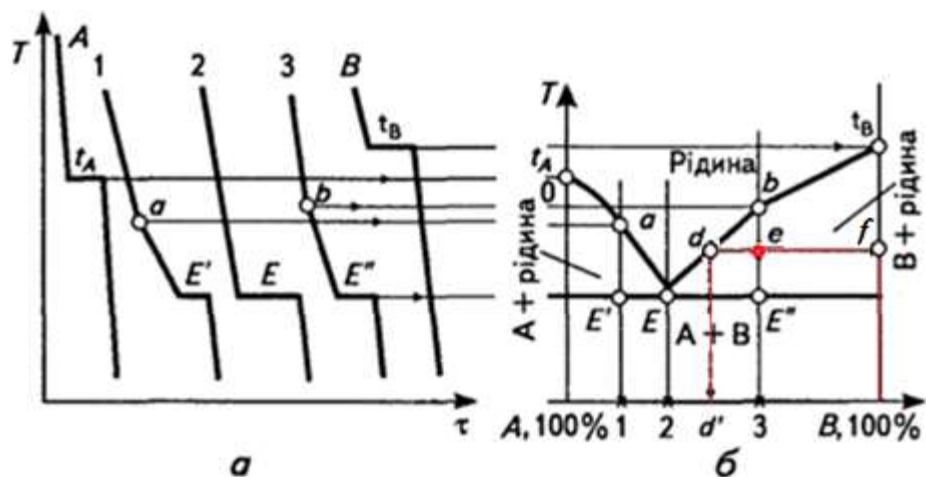
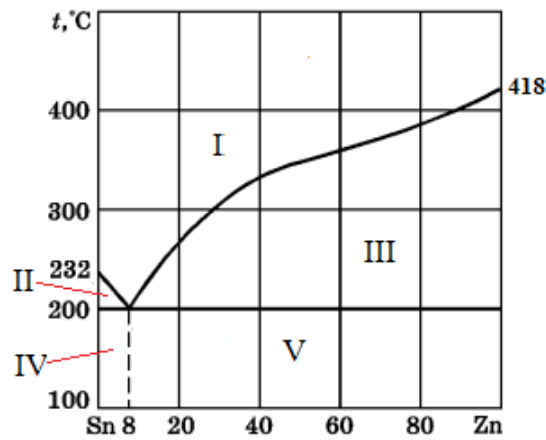


Рис. 9.2

ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ЗАВДАНЬ

1. Укажіть структурні складові в усіх областях діаграми.



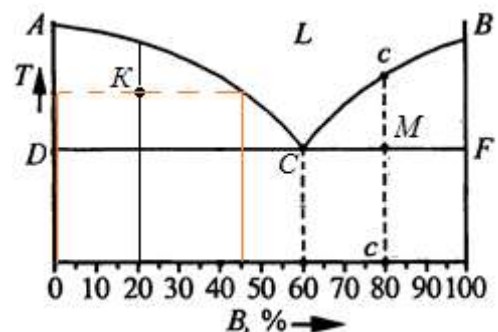
Розв'язання

Структурні складові внесені до таблиці 9.1.

Таблиця 9.1

Область діаграми	Структурні складові	Позначення структурних складових
I	Рідина	L
II	Рідина + кристали олова	L+Sn
III	Рідина + кристали цинку	L+Zn
IV	Кристали олова + евтектика	Sn+E(Sn+Zn)
V	Кристали цинку + евтектика	Zn+E(Sn+Zn)

2. Визначити хімічний склад твердої та рідкої фаз та їх масові частки у сплаві з 20% компонента В при температурі, що відповідає точці *K*.



Розв'язання

Сплав з 20% компонента В при температурі, що відповідає точці *K*, знаходиться в двофазній області L+A. Через точку *K* проводимо коноду. З точок перетину коноди з лініями діаграми опускаємо перпендикуляри на вісь концентрацій. Хімічний склад

твердої фази відповідає 0% компонента В (0% В) або 100% компонента А (100% А). Хімічний склад рідкої фази відповідає 45% В або 55% А. Тобто, тверда фаза в точці К діаграми представлена чистими кристалами компонента А, а рідка фаза містить 45% В або 55% А:

$$C_S = 0\% \text{ В}$$

$$C_L = 45\% \text{ В}$$

Для визначення кількісного співвідношення між твердою і рідкою фазами у сплаві 20% В скористаємося правилом відрізків.

Масова частка твердої фази (кристали А):

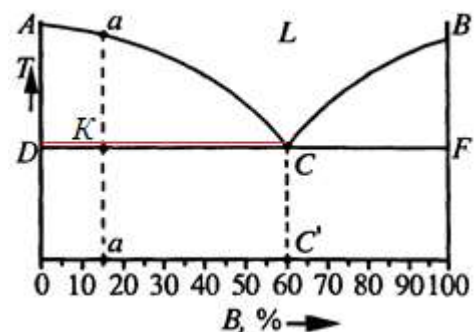
$$W_S = \frac{C_L - C_{20}}{C_L - C_S} = \frac{45 - 20}{45 - 0} = 0,56 = 56\%$$

Масова частка рідкої фази:

$$W_L = \frac{C_{20} - C_S}{C_L - C_S} = \frac{20 - 0}{45 - 0} = 0,44 = 44\%$$

Відповідь: $C_S = 0\% \text{ В}$, $C_L = 45\% \text{ В}$, $W_S = 56\%$, $W_L = 44\%$.

3. Визначити хімічний склад рідини у сплаві *a-a* в момент початку евтектичної кристалізації та масову частку евтектики при кімнатній температурі.



Розв'язання

Сплав *a-a* безпосередньо перед початком евтектичної кристалізації знаходиться в двофазній зоні L+A. Для знаходження хімічного складу через т. К проведемо коноду. Проекція точки С на вісь концентрацій показує 60% компонента В. це означає, що хімічний склад рідини у сплаві *a-a* дорівнює 60% В.

Сплав *a-a* при температурі нижче евтектичної знаходиться в зоні А+Е(А+В), в якій містяться кристали компонента А і евтектика у вигляді суміші з

кристалів А і В. Для визначення масової частки евтектики у сплаві 20% В скористаємося правилом відрізків.

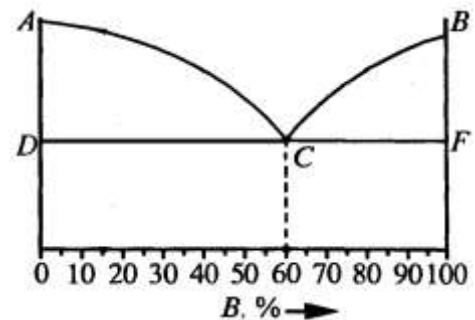
Масова частка евтектики складає:

$$W_{E(A+B)} = \frac{C_{15} - C_S}{C_L - C_S} = \frac{15 - 0}{60 - 0} = 0,25 = 25\%$$

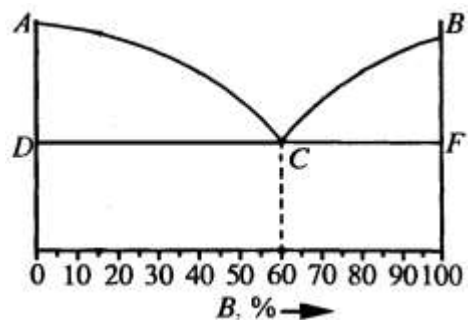
Відповідь: $C_L = 60\% B$, $W_{E(A+B)} = 25\%$.

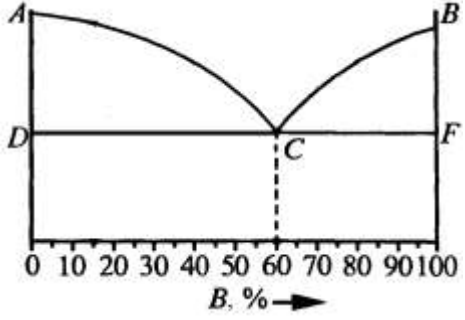
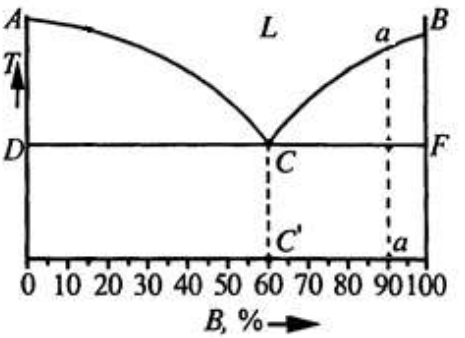
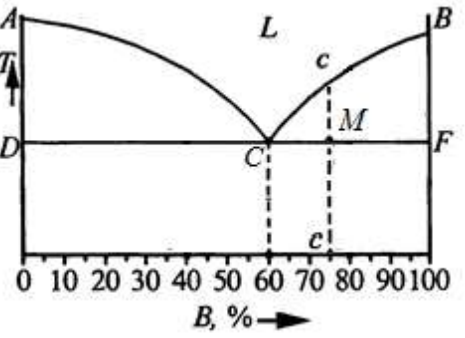
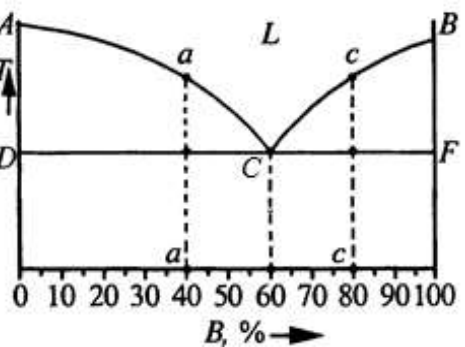
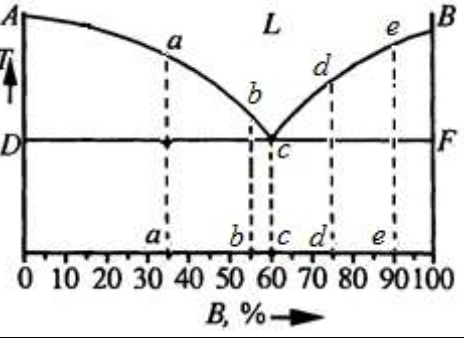
ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОГО ОПРАЦЮВАННЯ

1. Для даного типу діаграми оберіть вірні твердження:
 - a. Евтектика складається з кристалів твердих розчинів компонента В в А і компонента А в В.
 - b. Евтектика складається з кристалів твердих розчинів альфа і бета.
 - c. Евтектика складається з кристалів чистих компонентів А і В.



2. Для систем, що мають діаграми даного типу:
 - a. Температура закінчення кристалізації залежить від складу сплаву.
 - b. Температура початку кристалізації залежить від складу сплаву.
 - c. Температура початку кристалізації не залежить від складу сплаву.
 - d. Температура закінчення кристалізації не залежить від складу сплаву.



<p>3. При скількох ступенях свободи протікає евтектичне перетворення?</p> <p>a. Дві ступені свободи. b. Одна ступінь свободи. c. Нуль ступенів свободи.</p>	
<p>4. Визначити масову частку евтектики у сплаві <i>a-a</i> при кімнатній температурі.</p>	
<p>5. Визначити хімічний склад рідини у сплаві <i>c-c</i> в момент початку евтектичної кристалізації та масову частку кристалів В при кімнатній температурі.</p>	
<p>6. Визначити хімічний склад рідкої фази та масову частку рідини у сплавах <i>a-a</i> і <i>c-c</i> в момент початку евтектичної кристалізації. На скільки відсотків відрізняються масові частки рідини у сплавах <i>a-a</i> і <i>c-c</i>?</p>	
<p>7. Скільки відсотків евтектики містять сплави <i>a-a</i>, <i>b-b</i>, <i>c-c</i>, <i>d-d</i>, <i>e-e</i> при кімнатній температурі?</p>	

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Що таке діаграми стану? Яке вони мають практичне значення?
2. Поясніть значення термінів: евтектика, солідус, ліквідус.
3. Перелічіть характерні особливості евтектики.
4. Охарактеризуйте лінії та області діаграми стану сплаву, компоненти якого утворюють механічну суміш.
5. Які методи застосовують для побудови діаграм стану сплавів?
6. Побудуйте криві охолодження доевтектичного та заевтектичного сплавів.
7. Побудуйте криву охолодження евтектичного сплаву.

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 10

ДІАГРАМИ СТАНУ СИСТЕМИ З ОБМЕЖЕНОЮ РОЗЧИННІСТЮ КОМПОНЕНТІВ У ТВЕРДОМУ СТАНІ

Мета роботи: навчитися визначати склад, кількісне співвідношення фаза та структуру в будь-якій точці діаграми III типу; набути досвіду передбачувати можливість отримання певних сплавів при певних умовах.

СТИСЛІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

В системі, компоненти яких обмежено розчинюються у твердому стані та утворюють евтектику (рис. 10.1), при кристалізації утворюються кристали обмежених твердих розчинів α і β : α – твердий розчин компонента В в А; β – твердий розчин компонента А в В.

По лінії A_1E починається утворення кристалів α -твердого розчину, а по лінії B_1E – кристалів β -твердого розчину, тобто лінія A_1EB_1 – це лінія ліквідус.

Лінія A_1CEDB_1 – лінія солідус. По лінії A_1C закінчується процес кристалізації α -твердого розчину, а по лінії B_1D – β -твердого розчину.

Лінія CE – лінія евтектичного перетворення, суть якого полягає в утворенні із рідкого сплаву евтектичного складу одночасно суміші кристалів твердих розчинів α і β , тобто евтектики $E(\alpha + \beta)$.

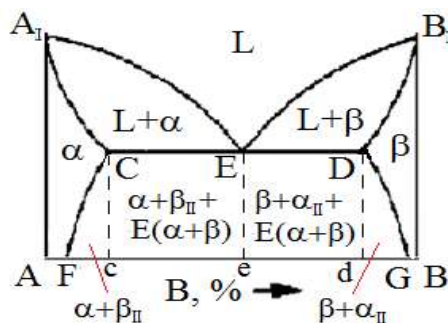


Рис. 10.1 – Діаграма стану сплавів, компоненти яких утворюють обмежені тверді розчини

Лінії CF і DG називаються сольвусом – це лінії граничної концентрації, відповідно, компонента В в α -твердому розчині та компонента А в β -твердому розчині. При зниженні температури вздовж лінії CF із α -твердого розчину виділяється надлишковий компонент В у вигляді β -фази (вторинні β_{II} -кристали), а вздовж лінії DG із β -твердого розчину виділяється надлишковий компонент А у вигляді α -фази (вторинні α_{II} -кристали).

Рідкий сплав знаходиться вище від лінії ліквідусу A_1EB_1 , а твердий – нижче від лінії солідусу A_1CEDB_1 .

На ділянці A_1CE – дві фази: рідкий сплав + кристали твердого розчину α ; на ділянці B_1ED – дві фази: рідкий сплав + кристали твердого розчину β .

На ділянці A_1CFA – твердий сплав, який є кристалами α ; на ділянці B_1DGB – твердий сплав, що складається з кристалів β .

При охолодженні сплавів первинна кристалізація починається по лінії ліквідусу A_1EB_1 , а закінчується по лінії солідусу A_1CEDB_1 .

По лініях CF і DG (лінії сольвусу) відбуваються процеси вторинної кристалізації. Кристали, які при цьому виділяються, називають вторинними (α_{II} і β_{II}), на відміну від первинних, що виділяються із рідкого розчину L .

На рисунку 10.2 представлено різновиди діаграми III типу.

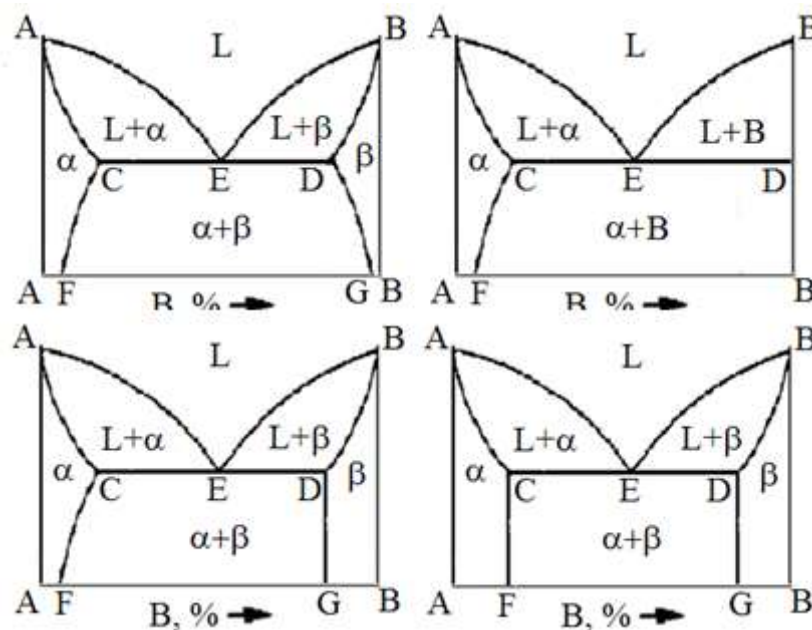
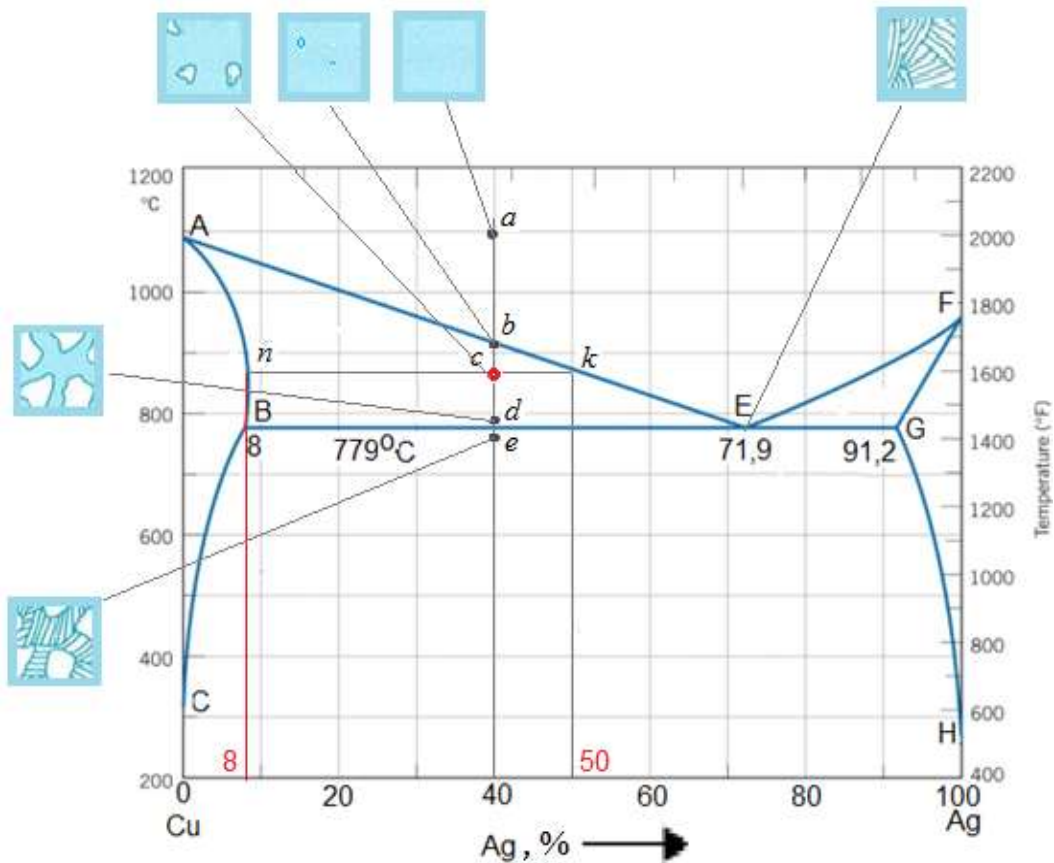


Рис. 10.2 – Різновиди діаграми III типу

ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ЗАВДАНЬ

1. За діаграмою стану системи мідь-срібло визначити хімічний склад фаз сплаву та масові частки кожної фази в точці *c* сплаву, що містить 40 % срібла.



Розв'язання

Сплав з 40% Ag при температурі, що відповідає точці *c*, знаходиться в двофазній області $L + \alpha$. Через точку *c* проводимо коноду. З точок *n* і *k* перетину коноди з лініями діаграми опускаємо перпендикуляри на вісь концентрацій.

Хімічний склад твердої фази, що представлена кристалами α -твердого розчину, відповідає 8% Ag, хімічний склад рідкої фази відповідає 50% Ag:

$$C_s = C_\alpha = 8 \% Ag$$

$$C_L = 50 \% Ag$$

Для визначення масової частки кожної фази у сплаві 40% Ag скористаємося правилом відрізків.

Масова частка твердої фази - кристалів α -твердого розчину:

$$W_S = W_\alpha = \frac{ck}{nk} = \frac{C_L - C_{40}}{C_L - C_S} = \frac{50 - 40}{50 - 8} = \frac{10}{42} = 0,238 = 23,8\%$$

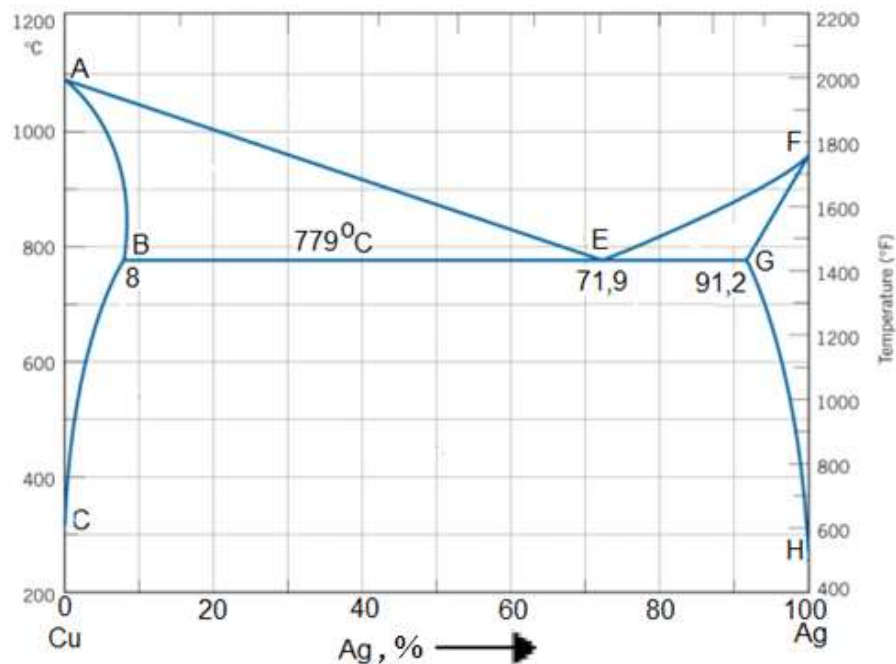
Масова частка рідкої фази:

$$W_L = \frac{cn}{nk} = \frac{C_{40} - C_S}{C_L - C_S} = \frac{40 - 8}{50 - 8} = \frac{32}{42} = 0,762 = 76,2\%$$

Відповідь:

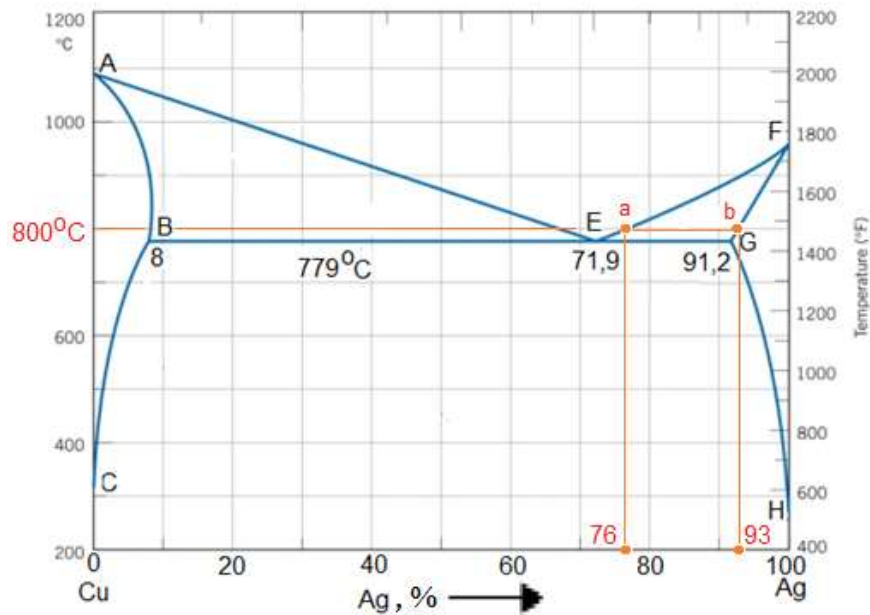
$$C_S = 8\% \text{ Ag}, \quad C_L = 50\% \text{ Ag}, \quad W_S = 23,8\%, \quad W_L = 76,2\%.$$

2. Чи можливий мідно-срібний сплав, який в рівновазі містить β -фазу складу 93 % Ag при складі рідкої фази 76 % Ag. Якщо так, то якою буде приблизна температура сплаву? Якщо це неможливо, поясніть чому.



Розв'язання

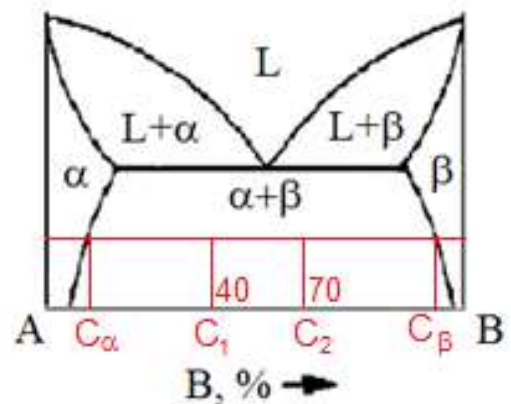
Згідно з умовою задачі, можливий сплав має бути у двофазній області $L + \beta$. На осі концентрацій знаходимо точки, що відповідають концентраціям 76 % Ag і 93 % Ag. Через ці точки проводимо перпендикуляри до перетинання з лініями EF, GF двофазної області $L + \beta$. Отримані точки a і b, майже, відповідають температурі 800 °C (1470 °F).



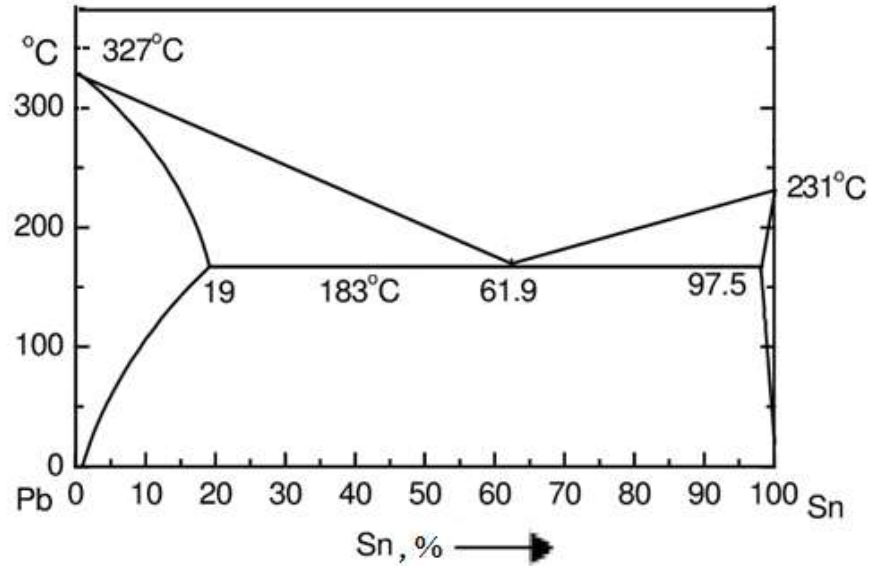
Відповідь: Такий сплав можливий, приблизна температура сплаву 800 °C

ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОГО ОПРАЦЮВАННЯ

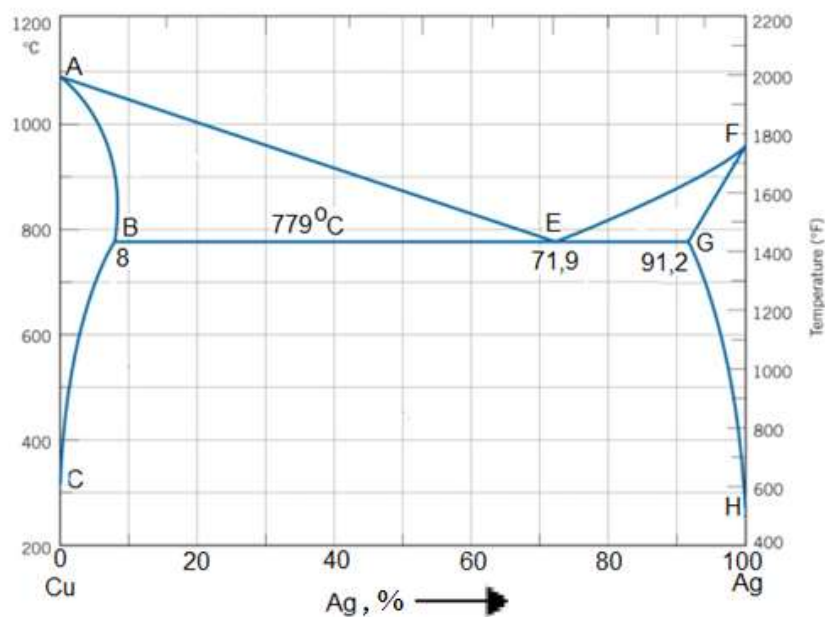
- У двофазній області ($\alpha + \beta$) діаграми, при однаковій температурі, для сплаву хімічного складу 40 % компонента B ($C_1 = 40\% B$) масова частка α -фази дорівнює 0,57 ($W_{\alpha 1} = 0,57$), а для сплаву 70 % компонента B ($C_2 = 70\% B$) масова частка α -фази дорівнює 0,14 ($W_{\alpha 2} = 0,14$). За вказаних вище умов, визначити хімічний склад α -фази (C_α) і β -фази (C_β).



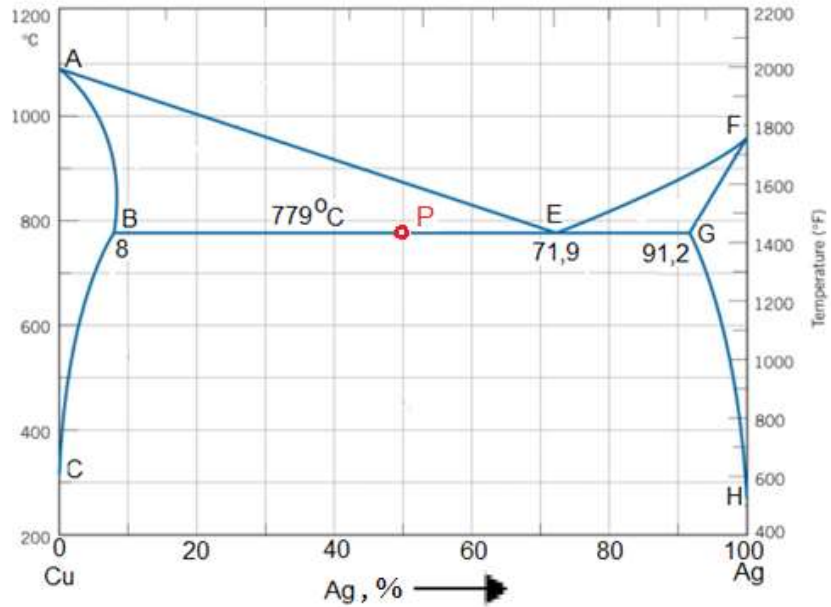
2. Сплав 30 % Sn -70 % Pb нагрівають до температури вище евтектичної. Якщо масова частка кожної фази дорівнює 0,5, визначити температуру сплаву і склад фаз.



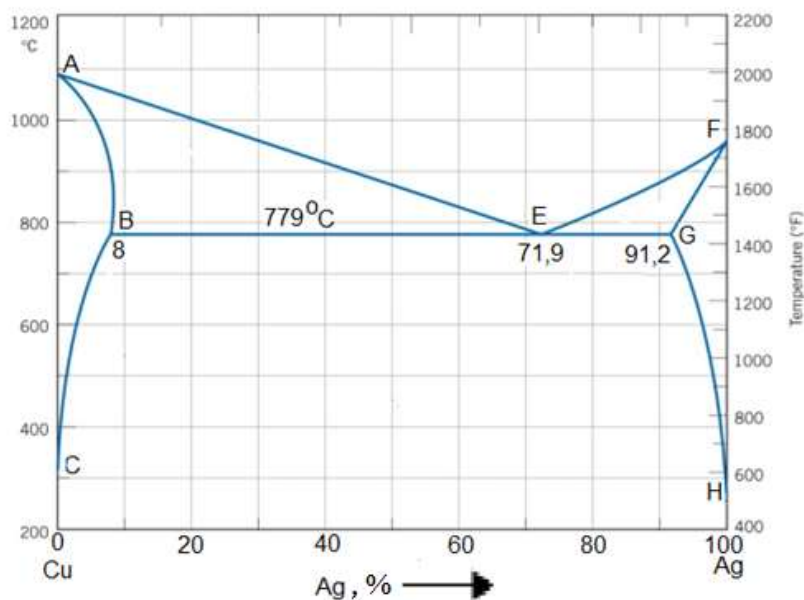
3. Чи можливий мідно-срібний сплав хімічного складу 50%Ag - 50% Cu, який в рівновазі складається з α і β фаз з масовими частками $W_\alpha = 0,6$ і $W_\beta = 0,4$? Якщо так, то якою буде приблизна температура сплаву? Якщо такий сплав неможливий, пояснити чому.



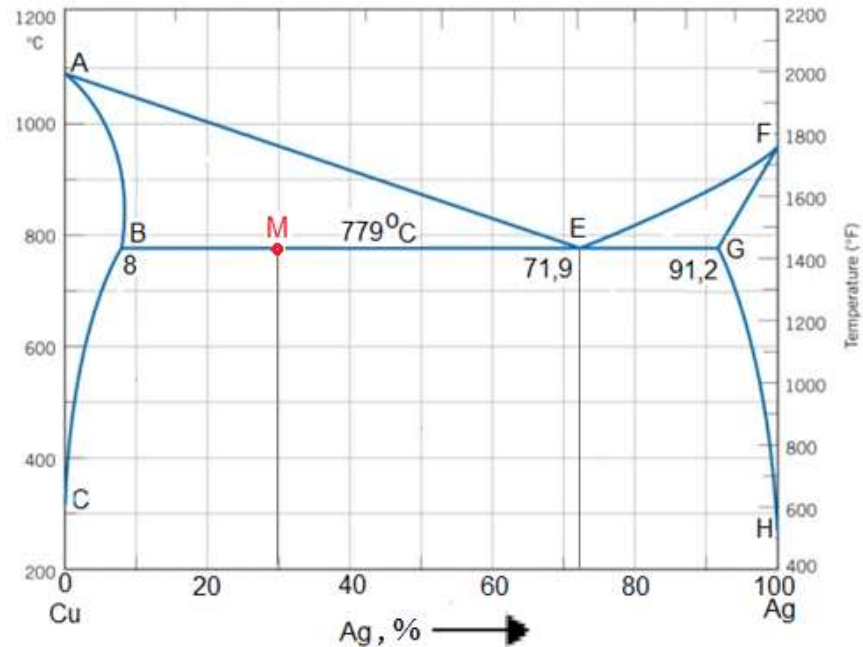
4. За діаграмою стану системи мідь-срібло визначити відносну кількість евтектики та первинних кристалів α -твердого розчину в точці P сплаву, що містить 50 % срібла.



5. Чи можливо отримати сплав Cu-Ag, для якого при 775°C масова частка первинної β -фази і загальної β -фази відповідно становлять 0,68 та 0,925?



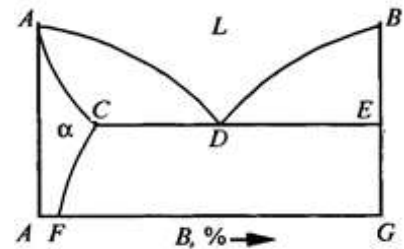
- б. Для мідно-срібного сплаву складу 30 % Ag при 775 °C визначити: масові частки α - фази і β - фази; масові частки первинних кристалів α -твердого розчину і евтектики; масову частку α - фази в евтектиці.



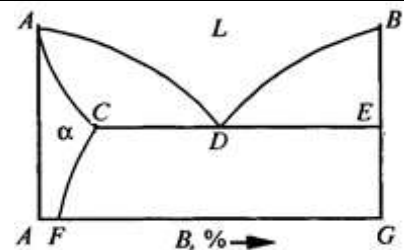
КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

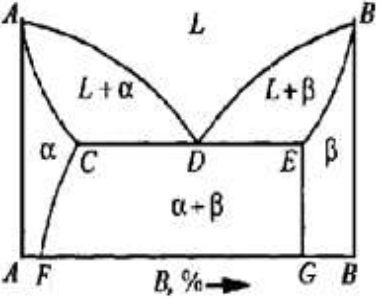
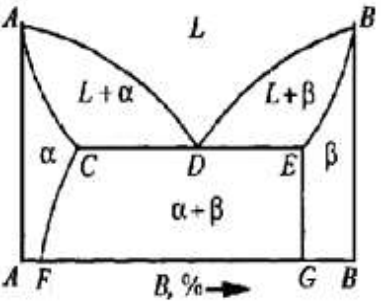
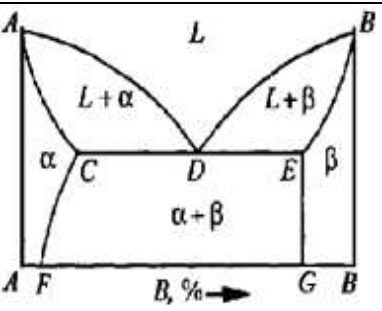
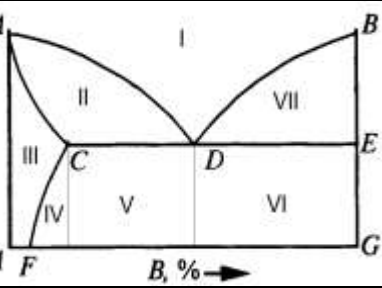
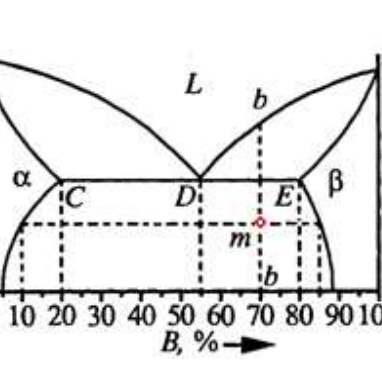
1. Який фазовий склад сплавів нижче лінії CDE діаграми?

A, B, L, α , β ?



2. Яка точка на діаграмі відповідає максимальній розчинності компонента B в компоненті A?



<p>3. Яка точка на діаграмі відповідає концентрації компонента А у твердому розчині компонента В при кімнатній температурі?</p>	
<p>4. Яка точка на діаграмі відповідає мінімальній розчинності компонента В в компоненті А?</p>	
<p>5. На представленій діаграмі точки Е і G мають однаковий хімічний склад при різних температурах. Що це означає? Надайте пояснення.</p>	
<p>6. Укажіть структурні складові в усіх областях діаграми.</p>	
<p>7. Укажіть, які структурні складові присутні у сплаві b-b при температурі точки m?</p>	

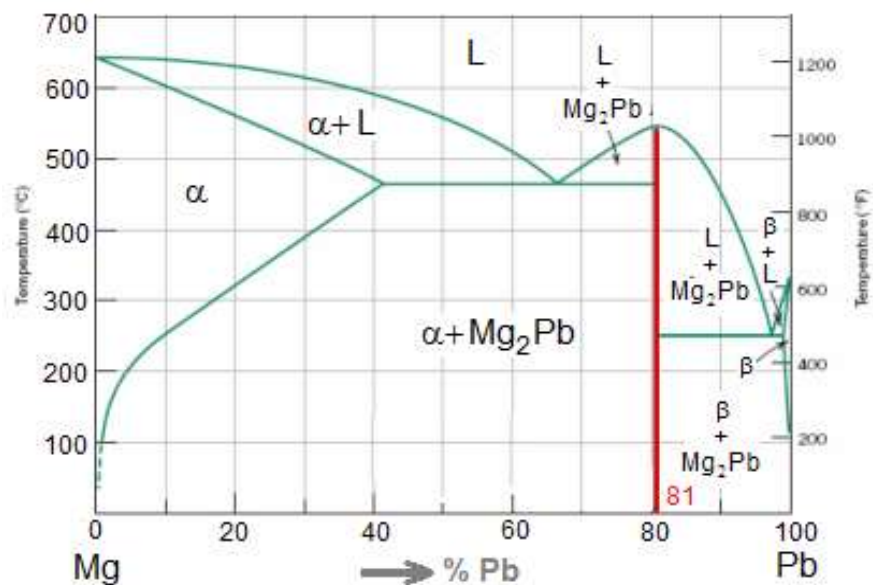
ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 11

ДІАГРАМА СТАНУ СИСТЕМИ З ХІМІЧНИМИ СПОЛУКАМИ ТА ПРОМІЖНИМИ ФАЗАМИ

Мета роботи: закріпити і розширити знання, одержані під час вивчення діаграм подвійних систем; поглибити знання при аналізі подвійних діаграм стану для сплавів з утворенням стійкої хімічної сполуки.

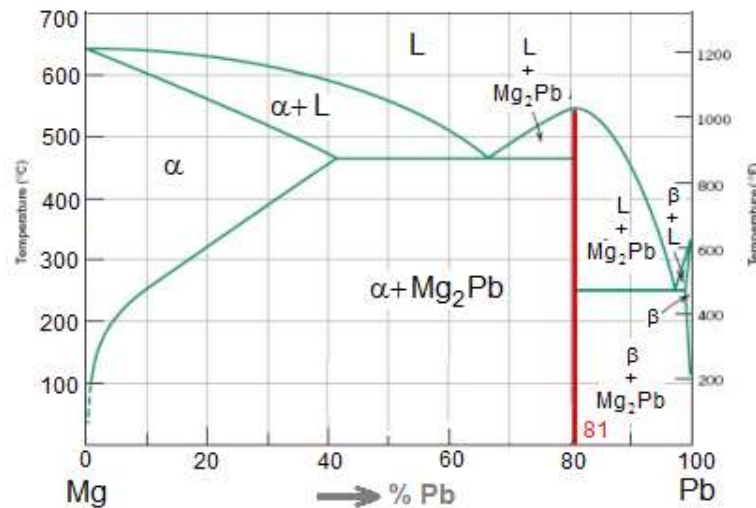
СТИСЛІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

У подвійних системах можуть утворюватися хімічні сполуки між компонентами загальною формулою A_mB_n . Найчастіше ці хімічні сполуки утворюються безпосередньо з рідини: $P \rightarrow A_m B_n$. Конкретний вигляд діаграми визначається взаємодією її компонентів, передусім розчинністю їх у твердому стані, а також наявністю певних перетворень. При цьому, хімічна сполука розглядається як окремий компонент.



ПРИКЛАД РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ЗАВДАНЬ

1. Чи можливе існування в рівновазі α -фази і хімічної сполуки Mg_2Pb з відповідними масами 7,39 кг і 3,81 кг у магнієво-свинцевому сплаві складу 30%Pb–70%Mg масою 11,20 кг? Якщо так, то якою буде температура сплаву?



Розв'язання

Знаючи маси α -фази і хімічної сполуки Mg_2Pb , знайдемо їх масові частки у заданому сплаві:

$$W_{\alpha} = \frac{m_{\alpha}}{m_{\alpha} + m_{Mg_2Pb}} = \frac{7,39}{7,39 + 3,81} = 0,66$$

$$W_{Mg_2Pb} = 1 - 0,66 = 0,34$$

З іншого боку, масові частки можна знайти за правилом відрізків. Так, масова частка α -фази дорівнює:

$$W_{\alpha} = \frac{C_{Mg_2Pb} - C_{30}}{C_{Mg_2Pb} - C_{\alpha}}$$

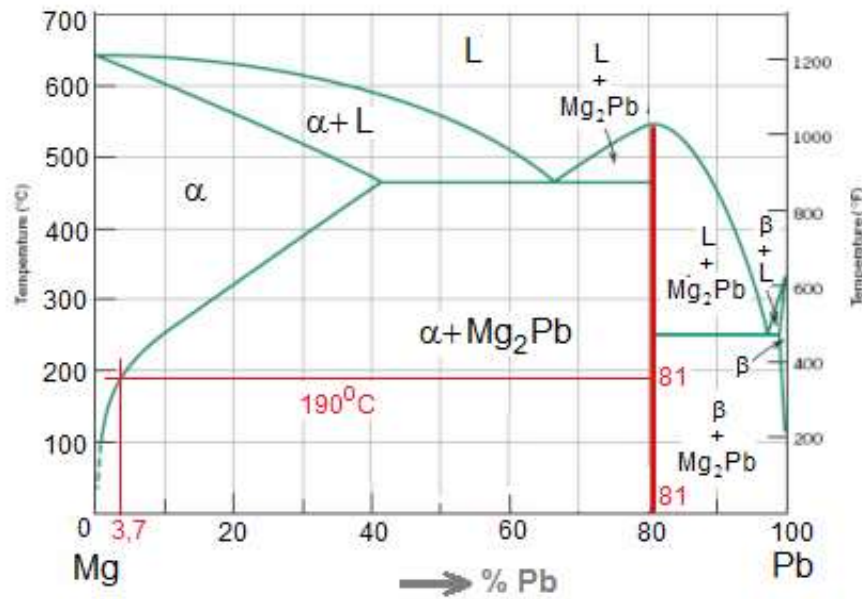
Концентрація хімічної сполуки Mg_2Pb , в наведеному вище рівнянні, дорівнює:

$$C_{Mg_2Pb} = 0,81 \% Pb$$

З цього рівняння знайдемо концентрацію α -фази у заданому сплаві:

$$0,66 = \frac{81 - 30}{81 - C_\alpha} = \frac{51}{81 - C_\alpha}$$

$$C_\alpha = 81 - \frac{51}{0,66} = 3,7 \% \text{ Pb}$$

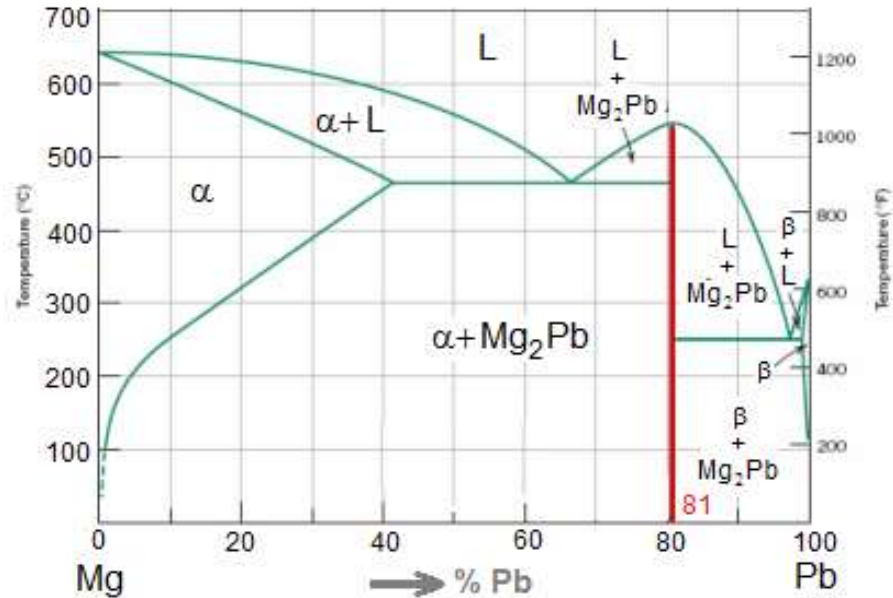


Проведемо вертикальну лінію, що відповідає концентрації 3,7 % Pb, до перетинання з межею фаз $\alpha - (\alpha + Mg_2Pb)$. Точка перетинання приблизно відповідає температурі 190°C.

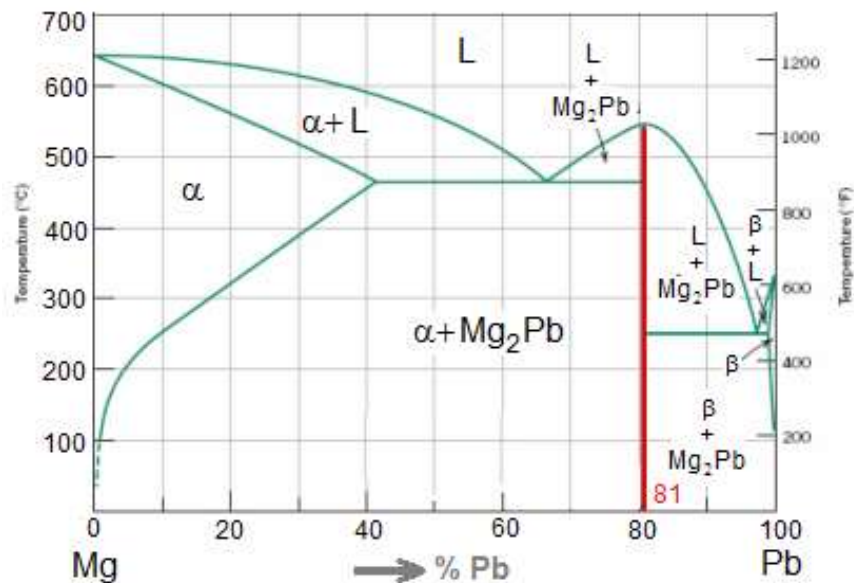
Відповідь: Магнієво-свинцевий сплав складу 30% Pb–70% Mg масою 11,20 кг може мати в рівновазі α -фазу і хімічну сполуку Mg_2Pb з відповідними масами 7,39 кг і 3,81 кг.

ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОГО ОПРАЦЮВАННЯ

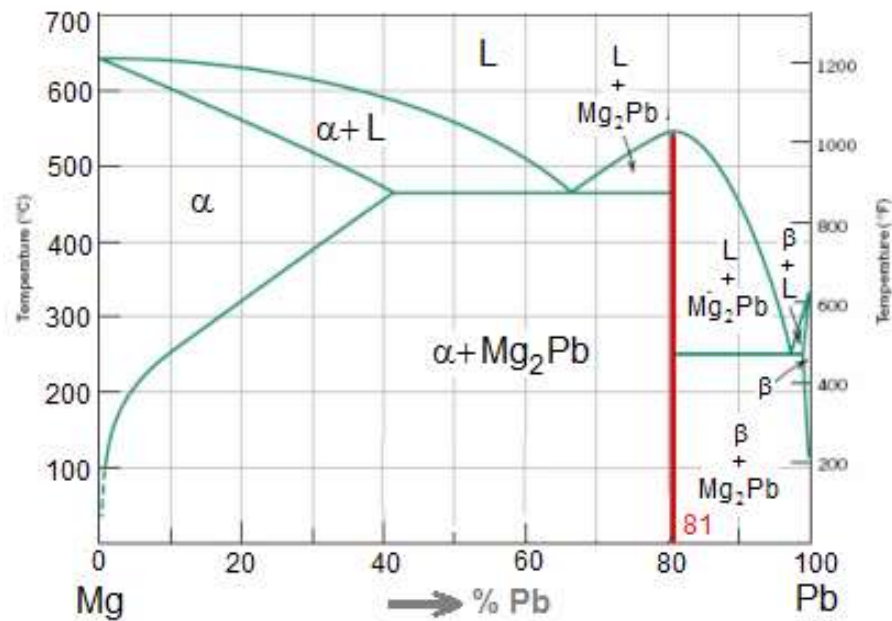
1. Для сплаву складу 40% Pb–60% Mg визначити температуру, при якій масова частка хімічної сполуки Mg_2Pb складає 20% .



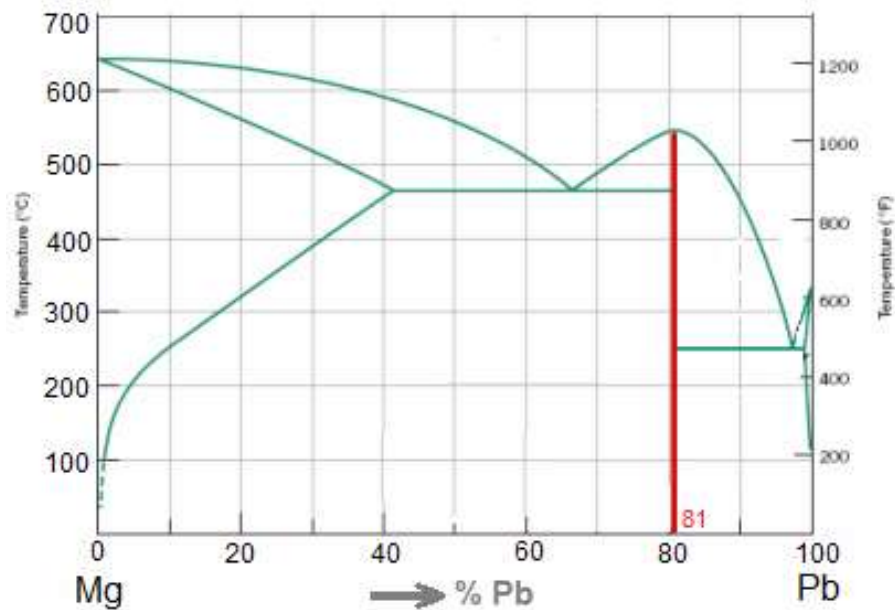
2. Чи можливо для 20 кг магнієво-свинцевого сплаву складу 40%Pb–60% Mg мати в рівновазі фази α і Mg_2Pb з відповідними масами 16 кг і 4 кг? Якщо так, то якою буде температура сплаву? Якщо такий сплав неможливий, поясніть чому.



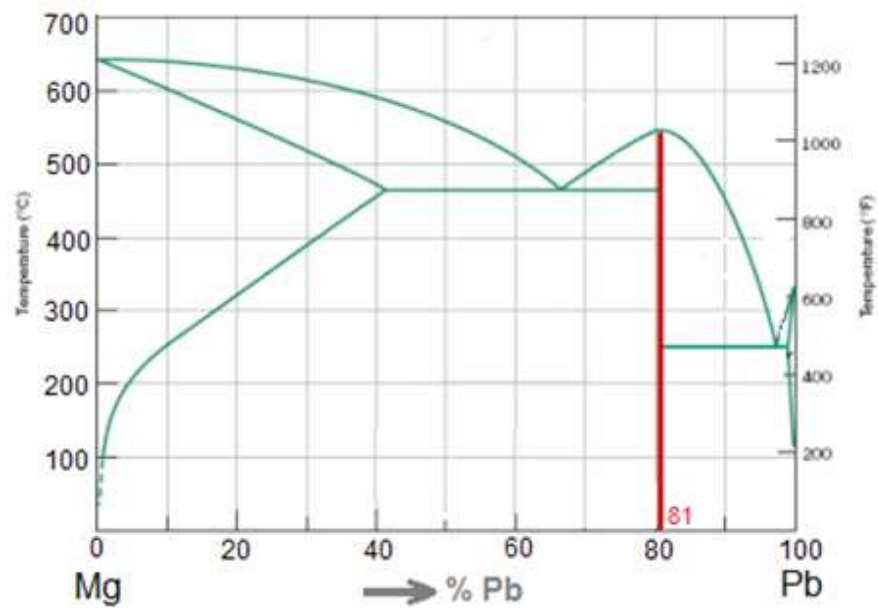
3. Сплав 45% Pb–55% Mg швидко охолоджують від певної температури до кімнатної, при цьому фіксується мікроструктура, що складається з α -фази та хімічної сполуки Mg_2Pb з відповідними масовими частками 0,65 і 0,35. Визначити температуру, при якій почалося охолодження сплаву.



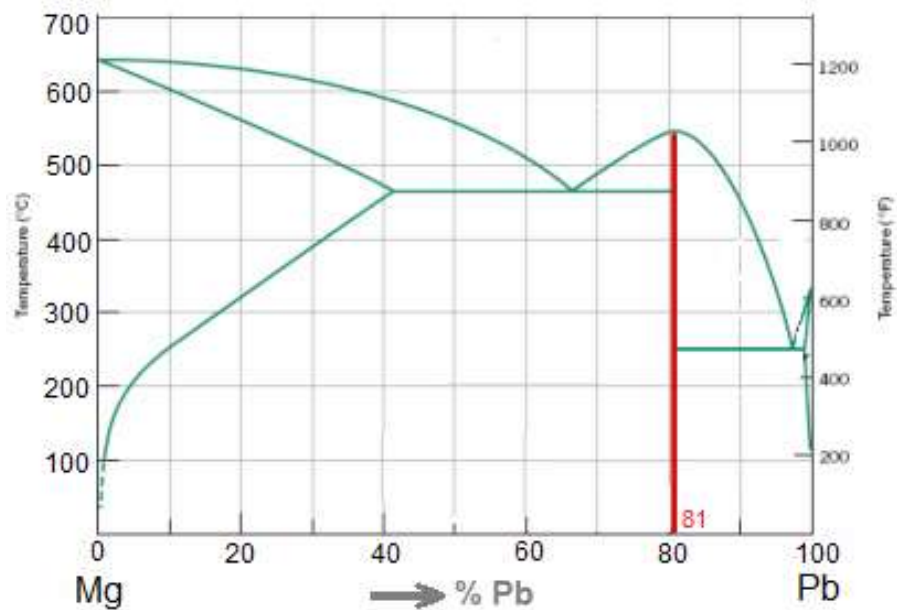
4. Для сплаву 30% Mg визначити хімічний склад при евтектичній температурі та масову частку евтектики..



5. Визначте хімічний склад сплаву 90% Pb при температурах 350 °C та масову частку фаз.



6. Для сплаву 60% Pb визначити хімічний склад альфа-твердого розчину, при якому масова частка хімічної сполуки Mg_2Pb дорівнює 0,65.



КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Охарактеризуйте діаграму стану системи, компоненти якої утворюють стійку хімічну сполуку.
2. Як впливає на властивості сплавів утворення стійкої хімічної сполуки?
3. Поясніть характер зміни властивостей сплавів за допомогою правила Курнакова.
4. Назвіть типові завдання, що виникають при дослідженні діаграми IV типу.
5. Побудуйте криві охолодження для сплавів 20% Pb і 50 % Pb системи Mg-Pb. Чим вони відрізняються?
6. Сформулюйте правило фаз Гіббса. Наведіть приклади визначення кількості ступенів свободи системи.

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 12

ДІАГРАМА СТАНУ СИСТЕМИ ЗАЛІЗО – ЦЕМЕНТИТ

Мета роботи: вивчення діаграми стану залізовуглецевих сплавів, аналіз перетворень, що проходять у сплавах при охолодженні та нагріванні, визначення фазового та структурного стану сплавів в залежності від їх складу та температури.

СТИСЛІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Залізовуглецеві сплави розділяють на два види – сталь і чавун. Сталь це залізовуглецевий сплав із вмістом вуглецю від 0 до 2,14 %. Сталі, в залежності від вмісту вуглецю, за рівноважною структурою поділяються на: технічне залізо ($C \leq 0,02 \%$); доевтектоїдні сталі ($0,02 < C < 0,8 \%$); евтектоїдні сталі ($C = 0,8 \%$); заевтектоїдні сталі ($0,8 < C \leq 2,14\%$).

Чавун – це залізовуглецевий сплав із вмістом вуглецю від 2,14 до 6,67 %. На рисунку 12.1 позначено структурні складові залізовуглецевих сплавів.

Лінії діаграми

Позначення точок на діаграмі стандартизовано. Лінії діаграми – це геометричне місце точок, що характеризують хімічний склад фаз, які знаходяться у рівновазі, температури початку та кінця фазових перетворень.

Лінія ABCD, що об'єднує точки початку кристалізації розплавів із різним вмістом вуглецю, називається лінією ліквідусу. Вище від лінії ABCD усі сплави перебувають у рідкому стані.

Лінія АНІЕСF, що відповідає точкам закінчення кристалізації, називається лінією солідусу. Нижче від лінії АНІЕСF усі сплави перебувають у твердому стані.

AB і АН – відповідно лінія початку і кінця кристалізації δ -фериту.

BC – лінія початку кристалізації аустеніту.

DC – лінія початку кристалізації первинного цементиту.

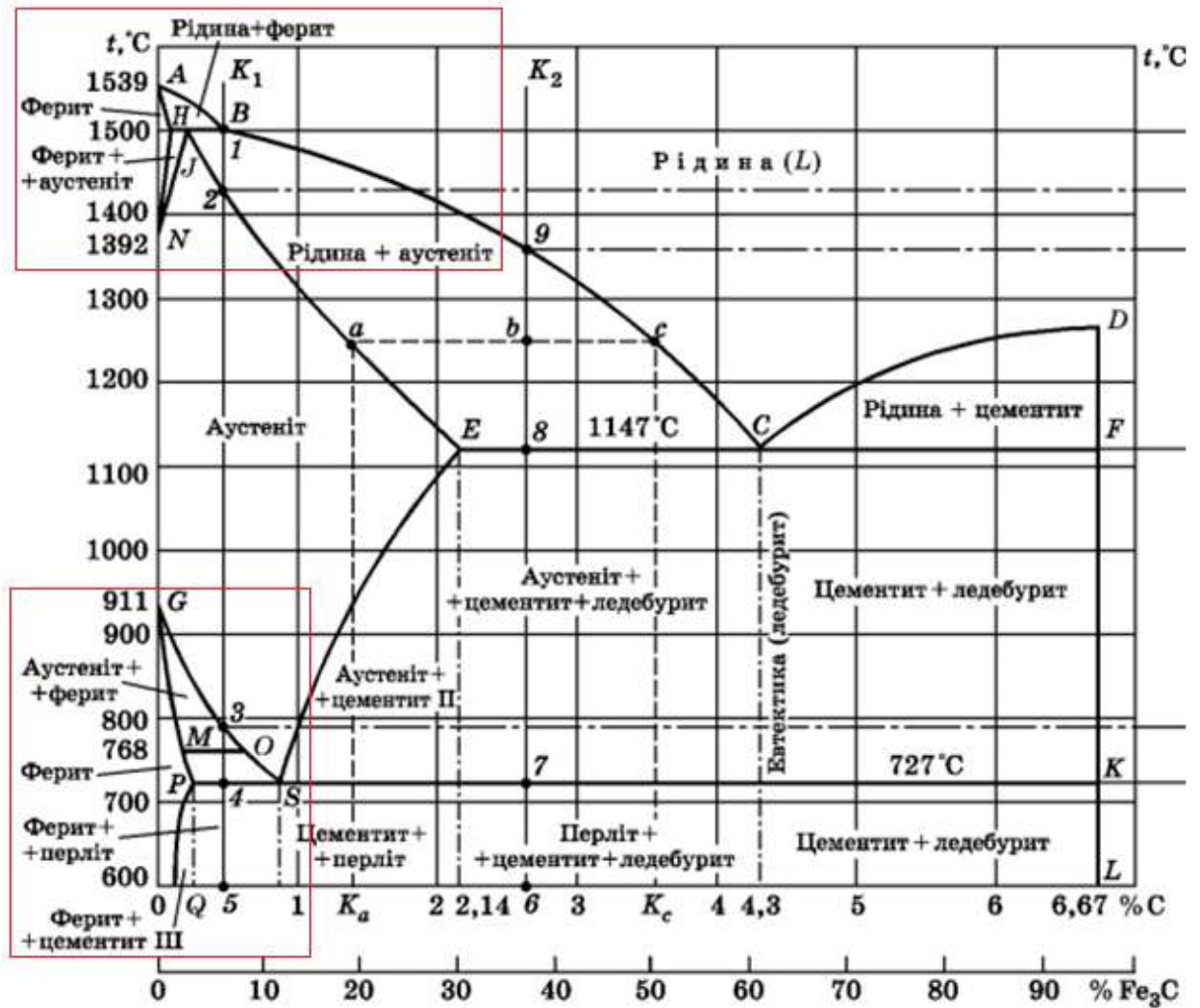


Рис. 12.1 – Діаграма стану системи Fe – Fe₃C

NJE – лінія кінця кристалізації аустеніту.

ECF – лінія евтектичної рівноваги – лінія кристалізації рідкого розчину евтектичної концентрації сплавів в евтектику – суміш аустеніту і цементиту (ледебурит). Евтектичне перетворення відбувається за температури 1147°C для всіх сплавів, що містять понад 2,14 % С.

З охолодженням сплавів нижче від лінії АНJЕСF відбуваються процеси, які супроводжуються поліморфними перетвореннями заліза і зменшенням розчинності вуглецю в α-залізі та γ-залізі.

GS – лінія початку перекристалізації аустеніту у ферит в процесі охолодження.

GP – лінія кінця перекристалізації аустеніту у ферит.

ES – лінія початку кристалізації вторинного цементиту із аустеніту, тобто характеризує зменшення концентрації вуглецю в аустеніті при охолодженні.

PQ – лінія початку кристалізації третинного цементиту з фериту, тобто характеризує зміну концентрації вуглецю у фериті.

PSK – лінія евтектоїдного перетворення, тобто перетворення аустеніту на перліт за температури 727 °С. Сплави на лінії PSK складаються з аустеніту, фериту і цементиту.

Лініями AHN, GPQ і NJESG обмежені відповідно однофазні області δ-фериту, α-фериту та аустеніту.

MO – лінія магнітного перетворення, яке відбувається при 768 °С для сплавів, що містять до 0,6 % С.

Три горизонтальні лінії діаграми відображають такі температурні і концентраційні умови, за яких у рівновазі перебувають три фази.

Лінія HJB при перитектичній температурі 1499°С характеризується наявністю трьох фаз: δ-фериту, аустеніту і рідини (розплаву). Перитектичне перетворення характерне тим, що із первинного фериту і рідини утворюється аустеніт (твердий розчин проникнення вуглецю у кристалічну ґратку γ - заліза). Перитектичне перетворення відбувається по лінії HJB, тобто починаючи з 0,1 % С і закінчуючи 0,5 % С.

Лінія ECF при евтектичній температурі 1147°С характеризується наявністю трьох фаз: аустеніту, рідини (розплаву) і цементиту.

Лінія PSK при евтектоїдній температурі 727°С характеризується наявністю трьох фаз: фериту, аустеніту і цементиту.

Характерні точки

Точка А відповідає температурі плавлення і кристалізації чистого заліза (1539 °С).

Точка В вказує на вміст вуглецю (0,5 %) у рідкій фазі при перитектичній температурі (1499 °С).

Точка Н відповідає граничній кількості вуглецю (0,1 %) у δ -фазі при перитектичній температурі.

Точка J вказує на вміст вуглецю (0,16 %) в аустеніті, який перебуває в рівновазі з δ -фазою і рідиною при перитектичній температурі.

Точка С – температура плавлення і утворення ледебуриту, вказує на вміст вуглецю (4,3%) у рідкій фазі у стані рівноваги з аустенітом при евтектичній температурі (1147 °С).

Точка Е – максимальна розчинність вуглецю в аустеніті (максимальна насиченість аустеніту вуглецем), відповідає 2,14 % С в аустеніті, що перебуває в рівновазі з цементитом при евтектичній температурі 1147 °С.

Точка S – відповідає 0,8 % С в аустеніті, який перебуває в рівновазі з перлітом (ферит + цементит) при евтектоїдній температурі (727 °С).

Точка Р – максимальна розчинність вуглецю у фериті, відповідає 0,025 % С – граничній кількості вуглецю, розчиненого у фериті, що перебуває у рівновазі з аустенітом і цементитом при евтектоїдній температурі.

Точка Q – мінімальна розчинність вуглецю у фериті, відповідає 0,006%С.

Точка D – температура плавлення і кристалізації цементиту (1250°С).

Точка N (1392°С, 0%С) і точка G (911°С, 0%С) – температури поліморфного перетворення в залізі.

ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ЗАВДАНЬ

1. Визначити хімічний склад перліту і масові частки фаз, що входять до його складу.

Розв'язання

Перліт - механічна (евтектоїдна) суміш фериту і цементиту, яка утворюється з аустеніту при 727 °С і вмісті вуглецю 0,8 %С.

Хімічний склад перліту:

Альфа-ферит $C_{\alpha} = 0,02 \%C$

Цементит $C_{Fe_3C} = 6,67 \%C$

Масові частки альфа-фериту і цементиту:

$$W_{\alpha} = \frac{C_{Fe_3C} - C_C}{C_{Fe_3C} - C_{\alpha}} = \frac{6,67 - 0,8}{6,67 - 0,02} = 0,883 = 88,3\%$$

$$W_{Fe_3C} = 11,7\%$$

Відповідь: $C_{\alpha} = 0,02 \%C$; $C_{Fe_3C} = 6,67 \%C$. $W_{\alpha} = 88,3\%$; $W_{Fe_3C} = 11,7\%$.

2. Яка концентрація вуглецю в залізовуглецевому сплаві, для якого частка загального фериту дорівнює 0,94?

Розв'язання

Для визначення концентрації вуглецю в залізі-вуглецевому сплаві, для якого частка загального фериту становить 0,94, скористаємося правилом відрізків:

$$W_{\alpha} = \frac{C_{Fe_3C} - C_C}{C_{Fe_3C} - C_{\alpha}} = \frac{6,67 - C_C}{6,67 - 0,02} = \frac{6,67 - C_C}{6,65} = 0,94$$

$$C_C = 0,42 \%C$$

Відповідь: $C_C = 0,42 \%C$

3. Залізо-вуглецевий сплав масою 2 кг, що містить 1,15 % вуглецю, охолоджується до температури 725°С.

А. Визначити масу фериту та цементиту.

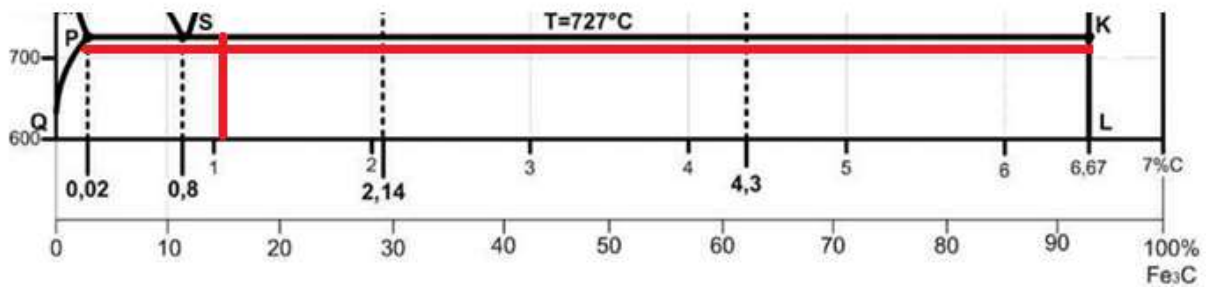
В. Визначити масу перліту та цементиту.

С. Схематично представити та позначити отриману мікроструктуру.

Розв'язання

Сплав 1,15 % С відноситься до заевтектоїдної сталі ($0,8 < C \leq 2,14\%$).

А. Визначимо масові частки фаз фериту і цементиту у заданому сплаві:



$$W_{\alpha} = \frac{C_{Fe_3C} - C_0}{C_{Fe_3C} - C_{\alpha}} = \frac{6,67 - 1,15}{6,67 - 0,02} = 0,83$$

$$W_{Fe_3C} = 0,17$$

Визначимо масу фериту і цементиту:

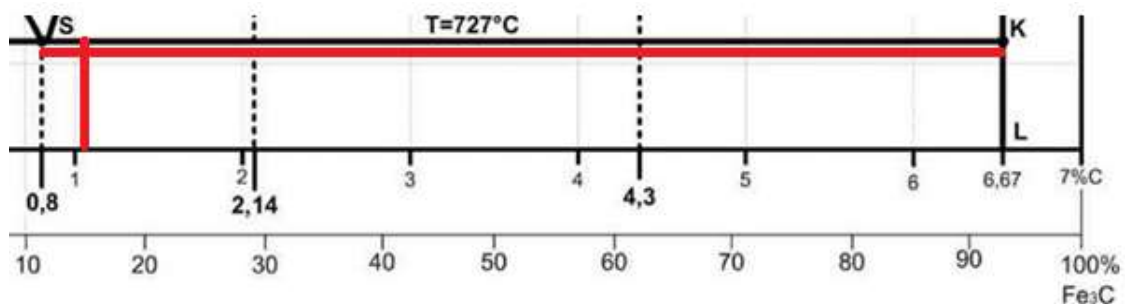
Маса фериту:

$$m_{\alpha} = W_{\alpha} m = 0,83 \cdot 2 = 1,66 \text{ кг}$$

Маса цементиту:

$$m_{Fe_3C} = W_{Fe_3C} m = 0,17 \cdot 2 = 0,34 \text{ кг}$$

В. Визначимо масові частки перліту і цементиту у заданому сплаві:



$$W_P = \frac{C_{Fe_3C} - C_0}{C_{Fe_3C} - C_P} = \frac{6,67 - 1,15}{6,67 - 0,8} = \frac{5,52}{5,87} = 0,94$$

$$W_{Fe_3C} = 0,06$$

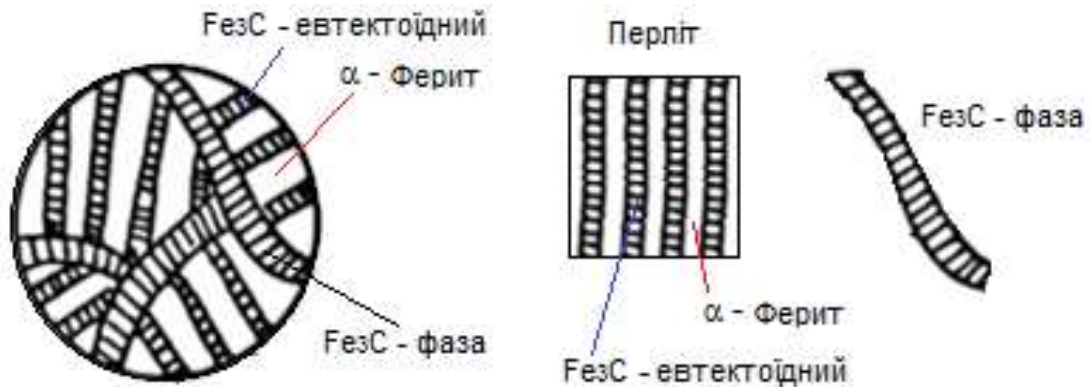
Маса перліту:

$$m_P = W_P m = 0,94 \cdot 2 = 1,88 \text{ кг}$$

Маса цементиту:

$$m_{Fe_3C} = W_{Fe_3C} m = 0,06 \cdot 2 = 0,12 \text{ кг}$$

С. Мікроструктура сплаву, що містить 1,15 % вуглецю, має наступний вигляд:



Відповідь:

Ферит-цементит: $m_{\alpha} = 1,66 \text{ кг}$; $m_{Fe_3C} = 0,34 \text{ кг}$.

Перліт-цементит: $m_P = 1,88 \text{ кг}$; $m_{Fe_3C} = 0,12 \text{ кг}$.

ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОГО ОПРАЦЮВАННЯ

1. Масові частки рівноважних фаз фериту та цементиту у сплаві залізо-вуглець становлять 0,92 та 0,8 відповідно. Визначити, до якого сплаву відноситься цей сплав?
2. Залізобуглецевий сплав масою 2,5 кг, що містить 0,65 % вуглецю, охолоджується до температури трохи нижче 727°C .
 - А) Визначити масу фериту та цементиту.
 - Б) Визначити масу фериту та перліту.
 Схематично представити та позначити отриману мікроструктуру.
3. Розрахувати масові частки фериту та перліту, що утворюються у залізобуглецевому сплаві з концентрацією вуглецю 0,3 % С.

- | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 4. Масові частки загального фериту та загального цементиту у сплаві залізо-вуглець становлять 0,88 та 0,12 відповідно. До якого сплаву відноситься цей сплав? |
| 5. Мікроструктура залізобуглецевого сплаву складається з фериту та перліту. Масові частки цих мікроскладових відповідно дорівнюють 0,28 і 0,72. Визначити концентрацію вуглецю у цьому сплаві. |
| 6. Для сплаву залізо-вуглець складу 5% С–95% Fe зробити схематичні ескізи мікроструктури, які спостерігалися б при повільному охолодженні при наступних температурах: 1180°C, 1150°C і 700°C. Позначити фази та вказати їх склад. |

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Які лінії діаграми залізо-цементит відповідають перитектичному, евтектичному і евтектоїдному перетворенням? В чому сутність цих перетворень?
2. По яких лініях діаграми залізо-цементит при охолодженні виділяється цементит первинний, вторинний, третинний і з яких фаз?
3. Скільки однофазних і двофазних областей на діаграмі залізо-цементит?
4. Вказати точки діаграми залізо-цементит, які ділять сплави на сталі і чавуни, доевтектоїдні і заевтектоїдні сталі, доевтектичні і заевтектичні чавуни?
5. При якій температурі протікає і в чому полягає евтектоїдне перетворення на діаграмі залізо-цементит?
6. Чим обумовлена наявність на діаграмі декількох областей гомогенних твердих розчинів?
7. Назвіть лінію солідусу на діаграмі залізо-цементит.
8. Вказати для чистого заліза критичні температури: точка магнітного переходу, поліморфні перетворення $\alpha \rightarrow \gamma$, $\gamma \rightarrow \delta$.

9. Який максимальний вміст вуглецю у фериті для високотемпературної та низькотемпературної кристалічної ґратки?
10. З яких фаз складаються заевтектоїдні сталі при кімнатній температурі?
11. З якої фази і по якій лінії діаграми залізо-цементит виділяється цементит третинний?
12. До якого виду чавуну відноситься сплав, що містить 5,1% С?
13. Визначте по діаграмі залізо-цементит, з яких фаз складається сталь з 0,47 % С при температурі 100 і 1000°C?
14. Поясніть, чому діаграма стану залізовуглецевих сплавів має порівняно складний вигляд?
15. Поясніть причину поділення сплавів на діаграмі залізо-цементит на сталі та чавуни.
16. Які алотропічні форми має залізо? У яких температурних інтервалах вони існують в рівноважних умовах?
17. Яка температура (лінія діаграми залізо-цементит) відповідає перитектичному перетворенню? У чому воно полягає?
18. Яка форма графіту найбільш сприятлива з точки зору набуття високих механічних властивостей?
19. При якій температурі протікає і в чому полягає евтектоїдне перетворення?
20. По представленій діаграмі стану Fe-Fe₃C вказати основні лінії, точки і структурно-фазовий склад усіх областей діаграми.
21. Які поліморфні перетворення відбуваються в залізі? Вказати температури.
22. Що таке ферит, аустеніт, цементит, перліт і ледебурит? Вказати тип їх кристалічної ґратки.
23. Які перетворення відбуваються при охолодженні з рідкого стану до кімнатної температури в доевтектоїдному, заевтектоїдному, доевтектичному, евтектичному та заевтектичному сплаві?

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 13

ДИФУЗІЙНІ ПРОЦЕСИ ПРИ ХІМІКО-ТЕРМІЧНІЙ ОБРОБЦІ СТАЛІ

Мета роботи: закріпити, поглибити та узагальнити теоретичні знання, а також використовувати ці знання при розв'язанні конкретних інженерних задач з розрахунку процесу дифузії при хіміко-термічній обробці деталей.

СТИСЛІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Хіміко-термічною обробкою (ХТО) називають технологічний процес дифузійного насичення поверхневого шару деталей різними елементами. Різні види хіміко-термічної обробки застосовують для підвищення поверхневої твердості, контактної витривалості, стійкості до зношення, опору втомленості, а також для захисту від хімічної, електрохімічної та газової корозії.

В залежності від насичуючого елемента хіміко-термічну обробку сталі поділяють на такі види: цементація, азотування, ціанування (нітроцементація), дифузійне насичення сталі металами і неметалами.

Залежно від агрегатного стану насичуючого середовища (твердий, рідкий, газоподібний) розрізняють процеси газової цементації, газового азотування і нітроцементації, цементації у твердому карбюризаторі, рідкого ціанування, борування.

При ХТО деталь розміщують у середовищі з високим вмістом елемента, який дифундує у метал. Процес насичення поверхневого шару металу цим елементом складається з трьох етапів.

На першому етапі відбуваються хімічні реакції у середовищі, в якому розміщена деталь, у результаті чого утворюються активні атоми елемента, який дифундує.

На другому етапі процесу відбувається абсорбція або хемосорбція активних атомів поверхнею металу, в результаті чого дуже тонкий

поверхневий шар насичується дифундуєчим елементом, тобто відбувається процес абсорбції. Цей процес можливий тільки тоді, коли дифундуєчий елемент здатний розчинятися в матеріалі деталі або утворювати з ним хімічні сполуки.

Третій етап – дифузійне проникнення елемента вглиб металу, що супроводжується утворенням твердих розчинів чи фазовою перекристалізацією. В результаті утворюється дифузійний шар зі змінною концентрацією дифундуєчого елемента по перерізу. Цей етап є найбільш тривалим і саме він визначає тривалість всього процесу ХТО.

Процес дифузії описується першим законом Фіка: Кількість елемента dM , що дифундує за час dt через елементарну поверхню dA , нормальну до напрямку дифузії, пропорційна градієнту концентрації dC/dn цього елемента:

$$dM = -DdAdt \frac{dC}{dn} \quad (13.1)$$

Коефіцієнт пропорційності D називають коефіцієнтом дифузії, розмірність якого m^2/c . Від'ємний знак вказує на напрямок дифузійного потоку від більших концентрацій до менших.

Дифузійний потік (потік дифундуєчого елемента або швидкість дифузії), що переноситься через одиницю поверхні в одиницю часу, дорівнює:

$$J = \frac{dM}{dAdt} = -D \frac{dC}{dn} \left[\frac{кг}{m^2 \cdot c} \right] \quad (13.2)$$

При перенесенні речовини в одному напрямку і стаціонарних умовах (рис. 13.1) рівняння (13.2) набуває вигляду:

$$J = -D \frac{\Delta C}{\Delta x} = -D \frac{C_A - C_B}{x_A - x_B} = D \frac{C_A - C_B}{x_B - x_A}, \quad (13.3)$$

де C_A, C_B – концентрація дифундуєчого елемента відповідно в перерізах x_A, x_B .

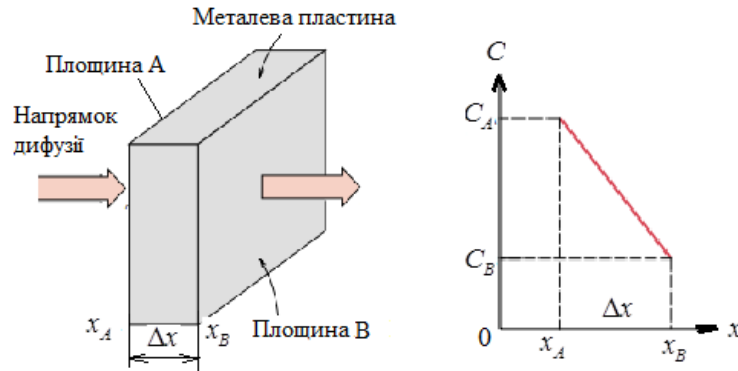


Рис. 13.1 – Профіль концентрації дифундуючого елемента вздовж осі x при стаціонарній дифузії

При нестационарних умовах використовується другий закон Фіка:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) = D \nabla^2 C \quad (13.4)$$

При дифузії в одному напрямку рівняння (13.4) набуває вигляду:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (13.5)$$

Розв'язок рівняння (13.5) дозволяє визначити концентрацію дифундуючого елемента (далі – ДЕ) в матеріалі на глибині x , як функцію часу.

Якщо в початковий момент концентрація ДЕ в матеріалі по всій товщині листа дорівнює C_0 , а в момент часу t концентрація ДЕ на поверхні матеріалу становить C_s , тоді має місце залежність:

$$\frac{C_x - C_0}{C_s - C_0} = 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right), \quad (13.6)$$

де C_x – концентрація дифундуючого елемента на глибині x від поверхні матеріалу (рис. 13.2).

Якщо необхідно отримати певну концентрацію C_x дифундуючого елемента на певній глибині матеріалу, тоді рівняння (13.6) є константою, тобто:

$$\frac{C_x - C_0}{C_s - C_0} = \text{const}$$

В такому випадку, маємо:

$$1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) = \text{const}; \quad \frac{x}{2\sqrt{Dt}} = \text{const}; \quad \frac{x^2}{Dt} = \text{const}; \quad Dt = \text{const} \quad (13.7)$$

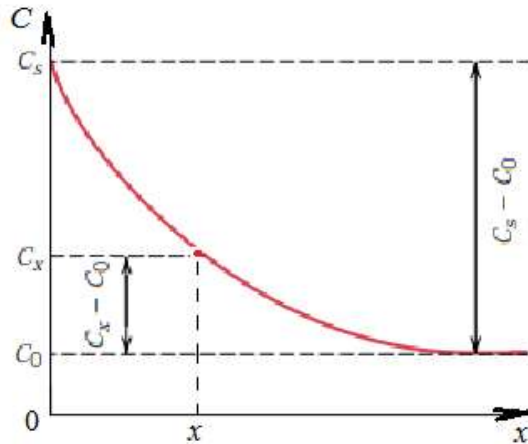


Рис. 13.2 – Профіль концентрації дифундуючого елемента вздовж осі x при нестационарній дифузії

Залежність коефіцієнта дифузії D від температури описується рівнянням:

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{Q_D}{RT}\right) \quad (13.8)$$

$$\ln D - \ln D_0 = -\frac{Q_D}{RT}, \quad (13.9)$$

де

D_0 – константа, що залежить від дифундуючого елемента і металу, який їм насичується, $\text{м}^2/\text{с}$;

Q_D – енергія активації процесу дифузії, це енергія, що необхідна для створення дифузійного руху одного моля атомів, Дж/моль ;

R – газова постійна, $8,31 \text{ Дж/моль}\cdot\text{К}$;

T – абсолютна температура (К).

Коефіцієнт дифузії D зростає з підвищенням температури, що суттєво впливає на тривалість процесу ХТО.

Результати ХТО визначаються товщиною дифузійного шару та концентрацією насичуючого елемента у поверхневому шарі, а основними її технологічними параметрами є склад насичуючого середовища, температура і тривалість процесу.

ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ЗАВДАНЬ

1. Пластина заліза піддається газовій цементації при $700\text{ }^\circ\text{C}$. Розрахуйте дифузійний потік вуглецю через пластину, при досягненні стаціонарного стану, за наступних умов: коефіцієнт дифузії при вказаній температурі становить $3 \times 10^{-11}\text{ м}^2/\text{с}$; концентрація вуглецю на відстані 5 і 10 мм від поверхні цементації відповідно дорівнює 1,2 і 0,8 кг/м³.

Розв'язання

Для визначення дифузійного потоку використовується перший закон Фіка - рівняння (13.5):

$$J = -D \frac{\Delta C}{\Delta x} = -D \frac{C_A - C_B}{x_A - x_B} = D \frac{C_A - C_B}{x_B - x_A}$$

$$J = 3 \cdot 10^{-11} \frac{1,2 - 0,8}{(10 - 5)10^{-3}} = 2,4 \cdot 10^{-9} \text{ кг} / \text{м}^2 \cdot \text{с}$$

Відповідь: $J = 2,4 \cdot 10^{-9} \text{ кг} / \text{м}^2 \cdot \text{с}$

Хіміко-термічна обробка цементацією сталевого сплаву тривалістю 15 годин підвищує концентрацію вуглецю до 0,35 мас.% на відстані 2,0 мм від поверхні. Оцініть час, необхідний для досягнення тієї ж концентрації вуглецю на відстані 6,0 мм від поверхні для ідентичної сталі при тій самій температурі цементації.

Розв'язання

Якщо необхідно отримати певну концентрацію C_x дифундуючого елемента на певній глибині матеріалу, застосовуємо рівняння (13.7):

$$\frac{x^2}{Dt} = const$$

Оскільки температура постійна, то й коефіцієнт дифузії D є постійним, тобто:

$$\frac{x^2}{t} = const \quad \rightarrow \quad \frac{x_1^2}{t_1} = \frac{x_2^2}{t_2}$$

Час, необхідний для досягнення концентрації вуглецю 0,35 мас.% на відстані 6,0 мм від поверхні сталі при тій же температурі, дорівнює:

$$t_2 = t_1 \frac{x_2^2}{x_1^2} = t_1 \left(\frac{x_2}{x_1} \right)^2 = 15 \left(\frac{6}{2} \right)^2 = 135 \text{ годин}$$

Відповідь: $t_2 = 135 \text{ годин}$

3. Коефіцієнти дифузії нікелю у залізі при температурі 1473 К становить $2,2 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2 / \text{с}$, а при 1673 К - $4,8 \cdot 10^{-14} \text{ м}^2 / \text{с}$. Визначити константу D_0 і енергію активації Q_D дифузії. Яким буде коефіцієнт дифузії D при температурі 1573 К?

Розв'язання

Використовуючи рівняння (13.9), складемо два рівняння з двома невідомими D_0 і Q_D :

$$\ln D_1 - \ln D_0 = -\frac{Q_D}{RT_1}; \quad \ln D_2 - \ln D_0 = -\frac{Q_D}{RT_2}$$

Розв'язуючи систему рівнянь відносно Q_D , отримуємо:

$$\ln D_1 - \ln D_2 = -\frac{Q_D}{RT_1} + \frac{Q_D}{RT_2} = -\frac{Q_D}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)$$

$$Q_D = -R \frac{\ln D_1 - \ln D_2}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}} = -8,31 \frac{\ln 2,2 \cdot 10^{-15} - \ln 4,8 \cdot 10^{-14}}{\frac{1}{1473} - \frac{1}{1673}} = 315618 \frac{\text{Дж}}{\text{моль}}$$

Тепер знаходимо константу D_0 з рівняння (13.8):

$$D_0 = D_1 \exp\left(\frac{Q_D}{RT_1}\right) = 2,2 \cdot 10^{-15} \exp\left(\frac{315618}{8,31 \cdot 1473}\right) = 3,47 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 / \text{с}$$

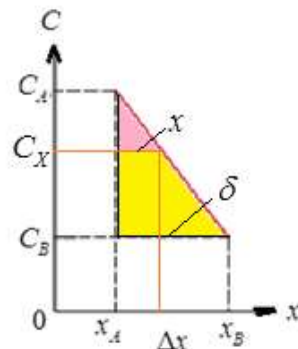
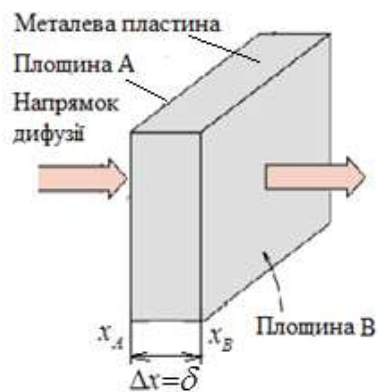
Використовуючи значення D_0 і Q_D , знаходимо з рівняння (13.8) коефіцієнт дифузії при температурі 1573 К:

$$D = 3,47 \cdot 10^{-4} \exp\left(-\frac{315618}{8,31 \cdot 1573}\right) = 1,13 \cdot 10^{-14} \text{ м}^2 / \text{с}$$

Відповідь: $Q_D = 315618 \frac{\text{Дж}}{\text{моль}}$; $D_0 = 3,47 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 / \text{с}$; $D = 1,13 \cdot 10^{-14} \text{ м}^2 / \text{с}$

ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОГО ОПРАЦЮВАННЯ

- Лист сталі товщиною 1,5 мм піддається азотуванню при 1200°C. Коефіцієнт дифузії азоту в сталі при цій температурі дорівнює $6 \times 10^{-11} \text{ м}^2/\text{с}$, а дифузійний потік становить $1,2 \times 10^{-7} \text{ кг}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$. На якій відстані x від поверхні азотування концентрація азоту в листі досягне $C_x = 2 \text{ кг}/\text{м}^3$ при концентрації на поверхні $4 \text{ кг}/\text{м}^3$? Вважати процес стаціонарним, а розподіл концентрацій – лінійним.



2. Визначити кількість водню, що дифундує за годину через пластину паладію товщиною 5 мм і площею $0,20 \text{ м}^2$ при $500 \text{ }^\circ\text{C}$ за наступних умов: концентрація водню з одного боку пластини $2,4 \text{ кг/м}^3$, з іншого – в чотири рази менше; коефіцієнт дифузії становить $10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$. Вважати, що досягнуті стаціонарні умови.
3. При цементації деталі зі сталевого сплаву тривалістю 10 годин концентрація вуглецю $0,45 \text{ мас.}\%$ була досягнута на глибині 2,5 мм від поверхні. Оцініть час, необхідний для досягнення концентрації $0,45 \text{ мас.}\%$ на глибині 5,0 мм для ідентичної деталі при тій самій температурі цементації.
4. Коефіцієнти дифузії міді в алюмінії при температурах 500°C і 600°C відповідно дорівнюють $4,8 \times 10^{-14}$ і $5,3 \times 10^{-13} \text{ м}^2/\text{с}$. Для досягнення певної концентрації міді у певному перерізі алюмінієвої пластини при 600°C витрачається 10 годин. Визначити приблизний час для досягнення того ж самого результату дифузії при температурі $500 \text{ }^\circ\text{C}$.
5. Коефіцієнти дифузії заліза у нікелі при температурі $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ становить $9,4 \cdot 10^{-16} \text{ м}^2 / \text{с}$, а при $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ - $2,4 \cdot 10^{-14} \text{ м}^2 / \text{с}$. Визначити константу D_0 і енергію активації Q_D дифузії. Яким буде коефіцієнт дифузії D при температурі $1100 \text{ }^\circ\text{C}$?
6. Після газової цементації сталюого листа товщиною 1 мм при 725°C , витримки з метою досягнення стаціонарного стану і швидкого охолодження до кімнатної температури, масова частка вуглецю на обох поверхнях становила $0,012 \%$ і $0,0075 \%$. Визначити коефіцієнт дифузії при дифузійному потоці $1,4 \times 10^{-8} \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$. Густина вуглецю 2 г/см^3 , - сталі $7,9 \text{ г/см}^3$.

7. Сталеву заготовку, що має рівномірну концентрацію вуглецю $C_0=0,25$ мас% по всьому об'єму, піддають карбюризації при 950°C з доведенням концентрації вуглецю на поверхні до $C_s=1,2$ мас% та її подальшою підтримкою. Скільки часу потрібно для досягнення вмісту вуглецю $0,8$ мас% на відстані $0,5$ мм від поверхні, що піддається карбюризації? Коефіцієнт дифузії вуглецю в залізі при температурі процесу становить $1,6 \times 10^{-11}$ м²/с.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Що являє собою хіміко-термічна обробка? З яких стадій вона складається?
2. Охарактеризуйте технологічні параметри цементації: температуру, швидкість, глибину шару.
3. Яка кінцева мета цементації сталі? Які властивості забезпечує цементація?
4. Яка термічна обробка проводиться після цементації?
5. У чому полягає азотування? За рахунок чого досягається висока твердість азотованого шару? Яка термічна обробка передуює азотуванню? При якій температурі проводять азотування?
6. Проведіть порівняння азотування і цементації.
7. Сформулюйте перший і другий закони Фіка. Дайте визначення дифузійному потоку. Вкажіть розмірність коефіцієнта дифузії.
8. Якими особливостями повинна володіти діаграма стану системи «метал, що насичується - компонент, що насичує» для здійснення хіміко-термічної обробки?

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 14

КІНЕТИКА ФАЗОВИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ

Мета роботи: перевірка уміння студентів використовувати теоретичні знання при розв'язанні практичних задач матеріалознавства.

СТИСЛІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Кристалізація - це перехід рідини у твердий (кристалічний) стан. Як всякий спонтанний процес, кристалізація протікає за термодинамічних умов, що забезпечують зниження енергії Гіббса системи.

Кристалізація складається з двох елементарних процесів - зародження центрів кристалізації і росту кристалів з цих центрів.

Рекристалізація – це зародження та ріст нових рівноосних зерен, що відрізняються досконалішою ґраткою та значно меншою густиною дислокацій.

Температура початку рекристалізації $T_{РЕК}$ (температурний поріг рекристалізації) – це мінімальна температура, за якою з'являється 4-5 зародків нових зерен. Температурний поріг рекристалізації визначається за формулою:

$$T_{РЕК} = k T_{ПЛ}, \quad (14.1)$$

де $T_{ПЛ}$ – температура плавлення металу, К; k – коефіцієнт, який залежить від чистоти металу, ступеня деформації, тривалості нагрівання.

Для металів високої чистоти $k = 0,1 \dots 0,3$; для металів технічної чистоти $k = 0,4$; для сплавів $k = 0,5 \dots 0,8$.

Перлітне перетворення підпорядковується законам вторинної кристалізації і складається з виникнення з аустеніту зерен перліту та їхнього росту. Зародження зерен відбувається як в результаті переохолодження аустеніту, так і утворення центрів кристалізації, обумовлених присутністю в

сталі різноманітних домішок і неметалічних включень (нітридів, оксидів). Ріст зерен перліту, будучи дифузійним процесом, може відбуватися тільки при достатньо високих температурах.

При вивченні кінетики процесів кристалізації, рекристалізації використовують рівняння Аврамі:

$$y = 1 - \exp(-kt^n), \quad (14.2)$$

де y - об'ємна доля (частка, фракція) нової фази;

k - константа швидкості реакції, що залежить від швидкості наростання зародків та швидкості утворення центрів нової фази;

t - час перетворення, с;

n - показник ступеня.

Застосування рівняння Аврамі при аналізі процесів розпаду і утворення аустеніту в сталях та кінетики мартенситного перетворення показало задовільний збіг обчислених і експериментальних кривих.

За швидкість перетворення приймається зворотна величина часу, необхідного для досягнення 50 % перетворення:

$$r = 1 / t_{0,5} \quad (14.3)$$

Температура в процесі термічної обробки, впливає на кінетику і швидкість перетворення. Для більшості реакцій, в певних діапазонах температур, швидкість перетворення r збільшується з підвищенням температури згідно із залежністю:

$$r = A \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (14.4)$$

$$\ln r - \ln A = -\frac{Q}{RT} \quad (14.5)$$

де A – температурно-незалежна константа;

Q – енергія активації для певної реакції;

R – газова постійна, 8,31 Дж/моль-К; ;

T – абсолютна температура (К).

Зверніть увагу, що коефіцієнт дифузії має таку ж температурну залежність (рівняння 13.8). Процеси, швидкість яких виявляють таку залежність від температури, іноді називають термічно активованими.

ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ЗАВДАНЬ

1. Для фазового перетворення, що підпорядковується рівнянню Аврамі, визначити швидкість реакції, припускаючи, що константи n і k мають відповідні значення 2,0 і $5 \cdot 10^{-4}$.

Розв'язання

За швидкість реакції приймається зворотна величина часу, необхідного для досягнення 50 % перетворення. Час, необхідний для досягнення 50 % перетворення знайдемо за формулою (14.2):

$$t_{0,5} = \sqrt[n]{-\frac{\ln(1-y)}{k}} = \sqrt[2]{-\frac{\ln(1-0,5)}{5 \cdot 10^{-4}}} = 37,23 \text{ с}$$

Швидкість реакції знайдемо за формулою (14.3):

$$r = \frac{1}{t_{0,5}} = \frac{1}{37,23} = 0,0268 \text{ с}^{-1}$$

Відповідь: $r = 0,0268 \text{ с}^{-1}$

2. Кінетика аустеніт-перлітного перетворення підпорядковується рівнянню Аврамі. Визначити час, необхідний для перетворення 95% аустеніту в перліт за наступних умов: $y_1 = 0,2$ при $t_1 = 12,6 \text{ с}$; $y_2 = 0,8$ при $t_2 = 28,2 \text{ с}$.

Розв'язання

Час, необхідний для перетворення 95% аустеніту в перліт знайдемо за формулою (14.2):

$$y = 1 - \exp(-kt^n); \quad \exp(-kt^n) = 1 - y; \quad t = \sqrt[n]{-\frac{\ln(1-y)}{k}}$$

Перш за все, треба визначити константу швидкості k і показник ступеня n :

$$\exp(-kt^n) = 1 - y; \quad -kt^n = \ln(1-y); \quad k = -\frac{\ln(1-y)}{t^n}$$

$$k = -\frac{\ln(1-y_1)}{t_1^n} = -\frac{\ln(1-y_2)}{t_2^n}$$

$$\frac{\ln(1-0.2)}{12.6^n} = \frac{\ln(1-0.8)}{28.2^n}$$

$$\frac{\ln 0.8}{12.6^n} = \frac{\ln 0.2}{28.2^n}; \quad \frac{28.2^n}{12.6^n} = \frac{1,609}{0,223} = 7,211$$

$$n \left(\ln \frac{28.2}{12.6} \right) = \ln 7,211; \quad n = 2.45$$

$$k = -\frac{\ln 0,2}{28,2^{2,45}} = 4,5 \cdot 10^{-4}$$

Час, необхідний для перетворення 95% аустеніту в перліт дорівнює:

$$t = \sqrt[n]{-\frac{\ln(1-y)}{k}} = \sqrt[2.45]{-\frac{\ln(1-0,95)}{4,5 \cdot 10^{-4}}} = 36,35 \text{ с}$$

Відповідь: $t = 36,35 \text{ с}$

ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОГО ОПРАЦЮВАННЯ

1. Кінетика аустеніт-перлітної перетворення підпорядковується рівнянню Аврамі. Визначити час, необхідний для перетворення 95%, 80% аустеніту в перліт за наступних умов: $y_1 = 0,2$ при $t_1 = 280$ с; $y_2 = 0,6$ при $t_2 = 425$ с.

3. На підставі даних, отриманих при дослідженні процесу рекристалізації міді, побудуйте логарифмічну залежність швидкості рекристалізації r від температури T , визначте енергію активації Q процесу та час $t_{0,5}$, необхідний для досягнення 50% рекристалізації міді при кімнатній температурі 20°C.

№	Температура, °C	Швидкість рекристалізації r , хв ⁻¹
1	135	0,105
2	119	0,044
3	113	0,029
4	102	0,0125
5	88	0,0042
6	43	0,000038

2. Для фазового перетворення, що підпорядковується рівнянню Аврамі, параметр n дорівнює 1,5. Якщо через 125 секунд реакція буде завершена на 25%, скільки часу необхідно для досягнення 90% перетворення?

4. Для фазового перетворення, що підпорядковується рівнянню Аврамі, визначити швидкість реакції, припускаючи, що константи n і k мають відповідні значення 3,0 і $7 \cdot 10^{-3}$.

5. Відомо, що кінетика рекристалізації для деякого сплаву підпорядковується рівнянню Аврамі, показник n при експоненті дорівнює 5,0. Якщо через 100 хв при певній температурі рекристалізована фракція становить 0,3, визначити швидкість рекристалізації при цій температурі.

6. Припускаючи, що кінетика рекристалізації алюмінію підпорядковується рівнянню Аврамі, визначити фракцію рекристалізованого алюмінію на 116,8 хвилині процесу за наступних умов: $y_1 = 0,3$ при $t_1 = 95,6$ хв; $y_2 = 0,8$ при $t_2 = 126,6$ хв.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Поясніть вплив форми, розмірів і взаємного розташування кристалів різних фаз у сплаві на властивості металів та сплавів.
2. Дайте роз'яснення щодо впливу фазового складу на фізико-хімічні властивості систем. Назвіть кристалізаційні параметри, що впливають на стан системи і формування мікроструктури.
3. Якими параметрами оцінюється кінетика фазового перетворення?
4. Поясніть вплив кінетики фазових перетворень на структуру.
5. Як визначається швидкість утворення центрів нової фази?
6. Дайте роз'яснення щодо рівняння Аврамі.
7. Який зв'язок між температурою початку рекристалізації і температурою плавлення?
8. Як залежить температура рекристалізації від чистоти металу? Що таке температурний поріг рекристалізації?

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 15

ГРАФІЧНІ МЕТОДИ ОЦІНКИ ДОВГОВІЧНОСТІ ПОЛІМЕРІВ

Мета роботи: ознайомитися з поняттям конструктивної міцності та методами визначення довговічності полімерних матеріалів.

СТИСЛІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Конструктивну міцність матеріалу характеризує комплекс механічних властивостей, що забезпечують надійну і тривалу роботу в умовах експлуатації. Конструктивна міцність визначається критеріями міцності, надійності та довговічності.

Довговічністю називають здатність матеріалу деталі чинити опір розвитку поступового руйнування, забезпечуючи її працездатність впродовж заданого часу.

Одним з критеріїв довговічності є витривалість, під якою розуміють здатність матеріалу чинити опір втомі, або поступовому накопиченню ушкоджень під дією навантажень, що циклічно повторюються. Витривалість залежить від живучості, що визначає тривалість роботи деталі від моменту зародження першої макроскопічної тріщини втоми (розміром 0,5 - 1,0 мм) до руйнування. При циклічному навантаженні руйнування починається в місцях концентрації напруження (деформації), що локалізується на різного роду ушкодженнях поверхневого шару. Недостатня довговічність обладнання викликає необхідність знижувати навантаження на окремі вузли і деталі, збільшувати їх вагу і габарити, призводить до значних витрат на виготовлення запасних деталей і ремонт обладнання. Підвищення довговічності деталей обладнання та інструменту в значній мірі може бути досягнуто правильним вибором матеріалу для їх виготовлення і раціональним технологічним процесом їх обробки.

Довговічність полімерних матеріалів залежить від величини прикладеного навантаження, тривалості його дії та температури експлуатації. Залежність міцності від часу дії навантаження і температури характерна для всіх матеріалів, але у полімерів вона відчутна вже в області температур, близьких до нормальних.

Систематичне дослідження довговічності полімерів було проведено С.М. Журковим. Ним встановлено, що залежність довговічності полімерів від руйнівного напруження σ може бути описано рівнянням:

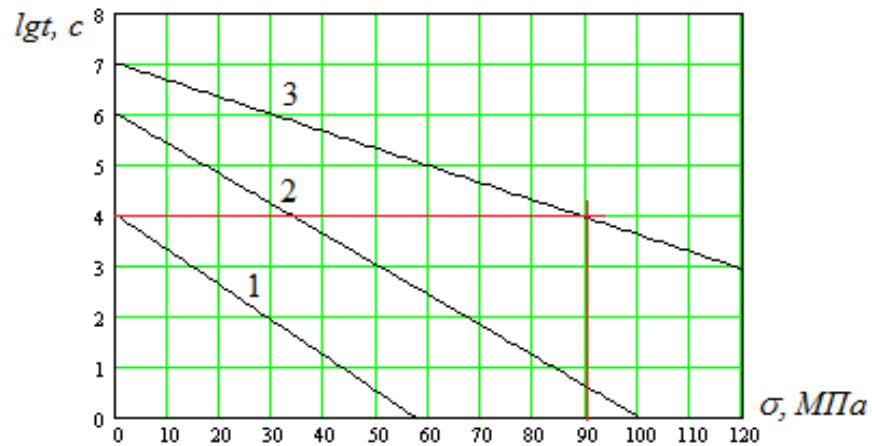
$$t = A \exp(-\beta\sigma), \quad (15.1)$$

де A і β - константи матеріалу.

В логарифмічних координатах залежність (15.1) має лінійний вигляд. Для більшості твердих матеріалів, в тому числі полімерів, залежності $\lg t$ від напруження σ при різних температурах утворюють «віяло» прямих, які при екстраполяції сходяться в одній точці.

ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ЗАВДАНЬ

1. На рисунку представлено залежності логарифму довговічності зразка полімерного матеріалу від напруження σ при температурах: 350 К (1), 300 К (2), 250 К (3). Визначити довговічність матеріалу при температурі 250 К і напруженні 90 МПа.



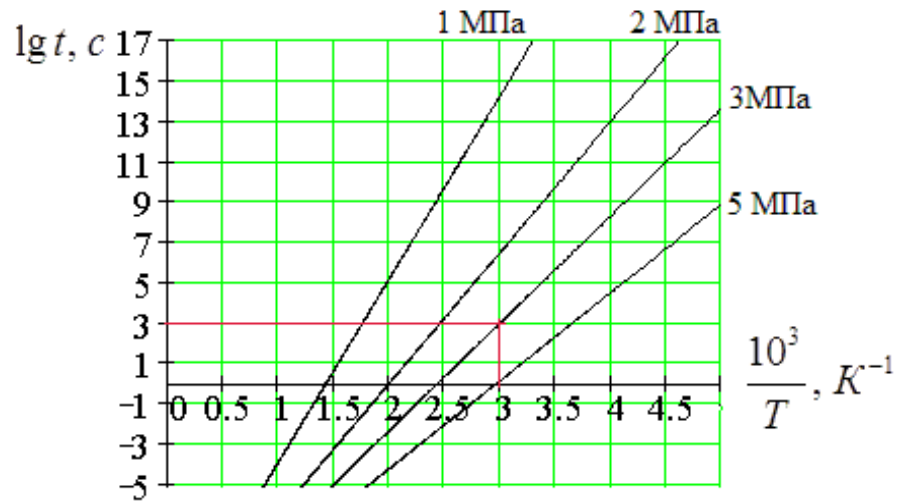
Розв'язання

З точки, що відповідає 90 МПа на осі напружень, проводимо перпендикуляр до пересічення з лінією, що відповідає температурі 250 К (3). Точці пересічення відповідає ордината 4, тобто:

$$\lg t = 4 \rightarrow t = 10^4 \text{ c}$$

Відповідь: Довговічність полімерного матеріалу при температурі 250 К і напруженні 90 МПа дорівнює $t = 10^4 \text{ c}$.

2. На рисунку представлено температурні залежності логарифму довговічності зразків полімерного матеріалу при напруженнях: 1 МПа, 2 МПа, 3 МПа, 5 МПа. Визначити довговічність зразка матеріалу при напруженні 3 МПа і температурі 60°С.



Розв'язання

Переводимо градуси Цельсія в градуси Кельвіна:

$$T = 60 + 273 = 333 K$$

Переводимо 333 K в масштаб горизонтальної осі:

$$\frac{10^3}{T} = \frac{10^3}{333} = 3 K^{-1}.$$

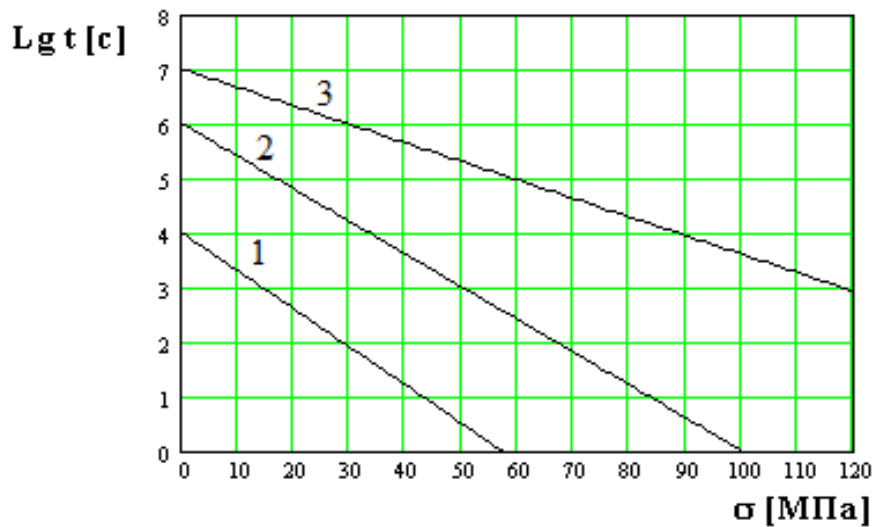
З точки 3, що відповідає температурі 333 K (60°С), проводимо перпендикуляр до пересічення з лінією, що відповідає напруженню 3 МПа. Точці пересічення відповідає ордината 3, тобто:

$$\lg t = 3 \rightarrow t = 10^3 c$$

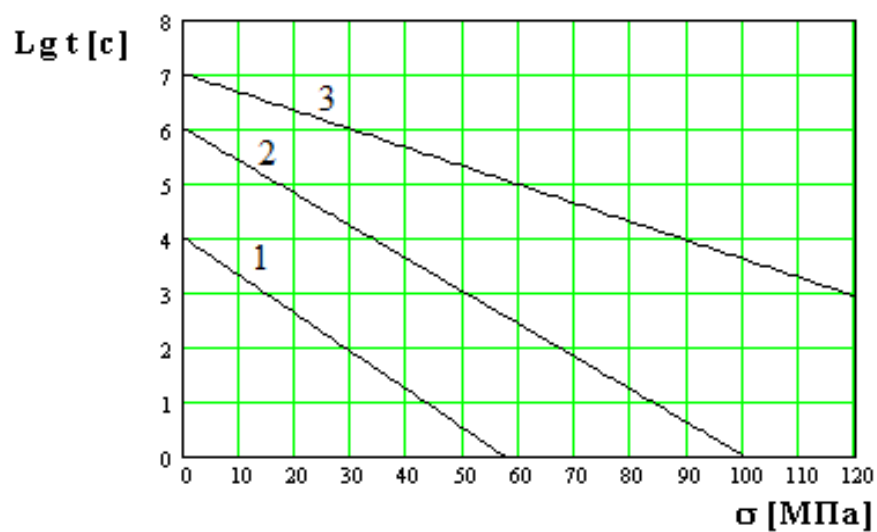
Відповідь: Довговічність полімерного матеріалу при напруженні 3 МПа і температурі 60°С дорівнює $t = 10^3 c$.

ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОГО ОПРАЦЮВАННЯ

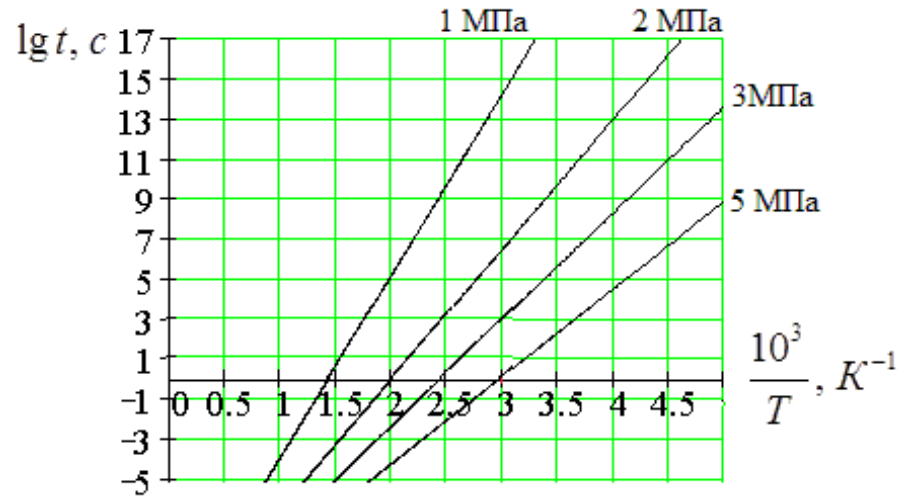
1. На рисунку представлено залежності логарифму довговічності зразка полімерного матеріалу від напруження σ при температурах: 350 К (1), 300 К (2), 250 К (3). Визначити довговічність матеріалу при температурі 350 К і напруженні 30 МПа.



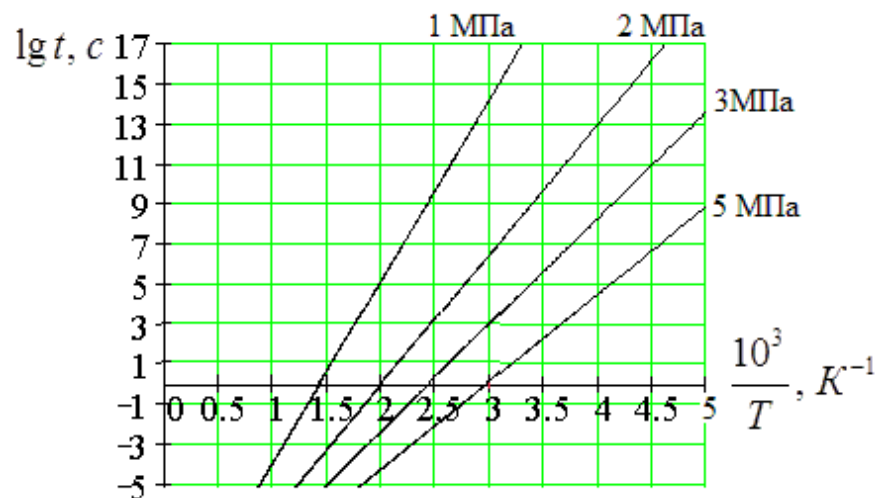
2. На рисунку представлено залежності логарифму довговічності зразка полімерного матеріалу від напруження σ при температурах: 350 К (1), 300 К (2), 250 К (3). Визначити довговічність матеріалу при температурі 300 К і напруженні 50 МПа.



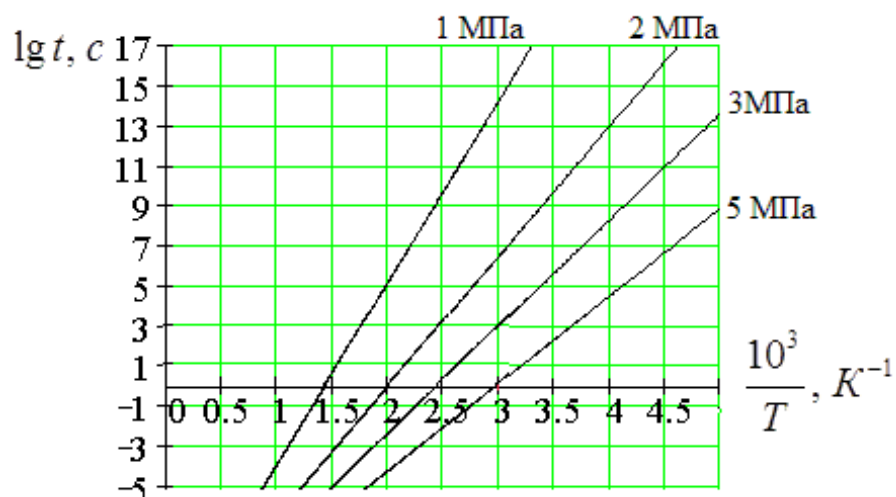
3. На рисунку представлено температурні залежності логарифму довговічності зразків полімерного матеріалу при напруженнях: 1 МПа, 2 МПа, 3 МПа, 5 МПа. Визначити довговічність зразка матеріалу при напруженні 1 МПа і температурі 227 °С.



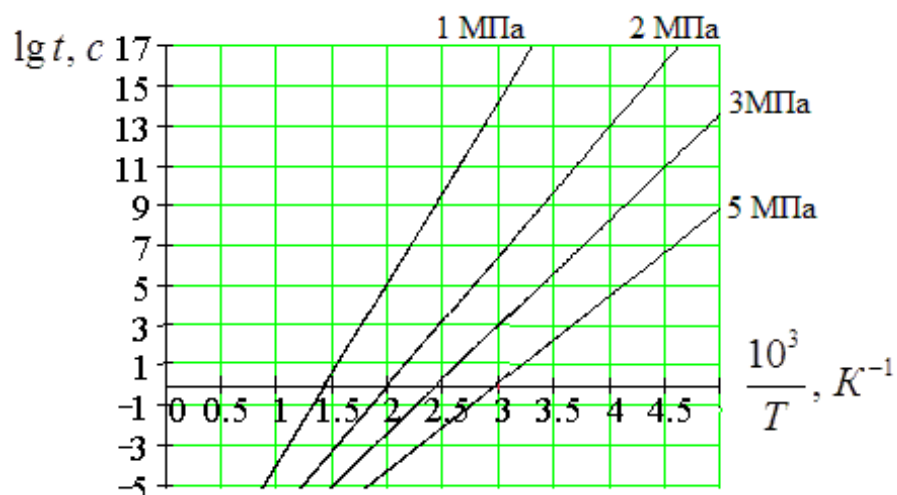
4. На рисунку представлено температурні залежності логарифму довговічності зразків полімерного матеріалу при напруженнях: 1 МПа, 2 МПа, 3 МПа, 5 МПа. Визначити довговічність зразка матеріалу при напруженні 3 МПа і температурі -73 °С.



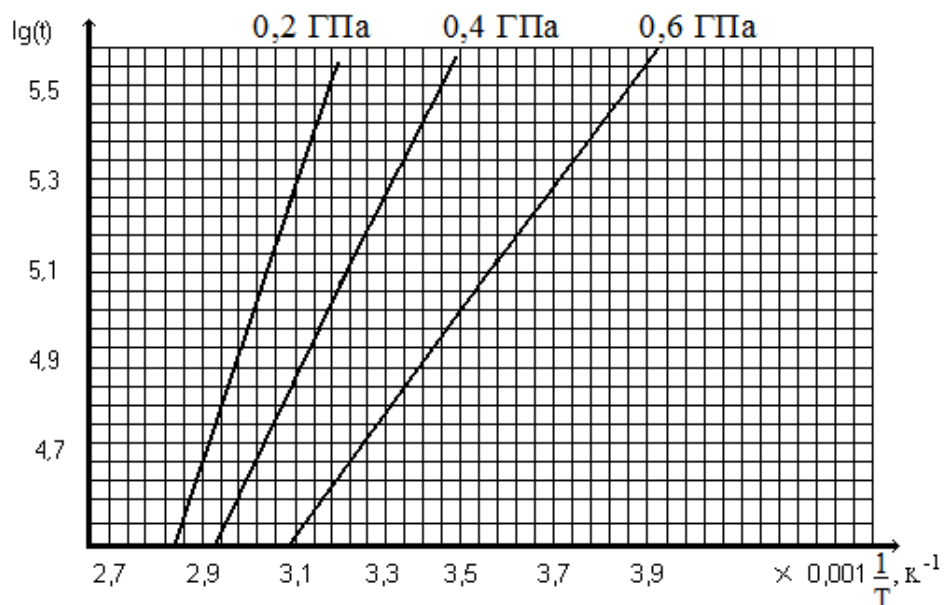
5. На рисунку представлено температурні залежності логарифму довговічності зразків полімерного матеріалу при напруженнях: 1 МПа, 2 МПа, 3 МПа, 5 МПа. Визначити довговічність зразка матеріалу при напруженні 2 МПа і температурі $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$.



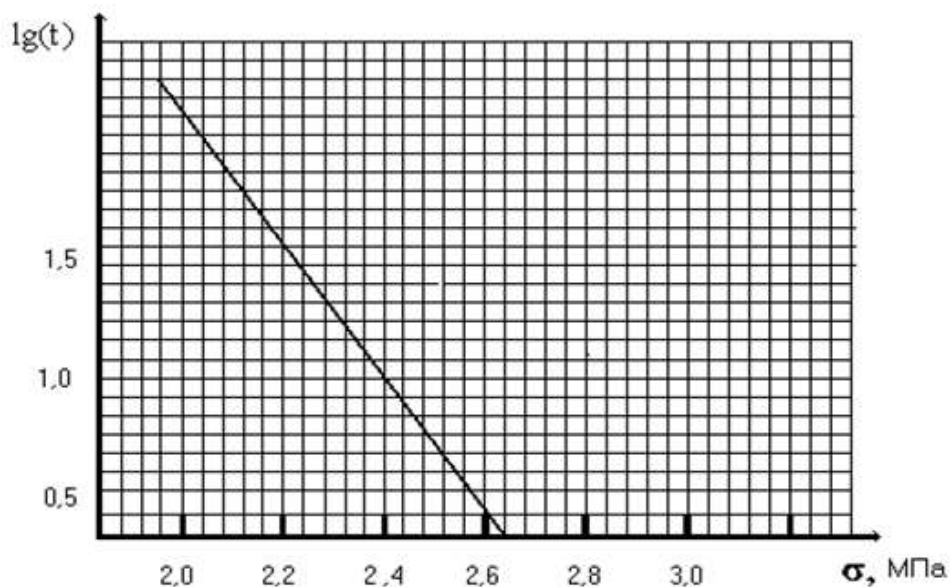
6. На рисунку представлено температурні залежності логарифму довговічності зразків полімерного матеріалу при напруженнях: 1 МПа, 2 МПа, 3 МПа, 5 МПа. Визначити довговічність зразка матеріалу при напруженні 5 МПа і температурі $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$.



7. На рисунку представлено температурні залежності довговічності зразків матеріалу для базисів протезів з акрилу при напруженнях: 0,2 ГПа, 0,4 ГПа і 0,6 ГПа. Визначити довговічність зразка матеріалу при напруженні 0,2 ГПа і температурі 49,6 °С.



8. На рисунку представлено залежність довговічності від напруження при постійній температурі для зразка полівінілхлориду, який застосовується при виготовленні еластичних прокладок базисів зубних протезів. Зразок зруйнувався через 10 с. Визначити напруження, при якому відбулося руйнування.



КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. З якої сировини виробляють пластмаси?
2. Як поділяються пластмаси за методикою отримання?
3. Як визначається твердість пластмас?
4. Як поділяються пластмаси за реакцією на нагрівання?
5. Яка методика визначення межі міцності пластмас на розтяг?
6. Що розуміють під довговічністю полімерних матеріалів?
7. Що описує рівняння Журкова і який вид воно має? Дайте необхідні пояснення.
8. Від яких чинників залежить довговічність полімерних матеріалів?
9. Як розраховується довговічність полімеру при циклічних навантаженнях?

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 16

КОМПОЗИЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ

Мета роботи: дослідити вплив форми, розмірів, кількості та характеру розміщення наповнювача на механічні характеристики композиційних матеріалів. Набути досвіду визначати напруження, що виникають у кожній фазі композиційного матеріалу, та деформації, які зазнає кожна фаза при певному навантаженні.

СТИСЛІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Композиційними називаються матеріали, до складу яких входять різні за властивостями нерозчинні один в одному або малорозчинні компоненти. Властивості композиційних матеріалів (композитів), в основному, залежать від фізико-хімічних властивостей компонентів та міцності зв'язку між ними.

Будь-який композит складається з матриці та наповнювача. Матриці можуть бути металевими, полімерними або комбінованими. В матриці рівномірно розподілені наповнювачі, що виконують роль армуючих компонентів. В якості наповнювачів використовують дисперсні частинки, неперервне та розривне волокно, шари (пластини) різних матеріалів. Дисперсні частинки розподіляються в композиті хаотично. Розривне, неперервне волокно та шаруваті матеріали розміщуються за різними схемами.

Властивості композитів залежать від форми, розмірів, об'ємної частки наповнювача та характеру його розміщення в матриці.

Армування дисперсними частинками

Для двофазних композитів з наповнювачем у вигляді дисперсних частинок, модуль пружності композита E_c знаходиться в межах:

$$E_c^{MAX} > E_c > E_c^{MN}$$

Граничні значення модуля пружності композита E_c визначаються за формулами:

$$E_c^{MAX} = E_m V_m + E_p V_p, \quad (16.1)$$

$$E_c^{MIN} = \frac{E_m E_p}{E_m V_p + E_p V_m}, \quad (16.2)$$

де E_m, E_p – модуль пружності матриці та частинок наповнювача, відповідно;

V_m, V_p – об'ємні частки матриці та частинок наповнювача, відповідно.

Індекси c, m і p відносяться до фаз композита, матриці та частинок наповнювача, відповідно.

Армування волокном

Ефективне зміцнення композита волокнами досягається при певному співвідношенню між довжиною волокна, його діаметром, міцністю волокон на розрив та міцністю зчеплення між волокнами і матрицею. Ця залежність має вигляд:

$$l_c = \frac{\sigma_f^* d}{2\tau_c}, \quad (16.3)$$

де l_c – критична довжина волокна, при якій має місце армуючий ефект;

d – діаметр волокна;

σ_f^* – межа міцності волокон на розрив;

τ_c – межа текучості матриці на зсув.

Для композитів на основі скляного і вуглецевого волокна критична довжина волокон становить близько 1 мм, що перевищує їх діаметр від 20 до 150 разів. Зі збільшенням довжини волокна ($l > l_c$) армування стає більш ефективним. Волокна довжиною $l \geq 15 l_c$ називаються неперервними. Розривні (короткі) волокна мають довжину $l < 15 l_c$. Армуючий ефект

практично не спостерігається при розривних волокнах з довжиною значно меншою l_c . Для підвищення міцності композита волокна мають бути неперервної довжини.

Модуль пружності при поздовжньому навантаженні

При поздовжньому навантаженні композита, армованого неперервним волокном у поздовжньому напрямку, загальне навантаження F_c дорівнює сумі навантажень, що припадають на матрицю і волокна:

$$F_c = F_m + F_f \quad (16.4)$$

$$\sigma_c A_c = \sigma_m A_m + \sigma_f A_f \quad (16.5)$$

$$\sigma_c = \sigma_m \frac{A_m}{A_c} + \sigma_f \frac{A_f}{A_c} \quad (16.6)$$

$$\sigma_c = \sigma_m V_m + \sigma_f V_f \quad (16.7)$$

При поздовжньому навантаженні композита, армованого неперервним волокном у поздовжньому напрямку, деформація композита, матриці та волокон однакова, тобто:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_m = \varepsilon_f \quad (16.8)$$

Поділивши кожен член рівнянні (16.7) на відповідну деформацію (16.8), отримаємо:

$$\frac{\sigma_c}{\varepsilon_c} = \frac{\sigma_m}{\varepsilon_m} V_m + \frac{\sigma_f}{\varepsilon_f} V_f \quad (16.9)$$

За умови пружної деформації композита, матриці та волокна, рівняння (16.9) набуває вигляду:

$$E_{cl} = E_m V_m + E_f V_f \quad (16.10 \text{ a})$$

$$E_{cl} = E_m (1 - V_f) + E_f V_f \quad (16.10 \text{ б})$$

де E_{cl} – модуль пружності композита при поздовжньому навантаженні;

E_m , E_f – модулі пружності матриці і волокна, відповідно;

V_m , V_f - об'ємна частка матриці і волокна, відповідно.

При поздовжньому навантаженні відношення навантаження, яке сприймають волокна, до навантаження, яке сприймає матриця, дорівнює:

$$\frac{F_f}{F_m} = \frac{E_f V_f}{E_m V_m} \quad (16.11)$$

Модуль пружності при поперечному навантаженні

При поперечному навантаженні композита, армованого неперервним волокном у поздовжньому напрямку, напруження в композиті, матриці та волокнах однакові, тобто:

$$\sigma_c = \sigma_m = \sigma_f = \sigma \quad (16.12)$$

Загальна деформація композита при поперечному навантаженні дорівнює:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_m V_m + \varepsilon_f V_f \quad (16.13)$$

$$\frac{\sigma}{E_{ct}} = \frac{\sigma}{E_m} V_m + \frac{\sigma}{E_f} V_f \quad (16.14)$$

$$\frac{1}{E_{ct}} = \frac{V_m}{E_m} + \frac{V_f}{E_f} \quad (16.15)$$

$$E_{ct} = \frac{E_m E_f}{E_m V_f + E_f V_m} = \frac{E_m E_f}{E_m V_f + E_f (1 - V_f)}, \quad (16.16)$$

де E_{ct} – модуль пружності композита при поперечному навантаженні.

Поздовжня міцність композитів

При поздовжньому навантаженні композита, армованого неперервним волокном у поздовжньому напрямку, за міцність приймається максимальне напруження на кривій напруження-деформація. Поздовжня міцність волокнистих композитів розраховується за формулою:

$$\sigma_{cl}^* = \sigma_m' (1 - V_f) + \sigma_f^* V_f, \quad (16.17)$$

де σ_f^* , σ_m' – напруження у волокнах і в матриці, відповідно, при руйнуванні композита.

Поперечна міцність композитів

Міцність неперервних і односпрямованих волокнистих композитів анізотропна. Такі композити, як правило, використовують при навантаженнях вздовж високоміцного поздовжнього напрямку. Однак, під час експлуатації можуть бути присутніми поперечні розтягуючі навантаження. За цих обставин, це може призвести до передчасного руйнування, оскільки поперечна міцність, низька – іноді вона нижче міцності на розтяг матриці. Заходи, що застосовуються для підвищення поперечної міцності цих композитів передбачають модифікацію властивостей матриці.

Міцність композитів при армування розривними однонапрямленими волокнами

Незважаючи на те, що ефективність армування розривними волокнами нижча, ніж неперервними, композити з розривними однонапрямленими волокнами достатньо поширені. Ці композити можуть бути виготовлені з модулями пружності та міцністю на розтяг, які наближаються до 90% і 50% їх аналогів з неперервними волокнами. Для композитів з розривним однонапрямленим волокном, що мають рівномірний розподіл волокон по перерізу і в якому $l > l_c$, поздовжня міцність композита σ_{cl}^* визначається за формулою:

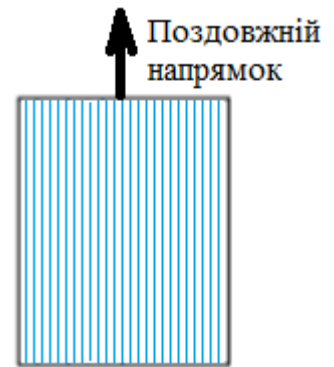
$$\sigma_{cl}^* = \sigma_f * V_f \left(1 - \frac{l_c}{2l} \right) + \sigma'_m (1 - V_f) \quad (16.18)$$

Якщо довжина волокна менша за критичну $l < l_c$, то поздовжня міцність композита дорівнює:

$$\sigma_{cl}^{*'} = \frac{l \tau_c}{d} V_f + \sigma'_m (1 - V_f) \quad (16.19)$$

ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ЗАВДАНЬ

1. Композиційний матеріал (далі – композит), що армований неперервним однонапрямленим скловолокном у поздовжньому напрямку, складається із 40 об.% скляних волокон з модулем пружності 69 ГПа та 60 об.% поліефірної смоли, яка при затвердінні має модуль пружності 3,4 ГПа. Зразок композита з площею поперечного перерізу 250 мм² піддається поздовжньому навантаженню з напруженням 50 МПа. Визначити навантаження, що діють на кожну фазу, та деформації наповнювача і матриці.



Розв'язання

Модуль пружності композита при поздовжньому навантаженні знайдемо за формулою (16.10a):

$$E_{cl} = E_m V_m + E_f V_f = 3,4 \cdot 0,6 + 69 \cdot 0,4 = 29,64 \text{ ГПа}$$

Загальне навантаження є сумою навантажень, що діють на волокна і матрицю зразка композита:

$$F_c = F_m + F_f$$

Визначимо загальне навантаження, що діє на зразок композиційного матеріалу з площею поперечного перерізу 250 мм² при напруженні 50 МПа:

$$F_c = \sigma A_c = 50 \cdot 10^6 \cdot 250 \cdot 10^{-6} = 12500 \text{ Н}$$

Знайдемо співвідношення між навантаженням на волокна і матрицю за формулою (16.11):

$$\frac{F_f}{F_m} = \frac{E_f V_f}{E_m V_m} = \frac{69 \cdot 0,4}{3,4 \cdot 0,6} = 13,53$$

$$F_f = 13,53 F_m$$

В результаті маємо:

$$12500 = F_m + 13,5 F_m = 14,5 F_m$$

Навантаження, що сприймає матриця, дорівнює:

$$F_m = \frac{12500}{14,53} = 860 \text{ Н}$$

Навантаження, що сприймають волокна, дорівнює:

$$F_f = F_c - F_m = 12500 - 860 = 11640 \text{ Н}$$

Визначимо площі поперечного перерізу, які займають волокна і матриця:

$$A_f = A_c V_f = 250 \cdot 0,4 = 100 \text{ мм}^2$$

$$A_m = A_c V_m = 250 \cdot 0,6 = 150 \text{ мм}^2$$

Обчислимо напруження, що виникають у кожній фазі:

$$\sigma_f = \frac{F_f}{A_f} = \frac{11640}{100 \cdot 10^{-6}} = 116,4 \text{ МПа}$$

$$\sigma_m = \frac{F_m}{A_m} = \frac{860}{150 \cdot 10^{-6}} = 5,73 \text{ МПа}$$

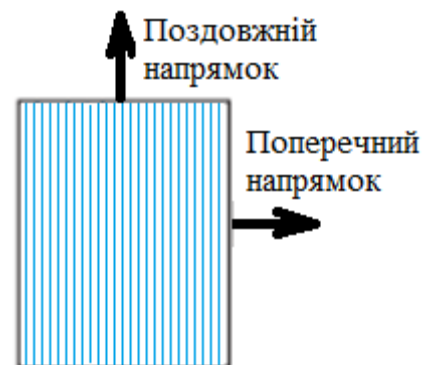
Використовуючи закон Гука, визначимо деформації, які зазнає кожна фаза композита:

$$\varepsilon_f = \frac{\sigma_f}{E_f} = \frac{116,4}{69 \cdot 10^3} = 1,69 \cdot 10^{-3}$$

$$\varepsilon_m = \frac{\sigma_m}{E_m} = \frac{5,73}{3,4 \cdot 10^3} = 1,69 \cdot 10^{-3}$$

Відповідь: $E_{cl} = 29,64 \text{ ГПа}$; $F_f = 11640 \text{ Н}$; $F_m = 860 \text{ Н}$; $\varepsilon_f = \varepsilon_m = 1,69 \cdot 10^{-3}$.

2. Визначити, чи можна виготовити композит з неперервного і орієнтованого арамідного волокна та епоксидної матриці з поздовжнім і поперечним модулями пружності $E_{cl} = 35 \text{ ГПа}$ і $E_{ct} = 5,17 \text{ ГПа}$ відповідно, враховуючи,



що модуль пружності епоксидної смоли і арамідних волокон відповідно становить $E_m = 3,4 \text{ ГПа}$ і $E_f = 131 \text{ ГПа}$.

Розв'язання

Підхід до розв'язку цієї задачі полягає у визначенні об'ємної частки волокон V_f при поздовжньому і поперечному навантаженні. Якщо об'ємні частки будуть однаковими, то цей композит можливий.

Знайдемо об'ємну частку волокон V_f при поздовжньому навантаженні за формулою (16.10b):

$$E_{cl} = E_m(1 - V_f) + E_f V_f$$

$$V_f = \frac{E_{cl} - E_m}{E_f - E_m} = \frac{35 - 3,4}{131 - 3,4} = \frac{31,6}{127,6} = 0,248$$

Знайдемо об'ємну частку волокон V_f при поперечному навантаженні за формулою (16.16):

$$E_{ct} = \frac{E_m E_f}{E_m V_f + E_f (1 - V_f)}$$

$$V_f = \frac{1 - \frac{E_m}{E_{ct}}}{1 - \frac{E_m}{E_f}} = \frac{1 - \frac{3,4}{5,17}}{1 - \frac{3,4}{131}} = \frac{0,342}{0,974} = 0,351$$

Відповідь: Композит, що відповідає заданим умовам неможливий, оскільки об'ємні частки різні.

3. Композит на основі епоксидної смоли, армований розривним однонапрямленим скловолоконом. Визначити поздовжню міцність σ_{cl}^* композита, враховуючи наступне: середній діаметр волокна $d = 0,015 \text{ мм}$; середня довжина волокна $l = 2,0 \text{ мм}$; об'ємна частка



волокон $V_f = 0,25$; міцність волокна при руйнуванні $\sigma_f^* = 3500$ МПа; міцність міжфазного зв'язку волокно-матриця $\tau_c = 100$ МПа і напруження матриці при руйнуванні композита $\sigma_m' = 5,5$ МПа.

Розв'язання

Перш за все, визначимо критичну довжину волокна за формулою (16.3):

$$l_c = \frac{\sigma_f^* d}{2\tau_c} = \frac{3500 \cdot 0,015}{2 \cdot 100} = 0,263 \text{ мм}$$

$$\frac{l}{l_c} = \frac{2}{0,263} = 7,6$$

Для розривного однонапрявленого волокнистого композита, що має рівномірний розподіл волокон і в якому $l > l_c$, поздовжня міцність композита σ_{cl}^* визначається за формулою (16.18):

$$\sigma_{cl}^* = \sigma_f^* V_f \left(1 - \frac{l_c}{2l}\right) + \sigma_m' (1 - V_f)$$

$$\sigma_{cl}^* = 3500 \cdot 0,25 \left[1 - \frac{0,263}{2 \cdot 2}\right] + 5,5(1 - 0,25) = 822 \text{ МПа}$$

Відповідь: $\sigma_{cl}^* = 3822$ МПа

ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОГО ОПРАЦЮВАННЯ

1. Оцініть максимальне та мінімальне значення теплопровідності для металокераміки, що містить 90 об.% частинок карбіду титану (TiC) у нікелевій матриці. Теплопровідність карбіду титану та нікелю відповідно дорівнює 27 Вт/м·К і 67 Вт/м·К.
2. Для деякої комбінації скловолокна та епоксидної матриці критичне співвідношення довжини волокна до діаметра волокна становить 40. Визначити міцність зчеплення волокно-матриця при міцності волокна на розтяг $3,45 \cdot 10^3$ МПа.
3. Чи можна виготовити суцільний та орієнтований композит з арамідного волокна та епоксидної матриці з поздовжнім і поперечним модулями пружності 35 ГПа і 5,17 ГПа відповідно? Чому так або чому ні? Припустити, що модуль пружності епоксидної смоли становить 3,4 ГПа. Відомо, що модуль пружності арамідних волокон може коливатися від 60 до 140 ГПа.
4. Для суцільного та орієнтованого композита, армованого волокнами, модулі пружності в поздовжньому та поперечному напрямках становлять 33,1 та 3,66 ГПа відповідно. Якщо об'ємна частка волокон дорівнює 0,30, визначити модулі пружності волокна та матриці.
5. Композит, що описаний у попередньому завданні, має площу поперечного перерізу 480 мм^2 і піддається поздовжньому навантаженню 53 400 Н. Визначити навантаження, що припадають на кожну фазу композита та відповідне напруження, а також деформацію, яку зазнає композит.

6. Композит, що армований неперервним волокном у поздовжньому напрямку, складається з 45 об.% арамідних волокон і 55 об.% полікарбонатної матриці. Напруження на полікарбонатну матрицю при руйнуванні арамідних волокон становить 35 МПа. Визначити поздовжню міцність композита та поздовжній модуль пружності. Механічні характеристики складових композита наведено в таблиці.

Складові композита	Модуль пружності, ГПа	Поздовжня міцність (міцність на розтяг), ГПа
Арамідне волокно	131	3,6
Полікарбонат	2,4	0,065

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Які матеріали називають композиційними? В чому полягають особливості композиційних матеріалів?
2. Яку будову мають композиційні матеріали?
3. Як будова композиційних матеріалів впливає на механічні характеристики.
4. Які бувають види волокнистих композитів? Опишіть їх властивості.
5. Назвіть основні вимоги до матриці композиційних матеріалів.
6. Назвіть основні вимоги до армуючих елементів композиційних матеріалів.
7. Класифікація композиційних матеріалів за видом матриць та видом армуючих елементів.
8. Що розуміють під критичною довжиною волокон? Наведіть формулу і дайте пояснення.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Бялік О.М. та ін. Металознавство: Підручник. – К.: ІВЦ «Політехніка», 2001. – 375 с. – ISBN 966-622-053-9.
2. Афтандіянц Є. Г., Зазимко О. В., Лопатько К. Г. Матеріалознавство: Підручник. К.: Вища освіта, 2012. – с 548.
3. Афанасьєва О.В. Матеріалознавство та конструкційні матеріали. Навч. посібник. – Харків: ХНУРЕ, 2016. – 188 с.
4. Матеріалознавство та конструкційні матеріали. Конспект лекцій: навчальні матеріали для самостійного та дистанційного вивчення для студ. спеціальності 163 «Біомедична інженерія» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: Л.Д Тарасова. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. Посилання на ресурс: <https://do.ipk.kpi.ua/course/view.php?id=1342>.
5. Методичні вказівки та завдання до виконання лабораторних і контрольних робіт із дисципліни “Кристалографія і дефекти кристалічної будови” для студентів спеціальності 8.090101, 8.090403 заочної форми навчання /Укл.: А.Д. Коваль, Л.П. Степанова, В.Я. Грабовський. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2005. – 50 с.
6. Callister, William D. Materials Science and Engineering: an introduction / William D. Callister, Jr. – 7th ed. Copyright 2007, John Wiley & Sons, Inc.