

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**НАЦІОНАЛЬНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ**

**РОБОЧА ПРОГРАМА,**  
**методичні вказівки**  
**та індивідуальні завдання до вивчення**  
**дисципліни «Фізика металів»**  
**для студентів напрямку 0904-металургія**

Затверджено  
на засіданні Вченої ради академії.  
Протокол № 11 від 27.12.06.

**Дніпропетровськ НМетАУ 2007**

УДК 669.017+539.2

Кривуша Л.С. Робоча програма, методичні вказівки, індивідуальні завдання до вивчення дисципліни «Фізика металів» для студентів напрямку 0904 – металургія. – Дніпропетровськ: НМетАУ, 2007. – 25 с.

Програму дисципліни складено відповідно до вимог програми підготовки бакалаврів за напрямком 0904 – металургія і кваліфікаційних характеристик спеціальностей: «Термічна обробка металів», «Металознавство», «Матеріалознавство». Вона може бути корисна студентам інших металургійних і машинобудівних спеціальностей.

Наведені мета і задачі вивчення дисципліни, знання й уміння, що повинен придбати студент при її вивченні; зміст теоретичного матеріалу і практичних задач за темами: міжатомна взаємодія у твердих тілах, основи електронної будови, тверді розчини і проміжні фази, дифузія в металах і сплавах.

Містить 25 варіантів індивідуальних завдань і методичні вказівки до них. Наведено основну і додаткову літературу.

Друкується в авторській редакції

Автор Кривуша Л.С., канд. фіз.-мат. наук, доц.

Відповідальний за випуск Дейнеко Л.М., д-р техн. наук, проф.

Рецензент Воробйов Г.М., д-р фіз.-мат. наук, проф. (ПДАБА)

© Національна металургійна академія України

© Л.С. Кривуша, 2007

## ВСТУП

Фізика металів – наука про будову і властивості металів і сплавів, а також про процеси, що відбуваються в них, під дією температури, тиску, електричних і магнітних полів і т.д.

Будь-яка область сучасної техніки так чи інакше використовує метали і сплави з різними механічними, електричними, тепловими, магнітними та іншими спеціальними властивостями. Постійно виникає необхідність в створенні нових матеріалів і нових технологій їхнього одержання, що відбиває успіхи інженерних рішень у машинобудуванні, авіаційній і ракетно-космічній техніці, мікроелектроніці, атомній енергетиці і т.д. Ці успіхи, у свою чергу, спираються на фундаментальні і прикладні дослідження в галузі металів і вимагають підготовки фахівців, озброєних знаннями фізичного матеріалознавства, які ведуть пошук шляхів підвищення експлуатаційних властивостей існуючих і створення нових матеріалів, розробляють технології їхнього одержання для задоволення всезростаючих вимог техніки.

Тому фізика металів є одним з основних предметів, що забезпечують теоретичну підготовку інженерів-металознавців, фахівців з технології термічної обробки, які формують технічний світогляд і розвивають інженерне мислення.

У зв'язку з переліченим *мета* викладання предмета «Фізика металів»:

– забезпечити основи теоретичної підготовки в області фізики металів для розуміння природи процесів термічної обробки і забезпечення зміни властивостей металів і сплавів у заданому напрямку;

– формувати у майбутніх фахівців наукове мислення, розуміння границь застосовності різних фізичних законів і моделей.

**Задачі вивчення дисципліни.** Відповідно до кваліфікаційної характеристики спеціальності студент повинний:

**знати:**

– природу міжатомного зв'язку у твердих тілах;  
– залежність фізичних властивостей від атомної будови і характеру зв'язку;  
– атомно-кристалічну будову і властивості фаз, що найчастіше зустрічаються в сплавах;

– найімовірніші атомні механізми дифузії в металах і сплавах;

– роль дефектів кристалічної будови в підвищенні міцності сплавів;

**уміти:**

– зв'язати природу металевого зв'язку з фізичними властивостями металів і сплавів;

– пояснювати електричні властивості металів і сплавів з позиції різних електронних теорій;

– аналізувати можливості утворення твердих розчинів і проміжних фаз у сплавах;

– оцінювати дифузійну рухливість атомів у різних фазах, визначити основні параметри дифузії.

# 1. РОБОЧА ПРОГРАМА ДИСЦИПЛІНИ

Таблиця

Розподіл навчальних годин по дисциплінах і форми контролю

Шифр спеціальності	7(8).090412
Найменування дисциплін	Фізика металів
Усього навчальних годин за навчальним планом	108
У тому числі:	
Аудиторних занять	20
З них:	
Лекції	12
Практичні роботи	8
Самостійна робота	88
Семестровий контроль	Контрольна робота
Підсумковий контроль	Іспит

## 1.1. Міжатомна взаємодія у твердих тілах

**Модель парної взаємодії.** Природа сил притягання і відштовхування. Енергія зв'язку. Використання потенціалу парної взаємодії для опису властивостей кристалів. Можливості гармонійного й ангармонійного наближення. Вплив різних факторів на пружні модулі речовини. Причини теплового розширення.

**Міжмолекулярна** взаємодія – універсальний вид зв'язку. Природа зв'язку в молекулярних кристалах і їх властивості. Водневий зв'язок і його роль у природі.

**Іонні** кристали. Природа зв'язку, структура кристалів, властивості, енергія зв'язку. Вплив зовнішніх умов на структуру. Суперіонні провідники.

**Атомні** кристали. Природа зв'язку. Характерні риси ковалентного зв'язку: насиченість і спрямованість. Зв'язок природи взаємодії з фізичними і хімічними властивостями кристалів. Поліморфні модифікації вуглецю: алмаз, графіт, фулерени. Правило 8-N і вид структури.

**Металевий** зв'язок як основа сучасної техніки. Природа металевого зв'язку і властивості металів. Найплотніші упакування атомів. Характеристика найтиповіших структур металів: ГП, ГЦК і ОЦК. Зміни атомних радіусів при поліморфних перетвореннях.

Будова розплавів. Структура і властивості. Поняття дальнього і ближнього порядків.

### Практичні заняття

1. Порівняльна характеристика кристалів  $\alpha$ - і  $\gamma$ -заліза, використовувати результати визначення параметрів елементарних осередків при температурі  $\alpha \leftrightarrow \gamma$  перетворення.

$$\alpha = 0,2897 \text{ нм (ОЦК)} \quad \text{і} \quad \alpha = 0,3638 \text{ нм (ГЦК)}$$

2. Рішення задач на визначення енергії зв'язку, густина речовини, параметрів кристалічних ґрат.

## 1.2. Основи електронної будови металів

**Класична електронна теорія металів.** Положення, що лежать в основі теорії Друде. Вільні і незалежні електрони. Успіхи теорії в описі електро- і теплопровідності металів. Труднощі пояснення ряду властивостей. Ефект Холла.

**Квантова теорія вільних електронів.** Положення, що лежать в основі теорії. Розподіл електронів по енергіях при абсолютному нулі. Енергія Фермі. Простір імпульсів і поверхня Фермі. Імовірність заповнення електронами енергетичних рівнів при підвищенні температури. Функція щільності станів –  $N(E)$ -крива.

Опис властивостей металів з позиції квантової теорії вільних електронів: внесок електронного газу в молярну теплоємність, теплопровідність і електропровідність; термоелектронна емісія. Термоелектричні явища, надпровідність. Обмеженість теорії вільних електронів.

**Основи зонної теорії металів.** Хвильова функція і хвильове рівняння. Залежність енергії електронів від хвильового числа для вільних електронів і електронів, що рухаються в періодичному полі кристала. Зони дозволених і заборонених значень енергії. Зони Бриллюена. Дифракція електронів на атомних площинах. Заповнення зон електронами.

Енергетичні спектри ізольованих атомів. Утворення енергетичних зон у кристалах. Розподіл твердих тіл за характером заповнення зон на метали, напівпровідники і діелектрики.

Енергетичні спектри перехідних металів.

### Практичні заняття

1. Розрахунок енергії Фермі  $E_f$ , максимальної швидкості  $v_f$ , температури  $T_f$  і довжини хвилі  $\lambda_f$ . Оцінка імовірності заповнення енергетичних рівнів електронами.

2. Визначення символів площин, що огранюють 1-ю зону Бриллюена металів з кубічними ґратами. Розрахунок електронної концентрації при торканні границь зони сферою Фермі.

## 1.3. Тверді розчини і проміжні з'єднання

Тверді розчини заміщення, упровадження, вирахування. Фактори, що впливають на взаємну розчинність елементів. Роль електронної концентрації у твердих розчинах на основі елементів підгрупи ІВ з елементами підгруп ІІВ ...VВ.

Електронні з'єднання або фази Юм-Розери. Упорядковані тверді розчини. Температура Курнакова. Упорядкування – фазовий перехід I або II роду.

Фази з визначеним стехіометричним складом: АВ, АВ<sub>2</sub>, фази Лавеса, АВ<sub>5</sub>, А<sub>3</sub>В.

Будова і властивості фаз упровадження. Температура плавлення і твердість. Природа міжатомного зв'язку. З'єднання з нормальною валентністю. Нікель-арсенідні фази, їхня структура і властивості. Інтерметалічні з'єднання типу  $\sigma$ -FeCr і споріднені їм фази. Вплив їх утворення на міцність і пластичність сплавів.

### Практичні заняття

1. Визначення типу твердого розчину на підставі значення параметра кристалічної решітки твердого розчину і його щільності.
2. Визначення електронної концентрації у твердих розчинах і фазах.

#### 1.4. Дифузія в металах і сплавах

Роль дифузії в фазових і структурних перетвореннях. Рушійні сили дифузії. Законі дифузії. Окремі випадки рішення рівнянь дифузії для різних початкових і граничних умов. Методи виміру коефіцієнтів дифузії. Основні параметри дифузії і їхнє дослідне визначення. Дифузія і термодинаміка. Атомні механізми дифузії у твердих тілах. Ефект Кіркендалла. Дифузія в інтерметалевих з'єднаннях.

Фактори, що впливають на швидкість дифузії: природа елемента, що дифундує, тип твердого розчину, тип кристалічної решітки, величина зерна, пластична і пружна деформація, опромінення. Поняття граничної, об'ємної і поверхневої дифузії. Дифузія, що супроводжується фазовими перетвореннями, або реактивна дифузія.

### Практичні заняття

1. Рішення задач на визначення основних параметрів дифузії.
2. Побудова функції  $C(x,t)$  при цементації.
3. Рішення різних дифузійних задач.

## 2. МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ З ВИВЧЕННЯ ТЕОРЕТИЧНОГО КУРСУ ДИСЦИПЛІНИ

При вивченні першої теми «*Міжатомна взаємодія у твердих тілах*» варто звернути увагу на те, що, на відміну від кристалографії, фізика твердого тіла використовує класифікацію, засновану на природі сил міжатомної взаємодії. Це дозволяє робити деякі узагальнення щодо властивостей кристалів, оскільки саме взаємодія між атомами або молекулами визначає опір тіл зовнішнім впливам.

Основні сили, що утримують частки в кристалах, – сили електростатичного притягання між протилежно зарядженими частками.

Зверніть увагу на взаємозв'язок функцій енергії  $U(x)$  і сили  $f(x)$ , поняття енергії зв'язку, властивості кристалів, які можна описати, використовуючи модель парної взаємодії. Пружні властивості в гармонійному та ангармонійному наближенні моделі.

Аналіз природи взаємодії часток твердого тіла варто починати з найбільш універсального виду – міжмолекулярної взаємодії і впливаючих з цього властивостей молекулярних кристалів. Потім коротко розглянути природу і властивості іонних і атомних кристалів, приділити головну увагу природі металевого зв'язку і властивостям металів, опису типових структур металів.

Розподіл кристалів за типами зв'язку не є строгим, тому що в багатьох тілах, крім основного типу зв'язку, можуть виявлятися й інші. Приклади: алмаз і графіт.

У сплавах елементів різної валентності на основний металевий зв'язок імовірно накладення іонної і ковалентної взаємодії.

Залежність величини атомного радіуса від типу структури.

Вивчаючи розплави металів, зверніть увагу на порівняно незначну зміну властивостей при плавленні на поняття «ближнього» і «дальнього» порядку.

### Питання для самоконтролю

1. Яка природа сил притягання і відштовхування часток, що утворюють тверде тіло?
2. Залежність енергії взаємодії від відстані між атомами.
3. Який зміст поняття «енергія зв'язку»?
4. Яку інформацію про пружні властивості тіл можна одержати в гармонійному й ангармонійному наближеннях моделі парної взаємодії?
5. Яка природа міжмолекулярного зв'язку?
6. Яка природа іонного зв'язку і властивостей іонних кристалів?
7. Яка природа ковалентного зв'язку і її основні особливості?
8. Яка природа металевого зв'язку?

Задачі другої теми «*Основи електронної будови металів*» – дати фізичне тлумачення електричних, теплових і ряду інших властивостей металів.

Класична електронна теорія, розглядаючи валентні електрони вільними і незалежними, застосувала до них законі молекулярно-кінетичної теорії. Незважаючи на це допущення, теорія зробила першу й успішну спробу якісно описати механізм електропровідності і теплопровідності металів, зв'язавши його з концентрацією і рухливістю валентних електронів, довжиною вільного пробігу електронів і квадратичною швидкістю хаотичного руху електронів. Теорія пояснила механізм виділення тепла при проходженні струму і ряду інших закономірностей, раніше відкритих дослідним шляхом. Однак виникли нездоланні труднощі в поясненні деяких властивостей, вирішити які змогла більш ніж через 20 років квантова теорія вільних електронів. Зверніть увагу, що за уявленнями цієї теорії навіть при абсолютному нулі енергія і швидкість не всіх електронів обертається в нуль.

Валентні електрони не можуть бути абсолютно вільними, тому що переміщуються в періодичному полі кристала. З урахуванням цього прийшли до уявлень про дозволені і заборонені значення енергії – до зонної теорії металів – і на її основі розділили тіла на провідники, напівпровідників і діелектрики.

### Питання для самоконтролю

1. Що покладено в основу класичної теорії металів? Що нового внесла ця теорія в пояснення раніше отриманих дослідним шляхом закономірностей?
2. У чому суть труднощів, з якими зіштовхнулася класична теорія, пояснюючи властивості металів? Як ці утруднення пояснила квантова теорія?
3. Що характеризує енергія Фермі? Поверхня Фермі?  $N(E)$ -крива?
4. Які явища змогла пояснити квантова теорія вільних електронів?

5. У чому різниця залежності енергії електронів від хвильового числа для вільних електронів, що рухаються в періодичному полі кристала?
6. Чим пояснити появу заповнених значень енергії?
7. Що називають зонами Бриллюена? Який вид вони мають для кубічних кристалів?
8. У чому відмінність властивостей електронів заповнених і частково вільних зон?

При вивченні третьої теми «*Тверді розчини і проміжні з'єднання*» зверніть увагу на умови взаємної розчинності елементів. Розгляньте утворення розчинів заміщення і впровадження (бажано на основі заліза), характер зміни параметра кристалічної решітки при утворенні твердих розчинів, можливість визначення типу твердого розчину на підставі визначення параметра комірки і щільності розчину.

Аналізуючи різні типи з'єднань, спробуйте визначити, який з факторів (розмірний або електронної концентрації) є найважливішим при утворенні фази. Різниця в розмірах, відносна валентність є визначальними при утворенні тієї чи іншої фази. Розгляньте роль електронної концентрації при утворенні: твердих розчинів на основі міді, срібла або золота; електронних з'єднань; упорядкованих твердих розчинів або надструктур. Чим обумовлена структура і стійкість фаз Лавеса?

Підвищення міцності сталей і багатьох сплавів обумовлено утворенням у них фаз упровадження – дрібнодисперсних карбідів і нітридів, які стабілізують границі зерен і гальмують ковзання дислокацій, що мають високу твердість і дуже високі температури плавлення при домінуючій ролі металевого зв'язку.

Зверніть увагу на інтерметалеві фази типу  $\sigma$ -FeCr і родинні їм фази, що зустрічаються в багатьох практично важливих бінарних і потрійних системах елементів підгрупи IV, V і VI з елементами підгрупи VII і VIII, та їхній вплив на механічні властивості.

### Питання для самоконтролю

1. Що називають твердими розчинами?
2. Як визначити тип твердого розчину?
3. Які фактори впливають на взаємну розчинність елементів?
4. Що загальне й у чому відмінність фаз упровадження від твердих розчинів упровадження?
5. Чому упорядковані розчини відносяться до проміжних фаз?
6. Який фактор є визначальним у фазах Юм-Розері?
7. Чим визначається стійкість і тип структури фаз Лавеса?
8. Наведіть характерні риси  $\sigma$ -FeCr і споріднених фаз.

Четверта тема розглядає *дифузію в металах і сплавах*.

Необхідно відзначити, що дифузія у твердих тілах – процес атомарний. У загальному випадку його рушійною силою є градієнт хімічного потенціалу. В окремих випадках його дії можуть зводитися до дії градієнтів концентрації,



електричного потенціалу, температурних, пружних напружень. Необхідно ознайомитися з рівняннями дифузії і різних часткових рішень з урахуванням конкретних початкових і граничних умов, методами визначення коефіцієнтів дифузії, енергії активації дифузії і частотного фактора; вміти аналізувати найбільш імовірні механізми дифузії в конкретних дифузійних парах.

Розгляньте вплив на швидкість дифузії таких факторів: природа елемента, що дифундує, типу твердого розчину, типу кристалічної решітки, кристалографічного напрямку, величини зерна, деформації і ряду інших.

Зверніть увагу на вид кривих  $s(x,t)$  при утворенні твердих розчинів і у випадку дифузії, що супроводжується фазовими перетвореннями.

### **Питання для самоконтролю**

1. Що розуміють під дифузією? Що є рушійною силою дифузії? Наведіть приклади.
2. Яку залежність описує 1-е рівняння дифузії? Який фізичний зміст коефіцієнта дифузії?
3. Що називають основними параметрами дифузії?
4. Запропонуйте методи вивчення гетеродифузії і самодифузії.
5. Зіставте швидкість дифузії вуглецю і хрому в залізі при однаковій температурі.
6. Як впливає тип кристалічної решітки на швидкість дифузії (на прикладі ОЦК і ГЦК решітки заліза)?
7. Чи можлива анізотропія дифузії?
8. Як впливає пружна деформація на дифузію?
9. Які особливості дифузії, що супроводжується фазовими перетвореннями?

### **3. ІНДИВІДУАЛЬНІ ЗАВДАННЯ**

Метою завдання є перевірка розуміння дисципліни, що вивчається, можливості свідомого пояснення розглянутих явищ. Для виконання завдання рекомендується використовувати підручники і навчальні посібники, наведені наприкінці. Номер варіанта відповідає останнім цифрам номера залікової книжки або студентського квитка.

Дослівне списування без осмислювання суті конкретного питання не допускається.

Робота має бути викладена чітко, коротко і по суті. Необхідні малюнки, графіки, схеми, діаграми і т.д. варто розташовувати відразу після згадування про них у тексті відповіді або іа наступній сторінці. Усі приведені ілюстрації повинні бути описані в тексті відповіді.

Одержавши перевірену роботу, необхідно уважно проаналізувати зауваження рецензента.

## Варіант № 1

### Теоретичні питання

1. На які типи поділяють тверді тіла за природою сил міжатомної взаємодії? Дайте коротку характеристику кожному типу. Чи є розподіл по типах зв'язку строгим?

2. У чому відмінність залежності енергії електронів  $E(k)$  у зонній теорії від квантової теорії вільних електронів?

3. Що називають твердими розчинами? Дайте приклади елементів, що утворюють із залізом тверді розчини заміщення.

4. Рушійні сили дифузії.

### Задачі

1. Визначити щільність окислу NiO, що має тип структури NaCl і період решітки  $a = 0,417$  нм.

2. Визначити імовірність заповнення електронами енергетичних рівнів, розташованих на  $0,03 E_f$  нижче (вище) рівня Фермі, при кімнатній температурі. Енергія Фермі алюмінію дорівнює 11,7 еВ. Зробити малюнок.

3. Визначити електронну концентрацію з'єднання  $Cu_3Al$ .

4. Як міняється коефіцієнт самодифузії атомів заліза при  $\alpha \leftrightarrow \gamma$  перетворенні ( $911^\circ C$ )

$$\alpha\text{-Fe} \quad D_0 = 5,8 \text{ см}^2/\text{с}$$

$$Q = 250 \text{ кДж/моль}$$

$$\gamma\text{-Fe} \quad D_0 = 0,6 \text{ см}^2/\text{с}$$

$$Q = 285 \text{ кДж/моль}$$

## Варіант № 2

### Теоретичні питання

1. Яка природа сил притягання і відштовхування часток, що утворюють тверде тіло?

2. Розподіл електронів за енергіями при абсолютному нулі.

3. Типи твердих розчинів.

4. Вплив пластичної деформації на швидкість дифузії.

### Задачі

1. Магній має гексагональне найплотніше упакування атомів з параметрами комірки  $a = 0,321$  нм,  $c = 0,521$  нм. Визначити щільність магнію.

2. Визначити для заліза енергію Фермі, швидкість  $V_f$ , температуру  $T_f$ , довжину хвилі  $\lambda_f$ .

3. Максимальна розчинність алюмінію в сріблі складає 6% (по масі). Визначити електронну концентрацію, що відповідає такому твердому розчину.

4. За наведеними коефіцієнтами дифузії вуглецю в титані побудувати залежність  $\ln = f(1/T)$  і графічним методом обчислити енергію активації дифузії  $Q$  і частотний фактор  $D_0$ .

$t, ^\circ C$	950	1000	1050	1150	1250
$D, 10^{-6} \text{ см}^2/\text{с}$	1.33	1.77	2.21	4.09	6.42

## Варіант № 3

### Теоретичні питання

1. Як залежить енергія (потенціал) парної взаємодії атомів від відстані між ними?
2. Зміна виду графіка імовірності заповнення енергетичних рівнів електронами при підвищенні температури від абсолютного нуля.
3. Які фази називають твердими розчинами? Наведіть приклади елементів, що утворюють із залізом розчини впровадження.
4. Атомні механізми дифузії.

### Задачі

1. Знаючи, що ніобій кристалізується з утворенням ОЦК структури і має щільність  $8,57 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ , визначити період кристалічної решітки ніобію.
2. Визначити енергію Фермі для міді, швидкість  $V_f$ , температуру  $T_f$ , довжину хвилі  $\lambda_f$ .
3. Якими площинами огранена перша зона Бриллюена металів з ОЦК решіткою?
4. Порівняйте дифузійну рухливість атомів вуглецю в ОЦК і ГЦК решітках заліза при температурі  $\alpha \leftrightarrow \gamma$  перетворення.

$\alpha\text{-Fe}$	$D_0 = 0,02 \text{ см}^2/\text{с}$	$Q = 84 \text{ кДж/моль}$
$\gamma\text{-Fe}$	$D_0 = 0,04 \text{ см}^2/\text{с}$	$Q = 134 \text{ кДж/моль}$

## Варіант № 4

### Теоретичні питання

1. Модель парної взаємодії атомів. Енергія і сила взаємодії як функція відстані між частками.
2. Що характеризує енергія Фермі?
3. Фази впровадження.
4. Вплив деформації на швидкість дифузійних процесів.

### Задачі

1. Параметри елементарного осередку міді  $a = 0,3615 \text{ нм}$ . Визначити обсяг, що приходить на один атом.
2. Визначити максимальну енергію електронів алюмінію при абсолютному нулі.
3. Що називають зоною Бриллюена? Яку форму вона має у металів з ОЦК решіткою?
4. У металознавстві прийнято вважати рухливість атомів заліза при кімнатній температурі зневажно малою. Визначте кількість переміщень атомів вуглецю за 1 секунду при  $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $a = 0,287 \text{ нм}$ .

$D_0 = 0,02 \text{ см}^2/\text{с}$	$Q = 85 \text{ кДж/моль}$
------------------------------------	---------------------------

## Варіант № 5

### Теоретичні питання

1. Який зміст поняття «Енергія зв'язку»? З якими фізичними характеристиками вона корелює?
2. Що являє собою поверхню Фермі для вільних електронів? У якому просторі вона побудована?
3. Фази Лавеса. Природа зв'язку, структура, властивості.
4. У чому суть і значення ефекту Кіркендалла?

### Задачі

1. Визначити щільність карбіду TiC, що має тип структури NaCl і період решітки  $a = 0,431$  нм.
2. Визначити максимальну швидкість електронів у кристалі заліза при абсолютному нулі, якщо  $E_f = 11,2$  еВ.
3. Максимальна розчинність германія в міді складає 13,8 % по масі. Визначити електронну концентрацію, що відповідає такому твердому розчину.
4. Коефіцієнт дифузії вуглецю в  $\alpha$ -залізі при  $600^\circ\text{C}$   $1,63 \cdot 10^{-7} \text{ см}^2/\text{с}$ . Визначити частоту його переміщень,  $a = 0,288$  нм.

## Варіант № 6

### Теоретичні питання

1. Яку інформацію про пружні властивості кристалів можна одержати в гармонійному й ангармонійному наближеннях моделі парної взаємодії часток, що утворюють кристали?
2. Основні положення квантової теорії вільних електронів.
3. Як можна визначити тип твердого розчину?
4. Які особливості дифузії, що супроводжується фазовими перетвореннями?

### Задачі

1. Визначте щільність оксиду Fe, що має тип структури NaCl і період грати  $a = 0,408$  нм.
2. Визначте максимальне значення кінетичної енергії електронів у кристалах срібла при абсолютному нулі. ( $\rho_{Ag} = 10,5 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ,  $A = 107,88$ ).
3. До якого типу електронних з'єднань відноситься фаза  $\text{Cu}_5\text{Zn}_8$ ? Яка електронна концентрація фази?
4. Зіставте дифузійну рухливість атомів вуглецю в залізі при температурі  $\alpha \leftrightarrow \gamma$  перетворення.

$$\alpha\text{-Fe} \quad D_0 = 0,02 \text{ см}^2/\text{с}$$

$$Q = 85 \text{ кДж/моль}$$

$$\gamma\text{-Fe} \quad D_0 = 0,04 \text{ см}^2/\text{с}$$

$$Q = 135 \text{ кДж/моль}$$

Зробити висновок про вплив механізму дифузії на тривалу жароміцність сплавів.

## Варіант № 7

### Теоретичні питання

1. Наведіть приклади властивостей твердих тіл, для опису яких недостатньо гармонійного наближення моделі парної взаємодії.
2. Основні уявлення квантової теорії вільних електронів. Розподіл електронів за енергіями –  $N(E)$ -крива.
3. Що називають твердими розчинами? Наведіть приклади елементів, що розчиняються в залізі за типом заміщення, за типом впровадження.
4. Яку залежність описує 1-е рівняння дифузії? Який фізичний зміст коефіцієнта дифузії?

### Задачі

1. При значення енергії зв'язку атомів вольфраму (ОЦК)  $V_{зв} = 876$  кДж/моль, визначити енергію, що приходить на один атом і один зв'язок.
2. Як і в скільки разів зміниться імовірність заповнення електронами рівня, розташованого на 0,1 еВ вище рівня Фермі, при підвищенні температури від 300 до 700 °С?
3. До якого типу фаз Юм-Розері відноситься з'єднання  $Au_5Zn_8$ ?
4. Енергія активації дифузії атомів водню в  $\gamma$ -залізі  $Q = 42$  кДж/моль, частотний множник  $D_0 = 1,1 \cdot 10^{-2}$  см<sup>2</sup>/с. Визначити частоту переміщень атомів водню.

## Варіант № 8

### Теоретичні питання

1. Обґрунтуйте причину теплового розширення тіл.
2. Які властивості металів пояснює квантова теорія вільних електронів?
3. Інтерметалеві з'єднання типу  $\sigma$ -FeCr і родинні їм фази. Чому бажано не допускати утворення цих фаз при термічній обробці сплавів?
4. Перелічіть фактори, що впливають на швидкість дифузії. Поясніть вплив величини зерна.

### Задачі

1. Кристал цинку має гексагональне найплотніше упакування атомів з параметрами осередку  $a = 0,266$ ,  $c = 0,494$  нм. Визначити щільність цинку.
2. Визначте імовірність заповнення електронами енергетичних рівнів, розташованих на  $0,03 E_f$  нижче (вище) рівня Фермі, при  $t = 27$  °С. Енергія Фермі для електронів міді дорівнює 7,1 еВ.
3. Визначте електронну концентрацію з'єднання  $Cu_3Sn$ .
4. Визначте основні параметри самодифузії атомів заліза за значеннями коефіцієнтів дифузії:

$t, ^\circ C$	1000	1100	1200	1300	1390
$D, 10^{-11}$ см <sup>2</sup> /с	0,15	1,10	5,70	25	89,5

## Варіант № 9

### *Теоретичні питання*

1. Яка природа міжмолекулярного зв'язку? Перелічіть основні властивості молекулярних кристалів.
2. Пояснення тепло- і електропровідності з позиції класичної електронної теорії.
3. Які закономірності характерні для діаграм стану твердих розчинів металів підгрупи ІВ з елементами підгруп ІІВ ... VУ?
4. Назвіть можливі механізми дифузії атомів у металах і сплавах.

### *Задачі*

1. Визначити щільність з'єднання  $Mg_2Si$ , що має тип структури  $CaF_2$  і період  $a = 0,634$  нм.
2. Знайти значення енергії Фермса для натрію ( $\rho = 0,97 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>,  $A = 23,00$ ).
3. Визначити електронну концентрацію фази  $Cu_5Zn_8$ .
4. Вольфрам найтугоплавкий метал ( $t_{пл} \approx 3370^\circ C$ ). Визначити частоту переміщень атомів вольфраму при  $t = 2000^\circ C$ .  $D_0 = 11,5$  см<sup>2</sup>/с  $Q = 590$  кдж/моль. Атомний діаметр  $0,274$  нм.

## Варіант № 10

### *Теоретичні питання*

1. Який зв'язок називаю водневим? Наведіть приклади. Роль цього зв'язку в природі.
2. Квантова теорія вільних електронів про внесок електронного газу в теплоємність металів.
3. Наведіть приклади з'єднань з визначеним стехіометричним складом.
4. За яким механізмом найімовірніше здійснюється самодифузія? Запропонуйте методи вивчення самодифузії.

### *Задачі*

1. Знаючи, що алюміній кристалізується з утворенням ГЦК структури і має щільність  $2,7 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, визначити період кристалічних ґрат алюмінію.
2. Визначити максимальну кінетичну енергію валентних електронів золота при абсолютному нулі. ( $A = 197,2$ ;  $\rho = 19,4 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>)
3. Максимальна розчинність галію в міді складає 19,9% (ат). Визначити граничну електронну концентрацію твердого розчину.
4. Коефіцієнт дифузії вуглецю в залізі (ОЦК) при  $600^\circ C$  дорівнює  $1,6 \cdot 10^{-7}$  см<sup>2</sup>/с. Визначити частоту переміщень атомів вуглецю. Період ґрат заліза  $0,288$  нм. Вуглець дифундує по октаедричним міжвузлям.

## Варіант № 11

### Теоретичні питання

1. Опишіть природу іонного зв'язку й основні властивості іонних кристалів.
2. У чому різниця в оцінці залежності електронів від імпульсу або хвильового числа в теорії вільних електронів і в зонній теорії металів?
3. Який з критеріїв при утворенні фаз Юм-Розері є визначальним? Приклади.
4. Перелічить фактори, що впливають на швидкість протікання дифузійних процесів. Чи можлива анізотропія коефіцієнтів дифузії в металах?

### Задачі

1. Визначити щільність карбиду VC, що має тип структури NaCl і період решітки  $a = 0,415$  нм.
2. Визначте енергію Фермі літію ( $A = 6,94; \rho = 0,53 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>).
3. Визначте електронну концентрацію фази Ag<sub>5</sub>Ge. Порівняйте з ємністю 1-ї зони Бриллюена для ОЦК металів.
4. Використовуючи значення основних параметрів дифузії азоту в  $\gamma$ -залізі, визначте коефіцієнт дифузії при 900 °С. За яким механізмом йде дифузія азоту?  
 $Q = 145$  кДж/моль,  $D_0 = 3,3 \cdot 10^{-4}$  см<sup>2</sup>/с.

## Варіант № 12

### Теоретичні питання

1. Яка природа ковалентного зв'язку? Дайте приклади атомних кристалів.
2. На яких уявленнях базується квантова теорія вільних електронів?
3. Фактори, що впливають на взаємну розчинність елементів.
4. Перше рівняння дифузії. Фізичний зміст коефіцієнта дифузії.

### Задачі

1. Кристал берилію має гексагональне найплотніше упакування атомів з параметрами осередку  $a = 0,228$  нм,  $c = 0,357$  нм. Визначте щільність берилію.
2. Визначте імовірність заповнення енергетичних рівнів, розташованих вище і нижче рівня Фермі на  $\Delta E = \pm 0,1$  еВ при кімнатній температурі.
3. Яка електронна концентрація у фазі Cu<sub>5</sub>Si? Порівняйте відповідь з ємністю 1-ї зони Бриллюена.
4. Порівняйте швидкості дифузії (коефіцієнти) вуглецю і нікелю в  $\gamma$ -залізі при  $t = 1000$  °С.

$$3 \rightarrow \gamma\text{-Fe} \quad D_0 = 0,04 \text{ см}^2/\text{с} \quad Q = 134 \text{ кДж/моль}$$

$$\text{Ni} \rightarrow \gamma\text{-Fe} \quad D_0 = 0,77 \text{ см}^2/\text{с} \quad Q = 280 \text{ кДж/моль}$$

За якими механізмами найімовірніша дифузія цих елементів?

## Варіант № 13

### Теоретичні питання

1. Назвіть основні особливості ковалентного зв'язку.
2. У чому суть труднощів, з якими зіштовхнулася класична теорія при поясненні властивостей металів? Що є їхньою причиною?
3. Фази зі стехіометричним складом:  $AB_5$  і  $A_3B$ .
4. Дифузія, що супроводжується фазовими перетвореннями. Вигляд функції  $C(x, \tau)$ .

### Задачі

1. Визначити густину речовини  $NiAl$ , що має тип структури  $CsCl$  і період решітки  $a = 0,288$  нм.
2. Знайти різницю енергій  $\Delta E$  (в одиницях кТ) між електроном, що знаходиться на рівні Фермі, і електронами рівнів, імовірність заповнення яких дорівнює 0,7 і 0,3.
3. Визначення параметра решітки з виміром щільності твердого розчину на основі ГЦК решітки показало, що кількість атомів на комірку склало 4,1. Про який тип твердого розчину свідчить цей результат?
4. Металознавці вважають, що рухливістю атомів вуглецю в залізі при кімнатній температурі можна зневажити.  
Оцініть кількість переміщень атомів вуглецю при цій температурі, якщо  $D_0 = 0,01$  см<sup>2</sup>/с і  $Q = 84$  кДж/моль,  $a = 0,287$  нм.

## Варіант № 14

### Теоретичні питання

1. Атомні кристали. Правило 8-N.
2. Що називають енергією Фермі, поверхнею Фермі? Яка її форма в теорії вільних електронів і зонної теорії металів?
3. Чим визначається стійкість фаз Лавеса? Від чого залежить тип структури?
4. Вплив пружної деформації на швидкість дифузії. Явище “висхідної” дифузії.

### Задачі

1. Знаючи, що молібден кристалізується з утворенням ОЦК структури і має щільність  $10,2 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, визначити період кристалічної решітки молібдену.
2. Як і в скільки разів зміниться імовірність заповнення електронами енергетичного рівня, якщо він розташований на 0,1 еВ нижче рівня Фермі, а температура змінюється від 300 до 1000К?
3. Визначити електронну концентрацію фази  $Cu_{31}Sn_8$ . До якого типу проміжних фаз вона відноситься?
4. За наведеними нижче значеннями коефіцієнтів дифузії вуглецю в кременистому залізі визначити основні параметри дифузії, використовуючи графічний метод рішення.

$t, ^\circ C$	900	1000	1100	1200
$D, 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$	0,74	1,86	3,98	7,43



## Варіант № 15

### *Теоретичні питання*

1. Зіставте структури, типи міжатомного зв'язку і властивості кристалів різних поліморфних модифікацій вуглецю.
2. У чому відмінність рішень хвильового рівняння Шредингера для електронів у полі постійного і періодично мінливого потенціалу? Порівняйте  $E = f(k)$ .
3. Що об'єднує фази впровадження зі з'єднаннями? З твердими розчинами?
4. Як впливає природа елемента, що дифундує, на енергію активації дифузії?

### *Задачі*

1. Знаючи, що нікель кристалізується з утворенням ГЦК структури і має щільність  $8,90 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ , визначити період кристалічної решітки нікелю.
2. Визначити максимальну кінетичну енергію електронів у залізі ( $A = 55,85$ ;  $\rho = 7,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ) при абсолютному нулі.
3. Максимальна розчинність магнію в сріблі 30% (ат.) Яка електронна концентрація цього розчину?
4. Енергія активації атомів водню в  $\gamma$ -залізі  $Q = 41,8 \text{ кДж/моль}$ , частотний фактор  $D_0 = 1,1 \text{ см}^2/\text{с}$ . Визначити кількість переміщень атомів водню при  $1100^\circ\text{C}$ .

## Варіант № 16

### *Теоретичні питання*

1. Які властивості виділяють метали серед твердих тіл?
2. Чому системи дискретних рівнів енергії електронів, характерні для ізольованих атомів, перетворюються для твердих тіл у системи енергетичних зон?
3. Який фактор є визначальним при утворенні фаз Юм-Розери?
4. У чому суть ефекту Киркендалла? Його значення для з'ясування можливих механізмів дифузії.

### *Задачі*

1. Маючи значення енергії зв'язку атомів титана (ГП)  $V_{зв} = 416,4 \text{ кДж/моль}$ , визначити енергію, що приходить на один атом і один зв'язок.
2. Як і в скільки разів зміниться імовірність заповнення електронами енергетичного рівня, розташованого вище рівня Фермі на  $\Delta E = 0,05 \text{ eV}$ , при зниженні температури від  $1000$  до  $300 \text{ K}$ ?
3. Визначення параметра решітки з виміром щільності твердого розчину на основі ГЦК решітки показало, що кількість атомів на комірку склало  $3,9$ . Про який тип твердого розчину свідчить цей результат?
4. Використовуючи значення основних параметрів дифузії азоту в  $\gamma$ -залізі, визначте коефіцієнт дифузії азоту при  $850^\circ\text{C}$ . За яким механізмом йде дифузія азоту?  $Q = 145 \text{ кДж/моль}$ ,  $D_0 = 3,3 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2/\text{с}$ .

## Варіант № 17

### Теоретичні питання

1. Яка природа металевого зв'язку?
2. Чому електронний газ у металах називають виродженим? При якій температурі могло б знятися виродження?
3. Чим визначається стійкість і тип структури фаз Лавеса?
4. Дифузія у твердих фазах. Рушійні сили дифузії.

### Задачі

1. Титан має гексагональне найплотніше упакування атомів з параметрами осередку  $a = 0,295$  нм,  $c = 0,408$  нм. Визначити щільність титана.
2. Визначити енергію Фермі для калію ( $A=39,10$ ;  $\rho = 0,86 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>).
3. Яка електронна концентрація у фазі  $\text{Cu}_5\text{Sn}$ ? Порівняєте відповідь з ємністю 1-ї зони Бриллюена.
4. Як міняється коефіцієнт самодифузії атомів заліза при  $\alpha \leftrightarrow \gamma$  перетворенні ( $911^\circ\text{C}$ )?  
 $\alpha\text{-Fe}$        $D_0 = 5,8 \text{ см}^2/\text{с}$        $Q = 250 \text{ кДж/моль}$   
 $\gamma\text{-Fe}$        $D_0 = 0,6 \text{ см}^2/\text{с}$        $Q = 285 \text{ кДж/моль}$

## Варіант № 18

### Теоретичні питання

1. Що загального й у чому розходження природи міжатомного зв'язку атомних і металевих кристалів?
2. У чому причина ускладнень класичної електронної теорії при поясненні теплових і електричних властивостей металів?
3. Дайте приклад з'єднань з нормальною валентністю.
4. Дифузія з нескінченно тонкого шару в необмежене тіло. Вигляд функції  $C = f(x, \tau)$ .

### Задачі

1. Маючи значення енергії зв'язку атомів міді (ГЦК)  $V_{\text{зв}} = 338$  кДж/моль, визначити енергію, що приходить на один атом і один зв'язок.
2. Визначте максимальну кінетичну енергію електронів при  $T = 0\text{K}$  в кристалах цезію ( $A = 132,9$ ;  $\rho = 1,90 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>).
3. Визначення параметра решітки з виміром щільності твердого розчину на основі ГЦК решітки показало, що кількість атомів на комірку склало 4,2. Про який тип твердого розчину свідчить цей результат?
4. Сталь, що містить 0,10% вуглецю, піддають цементації. На поверхні під час науглецювання підтримують постійну концентрацію вуглецю 1,1%. Визначте тривалість відпалу для того, щоб на глибині 0,05 см досягти концентрації 0,68%.  
 $D_0 = 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ см}^2/\text{с}$        $Q = 120 \text{ кДж/моль}$        $t = 927^\circ\text{C}$

## Варіант № 19

### Теоретичні питання

1. Як зміниться компактність структури й атомний радіус заліза при  $\alpha \leftrightarrow \gamma$  перетворенні?
2. Дати коротку характеристику закономірностей, що пояснюються з позиції класичної теорії металів.
3. Закономірності, що спостерігаються на діаграмах стану елементів підгрупи ІВ з елементами підгруп ІІВ ... VВ.
4. Вид функції  $C = f(x, \tau)$  для випадку дифузії з постійного джерела (наприклад, при науглецюванні поверхні залізних деталей).

### Задачі

1. Період кристалічної решітки міді (ГЦК) дорівнює 0,3615 нм. Визначити атомний радіус міді.
2. Яка імовірність заповнення електронами енергетичного рівня в металі, розташованого на 0,01 еВ нижче рівня Фермі, при температурі 18 °С.
3. Визначення параметра решітки з виміром щільності твердого розчину на основі ГЦК решітки показало, що кількість атомів на комірку склало 3,95. Про який тип твердого розчину свідчить цей результат?
4. Енергія активації атомів водню в  $\gamma$ -залозі  $Q = 41,8$  кДж/моль, частотний фактор  $D_0 = 1,1 \text{ см}^2/\text{с}$ . Визначити кількість переміщень атомів водню металу при 1100 °С,  $a = 0,365$  нм.

## Варіант № 20

### Теоретичні питання

1. Як міняються фізичні властивості при плавленні кристалів?
2. Що покладено в основу класичної електронної теорії металів? У чому її успіхи?
3. Тверді розчини впровадження. Визначення типу розчину.
4. Якими методами можна визначити коефіцієнт дифузії?

### Задачі

1. Маючи значення енергії зв'язку атомів заліза (ОЦК) 390 кДж/моль, визначити енергію, що приходить на один атом і один зв'язок.
2. Яка імовірність заповнення електронами енергетичного рівня в металі, розташованого на 0,01 еВ вище рівня Фермі при температурі 1000К?
3. Визначити електронну концентрацію фази  $\text{Ag}_5\text{Zn}_8$ . До якого типу проміжних з'єднань відноситься ця фаза?
4. За наведеними нижче значеннями коефіцієнтів дифузії вуглецю в кременистому залізі визначити основні параметри дифузії, використовуючи графічний метод рішення.

$t, ^\circ\text{C}$	900	1000	1100	1200
$D, 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$	0,74	1,86	3,98	7,43

## Варіант № 21

### *Теоретичні питання*

1. Які агрегатні стани характеризуються поняттями “ближній” і “дальній” порядок?
2. У чому суть труднощів, з якими зіштовхнулася класична електронна теорія металів? Як вирішила ці ускладнення квантова теорія вільних електронів?
3. Розчини заміщення. Умови, що визначають взаємну розчинність.
4. Дифузія, що супроводжується фазовими перетвореннями. Порівняйте будову дифузійного шару з діаграмою стану.

### *Задачі*

1. Знаючи, що мідь кристалізується з утворенням ГЦК структури і має щільність  $8,96 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ , визначити період кристалічних ґрат міді.
2. Визначити енергію Фермі для срібла ( $A=107,88$ ;  $\rho=10,5 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ).
3. Визначити електронну концентрацію фази  $\text{Ag}_5\text{Ge}$ . Порівняйте з ємністю 1-ї зони Бриллюена для ОЦК металів.
4. Металознавці вважають, що рухливістю атомів вуглецю в залізі при кімнатній температурі можна зневажити. Оцініть кількість переміщень атомів вуглецю при цій температурі, якщо  $D_0=0,01 \text{ см}^2/\text{с}$  і  $Q=84 \text{ кДж/моль}$ .

## Варіант № 22

### *Теоретичні питання*

1. Опишіть залежність енергії парної взаємодії від відстані між частками, що утворюють кристал.
2. Основні положення квантової теорії вільних електронів.
3. Чому упорядковані тверді розчини відносять до проміжних фаз?
4. Вплив типу твердого розчину на швидкість дифузії. Порівняйте швидкості дифузії вуглецю і нікелю в залізі.

### *Задачі*

1. Знаючи значення періоду решітки алюмінію (ГЦК)  $a = 0,404 \text{ нм}$ , визначити атомний радіус алюмінію.
2. Знайти різницю  $\Delta E = E - E_f$  (в одиницях кТ) між електронами, що знаходяться на рівні Фермі, і електронами рівнів, імовірність заповнення яких 0,75 і 0,25.
3. Яка електронна концентрація у фазі  $\text{Cu}_5\text{Si}$ ? Порівняйте відповідь з ємністю 1-ї зони Бриллюена.
4. Використовуючи значення основних параметрів дифузії азоту в  $\alpha$ -залізі, визначте коефіцієнт дифузії при  $600 \text{ }^\circ\text{C}$ . За яким механізмом йде дифузія азоту?  $Q = 80 \text{ кДж/моль}$ ,  $D_0 = 4,6 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2/\text{с}$ .

## Варіант № 23

### Теоретичні питання

1. Яка природа металевого зв'язку?
2. Енергія Фермі. Яку форму має поверхня Фермі в теорії вільних електронів?
3. Електронні з'єднання або фази Юм-Розері.
4. Який вплив на дифузію робить пластична деформація?

### Задачі

1. Маючи значення енергії зв'язку атомів магнію (ГП)  $V_{зв} = 150,6$  кДж/моль, визначити енергію, що приходить на один атом і один зв'язок.
2. Визначити мінімальне і максимальне значення кінетичної енергії валентних електронів міді при абсолютному нулі ( $A = 63,54$ ;  $\rho = 8,9 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>).
3. Визначення параметра решітки з виміром щільності твердого розчину на основі ГЦК решітки показало, що кількість атомів на комірку склало 4,0. Про який тип твердого розчину свідчить цей результат?
4. Порівняйте швидкість дифузії (коефіцієнт) вуглецю і нікелю в  $\gamma$ -залізі при  $t = 1000$  °С.  
 $C \rightarrow \gamma\text{-Fe}$       $D_0 = 0,04$  см<sup>2</sup>/с      $Q = 134$  кДж/моль  
 $Ni \rightarrow \gamma\text{-Fe}$       $D_0 = 0,77$  см<sup>2</sup>/с      $Q = 280$  кДж/моль  
За якими механізмами найбільш ймовірна дифузія цих елементів?

## Варіант № 24

### Теоретичні питання

1. Що характеризує фізична величина “енергія зв'язку”?
2. Чим обумовлена контактна різниця потенціалів при з'єднанні двох металів?
3. Загальне і відмітне у твердих розчинах впровадження і фазах упровадження.
4. Можливі механізми дифузії в металах.

### Задачі

1. Знаючи, що хром кристалізується з утворенням ОЦК структури і має щільність  $7,10 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, визначити період кристалічних ґрат хрому.
2. Яка імовірність заповнення в металі енергетичного рівня, розташованого на 0,01 еВ вище рівня Фермі при температурі 27 °С.
3. На діаграмі стану Cu-Si найбільша розчинність кремнію в міді складає 6,3% (по масі). Визначити електронну концентрацію такого розчину.
4. Сталь, що містить 0,10% вуглецю, піддають цементації. На поверхні під час науглецювання підтримують постійну концентрацію вуглецю 1,1%. Визначте тривалість відпалу для того, щоб на глибині 0,06 см досягти концентрації 0,60%.  
 $D_0 = 2,5 \cdot 10^{-6}$  см<sup>2</sup>/с,  $Q = 120$  кДж/моль,  $t = 927$  °С

## Варіант № 25

### Теоретичні питання

1. Опишіть природу металевого зв'язку.
2. Який вигляд має залежність енергії електронів від хвильового числа  $E(k)$  в теорії вільних електронів і в зонній теорії металів?
3. Фази Лавеса. Що визначає стійкість структури?
4. Самодифузія і гетеродифузія. Який найбільш імовірний механізм самодифузії? Запропонуйте методи вивчення самодифузії.

### Задачі

1. Маючи значення енергії зв'язку срібла (ГЦК) 284 кДж/моль, визначити енергію, що приходить на один атом і один зв'язок.
2. Визначте значення мінімальної і максимальної кінетичної енергії валентних електронів при  $T = 0\text{K}$  у кристалах заліза ( $\rho = 7,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ;  $A = 55,85$ ).
3. Визначте електронну концентрацію у фазі  $\text{Ag}_5\text{Zn}_8$ .
4. Використовуючи значення основних параметрів дифузії азоту в  $\alpha$ -залізі, визначте коефіцієнт дифузії при  $700\text{ }^\circ\text{C}$ . За яким механізмом йде дифузія азоту?  $Q = 80 \text{ кДж/моль}$ ,  $D_0 = 4,6 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2/\text{с}$ .

## 4. МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО РІШЕННЯ ЗАДАЧ

При рішенні першої задачі (тема 1) на визначення густини речовини або параметра кубічної комірки при названому типі структури необхідно:

- зобразити елементарну комірку для названого типу структури;
- визначити кількість атомів або молекул, що приходяться на одну комірку – базис  $n$ ;

– розділивши об'єм комірки  $V_{\text{ат}}$  (комірка кубічна з параметром  $a$  або гексагональна щільноупакована з параметрами  $a$  і  $c$ ) на число атомів у ній, одержимо об'єм, що приходить на один атом або молекулу  $V_{\text{ат}}/n$ ; помноживши його на число часток в одному молі речовини – число Авогадро  $N_A = 6,023 \cdot 10^{23} \text{ 1/моль}$ , одержимо об'єм одного моля, який можна також представити як атомну (молярну) масу  $A$ , ділену на густину речовини  $\rho$ . Одержали формулу:

$$\frac{V_{\text{ат}}}{n} \cdot N_A = \frac{A}{\rho}$$

і визначили з неї необхідну величину.

При рішенні задачі на визначення енергії одного зв'язку необхідно:

- дати визначення поняття “енергія зв'язку”;
- перейти від енергії, що приходить на один моль, до енергії, що приходить на 1 атом (в eV);
- врахувати, що при випарі атома з поверхні кристала руйнуються зв'язки в середньому з половиною найближчих сусідніх атомів.

Вирішуючи задачі, необхідно обов'язково наводити фізичний зміст усіх величин і використовуваних понять.

У задачі 2 найчастіше використовують поняття “енергія Фермі”, для визначення якої необхідно:

– попередньо розрахувати кількість атомів цього елемента в одиниці об’єму, використовуючи наступну пропорцію: 1 моль речовини містить  $N_A$  атомів і займає об’єм  $A/\rho$ .  $1 \text{ м}^3$  відповідає  $n_{\text{ат}}$

$$n_{\text{ат}} = \frac{N_A \cdot A/\rho}{1 \text{ м}^3};$$

– від числа атомів у  $1 \text{ м}^3$  перейти до числа валентних електронів у  $\text{м}^3$  (електронної концентрації) з урахуванням валентності елемента  $n = n_{\text{ат}} \cdot \text{валентність}$ ;

– визначити  $E_{\text{ф}}$ .

Знаючи  $E_{\text{ф}}$ , можна визначити середню енергію електронів  $\bar{E} = 3/5 E_{\text{макс}}$ ; максимальну швидкість електронів  $u_{\text{ф}}$ , і відповідну довжину хвилі  $\lambda_{\text{мін}}$  і температуру  $T_{\text{ф}}$ . Розрахувавши  $E_{\text{ф}}$ , можна визначати імовірності заповнення енергетичних рівнів, розташованих вище або нижче рівня Фермі на задану величину при даній температурі.

Рішення задач теми 3 вимагає визначення значення електронної концентрації, для чого у випадку, коли гранична розчинність елемента у твердому розчині задана у відсотках по масі, необхідно перерахувати її в атомні відсотки.

У подвійних сплавах концентрації компонентів позначимо:

% ( по масі)	$X_1$ і $X_2$	$X_1 + X_2 = 100\%$ або	$X_2 = 100\% - X_1$
% (атомні)	$Y_1$ і $Y_2$	$Y_1 + Y_2 = 100\%$ або	$Y_2 = 100\% - Y_1$
Атомні маси	$A_1$ і $A_2$ ,	$M$ – маса сплаву.	

$$\frac{Y_1}{Y_2} = \frac{\frac{M \cdot X_1}{A_1}}{\frac{M \cdot X_2}{A_2}} = \frac{X_1}{X_2} \cdot \frac{A_2}{A_1}.$$

Звідси по заданому  $X_1$  одержати вираження для  $Y_1$ . Потім, визначивши  $Y_1$  і знаючи валентність елементів, визначити електронну концентрацію:

$$\frac{n_{\text{эл}}}{n_{\text{ат}}} = \frac{B_1 \cdot Y_1 + B_2 \cdot Y_2}{100\%},$$

де  $B_1$  і  $B_2$  – валентності розчинника і розчиненого елемента.

При визначенні символів площин, що обмежують 1-у зону Бриллюена, необхідно для заданого типу структури визначити найщільніше упаковані атомами площини. Їм відповідають найбільші міжплощинні відстані, значить найменше значення  $\pi/d$ . Ці площини і будуть визначати форму 1-ї зони Бриллюена.

Для визначення частоти переміщень атомів елемента, що дифундує, (тема 4) за одну секунду необхідно врахувати, що при виведенні 1-го рівняння дифузії множник  $1/6 \cdot f \cdot \delta^2$  названий коефіцієнтом дифузії і позначений  $D = 1/6 \cdot f \cdot \delta^2$ ,

де  $f$  – частота переміщень або стрибків атомів,  $\delta$  – довжина стрибка атома з одного положення рівноваги в сусіднє. З іншої сторони з підвищенням температури коефіцієнт дифузії збільшується за законом Арреніуса

$$D = D_0 \cdot e^{-Q/RT},$$

де  $D_0$  – частотний фактор;

$Q$  – енергія активації дифузії, енергія, необхідна для переміщення одного моля речовини на одну міжатомну відстань;

$R = 8,31$  Дж/моль – універсальна постійна;

$T$  – температура за абсолютною шкалою.

Якщо в задачі наведені коефіцієнти дифузії при декількох температурах і потрібно визначити основні параметри дифузії, тобто  $Q$  і  $D_0$ , то зручний графічний метод рішення задачі: логарифмують рівняння Арреніуса

$$\ln D = \ln D_0 - (Q/R) (1/T),$$

одержують рівняння прямої, і будують графік  $\ln D = f(1/T)$ . На цьому графіку відрізок, що відтинається прямою від початку координат, є  $\ln D_0$ , а  $Q/R$  – тангенс кута нахилу прямої до осі  $1/T$ . Узявши дві крапки на прямій, визначаємо

$$Q = R(\Delta \ln D) / \Delta(1/T).$$

## ЛІТЕРАТУРА

### Основна

1. Уманский Я.С., Скаков Ю.А. Физика металлов. Атомное строение металлов и сплавов: Учебник для вузов. – М.: Атомиздат, 1978. - 352 с.
2. Павлов П.В., Хохлов А.Ф. Физика твердого тела: Учебник. – М.: Высшая школа. 2000. - 494 с.
3. Белоус М.В., Браун М.П. Физика металлов: Учебное пособие. – Киев: Вища школа, 1986. - 343 с.
4. Бушманов Б.Н., Хромов Ю.А. Физика твердого тела: Учебное пособие для вузов. – М.: Высшая школа, 1971. - 274 с.
5. Кривуша Л.С., Физика металлов: Учебное пособие для вузов. – Днепропетровск, НМетАУ, 2007. - 150 с.
6. Ермаков С.С. Физика металлов и дефекты кристаллического строения: Учебное пособие. – Л.: ЛГУ, 1989. - 280 с.

### Додаткова

7. Шульце Г. Металлофизика. – М.: Мир, 1971. - 503 с.
8. Елифанов Г.И. Физика твердого тела: Учебное пособие для вузов. – М.: Высшая школа, 1977. - 286 с.
9. Григорович В.К. Металлическая связь и структура металлов. – М.: Наука, 1988. - 296 с.



10. Бокштейн С.З. Строение и свойства металлических сплавов- М.:  
Металлургия, 1971. - 496 с.

11. Юм-Розери В. Введение в физическое металловедение. – М.:  
Металлургия, 1965. - 203 с.

## З М І С Т

	Стор.
ВСТУП .....	3
1. РОБОЧА ПРОГРАМА ДИСЦИПЛІНИ .....	4
1.1. Міжатомна взаємодія в твердих тілах .....	4
1.2. Основи електронної будови металів .....	5
1.3. Тверді розчини та проміжні сполуки .....	5
1.4. Дифузія в металах і сплавах .....	6
2. МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИВЧЕННЯ ТЕОРЕТИЧНОГО КУРСУ ДИСЦИПЛІНИ .....	6
3. ІНДИВІДУАЛЬНІ ЗАВДАННЯ .....	9
4. МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО РІШЕННЯ ЗАДАЧ .....	22
ЛІТЕРАТУРА .....	24