



ДИФРАКЦІЙНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ НАНОМАТЕРІАЛІВ

Робоча програма навчальної дисципліни (Силабус)

Реквізити навчальної дисципліни

Рівень вищої освіти	<i>Другий (магістерський)</i>
Галузь знань	<i>13 Механічна інженерія</i>
Спеціальність	<i>132 Матеріалознавство</i>
Освітньо-професійна програма	<i>Освітньо-професійна програма Нанотехнології та комп'ютерний дизайн матеріалів</i>
Статус дисципліни	<i>Вибіркова</i>
Форма навчання	<i>очна(денна) /дистанційна/змішана</i>
Рік підготовки, семестр	<i>1 курс, весняний семестр</i>
Обсяг дисципліни	<i>5 кредитів ECTS / 150 годин, 36 годин лекцій, 18 годин лабораторних занять, 96 годин СРС</i>
Семестровий контроль/ контрольні заходи	<i>екзамен / МКР</i>
Розклад занять	<i>http://rozklad.kpi.ua (Лекція –1 раз на тиждень, лабораторне заняття – 1 раз на два тижні)</i>
Мова викладання	<i>Українська</i>
Інформація про керівника курсу / викладачів	<i>Лектор: доктор технічних наук, професор, Юркова Олександра Іванівна, e-mail: yurkova2403@gmail.com Лабораторні: доктор технічних наук, професор, Юркова Олександра Іванівна, e-mail: yurkova2403@gmail.com</i>
Розміщення курсу	<i>https://campus.kpi.ua/tutor/index.php?mode=mob&show&irid=234841</i>

Програма навчальної дисципліни

1. Опис навчальної дисципліни, її мета, предмет вивчення та результати навчання

Вивчення навчальної дисципліни надає здобувачу можливість ознайомитися з сучасним рівнем наукових досліджень в області дифракційних методів дослідження наноматеріалів, поглибити професійну підготовку в межах спеціальності та освітньої програми, здобути додаткові результати навчання. Цю дисципліну варто вчити для того, щоб стати конкурентоспроможним фахівцем. Дифракційні методи дослідження дають пряму і найбільш об'єктивну інформацію про атомно-кристалічну будову твердого тіла. Володіючи цими методами, студент стає фахівцем, здатним вирішувати задачі встановлення взаємозв'язку між хімічним складом, внутрішньою будовою та різноманітними фізико-хімічними і механічними властивостями наноматеріалів.

Предмет дисципліни «Дифракційні методи дослідження наноматеріалів» – вивчення особливостей формування картин рентгенівської та електронної дифракції наноматеріалів, отриманих різними методами, та визначення на їх основі форми, розмірів, тонкої структури (зерен, кристалітів, мікронапружень, дислокаційної субструктури) у широкому інтервалі дисперсності; сучасні дифракційні методи контролю структурних змін в наноматеріалах на різних стадіях отримання.

Метою навчальної дисципліни є формування у студентів компетентностей, що підсилюють фахові компетентності спеціальності, таких як:

- здатність уявляти особливості формування рентгенівських та електронних дифракційних картин матеріалів, в т.ч. наноматеріалів, отриманих різними методами, та визначати на їх основі фазовий склад, структурний стан, розміри частинок, зерен, кристалітів, тонку структуру (розмір блоків, величину мікронапружень, щільність дислокацій, концентрацію дефектів пакування);
- здатність отримати інформацію про структуру речовини, у т.ч. в наноструктурному стані, зі спектрів електромагнітного випромінювання (рентгенівського, електронного);
- здатність обґрунтовано та аргументовано обирати сучасні методи та засоби аналізу і контролю структури, фазового та хімічного складу наноматеріалів і виробів з них;
- здатність застосовувати сучасні дифракційні методики контролю структурних змін в наноматеріалах на різних стадіях їх отримання;
- здатність проводити експериментальні дослідження структури наноматеріалів; аналізувати, систематизувати та представляти результати досліджень.
- здатності працювати із дослідницьким устаткуванням, застосовуючи сучасні методи і методики експерименту у лабораторних та виробничих умовах для вирішення завдань в галузі матеріалознавства;
- здатність проводити дослідження структури композитів і покриттів із наноматеріалів методами дифракційного експерименту із розумінням фізичної сутності і можливостей методів та критичним аналізом його результатів;
- здатність проводити дослідницькі роботи, стандартизацію, сертифікацію наноматеріалів та виробів на підставі базових знань.

Студенти мають продемонструвати знання, що поглиблюють результати навчання:

- термінології рентгенівського та електронографічного дифракційного аналізу, фізичних основ взаємодії рентгенівського випромінювання та електронів з речовиною, теоретичних основ та можливостей основних сучасних методів рентгеноструктурного та електронографічного аналізу для дослідження структури матеріалів, в т.ч. наноматеріалів;
- особливостей розсіювання рентгенівських променів та електронів атомами речовини, теоретичних основ дифракційних методів дослідження фазового складу, атомно-кристалічної структури та дефектів кристалічної будови наноматеріалів; впливу розмірів кристалітів на формування картини розсіювання рентгенівського випромінювання та електронів;
- сучасних експериментальних методів та приладів дослідження структури наноматеріалів, умови реалізації та границі застосування методів;
- основних розрахункових методик обробки результатів дифракційного експерименту;
- можливостей дифракційних методів дослідження структури, їх точності, чутливості та локальності.
- сучасних методик контролю структурних змін порошкових наноматеріалів як на стадії пресування, так і на стадії спікання.

студенти повинні уміти:

- застосовувати отримані знання для проведення експериментальних досліджень фазового складу, атомно-кристалічної структури та дефектів кристалічної будови наноматеріалів;
 - ставити та вирішувати завдання з проведення досліджень структури наноматеріалів дифракційними методами;
 - обирати відповідні обладнання та методи дослідження для рішення конкретних практичних задач визначення структури наноматеріалів;

- використовувати дифракційні методи (рентгеноструктурний аналіз, електроннографію/дифракційну електронну мікроскопію) для вивчення фазового складу, атомно-кристалічної структури та дефектів кристалічної будови наноматеріалів;
- використовувати основні розрахункові методики обробки результатів дифракційного експерименту на основі сучасних інформаційних технологій та критично аналізувати отримані експериментальні дані;
- застосовувати сучасні дифракційні методи визначення/дослідження/контролю основних параметрів структури наноматеріалів та обробляти експериментальні дані;
- опановувати і виконувати сучасні експериментальні методики контролю структурних змін наноматеріалів на різних стадіях отримання та обробки (пресування, спікання тощо).
- планувати матеріалознавчі дослідження, здійснювати статистичну обробку і статистичний аналіз результатів експериментів, обґрунтовувати висновки.

2. Пререквізити та постреквізити дисципліни (місце в структурно-логічній схемі навчання за відповідною освітньою програмою)

Дисципліна викладається в другому семестрі підготовки за освітньою-професійною програмою другого (магістрського) рівня вищої освіти зі спеціальності 132 Матеріалознавство. Для успішного засвоєння дисципліни, студент повинен володіти набором компетентностей першого (бакалаврського) рівня вищої освіти.

Знання, що студент отримає під час вивчення дисципліни «Дифракційні методи дослідження наноматеріалів», є підґрунтям для проведення науково-дослідних робіт, виконання магістерської дисертації за спеціальністю 132 Матеріалознавство.

3. Зміст навчальної дисципліни

Розділ 1. Дифракційні методи як методи вивчення структурних особливостей речовини.

Тема 1.1. Дифракційні методи вивчення структури матеріалів та їх роль в розвитку наноматеріалів.

Тема 1.2. Елементи кристалографії. Елементарна комірka та кристалічна решітка.

Розділ 2. Дослідження матеріалів за допомогою дифракції рентгенівських променів

Тема 2.1. Властивості рентгенівських променів та їх практичне використання. Суцільний та характеристичний спектр та їх використання в рентгеноструктурному аналізі. Взаємодія рентгенівського випромінювання з речовиною.

Тема 2.2. Основні рівняння дифракції рентгенівських променів. Принципи основних методів рентгеноструктурного аналізу.

Тема 2.3. Теорія інтенсивності дифракційного розсіювання кристалами. Фактори інтенсивності.

Тема 2.4. Рентгенівський фазовий аналіз. Визначення індексів інтерференцій.

Тема 2.5. Прецизійне визначення параметрів кристалічної ґратки. Рентгенівський аналіз діаграм стану.

Розділ 3. Рентгенівські методи дослідження структури наноматеріалів

Тема 3.1. Загальна характеристика рентгенівських методів визначення розміру кристалітів. Аналіз розширення профілю рентгенівських дифракційних максимумів.

Тема 3.2. Визначення розміру кристалітів та мікронапружень за розширенням дифракційних ліній.

Розділ 4. Застосування дифракції електронів для дослідження наноматеріалів

Тема 4.1 Електроннографічні/електронно-мікроскопічні дослідження структури наноматеріалів. Принципи електроннографічного/електронно-мікроскопічного аналізу. Взаємодія електронів з речовиною.

Тема 4.2 Формування дифракційної картини електронів, геометрія дифракційної картини. Особливості дифракційної картини наноматеріалів

Тема 4.3 Сучасні експериментальні прилади та методи дослідження структури наноматеріалів, умови реалізації та границі застосування методів.

4. Навчальні матеріали та ресурси

4.1 Базова

1. Структура і властивості твердого тіла [Текст]: Лабораторний практикум: навч. посібник / О.Г. Алавердова, О.В. Арінкін, О.Ф. Богданова та ін. За ред. Л.С. Палатника. – Київ: Вища школа, 1992. – 311 с.

2. Рентгеноструктурний аналіз матеріалів у дисперсному стані [Текст]: навчальний посібник / уклад.: П.І. Лобода, О.П. Карасевська, І.Ю. Троснікова. – Київ: НТУУ «КПІ», 2017. – 139 с.

3. Кушта Г.П. Рентгенографія металів [Текст] / Г.П. Кушта. – Львов: Вища школа, 1979. – 386 с.

Перераховані книги є у вільному доступі в бібліотеці КПІ ім. Ігоря Сікорського і можуть бути використані для отримання базових знань по рентгенівському аналізу дисперсних матеріалів.

4.2 додаткова

4. Кристалографія, кристалохімія та мінералогія [Електронний ресурс]: підручник для студ. спеціальності 132 Матеріалознавство / Л.О. Бірюкович. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 234 с.

5. Горелик С.С. Рентгенографический и электронно-оптический анализ [Текст]: учеб. пособие для студентов вузов / С.С. Горелик, Ю.А. Скаков, Л.Н. Расторгуев. – Москва: МИСИС, 2002 (1994). – 328 с.

6. Тейлор А. Рентгеновская металлография [Текст] (перевод с английского) / А. Тейлор. Ред. Б.Я. Пинес. – Москва: Металлургия, 1965. – 663 с.

7. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия [Текст] / Я.С. Уманский, Ю.А. Скаков, А.Н. Иванов, Л.Н. Расторгуев. – Москва: Металлургия, 1994. – 632 с.

8. Шаскольская М.П. Кристаллография [Текст] / М.П. Шаскольская. – Москва: Высшая школа, 1982. – 375 с.

9. Кушта Г.П.. Введение в кристаллографию [Текст] / Г.П. Кушта. – Львов: Высшая школа, 1976. – 237 с.

10. Русаков А.А. Рентгенография металлов [Текст] / А.А. Русаков. – Москва: Атомиздат, 1977. – 480 с.

11. Cullity B.D, Stock S.R. Elements of X-Ray Diffraction [Текст] / B.D, Cullity., S.R. Stock / 2nd edn. – London: Pearson Education Limited, 2001. – 650 p. – <https://www.pearson.com/us/higher-education/product/Cullity-Elements-of-X-Ray-Diffraction-3rd-Edition/9780201610918.html>

12. Anomalous decrease in X-ray diffraction intensities of Cu–Ni–Al–Co–Cr–Fe–Si alloy systems with multi-principal elements [Text] / J. W. Yeh, S. Y. Chang, Y. D. Hong and [et. al.] // Materials Chemistry and Physics. – 2007. – Vol. 103. – P. 41–46. – <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2007.01.003>

13. Ungar T. Characterization of nanocrystalline materials by X-ray line profile analysis [Text] / T. Ungar / J. Mater. Sci. – 2007. – Vol. 42. – P. 1584–1593.. – <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0696-1>

14. Ungar T. Microstructural parameters from X-ray diffraction peak broadening [Text] / T. Ungar / Scripta Materialia. – 2004. – Vol. 51, No 8. – P. 777-781. – <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2004.05.007>

15. Гусев, А.И.. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии [Текст] / А. И. Гусев. / Изд.2-е, исправленное. – Москва: Физматлит, 2009. – 416 с. http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=2173

16. Азаренков Н.А. Основы нанотехнологий и наноматериалов: учебное пособие [Текст] / Н.А. Азаренков, А.А. Веревкин, Г.П. Ковтун. – Харьков: ХНУ им. В.Н. Каразина, 2009. – 69 с.

17. Андрієвський Р.А, Рагуля А.В.. Наноструктурные материалы [Текст] / Р.А. Андрієвський, А.В. Рагуля. – Москва: Академия, 2005. – 192 с.

Книги [1] – [5], [11], [12] зазначені у списку допоміжних навчальних матеріалів, є у вільному доступі бібліотеці КПІ ім. Ігоря Сікорського.

Рекомендується ознайомитись зі змістом вказаних базових та додаткових джерел, більш глибоко опрацювати рекомендовані викладачем розділи, що відповідають тематиці лекцій та/чи практичних занять. Для окремих розділів доцільно створити електронний конспект.

Навчальний контент

5. Методика опанування навчальної дисципліни (освітнього компонента)

5.1 Зміст лекційних занять

Розділ 1. Дифракційні методи як методи вивчення структурних особливостей наноматеріалів.

Тема 1.1. Дифракційні методи вивчення структури матеріалів та їх роль в розвитку наноматеріалів.

Лекція 1. Вступ. Предмет, мета і завдання дисципліни. Сучасні методи дослідження структури матеріалів та їх класифікація. Дифракційні методи вивчення структури матеріалів та їх роль в розвитку наноматеріалів. (презентація)

Література [1] с. 13-21; [2] с. 17-29; [4] с. 342-346.

Тема 1.2. Елементи кристалографії. Елементарна комірka та кристалічна решітка.

Лекція 2. Кристалічний стан речовини. Кристалічна решітка та елементарна комірka. Співвідношення параметрів елементарної комірki. Сингонії та категорії. Решітки Браве. Базис та координаційне число просторової решітки.. Елементи симетрії кристалічного простору та їх позначення. Міжплощинна відстань. Формули структурної кристалографії. Симетрія кристалів. (презентація)

Література [1] с. 5-13; [3] с.102-111; [4] с. 317-328; с. 342-346.

Розділ 2. Дослідження матеріалів за допомогою дифракції рентгенівських променів

Тема 2.1. Властивості рентгенівських променів та їх практичне використання. Суцільний та характеристичний спектр та їх використання в рентгеноструктурному аналізі. Взаємодія рентгенівського випромінювання з речовиною.

Лекція 3. Природа, отримання та властивості рентгенівських променів та їх практичне використання. Способи реєстрації рентгенівського випромінювання. (презентація)

Література [3] сс. 28-36; 41; 10-13; [6] с. 140-146.

Лекція 4. Спектральний склад рентгенівських променів. Суцільний рентгенівський спектр, його природа, властивості, загальні закономірності та використання. Характеристичний рентгенівський спектр, його природа, умови виникнення. Теорія характеристичного спектру та його особливості. Закон Мозлі та його застосування. Вторинне характеристичне (флуоресцентне) випромінювання (презентація)

Література [3] с. 13-17; [2] [4] с. 317-328. [6] с. 143-146.

Лекція 5. Взаємодія рентгенівського випромінювання з речовиною. Основний закон ослаблення рентгенівських променів. Лінійний та масовий коефіцієнти ослаблення. Шар половинного ослаблення. Край смуги поглинання рентгенівських променів та фільтрація рентгенівського випромінювання. (презентація)

Література: [4] с. 117-128. [5] с. 170-172, [6] с. 146-153,

Лекція 6. Взаємодія рентгенівських променів з речовиною. Явища, що виникають під час проходження рентгенівських променів крізь речовину. Поглинання та розсіювання рентгенівського випромінювання. Фотоелектричний ефект, вторинне характеристичне випромінювання, оже-ефект. Класичне та квантове розсіяння рентгенівських променів. Виникнення електронно-позитронних пар. (презентація)

Література: [4] с. 117-128, [5] с. 170-172; [6] с. 147-153

Тема 2.2. Основні рівняння дифракції рентгенівських променів. Принципи основних методів рентгеноструктурного аналізу.

Лекція 7. Основні рівняння дифракції рентгенівських променів. Розсіювання рентгенівських променів атомним рядом, атомною площиною, кристалічною решіткою. Рівняння Лауе. Рівняння Вульфа-Брегга та його застосування. Характеристика основних методів

рентгеноструктурного аналізу: Лауе, обертового монокристала, полікристалів (метод Дебая-Шерера). (презентація)

Література [3] с. 13-15; 129-131; [4] с. 117-128; [6] с. 218-250.

Тематична контрольна робота 1 (перелік питань на тематичну контрольну роботу у Додатку А).

Тема 2.3. Теорія інтенсивності дифракційного розсіяння кристалами. Фактори інтенсивності.

Лекція 8. Теорія інтенсивності дифракційного розсіяння кристалами. Розрахунок відносної інтегральної інтенсивності ліній рентгенограми полікристалічних матеріалів. Фактори інтенсивності інтерференційних максимумів: кутовий фактор, атомний фактор, структурна амплітуда розсіювання, структурний фактор. (презентація)

Література [3] с.112-148. [5] с. 49-53, [6] с. 186-200; [7] с. 163-181,

Лекція 9. Теорія інтенсивності дифракційного розсіяння кристалами. Аналіз структурної амплітуди простої решітки, ОЦК-, ГЦК- та ГЦУ- решітки. Закономірності інтегральних погасань. Фактори інтенсивності інтерференційних максимумів: повторюваності, температурний, поглинання. Ефект первинної екстинкції. (презентація)

Література: [3] с. 383-406; [4] с. 117-128, [5] с. 49-53, [6] с. 186-200; [7] с. 181-195, 200-203

Тема 2.4. Рентгенівський фазовий аналіз. Визначення індексів інтерференцій.

Лекція 10. Рентгенограма як джерело інформації про будову речовини. Визначення фазового складу порошкових композицій. Точність і чутливість рентгенівського фазового аналізу. Основні етапи визначення атомно-кристалічної структури. Кількісний фазовий аналіз. Аналітичний метод індексування дифракційної картини. (презентація)

Література [3] с. 383-406; [5] с. 80-104; [6] с. 57-67; [7] с. 275-289

Тема 2.5. Прецизійне визначення параметрів кристалічної ґратки. Рентгенівський аналіз діаграм стану.

Лекція 11. Прецизійне визначення періодів кристалічної ґратки. Методи прецизійного визначення періоду кристалічної ґратки. Метод графічної екстраполяції.. Рентгенівський аналіз діаграм стану. Особливості дифракційної картини діаграм стану з необмеженою та обмеженою розчинністю компонентів, механічної суміші. Уточнення положення фазових границь на діаграмах стану. Типи твердих розчинів - заміщення, проникнення та вилучення. Визначення типу твердого розчину (презентація)

Література [5] с. 42-49, [6] с. 245-247, с. 269-275

Розділ 3. Рентгенівські методи дослідження наноматеріалів

Тема 3.1. Загальна характеристика рентгенівських методів визначення розміру кристалітів. Аналіз розширення профілю рентгенівських дифракційних максимумів.

Лекція 12. Загальна характеристика рентгенівських методів визначення розміру кристалітів. Особливості рентгенівської дифракційної картини в залежності від розміру зерен /блоків/ кристалітів. Визначення інтегральної або експериментальної ширини дифракційних ліній. Аналіз розширення профілю рентгенівських дифракційних максимумів.. Інструментальна ширина та фізичне розширення дифракційних ліній. Фактори, що викликають розширення дифракційних ліній. (презентація)

Література [1]; [2] с. 62-82; [3] с. 306-310; [5] с. 306-310; [7] с. 347-370.

Тематична контрольна робота 2 (перелік питань на тематичну контрольну роботу у Додатку А).

Тема 3.2. Визначення розміру кристалітів та мікронапружень за розширенням рентгенівських дифракційних ліній

Лекція 13. Визначення розмірів кристалітів/блоків/ділянок когерентного розсіювання за розширенням дифракційних ліній. Мікровикривлення кристалічної решітки. Розділення внеску дисперсності та мікровикривлень у фізичне розширення дифракційних ліній. (презентація)

Література: [1]; [2] с. 62-82;; [3]; [4] с.145-155; [5] с.145-155; [7] с. 347-365. .

Розділ 4. Застосування дифракції електронів для дослідження наноматеріалів

Тема 4.1. Електронографічні / електронно-мікроскопічні дослідження структури наноматеріалів. Принципи електронографічного/електронно-мікроскопічного аналізу. Взаємодія електронів з речовиною.

Лекція 14. Електронографічні / електронно-мікроскопічні дослідження структури наноматеріалів. Принципи електронографічного/електронно-мікроскопічного аналізу. Довжина хвилі електронів. (презентація)

Література [4] с. 204-230; [5] с. 293-302; с. 424-548; [7] с. 293-302 с. 484-548.

Тематична контрольна робота 2 (перелік питань на тематичну контрольну роботу у Додатку А).

Лекція 15. Взаємодія електронів з речовиною. Особливості розсіювання електронів атомами речовини, електронна дифракція. Амплітуда атомного розсіювання електронів (презентація)

Література [4] с.204-230; с. 424-435; [5] с. 293-302; [7] с. 293-302 с. 484-548.

Тема 4.2 Формування дифракційної картини електронів, геометрія дифракційної картини. Особливості дифракційної картини наноматеріалів.

Лекція 16. Формування дифракційної картини електронів, геометрія дифракційної картини. Основні розрахункові методи обробки результатів дифракційного експерименту. Обчислення міжплощинних відстаней, визначення індексів інтерференцій по електронограмах (презентація)

Література: [4] с. 204-230; [5] с. 293-302; с. 424-548

Лекція 17. Вплив розміру кристалітів на формування картини розсіювання електронів матеріалами, отриманими різними методами. Просвічувальна/Трансмісійна електронна мікроскопія для визначення геометричних параметрів і розмірів наночастинок. Будова електронного мікроскопу, режим мікродифракції та мікрозображення. Основні області застосування електронної дифракції. Границі застосування та порівняння з рентгенівськими методами (презентація)

Література: [4] с. 204-230; [5] с. 293-302; с. 435-448

Тема 4.3 Сучасні експериментальні прилади та методи дослідження структури наноматеріалів, умови реалізації та границі застосування методів.

Лекція 18. Сучасні експериментальні прилади та методи дослідження структури наноматеріалів, умови реалізації та границі застосування методів. Можливості дифракційних методів дослідження структури, їх точність, чутливість та локальність. Роль дифракційних досліджень в діагностиці структурних особливостей наноматеріалів (презентація)

Література: [4] с. 204-230; [5] с. 293-302; с. 435-448; [10] - [12]

5.1 Перелік тем лабораторних занять

Встпк. Ознайомлення студентів з вимогами щодо підготовки до лабораторних занять, правилами оформлення протоколів та захисту лабораторних робіт. 2 год

Лабораторне заняття 1. Дифракція рентгенівських променів на кристалічній структурі речовини. 2 год.

Лабораторне заняття 2. Визначення кристалічної будови фазових складових речовини. Визначення кристалічної структури полікристалічної речовини кубічної та тетрагональної сингонії. 2 год.

Лабораторне заняття 3. Рентгенівський фазовий аналіз. Визначення якісного та кількісного фазового складу речовини. 2 год.

Лабораторне заняття 4. Напруження в речовині, їх класифікація. Визначення макронапружень в матеріалах рентгенівським методом. 2 год.

Лабораторне заняття 5 Визначення мікронапружень та розмірів блоків/ділянок когерентного розсіювання (ДКР). Розділення їх вкладів в розподіл інтенсивності (розширення ліній) на дифрактограмі/рентгенограмі. 2 год.

Лабораторне заняття 6. Кристалографічні текстури у матеріалах та методи їх дослідження. Рентгенівський аналіз текстур у матеріалах. 2 год.

Лабораторне заняття 7. Рентгеноструктурний аналіз багатофазних композитів. 2 год.

Лабораторне заняття 8 Електронно-мікроскопічний аналіз. Розрахунок електронограм полікристалів. Визначення кристалічної структури та фазового складу матеріалів. 2 год

Лабораторне заняття 9. Захист лабораторної роботи № 8. 2 год.

6. Самостійна робота студента

Самостійна робота студентів (загальна тривалість 96 годин) з дисципліни полягає в:

- самостійному опрацюванні літературних джерел для розширення розуміння лекційних тем (35 годин);*
- підготовці до 2-х тематичних контрольних робіт (4 години)*
- підготовці до виконання лабораторних робіт, аналізу одержаних результатів та формулюванні висновків – в розрахунку 1,5 години на 1 годину виконання лабораторних занять (27 годин);*
- підготовці до підсумкової атестації – екзамену (30 годин).*

Політика та контроль

7. Політика навчальної дисципліни (освітнього компонента)

Система вимог, які ставляться перед студентами:

- Тему пропущеного лекційного заняття студент повинен опрацювати самостійно шляхом написання конспекту. .*
- Завдання пропущеного лабораторного заняття студент повинен виконати в час, узгоджений з викладачем.*
- Під час усіх видів аудиторних занять забороняється використання мобільних телефонів у звуковому режимі, дозволяється обмежене використання месенджерів у беззвучному режимі. Під час лабораторних занять дозволяється застосування персональних комп'ютерів для пошуку інформації, використання власних хмарних ресурсів, тощо.*
- Умовою допуску до лабораторних занять є наявність у студента написаного протоколу, який складається з: номера та назви лабораторної роботи; мети лабораторної роботи; теоретичних відомостей, до яких включають основні визначення та умовні позначення; порядок виконання лабораторної роботи.*
- Перевірка правильності виконання завдань проводиться викладачем безпосередньо на занятті. Студенти можуть обробляти отримані на лабораторному занятті експериментальні результати (виконувати розрахунки, аналіз одержаних результатів та формулювання висновків) самостійно вдома і надавати їх на перевірку викладачу на наступному занятті. За умови проведення лабораторних занять у дистанційному режимі оформлені протоколи лабораторних робіт із виконаними завданнями надсилаються викладачу на e-mail або в Telegram для перевірки упродовж тижня після останнього заняття за відповідною темою.*
- Результати виконаних лабораторних робіт оформлюються у вигляді звітів з застосуванням текстового редактора. Звіт супроводжується формулами, таблицями, графіками, елементами, які підтверджують виконання завдань та одержані результати. За дистанційної форми навчання перевірка правильності виконання завдання здійснюється під час заняття дистанційно із використанням Telegram чату. За дистанційної чи змішаної форми навчання звіт оформлюється в будь-якому текстовому редакторі і на перевірку надсилається на e-mail викладача. За звичайної аудиторної форми навчання звіт виконується в будь-якому текстовому редакторі і на*

перевірку надається у роздрукованому вигляді. Безпосередній захист відбувається у формі співбесіди, запитань-відповідей.

- Перескладання тематичних контрольних робіт проводиться за взаємною домовленістю викладача та студента.
- Перескладання екзамену проводиться під час додаткової сесії за положенням КПІ ім. Ігоря Сікорського відповідно до графіку перескладань, оприлюдненому на сайті ІМЗ ім. Є.О. Патона
- Політикою дедлайнів передбачається необхідність своєчасного виконання завдань. Звіти з лабораторних занять виконуються і подаються на перевірку не пізніше 2-х тижнів з моменту завершення. Усі письмові документи мають бути захищені до закінчення теоретичного навчання в семестрі.
- Усі учасники освітнього процесу: викладачі і студенти в процесі роботи вивчення дисципліни мають керуватись принципами академічної доброчесності, передбаченими «Кодексом честі Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»» <https://kpi.ua/code>.

8. Види контролю та рейтингова система оцінювання результатів навчання (PCO)

Поточний контроль:

- Виконання та захист звітів з лабораторних робіт всього максимально 40 балів (5×8). Оцінюється самостійність виконання роботи, грамотність в оформленні та правильність виконання.

Критерії оцінювання та кількість балів за лабораторні роботи:

- робота виконана правильно та самостійно та звіт зданий з першого разу (відмінно) – 5 балів;
- робота виконана самостійно, але є неточності у розрахунках та оформленні (добре) – 4 бали;
- робота виконана самостійно, але є помилки у розрахунках та оформленні неповні відповіді на запитання (задовільно) – 3 бали;
- робота виконана несамотійно, є помилки у розрахунках та оформленні, незадовільні відповіді на запитання – 2 б. і менше.

До кожної лабораторної роботи студент повинен підготувати протокол, який складається із: номера; назви; мети; теоретичних відомостей, до яких включають основні визначення та умовні позначення; порядок виконання.

На занятті студенти після опитування допускаються до виконання лабораторної роботи. Після чого викладач проводить ознайомлення студентів із обладнанням і алгоритмом проведення лабораторної роботи. В кінці лабораторної роботи студенти отримують результати дослідження. У продовж тижня студенти дооформляють протокол лабораторної роботи відповідно до вимог завдання і на наступному занятті її захищають

- **МКР** розбита на 2 Тематичні контрольні роботи (ТКР), які проводяться у вигляді тестів на 7-му та 14-му навчальних тижнях. Максимальна оцінка 5 балів за тест, всього 10 балів. Мінімальна позитивна оцінка за тест 3 бали, всього 6 балів. Бали знижуються за неправильні відповіді.

Критерії оцінювання та кількість балів за ТКР.

- повна відповідь – 5
 - неповна відповідь – 4
 - неповна відповідь з неточностями – 3
 - незадовільна відповідь – 2 б. і менше
- **Календарний контроль:** провадиться двічі на семестр на 7-8 та 14-15 тижні, як моніторинг поточного стану виконання вимог силабусу. Для позитивного першого календарного контролю студент повинен отримати позитивні оцінки за захист лабораторних робіт № 1 – № 3 (мінімальна позитивна оцінка 3 бали за кожну роботу,

всього 9 балів за три роботи) та Тематичну контрольну роботу № 1 (мінімум 3 бали) і сумарна мінімальна позитивна оцінка 12 балів. Для позитивного другого календарного контролю студент повинен отримати позитивні оцінки за захист лабораторних робіт № 4 - № 7 (мінімальна позитивна оцінка 12 балів за 4 роботи) та тематичної контрольної роботи № 2 (мінімум 3 бали) і сумарно мінімальна позитивна оцінка 15 балів.

- **Семестровий контроль:** екзамен, проводиться у письмовій, усній або змішаній формі., у кожному білеті три питання.

Умови допуску до семестрового контролю (мінімальний стартовий рейтинг): семестровий рейтинг не менше 30 балів за умови виконання усіх лабораторних робіт та кількості балів за видами:

- Тематичні контрольні роботи не менше 6 балів (ТРК № 1 – 3 бали: ТРК № 2 – 3 бали).
- Захист звітів з лабораторних робіт не менше 24 балів.

Відповіді на екзамені оцінюються за 50-бальною шкалою, яка складається з балів, які студент отримує за відповіді на питання білету (максимально 15 балів за кожне питання білету; кожен білет складається з 3-х питань) та надання відповіді на 1 додаткове питання (максимально 5 балів). Тобто, $15 \text{ б.} \times 3 + 5 \text{ б.} = 50 \text{ балів}$.

Критерії оцінювання відповідей на питання білету та кількість балів на екзамені:

- 14-1 балів – повна відповідь (не менше 95 % потрібної інформації), студент демонструє повні і глибокі знання навчального матеріалу;
- 11-13 балів – достатньо повна відповідь (не менше 85 % потрібної інформації), студент демонструє хороші знання навчального матеріалу;
- 9-10 балів – неповна відповідь (але не менше 60 % потрібної інформації), студент задовільно засвоїв теоретичний матеріал, але допускає суттєві неточності, щодо використання отриманих знань;
- менше 9 балів – незадовільна відповідь, незадовільне знання теорії (менше 60 % потрібної інформації) та відсутність вміння та навичок у вирішенні поставлених завдань, відповідь не відповідає умовам до «задовільно».

Оцінка за відповідь знижується – за принципові помилки у відповіді, за неповну відповідь, за неточності, за неправильне використання термінів.

Критерії оцінювання відповіді на додаткове питання:

- 5 балів – повна відповідь;
- 4 бали – достатньо повна відповідь;
- 3 бали – неповна відповідь;
- менше 2 балів – незадовільна відповідь.

Загальна кількість балів за відповідь на екзамені визначається шляхом підсумовування балів за відповіді на питання екзаменаційного білету та балів за відповідь на додаткове питання.

Рейтинг з дисципліни (РД) враховує роботу студента протягом семестру (стартові бали, максимально 50 б., мінімально 30 б.) та рівень знань і навичок, виявлених ним на екзамені (максимально 50 б., мінімально 10 б.). Після оцінювання відповідей на екзамені підсумовуються стартові бали та бали за екзамен, зводяться до рейтингової оцінки та переводяться до оцінок за університетською шкалою (табл.).

Таблиця відповідності рейтингових балів оцінкам за університетською шкалою:

Кількість балів	Оцінка
100-95	Відмінно
94-85	Дуже добре
84-75	Добре
74-65	Задовільно
64-60	Достатньо
Менше 60	Незадовільно
Не виконані умови допуску	Не допущено

9. Додаткова інформація з дисципліни (освітнього компонента)

- У випадку проходження дистанційних чи онлайн курсів за тематикою курсу, що підтверджується відповідними сертифікатами, додатково нараховуються 10 балів.
- Перелік питань на 1 та 2 тематичні контрольні роботи знаходиться в Додатку А
- Перелік питань, які виносяться на семестровий контроль (екзамен) знаходиться в Додатку Б.
- Лабораторні роботи плануються з максимальним використанням обладнання лабораторій ЦККНО «Матеріалознавство тугоплавких сполук та композитів» в структурі ІМЗ ім. Є. О. Патона, яке застосовується при одержанні та дослідженні широкого спектру порошкових, композиційних матеріалів та покриттів.

Робочу програму навчальної дисципліни (силабус):

Складено:

професором кафедри високотемпературних матеріалів та порошкової металургії, доктором технічних наук, професором, Юрковою Олександрою Іванівною

Ухвалено:

кафедрою Високотемпературних матеріалів та порошкової металургії (протокол № 21 від 08.07.2022)

Погоджено:

Методичною комісією навчально-наукового Інституту матеріалознавства та зварювання імені Є.О.Патона (протокол № 10/22 від 10 липня 22 р.)

**ПЕРЕЛІК ПИТАНЬ,
які виносяться на тематичні контрольні роботи**

Тематична контрольна робота 1:

1. Яка кількість атомів припадає на долю простої решітки, ОЦК, ГЦК?
2. Що таке базис просторової решітки, чим характеризується, як позначається?
3. Що таке координаційне число?
4. Як позначають вузли в кристалічній решітці, вузлові прямокутники, площини?
5. Індекси Вейса та Міллера. Находження індексів кристалографічних площин.
6. Міжплощинна відстань. Як визначається міжплощинна відстань через індекси площини і періоди решітки?
7. Квадратична форма для ромбічної, кубічної, тетрагональної, гексагональної системи.
8. Центр симетрії, площина симетрії, вісь симетрії.
9. Яка природа рентгенівських променів та як їх отримати?
10. Основні властивості рентгенівських променів.
11. Рівняння Вульфа-Брегга, які властивості рентгенівських променів воно описує?
12. Яку інформацію можна отримати за допомогою рівняння Вульфа-Брегга?
13. Яку інформацію отримують за дифрактограмою (рентгенограмою)?
14. Як розкласти рентгенівські промені в спектр? Типи спектрів рентгенівського випромінювання.
15. Як виникає суцільний спектр? Особливості суцільного спектра. Чим визначається спектральний склад суцільного спектра?
16. Як інтенсивність суцільного спектра залежить від атомного номера матеріалу анода, режимів роботи трубки? Чому ККД рентгенівської трубки становить 1-2%?
17. Умова виникнення характеристичного спектра та його основні особливості.
18. Від чого залежить спектральний склад характеристичного спектра?
19. Як виникає характеристичний спектр (теорія виникнення характеристичного спектра)?
20. Від чого залежить відносна інтенсивність ліній К-серії характеристичного спектра? Співвідношення довжин хвиль К-серії характеристичного спектра.
21. Закон Мозлі і його застосування.
22. Флуоресцентне (вторинне характеристичне) випромінювання: відмінності від характеристичного випромінювання (первинного); як виникає, застосування.
23. Основний закон ослаблення монохроматичних рентгенівських променів.
24. Лінійний і масовий коефіцієнти ослаблення рентгенівських променів, фізична сутність, що характеризують і від чого залежать, одиниці вимірювання.
25. Що таке шар половинного ослаблення?
26. Як масовий коефіцієнт поглинання (ослаблення) залежить від атомного номера речовини і від довжини хвилі випромінювання?
27. Як можна визначити товщину покриття рентгенівським методом?
28. Що таке край смуги поглинання або стрибок поглинання, як виникає?
29. Фільтрація рентгенівського випромінювання. Призначення фільтрів. Як підібрати фільтр?
30. Які явища виникають при взаємодії рентгенівських променів з речовиною?
31. Які процеси відповідають за поглинання, розсіювання рентгенівських променів?

32. Поглинання рентгенівського випромінювання: фотоефект, вторинне характеристичне випромінювання, Оже-ефект.
33. При яких явищах виникають фотоелектрон, оже-електрон, електрон видатності?
34. Що таке когерентне та некогерентне розсіювання рентгенівських променів? Коли виникає комптон ефект?
35. При яких енергіях рентгенівських квантів відбувається утворення електрон-позитронних пар?

Тематична контрольна робота 2:

1. Основні рівняння дифракції рентгенівських променів: рівняння Лауе для атомного ряду, атомної площини та кристалічної решітки.
2. Як на практиці виконують умови виникнення інтерференційних максимумів?
3. Рівняння Вульфа-Бреггів та його застосування у рентгенографії матеріалів.
4. Основні методи рентгеноструктурного аналізу, їх характеристика та призначення.
5. За якими ознаками розрізняються методи рентгеноструктурного аналізу?
6. Функцією яких факторів є інтегральна інтенсивність ліній рентгенограми/дифрактограми?
7. Кутівий фактор інтенсивності інтерференційних ліній на рентгенограмі.
8. Атомний фактор розсіювання, від чого залежить, як змінюється, його вплив на інтенсивність.
9. Структурний фактор інтенсивності, його вплив на інтенсивність ліній на рентгенограмі, що враховує, як визначається?
10. Структурна амплітуда F , що враховує, як визначається?
11. Умови існування та погасання інтерференційних максимумів для простої, ОЦК- та ГЦК решітки виходячи з аналізу структурної амплітуди.
12. Температурний фактор інтенсивності інтерференційних ліній.
13. Фактор повторюваності інтерференційних ліній на рентгенограмі.
14. Залежність інтенсивності інтерференційних ліній від фактора поглинання.
15. Від чого залежить інтегральна інтенсивність дифракційних максимумів?
12. Чому на рентгенограмі чистого металу або однофазного твердого розчину різні інтерференційні лінії мають різну інтенсивність?
13. Від чого, крім факторів інтенсивності, залежить інтенсивність інтерференційних максимумів?
14. На чому ґрунтується якісний фазовий аналіз багатофазних матеріалів?
15. Як провести якісний фазовий аналіз?
16. Які додаткові відомості про досліджуваний об'єкт необхідно знати для однозначного вирішення завдання якісного фазового аналізу?
17. Яке мінімальне число ліній на дифрактограмі необхідно для аналізу фазового складу речовини?
18. Що таке чутливість якісного фазового аналізу і від яких чинників вона залежить? Що впливає на чутливість якісного фазового аналізу?
19. Чому можуть бути відсутні лінії на дифрактограмі (рентгенограмі)?
20. Основи методу рентгеноструктурного кількісного фазового аналізу. Методи кількісного фазового аналізу та їх характеристика.
21. Як визначити тип кристалічної решітки для кристалів кубічної сингонії?
22. Як індексується рентгенограма/дифрактограма кристалів кубічної сингонії?
23. Як розрізнити рентгенограми кристалів з примітивною кубічною і ОЦК решітками?

24. Як розрахувати період кристалічної решітки? Методи прецизійного (точного) визначення періоду решітки.
25. Який зв'язок існує між періодом решітки та міжплощинною віддаллю кристала?
26. Які задачі рентгеноструктурного аналізу вирішують шляхом прецизійного вимірювання періодів решітки? Як досягається прецизійність вимірювання періодів решітки?
27. Яка область кутів θ (значення кутів) є прецизійною та чому?
28. На чому засновано прецизійні методи визначення періодів решітки (міжплощинні віддалі)? Методи прецизійної зйомки та їх характеристика.
29. Методи графічної екстраполяції. Як обрати екстраполяційну функцію? На чому засновано методи?
30. Особливості рентгенівської картини діаграм стану з відсутньою, обмеженою та з необмеженою розчинністю компонентів.
31. Які методи застосовують для уточнення положення фазових границь на діаграмах стану?
32. Які типи твердих розчинів Ви знаєте? Як визначити тип твердого розчину?
33. Які задачі вирішують методами електроннографічного/електронно-мікроскопічного аналізу?
34. Призначення електроннографії та просвічувальної електронної мікроскопії.
35. Як розмір кристалітів впливає на картину електронної дифракції?
36. В чому полягають особливості взаємодії електронів з речовиною?

**ПЕРЕЛІК ПИТАНЬ,
які виносяться на семестровий контроль**

1. Загальна характеристика рентгенівських методів визначення дисперсності порошкових об'єктів.
2. За якими формулами розраховують мікронапруження у матеріалах?
3. Кристалічна решітка та елементарна комірка. Співвідношення параметрів елементарної комірки.
4. Визначення дисперсності порошоків методом підрахунку числа плям на дебаївському кільці.
5. Якими функціями описують розподіл інтенсивності в інтерференційних максимумах при вивченні тонкої кристалічної структури (дисперсність, мікронапруження) в металах.
6. Елементи симетрії кристалічного простору (вузли, вузлові площини, вузлові вісі) та їх позначення.
7. Визначення дисперсності/ розміру зерен, кристалітів з використанням ефекту первинної екстинкції.
8. Що є мірою мікронапружень (напружень II роду) в металах?
9. Обчислення об'єму елементарної комірки.
10. Як визначаються міжплощинні віддалі за даними рентгеноструктурного аналізу?
11. Рівняння Вульфа-Бреггів та його застосування у рентгенографії металів.
12. Визначення товщини покриттів за ослабленням рентгенівських променів, дифрагованих матеріалом підкладки.
13. Методика визначення ширини інтерференційних максимумів.
14. Рентгенограма як джерело інформації і які її ознаки характеризують стан і будову речовини?
15. Від чого залежить кількість інтерференційних максимумів на рентгенограмі/дифрактограмі?
16. Які математичні функції використовують для опису профілю інтерференційних ліній при визначенні фізичного розширення?
17. Який розмір кристалітів можна визначити з лауеграми та епіграмми?
18. Структурний фактор інтенсивності інтерференційних ліній на рентгенограмі/дифрактограмі.
19. Які параметри рентгенограмми/дифрактограмми використовують для визначення дисперсності порошоків у межах 10^{-5} – 10^{-6} см та за якими формулами ведуться розрахунки?
20. Методика визначення центру ваги інтерференційного максимуму.
21. Атомний фактор інтенсивності інтерференційних ліній.
22. Правила вибору рентгенівського випромінювання при здійсненні структурного аналізу матеріалів, до складу яких входять хімічні елементи з різними порядковими номерами у таблиці Менделєєва.
23. Від чого залежить кількість та розмір плям на дебаївському кільці рентгенограмми?
24. Кутівий фактор інтенсивності інтерференційних ліній на рентгенограмі.
25. Що таке області когерентного розсіювання рентгенівських променів (блоків) і як вивчають їх розмір?
26. Температурний фактор інтенсивності інтерференційних ліній.
27. Як залежить вигляд рентгенограмми/дифрактограмми від дисперсності блоків у матеріалах?
28. Фактор повторюваності інтерференційних ліній.
29. Кількісний фазовий рентгенівський аналіз порошкових композицій методом підмішування еталона.

30. Залежність інтенсивності інтерференційних ліній від фактора поглинання.
31. Що таке внутрішні напруження II роду (мікронапруження) і чим вони характеризуються?
32. Ефект первинної екстинкції і його вплив на інтенсивність інтерференційних ліній.
33. Що дає аналіз відношення фізичного розширення інтерференційних ліній v_2/v_1 ?
34. Чому рентгенограма/дифрактограма сталі марки Ст3 не відрізняється від рентгенограми заліза?
35. Експериментальне визначення кутів дифракційних максимумів.
36. Чому на рентгенограмі чистого металу або однофазного твердого розчину різні інтерференційні лінії мають різну інтенсивність?
37. Роздільне визначення дисперсності блоків та мікронапружень.
38. Розрахунок міжплощинних відстаней у кристалічній речовині.
39. При визначенні дисперсності блоків і мікронапружень методом апроксимації застосовують еталон. Для чого його застосовують і які вимоги до нього висувають?
40. Як можна визначити товщину покриття рентгенівським методом?
41. Визначення якісного фазового складу порошкових композицій.
42. Чому вводиться і як визначається поправка на K_α -дублет при визначенні ширини інтерференційної лінії.
43. Які фактори впливають на розширення інтерференційних ліній і як їх враховують?
44. Методи кількісного фазового аналізу.
45. У якому діапазоні визначаються розміри блоків за фізичним розширенням інтерференційних ліній?
46. Яка область кутів є прецизійною для визначення параметру решітки та чому?
47. Формула Шеррера-Селякова та її застосування у рентгеноструктурному аналізі.
48. Чутливість якісного фазового рентгенівського аналізу порошкових композицій.
49. Як виникають рентгенівські промені та яка їх природа?
50. Основні властивості рентгенівських променів.
51. Що необхідне для виникнення рентгенівських променів?
52. Як виникає суцільний спектр випромінювання рентгенівської трубки та його закономірності. Від чого залежить спектральний склад суцільного спектру?
53. Характеристичний спектр: умови виникнення та особливості.
54. Як виникає характеристичний спектр?
55. Від чого залежить спектральний склад (довжина хвилі) та відносна інтенсивність ліній характеристичного спектра?
56. Закон Мозлі та його використання?
57. Як визначити хімічний склад речовини за допомогою рентгенівських променів?
58. Які явища виникають при взаємодії рентгенівських променів з речовиною?
59. Основний закон ослаблення монохроматичних рентгенівських променів.
60. Лінійний і масовий коефіцієнти ослаблення рентгенівських променів, їх фізичний сенс, що характеризують та від чого залежать, одиниці вимірювання.
61. Що таке шар половинного ослаблення? Як визначається?
62. Як масовий коефіцієнти поглинання (ослаблення) залежить від атомного номера речовини, від довжини хвилі випромінювання?
63. Край смуги поглинання або стрибок поглинання, як виникає та використовується?
64. Фільтрація рентгенівського випромінювання, на якому явищі базується, для чого застосовується?
65. Поглинання рентгенівського випромінювання: фотоефект, вторинне характеристичне випромінювання, Оже-ефект.
66. Розсіювання рентгенівських променів. Когерентне та некогерентне розсіювання.
67. Рівняння Лауе. Як на практиці виконують умови виникнення інтерференційних максимумів?
68. Умови існування та погасання інтерференційних максимумів для ОЦК-решітки виходячи з аналізу структурної амплітуди.

69. Умови існування та погасання інтерференційних максимумів для ГЦК-решітки виходячи з аналізу структурної амплітуди.
70. Структурний фактор інтенсивності, його вплив на інтенсивність ліній на рентгенограмі, що враховує, як визначається?
71. Атомний фактор розсіювання, від чого залежить, як змінюється, його вплив на інтенсивність.
72. Структурна амплітуда F , що враховує, як визначається?
73. Як розрахувати період решітки кристала? Методи прецизійного визначення періоду решітки.
74. Який зв'язок між періодом решітки та міжплощинною віддаллю кристала?
75. Як розділити α - і β -лінії на рентгенограмі? Чому вони виникають? Як позбутися β -ліній?
76. Для чого використовують фільтри та монохроматори? Як обирають випромінювання для проведення фазового аналізу, визначення параметра решітки?
77. Як визначити тип кристалічної решітки для кристалів з кубічною решіткою?
78. Як визначити тип твердого розчину?
79. Особливості рентгенівської картини діаграм стану з необмеженою, обмеженою та відсутньою розчинністю компонентів.
80. Фактори, що викликають зсув дифракційних ліній.
81. Фактори, що викликають розмиття дифракційних ліній.
82. Як залежить фізичне розширення інтерференційних ліній від кута дифракції при наявності мікронапружень?
83. Взаємозв'язок між шириною інтерференційних ліній та дисперсністю частинок фазових складових сплавів.
84. Який зв'язок між періодом решітки та міжплощинною віддаллю кристала?