

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Київський національний університет будівництва і архітектури

ОСНОВИ НАНОТЕХНОЛОГІЙ

Методичні вказівки
до виконання практичних та лабораторних робіт
для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності
G1 «Хімічні технології та інженерія» освітньої програми «Новітні технології
стінових і оздоблювальних матеріалів»
денної та заочної форм навчання

Київ 2025

УДК 658.512

О-78

Укладачі: М.В. Суханевич, д-р техн. наук, професор;
О.П. Бондаренко, канд. техн. наук, доцент

Рецензент К.О. Каверин, канд. техн. наук, доцент

Відповідальний за випуск К.К. Пушкарьова, д-р техн. наук,
професор

*Затверджено на засіданні кафедри будівельних матеріалів,
протокол № 9 від 12 червня 2025 року.*

В авторській редакції.

Основи нанотехнологій : методичні вказівки до виконання
О-78 практичних та лабораторних робіт / уклад. : М.В. Суханевич,
О.П. Бондаренко. – Київ : КНУБА, 2025. – 36 с.

Розглянуто зміст лабораторних і практичних робіт, наведено
запитання для самоконтролю до кожної роботи для підготовки до
семестрового контролю, а також список рекомендованої літератури.

Описано порядок виконання кожної практичної та лабораторної
роботи, зазначено мету, обладнання, матеріали, методику
проведення експериментів.

Призначено для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої
освіти спеціальності G1 «Хімічні технології та інженерія» освітньої
програми «Новітні технології та дизайн сучасних стінових та
оздоблювальних матеріалів» денної та заочної форм навчання.

ЗМІСТ

ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ.....	4
ЗМІСТ ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ.....	5
ЗМІСТ ЗАНЯТЬ.....	ЛАБОРАТОРНИХ 16
ЗМІСТ ІНДИВІДУАЛЬНИХ ЗАВДАНЬ.....	33
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	РЕКОМЕНДОВАНОЇ 35

ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

Методичні вказівки до виконання практичних і лабораторних робіт з дисципліни «Основи нанотехнологій» призначені для студентів спеціальності G1 «Хімічні технології та інженерія» і розроблені відповідно до навчального плану та програми підготовки фахівців першого (бакалаврського) рівня вищої освіти. Вони забезпечують методичну підтримку під час вивчення дисципліни, сприяють формуванню професійних компетентностей і закладають фундамент для подальшого вивчення сучасних нанотехнологічних процесів і матеріалів.

Основною метою методичних вказівок є організація ефективного виконання практичних і лабораторних занять, ознайомлення студентів з основними технологіями синтезу та дослідження наноматеріалів, розвиток експериментальних навичок, а також вміння проводити аналіз, інтерпретацію результатів і оформлення наукової звітності. Вказівки орієнтовані як на самостійну, так і на аудиторну роботу, що забезпечує гнучкість та індивідуалізацію навчального процесу.

У методичних матеріалах подано послідовний опис лабораторних процедур, вимоги до підготовки до занять, опис обладнання, техніки безпеки, а також форми звітності. Передбачено самоконтроль у вигляді запитань після кожної теми, що дозволяє студентам перевірити рівень засвоєння матеріалу.

Таким чином, запропоновані методичні вказівки є важливою складовою навчального процесу, що дозволяє інтегрувати теоретичні знання з практичними вміннями. Вони створюють умови для якісної підготовки конкурентоздатних фахівців у галузі хімічної технології та інженерії, які володіють сучасними знаннями про наноструктуровані матеріали та нанотехнологічні процеси.

Навчальним планом з дисципліни «Основи нанотехнологій» передбачено проведення 3 практичних занять та 4 лабораторних занять за відповідними темами, результати виконання практичних та лабораторних робіт студенти наводять у зошиті, кожна робота захищається.

За навчальним планом студент має виконати 1 індивідуальне завдання у вигляді реферату за відповідною темою.

Виконання практичних, лабораторних робіт, а також індивідуального завдання передбачає застосування інформації, що наведена в навчально-методичній літературі, довідниках, інтернет-джерелах.

ЗМІСТ ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ

Практична робота №1.

ОСОБЛИВОСТІ НАНОРОЗМІРНОГО СТАНУ РЕЧОВИНИ. РОЗМІРНІ ЕФЕКТИ. ПРИНЦИПИ КЛАСИФІКАЦІЇ НАНОМАТЕРІАЛІВ

Основні відомості

У нанорозмірному стані речовини набувають унікальних властивостей, що принципово відрізняються від властивостей об'ємних матеріалів. Це зумовлено суттєвим зростанням питомої площі поверхні, квантовими ефектами та домінуванням поверхневих атомів. У наномасштабі змінюється характер міжатомних взаємодій, спостерігаються явища локалізації електронів, зростає реакційна здатність, а фізико-хімічні властивості – електричні, оптичні, магнітні, механічні – можуть суттєво змінюватися під час зменшення розміру частинок до кількох нанометрів.

Розмірні ефекти є ключовими для розуміння поведінки наноматеріалів. Наприклад, наночастинки золота можуть змінювати колір залежно від розміру, а напівпровідникові нанокристали (квантові точки) демонструють зміну ширини забороненої зони залежно від їхнього діаметра. Ці ефекти мають велике значення для розробки сучасних технологій – від нанофотоники до біосенсорики. Вивчення таких ефектів допомагає передбачити та керувати властивостями речовини на нанорівні.

Під час вивчення наноматеріалів важливо розуміти класифікаційні підходи, що дозволяють систематизувати різноманіття наноструктур. Класифікація за розмірністю (0D, 1D, 2D, 3D) базується на кількості вимірів, у яких просторово обмежені електрони. За цією ознакою виділяють наночастинки (0D), нанотрубки та нанопроволоки (1D), наноплівки та графеноподібні матеріали (2D), а також об'ємні наноструктуровані матеріали (3D).

Іншим важливим критерієм є хімічна природа матеріалу – метали, оксиди, полімери, композити тощо. Крім того, наноматеріали класифікують за походженням – природні або синтетичні, за способом отримання – топ-даун (зменшення розміру) або боттом-ап (синтез з атомів або молекул), а також за функціональними властивостями – електропровідні, магнітні, біоактивні тощо. Така систематизація дозволяє ефективно орієнтуватися у швидко зростаючому обсязі знань про наноструктуровані речовини (див. табл. 1.1. – 1.4).

Таблиця 1.1

Порівняння властивостей матеріалів у макро- та нанорозмірному стані

Властивості	Макророзмірний стан	Нанорозмірний стан	Примітка*
Температура плавлення	Стабільна	Може зменшуватися	Для наночастинок Au – зменшення на 300°C
Електропровідність	Висока (метали)	Може знижуватись або зростати	Залежить від структури
Механічна міцність	Звичайна	Зростає	Через менше число дефектів
Оптичні властивості	Постійні	Змінюються (кольори, флуоресценція)	Колір колоїдів Au
Магнітні властивості	Постійні	Можуть зникати або проявляться	Квантові ефекти

Таблиця 1.2

Класифікація наноматеріалів

Тип наноматеріалу	Приклад	Розмірна форма	Галузь застосування
Наночастинки	Ag, Au, TiO ₂	0D (точкові)	Антибактеріальні покриття, каталіз
Нанотрубки	Вуглецеві нанотрубки	1D (лінійні)	Електроніка, композити
Наноплівки	Нанопокриття оксидів	2D (поверхні)	Оптика, сенсори, захист
Наноструктуровані матеріали	Нанозернисті метали	3D (об'ємні)	Конструкційні матеріали

Таблиця 1.3

Розмірні ефекти в наноматеріалах

Матеріал	Розмір частинки	Спостережуваний ефект	Причина
Золото (Au)	<10 нм	Зміна кольору колоїду	Поверхневий плазмонний резонанс
Кремній (Si)	<5 нм	Світіння (люмінесценція)	Квантове обмеження
Срібло (Ag)	<20 нм	Антибактеріальна дія	Велика площа поверхні
ZnO	~10 нм	Підвищена фотокаталітична активність	Збільшення поверхневої енергії

Таблиця 1.4

Вплив нанорозмірного фактора на властивості будівельних матеріалів

Властивість будівельного матеріалу	Вплив нанорозмірного фактора	Приклад наноматеріалу
Механічна міцність	Зростає	Нанокристалічний алюміній
Теплопровідність	Може зменшуватись	Нанопористі структури
Корозійна стійкість	Покращується	Нанопокриття
Хімічна активність	Зростає	Нанокаталізатори

Метою роботи є ознайомлення студентів з фундаментальними особливостями нанорозмірного стану речовини, пояснення проявів розмірних ефектів, аналіз ролі нанорозмірного фактора у властивостях матеріалів, а також з відомими класифікаціями наноматеріалів.

Порядок виконання роботи

Ознайомлення з основними наноматеріалами передбачає опрацювання навчальних посібників, конспекту лекцій, спеціальної літератури та інтернет-джерел. Необхідно класифікувати наноматеріали, описати розмірні ефекти, запропонувати їх галузі застосування.

Одержані дані заносять до табл. 1.5. Кількість досліджуваних зразків визначається викладачем (від 3 до 7).

Таблиця 1.5

Опис наноматеріалу

Назва наноматеріалу	Класифікація за різними ознаками	Розмірні ефекти, що спостерігаються в наноматеріалі	Вплив розмірних ефектів на властивості будівельних матеріалів	Галузі застосування наномодифікованого будівельного матеріалу
Наночастинки срібла				
Наночастинки алюмінію				
Наночастинки золота				
Діоксид силіцію				
Діоксид титану				
Графен				
Вуглецеві нанотрубки				

Запитання для обговорення:

1. Чому фізичні властивості матеріалів змінюються під час переходу до нанорозмірів?
2. Які переваги та недоліки мають наноматеріали порівняно з традиційними?
3. У яких галузях наноматеріали демонструють найефективніше застосування?
4. Чим обумовлена зміна кольору у колоїдному розчині наночастинок золота?
5. Як нанорозмір впливає на механічні характеристики металів?
6. Які існують виклики у виробництві та використанні наноматеріалів?

Практична робота 2. СТРУКТУРА КОНСОЛІДОВАНИХ НАНОМАТЕРІАЛІВ

Основні відомості

Консолідовані наноматеріали – це тверді тіла, утворені шляхом ущільнення наночастинок або наноструктур у єдину фазу. Їхня структура є надзвичайно складною і багаторівневою, що зумовлює широкий спектр фізико-хімічних властивостей. Однією з ключових ознак таких матеріалів є наявність зерен нанорозмірного масштабу, які формують внутрішню мікрота наноструктуру. Ці зерна можуть мати різну форму та орієнтацію, а їх межі значною мірою впливають на механічну міцність, електропровідність, магнітні та теплові властивості матеріалу.

Окрім зерен, у структурі консолідованих наноматеріалів часто присутні шари, які утворюються внаслідок направленого осадження або пресування. Шарувата структура забезпечує анізотропні властивості – тобто залежність характеристик від напрямку, що може бути використано для створення спеціалізованих функціональних матеріалів. Залежно від умов синтезу та методу консолідації можуть утворюватися й різноманітні включення – як аморфні, так і кристалічні – що діють як модифікатори структури або джерела внутрішніх напружень.

Пори, як структурні елементи, мають вагоме значення в наноматеріалах, особливо в адсорбційних і каталітичних застосуваннях. Їхній розмір, форма та розподіл можуть контролюватися під час виготовлення. Пористість не лише впливає на густину й механічну міцність, але й визначає поверхневу активність та проникність матеріалу. Контрольована нанопориста структура відкриває великі можливості в енергетичних комірках, фільтрах і біомедичних імплантах.

Окрему категорію сучасних наноматеріалів становлять нанополімерні структури. Вони базуються на полімерних матрицях, модифікованих нанонаповнювачами або створених на основі самоорганізації полімерних ланцюгів у нанорозмірному масштабі. Такі матеріали мають унікальні механічні, оптичні та термостійкі властивості й знаходять застосування в електроніці, пакуванні, біомедицині.

Супрамолекулярні наноструктури формуються за рахунок слабких взаємодій – водневих зв'язків, ван дер Ваальсових сил, π - π -взаємодій – і являють собою складні ієрархічні об'єднання молекул. Вони здатні до самозбірки, адаптації до середовища та специфічного зв'язування з молекулами-мішенями, що робить їх перспективними для створення сенсорів, гідрогелів і «розумних» матеріалів.

Нанобіологічні структури, на перетині нанотехнологій і біології, включають в себе біомолекули, функціоналізовані наночастинки, наноліпосоми, ДНК-орігамі та інші біоінспіровані елементи. Їхня структура визначається біологічними механізмами самоорганізації та адаптації. Такі матеріали мають критичне значення в медицині, зокрема у транспортуванні ліків, тканинній інженерії, створенні біосумісних імплантів і діагностичних систем нового покоління (див. табл. 2.1. і 2.2).

Таблиця 2.1

Компоненти структури консолідованих наноматеріалів

Компонент	Опис	Вплив на властивості	Приклад
Зерна	Кристалічні області в матеріалі	Механічна міцність, твердість	Нанокристалічний Si
Шари	Структури типу «сендвіч»	Бар'єрні властивості, гнучкість	Наноплівки Al ₂ O ₃ /полімер
Включення	Частинки іншої фази	Магнітні/електричні властивості	Fe-включення в композиті
Пори	Пустоти або канали	Зменшення щільності, фільтрація	Пористий кремній

Таблиця 2.2

Типи наноструктур за природою зв'язків

Тип структури	Основні характеристики	Галузі застосування
Нанополімерні	Полімерна матриця з нанофазами	Мембрани, біоматеріали, упаковка
Супрамолекулярні	Слабкі взаємодії (водневі зв'язки тощо)	Сенсори, каталіз, «розумні» матеріали
Нанобіологічні	Біомолекули (ДНК, білки, ліпіди) у наноформі	Біомедицина, діагностика, доставки ліків

Метою роботи є ознайомлення студентів зі структурними рівнями у консолідованих наноматеріалах, розгляд впливу внутрішніх компонентів – зерен, шарів, пор, включень – на властивості матеріалів, пояснення

особливостей нанополімерних, супрамолекулярних та біонаноструктур, сформулювати уявлення про структуру як ключовий фактор функціональності наноматеріалів.

Порядок виконання роботи

Ознайомлення зі структурними рівнями наноматеріалів передбачає опрацювання навчальних посібників, конспекту лекцій, спеціальної літератури та інтернет-джерел.

Розгляньте зображення наноматеріалів (рис. 2.1). Визначте ключові структурні елементи (зерна, включення, шари, пори). Оформіть результати у вигляді табл. 2.3.

На основі теоретичних матеріалів або прикладів, наведених у основних відомостях до практичної роботи, складіть порівняльну таблицю для трьох типів структур. Одержані дані заносять до табл 2.4.

Таблиця 2.3

Аналіз структури наноматеріалу

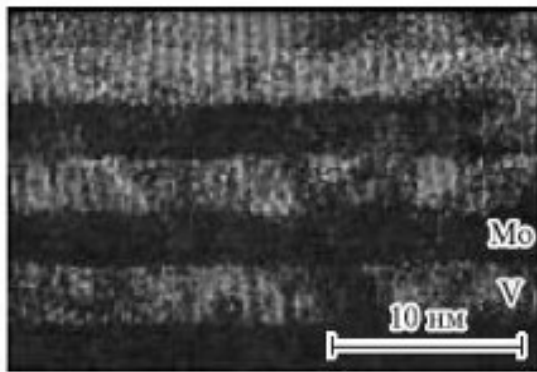
№	Назва матеріалу	Зерна (форма, розмір)	Наявність шарів	Включення (тип, розмір)	Пори (розподіл, розмір)	Примітка
1						
2						
3						

Таблиця 2.4

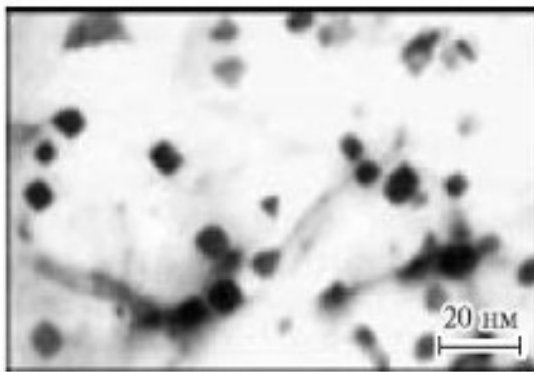
Порівняння типів наноструктур

Тип структури	Основні характеристики	Приклад матеріалу	Сфера застосування
Нанополімерна	<i>Наприклад:</i> гнучкість, самозбірка		
Супрамолекулярна	<i>Наприклад:</i> водневі зв'язки, впорядкованість		
Нанобіологічна	<i>Наприклад:</i> біосумісність,		

	селективність		
--	---------------	--	--



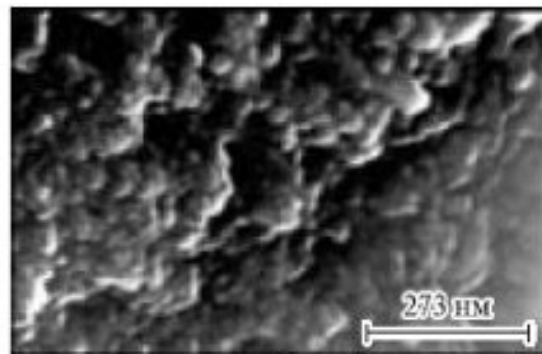
а



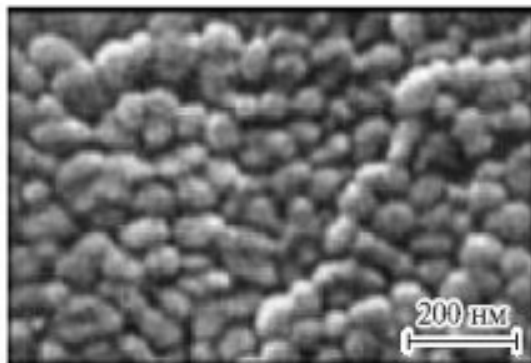
б



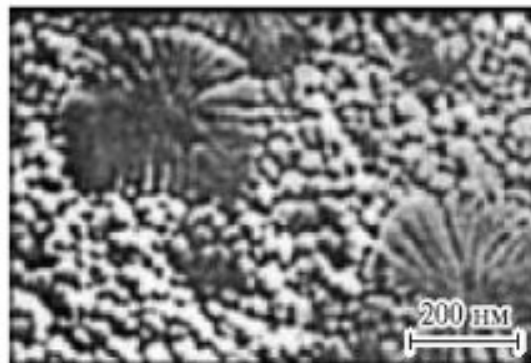
в



г



д



е

Рис. 2.1. Морфології наноструктур: а) компакт Pd; б) компакт TiN; в) багатшарова плівка (надрешітка) Mo-V; г) загартований з рідкого стану сплав Al-Pb; д) коміркова структура сплаву Fe-Si; е) дендритно-коміркова структура сплаву Fe-Si, загартованого з рідкого стану

Запитання для обговорення:

1. Як впливають пори на функціональність наноматеріалу?
2. Чим нанополімери відрізняються від звичайних полімерів?
3. Які переваги дають супрамолекулярні структури у сенсорних системах?
4. Як структура матеріалу впливає на його біосумісність?

5. Які технології використовуються для створення наноструктурованих шарів?
6. Чи можливе комбінування різних структур в одному матеріалі?

Практична робота 3.
ВУГЛЕЦЕВІ НАНОМАТЕРІАЛИ.
ФУЛЕРЕНИ, ЇХНЯ СТРУКТУРА, ВЛАСТИВОСТІ.
ВУГЛЕЦЕВІ НАНОТРУБКИ, ЇХНЯ СТРУКТУРА, ВИДИ, ВЛАСТИВОСТІ

Основні відомості

Вуглецеві наноматеріали є однією з найцікавіших та найперспективніших груп наноструктур завдяки унікальним властивостям атома вуглецю утворювати різноманітні форми – від плоских до об'ємних, від відкритих до замкнених. Зокрема, фулерени й вуглецеві нанотрубки – це представники тривимірних і одномірних вуглецевих наноструктур відповідно, що мають величезний науковий та прикладний потенціал.

Фулерени – це замкнені молекули, які складаються виключно з атомів вуглецю, з'єднаних у структуру, подібну до геодезичного купола. Найвідомішим прикладом є молекула C_{60} , що має форму футбольного м'яча й складається з 12 п'ятикутників і 20 шестикутників. Завдяки своїй симетрії фулерени є термічно й хімічно стабільними, можуть діяти як антиоксиданти, переносити електрони, а також формувати комплекси з іншими елементами. Їхні властивості активно вивчаються в електроніці, фотоніці та фармацевтиці.

Вуглецеві нанотрубки (ВНТ) – це циліндричні структури, утворені з одного або кількох шарів графену, згорнутих у трубку. Вони поділяються на одношарові (SWNT) та багатшарові (MWNT) залежно від кількості графенових оболонок. Структура ВНТ визначається способом згортання графенового листа, що задає їхній хіралітет – параметр, який безпосередньо впливає на електропровідність: одні трубки ведуть себе як метали, інші – як напівпровідники.

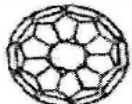
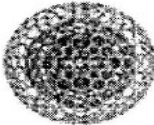

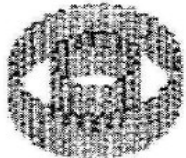

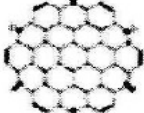
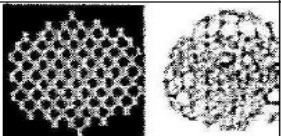
Серед фізико-хімічних властивостей ВНТ вирізняються надзвичайна міцність (у десятки разів вища за сталь), низька густина, висока теплопровідність і виняткова електропровідність. Крім того, вони є хімічно інертними, але під час функціоналізації поверхні – здатні до селективної взаємодії з різними речовинами, що робить їх незамінними у створенні датчиків, електродів, підсилювачів матеріалів.

Фулерени й нанотрубки часто розглядають як платформу для створення композитів і наногібридних матеріалів. Їх додають у полімерні,

металеві, керамічні матриці для посилення механічних характеристик, стабілізації структури чи забезпечення нових електронних функцій. У медицині, зокрема, фулерени досліджуються як носії ліків, а ВНТ – як наношприци чи транспортні канали для біомолекул (див. табл. 3.1).

Таблиця 3.1

Характеристичні розміри основних наноалотропів вуглецю

Тип наноалотропів	Атомна модель	Характеристичний розмір
Фулерени		Мінімальний фулерен C ₂₀ Найбільш стабільний фулерен C ₆₀
Оніони		Зовнішній діаметр (10 – 100) нм; внутрішній діаметр (0,7 – 1,0) нм (~C ₆₀)
Нанотрубки		Діаметри: типові (1 – 10) нм, інтервал: від 0,4 до 100 нм. Довжина: типова (50 – 100) нм, інтервал 1 нм – декілька мкм
Багатостінні нанотрубки		Довжина (10 – 100) нм, зовнішній діаметр 2,5 – 30 нм
Зв'язки нанотрубок		Зазвичай 10 – 100 (до тисячі) нанотрубок у зв'язці. Довжина – до декількох десятків мкм
Графенова сітка		(10 – 15) нм
Наноалмази		Від 1,8 до (4 – 5) нм

Метою роботи є ознайомлення із класифікацією та будовою вуглецевих наноречовин, розгляд унікальних властивостей фулеренів і нанотрубок, встановлення впливу структури на їхні механічні, електричні та оптичні характеристики, визначення раціональних галузей їх застосування.

Порядок виконання роботи

Ознайомлення з вуглецевими наноматеріалами передбачає опрацювання навчальних посібників, конспекту лекцій, спеціальної

літератури та інтернет-джерел. На основі теоретичних матеріалів або прикладів, наведених у основних відомостях до практичної роботи, складіть порівняльну таблицю для фулеренів та вуглецевих нанотрубок. Одержані дані заносять до табл. 3.2 та 3.3.

Таблиця 3.2

Порівняння властивостей фулеренів та вуглецевих нанотрубок

Характеристика	Фулерени (C ₆₀ та інші)	Вуглецеві нанотрубки
Структура		
Діаметр		
Механічна міцність		
Електропровідність		
Теплопровідність		
Застосування		

Таблиця 3.3

Види вуглецевих нанотрубок

Тип	Опис	Приклад застосування
Одношарові (ОВНТ)		
Багатошарові (БВНТ)		
Хіральність		

Запитання для обговорення:

1. У чому полягає структурна унікальність фулеренів порівняно з іншими алотропами вуглецю?
2. Як електропровідність нанотрубок залежить від їхнього хіральтету?
3. Чому вуглецеві нанотрубки настільки перспективні для наномеханіки?
4. Які особливості дозволяють фулеренам використовуватись у медицині?
5. Які є труднощі у виробництві одностінних нанотрубок?
6. Чи можна комбінувати фулерени й нанотрубки в одному матеріалі?

ЗМІСТ ЛАБОРАТОРНИХ ЗАНЯТЬ

Лабораторна робота № 4.

ОСНОВНІ ХІМІЧНІ МЕТОДИ СИНТЕЗУ ОКСИДНИХ НАНОМАТЕРІАЛІВ. ЗОЛЬ-ГЕЛЬ СИНТЕЗ ОКСИДІВ КРЕМНІЮ, АЛЮМІНІЮ, НАНОЦЕОЛІТІВ

Основні відомості

Хімічні методи синтезу оксидних наноматеріалів відіграють ключову роль у створенні високодисперсних і контрольованих за складом та структурою нанооб'єктів. Серед них особливої уваги заслуговує золь-гель технологія, яка дозволяє отримувати наноструктуровані оксиди металів з високою чистотою, рівномірністю розміру частинок і контрольованою пористістю. Цей метод базується на послідовних стадіях гідролізу та поліконденсації прекурсорів у розчині, з подальшим формуванням гелю й термічною обробкою.

Одним із найбільш досліджених матеріалів, які синтезуються методом *золь-гель*, є оксид кремнію (SiO_2). Його прекурсором зазвичай слугує тетраетоксисилан (TEOS), який у водно-спиртовому середовищі гідролізується з утворенням силанольних груп. Далі проходить конденсація з утворенням Si–O–Si зв'язків, що формують сітчасту структуру гелю. Після висушування та прожарювання можна отримати нанопорошки SiO_2 з вузьким розподілом за розміром та високою питомою поверхнею.

Іншим важливим об'єктом золь-гель синтезу є оксид алюмінію (Al_2O_3). У цьому випадку часто використовуються алюмінієві алкоксида або солі алюмінію як вихідні речовини. Особливістю цього синтезу є контроль над фазовим складом (γ -, α -, θ - Al_2O_3) залежно від температури прожарювання. Отримані наночастинки знаходять широке застосування в керамічних матеріалах, каталізі як абразивні компоненти та сорбенти.

Окремо слід виділити золь-гель синтез наноструктурованих цеолітів – алюмосилікатів з високовпорядкованою мікропористою структурою. Метод дозволяє модифікувати склад цеолітів на молекулярному рівні, керувати їх морфологією, розміром кристалів і ступенем впорядкування пор. Цеоліти широко застосовуються як каталітичні матеріали, іонобмінники, фільтрувальні та сорбційні системи в хімічній промисловості, екології та медицині.

Однією з ключових переваг золь-гель методу є можливість введення в реакційну систему різноманітних домішок або функціональних груп, що дозволяє отримувати композити з новими властивостями.

Наприклад, за рахунок ко-гідролізу кількох прекурсорів можна отримати багатокомпонентні наноматеріали, включно з оксидами перехідних металів або легуючими добавками.

Метою роботи є ознайомлення з принципами золь-гель методу (див. табл. 4.1), синтез нанодисперсних оксидів кремнію, алюмінію та цеолітів, дослідження отриманих наноматеріалів методами ІЧ-спектроскопії, рН-метрії, термогравіметричного аналізу (TGA) або скануючої електронної мікроскопії (SEM).



Рис. 4.1. Схема золь-гель технології синтезу наночастинок

Матеріали: силікат натрію / тетраетоксисилан (TEOS), алюміній ізопропоксид, сольовий розчин для створення цеолітної структури (наприклад, NaOH, Al(NO₃)₃, SiO₂ колоїд), етанол, дистильована вода.

Прилади: лабораторне скло, мішалки, термостати, рН-метр, сушильна шафа, Фур'є-ІЧ спектрофотометр / TGA / SEM (за наявності).

Порядок виконання роботи

4.1. Методика синтезу діоксиду кремнію (SiO₂).

1. У склянці змішати 10 мл TEOS з 10 мл етанолу.
2. Повільно додати 2 мл води з кількома краплями HCl (рН ~3).
3. Перемішувати 30 хв до утворення гомогенного золю.
4. Дати настоятись 24 години — утворюється гель.
5. Провести сушіння гелю за температури 80°C.
6. За бажанням — прожарити зразок за температури 500°C для утворення нанопорошку.

4.2. Методика синтезу оксиду алюмінію (Al₂O₃).

1. Розчинити 5 г Al(OC₃H₇)₃ в 20 мл ізопропанолу.
2. Додати воду (в молярному співвідношенні H₂O:Al = 3:1)
3. Перемішувати до утворення золю.
4. Дати гелю утворитися, далі сушити за температури 100°C.
5. Обробити прожарюванням за температури 400 – 600°C для отримання наноструктури.

4.3. Методика синтезу наноцеолітів (типу NaA).

1. Змішати джерела Si і Al у лужному середовищі (NaOH, SiO₂ колоїд, Al(NO₃)₃).
2. Провести реакцію за температури 90°C протягом 12–24 годин у герметичному контейнері (автоклаві).
3. Отриманий осад промити, висушити.
4. За потреби – провести прожарювання (550°C) для активації пор.

4.4. Узагальнення параметрів синтезу наноматеріалів.

На основі наведеної вище інформації заповнити табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Умови синтезу наноматеріалів (гідроліз)

Найменування наноматеріалу	Початкові реагенти	Початковий рН	Кінцевий рН	Час стабілізації, хв	Особливості синтезу
SiO ₂					
Al ₂ O ₃					
Цеоліт					

Запитання для обговорення:

1. У чому перевага золь-гель методу перед механічними методами отримання наноматеріалів?
2. Які фактори впливають на розмір частинок у золь-гель процесі?
3. Як рН середовища впливає на швидкість гідролізу TEOS?
4. Яка відмінність між гелем та золем?
5. Чому необхідне прожарювання гелю після синтезу?
6. Поясніть роль води й каталізатора в реакції утворення оксидів.

7. Які параметри визначають пористість та поверхневу активність наноцеолітів?

8. Чи можливий масштабований синтез оксидів цим методом?

Лабораторна робота № 5.

ПРОЦЕСИ ОТРИМАННЯ НАНОМАТЕРІАЛІВ

Основні відомості

У сучасній науці про наноматеріали існує велика різноманітність підходів до їх синтезу. Вибір методу залежить від бажаної структури, хімічного складу та властивостей кінцевого матеріалу.

Одним із простих та ефективних фізичних методів є *конденсаційний метод*, який базується на випаровуванні речовини з подальшим її охолодженням і конденсацією в наночастинки. Цей підхід дозволяє отримувати нанопорошки високої чистоти, але потребує точного контролю температурних параметрів і середовища охолодження, щоб уникнути агрегації частинок.

Високоенергетичне подрібнення і механохімічний синтез – це методи, що базуються на дії ударних навантажень та тертя в кульових млинах або планетарних установках. У результаті інтенсивного подрібнення порошки набувають наноструктурованого стану. У випадку механохімічного синтезу додатково активуються хімічні реакції, які протікають у твердому тілі без застосування високих температур. Ці методи є промислово масштабованими й широко використовуються в порошковій металургії.

Плазмохімічний синтез базується на використанні високотемпературної плазми для випаровування вихідної речовини, з подальшою конденсацією наночастинок. Цей метод дає змогу отримувати нанопорошки з вузьким розподілом за розміром, а також дозволяє легувати матеріали або синтезувати складні оксидні наноструктури.

Ще одним високоефективним методом є *електричний вибух дротиків*, який використовує імпульс електричного струму великої потужності для моментального випаровування металевих дротів. У результаті формується плазмово-аерозольне середовище, з якого конденсуються наночастинки. Метод придатний для синтезу металевих та оксидних нанопорошків і відзначається високою швидкістю процесу.

Після отримання наночастинок часто виникає необхідність у їх об'єднанні в об'ємні структури або ущільненні - це реалізується через *методи консолідації*. До таких методів належать гаряче пресування, іскрове плазмове спікання, холодне ізостатичне пресування. У ході

лабораторної роботи студенти ознайомляться з основами кожного із зазначених підходів, що дає змогу комплексно зрозуміти весь ланцюг від синтезу до формування функціонального наноматеріалу.

Метою роботи є ознайомлення з основними методами отримання наноматеріалів, їх фізико-хімічними принципами та основами консолідації наноструктур.

5.1. Конденсаційний метод (див. рис. 5.1).

Суть методу: осадження наночастинок з парової фази під час конденсації в охолоджену середовищі.

Матеріали: метали або сполуки, які можуть випаровуватись (Al, Cu, Ti, ZnO, SiO₂).

Обладнання: вакуумна камера, джерело нагріву (електронно-променевий або індукційний нагрівач), система охолодження або інертного газу (аргон, гелій).

Технологія процесу:

1. Розміщення сировини у вакуумній камері.
2. Нагрівання до температури випаровування.
3. Конденсація парів у вигляді наночастинок у зоні охолодження або на субстраті.
4. Збір порошку або покриття.

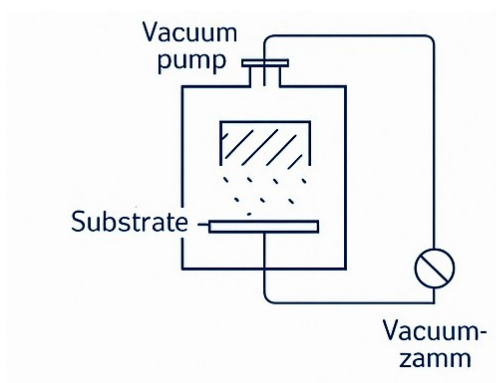


Рис. 5.1. Схема конденсаційного методу отримання наночастинок

5.2. Високоенергетичне подрібнення (рис. 5.2).

Суть методу: подрібнення матеріалу в кульовому млині до нанорозмірів.

Матеріали: металеві або керамічні порошки.

Обладнання: планетарний кульовий млин (високоенергетичний), кульки з твердої сталі, карбіду вольфраму або оксидів, контейнери для подрібнення.

Технологія:

1. Завантаження порошку і кульок у млин.
2. Обертання з високою швидкістю (до 1000 об/хв).
3. Інтенсивні удари та тертя руйнують частинки до нанорозмірів.
4. Тривалість процесу – від декількох годин до доби.



Рис. 5.2. Схема високоенергетичного подрібнення для одержання наночастинок

5.3. Механохімічний синтез (рис. 5.3).

Суть методу: комбінування механічного подрібнення з хімічними реакціями між реагентами.

Матеріали: реагенти (метали, оксиди, солі) для цільової реакції.

Обладнання: високоенергетичний кульовий млин, інертне середовище (аргон або вакуум).

Технологія:

1. Завантаження реагентів у млин.
2. Ініціювання реакцій шляхом механічної активації.
3. Утворення наноструктурованих сполук (оксиди, карбіди, нітриди).
4. Можлива додаткова термічна обробка

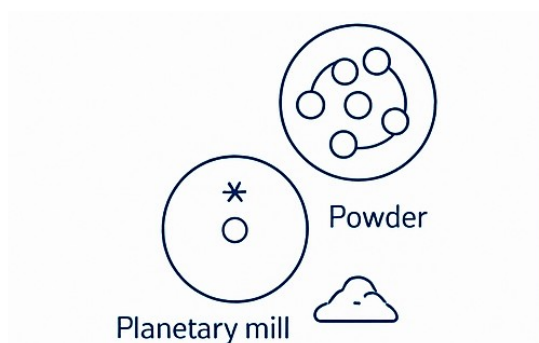


Рис. 5.3. Схема механохімічного синтезу наночастинок

5.4. Плазмохімічний синтез (рис. 5.4).

Суть методу: формування наночастинок у потоці плазми з подальшою конденсацією.

Матеріали: гази (метан, силан, аміак), порошки металів.

Обладнання: плазмотрон (дуговий, RF або мікрохвильовий), камера реактора, система подачі сировини та охолодження.

Технологія:

1. Генерація плазми за температури 5000–15000 К.
2. Введення сировини в плазмовий потік.
3. Розклад та іонізація речовини.
4. Конденсація у вигляді наночастинок під час охолодження.
5. Збір порошку з фільтраційної системи.

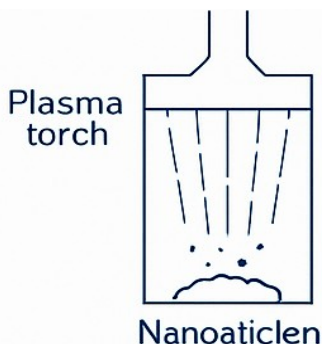


Рис. 5.4. Схема плазмохімічного синтезу наночастинок

5.5. Електричний вибух дротиків (рис. 5.5).

Суть методу: перехід металевого дроту у плазмовий стан під дією високовольтного імпульсу.

Матеріали: металевий дріт (Al, Cu, Fe, Ti).

Обладнання: імпульсний генератор високої напруги, камера з інертним газом або вакуумом, система збору наночастинок.

Технологія:

1. Пропускання імпульсу струму (10^4 – 10^5 А) через дріт.
2. Вибух дроту → плазмова фаза → аерозоль наночастинок.
3. Конденсація наночастинок у камері.
4. Збір продукту фільтрацією або на субстраті.

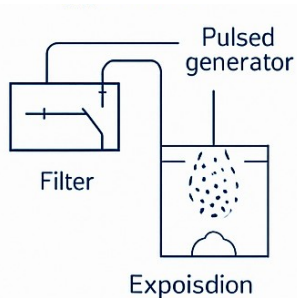


Рис. 5.5. Схема електричного вибуху дротиків

5.6. Методи консолідації наночастинок (рис. 5.6).

Суть методу: перетворення нанопорошків на монолітні матеріали без втрати наноструктури.

Матеріали: нанопорошки (металеві, керамічні).

Обладнання: пресові установки (холодне/гаряче пресування, ізостатичне пресування), установки для спікання (вакуумна піч, SPS – іскрове плазмове спікання).

Технологія:

1. Формування заготовки з нанопорошку.
2. Пресування під тиском (до 1 ГПа).
3. Спікання за зниженої температури для збереження наноструктури.
4. Отримання твердого наноматеріалу з підвищеними властивостями

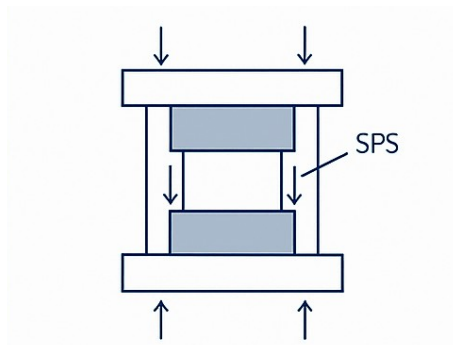


Рис. 5.6. Схема консолідації наночастинок

Порядок виконання роботи

На основі теоретичних матеріалів або прикладів, наведених у основних відомостях до лабораторної роботи, наведеної вище, заповнити табл. 5.1, 5.2 та 5.3.

Таблиця 5.1

Загальна характеристика методів

№	Метод	Принцип дії	Тип сировини	Тип наноматеріалу	Приклади речовин
1	Конденсаційний метод				
2	Високоенергетичне				

	подрібнення				
--	-------------	--	--	--	--

Закінчення табл. 5.1

3	Механохімічний синтез				
4	Плазмохімічний синтез				
5	Електричний вибух дротиків				
6	Методи консолідації				

Таблиця 5.2

Порівняння обладнання та умов

№	Метод	Обладнання	Умови процесу	Тривалість	Відносні енерговитрати
1	Конденсаційний метод				
2	Високоенергетичне подрібнення				
3	Механохімічний синтез				
4	Плазмохімічний синтез				
5	Електричний вибух дротиків				
6	Методи консолідації				

Таблиця 5.3

Переваги та недоліки методів

№	Метод	Основні переваги	Основні недоліки	Потенційні застосування
1	Конденсаційний метод			
2	Високоенергетичне подрібнення			
3	Механохімічний синтез			
4	Плазмохімічний синтез			

5	Електричний вибух дротиків			
6	Методи консолідації			

Запитання до обговорення:

1. Які фактори впливають на розмір наночастинок під час конденсаційного методу?
2. У чому переваги механохімічного синтезу порівняно з іншими методами?
3. Які переваги плазмохімічного синтезу для виробництва оксидних наноматеріалів?
4. Як метод електричного вибуху дротиків забезпечує нанорозмірність продукту?
5. Які методи консолідації дозволяють зберегти наноструктуру в матеріалах?
6. Які труднощі виникають під час аналізу структури наноматеріалів?

Лабораторна робота № 6.

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ НАНОРОЗМІРНИХ РЕЧОВИН

Основні відомості

У сучасних нанотехнологіях глибоке розуміння структури, морфології та властивостей наноматеріалів є запорукою успішного створення функціональних наноструктур. Для цього застосовуються високоточні аналітичні методи, які дозволяють досліджувати речовини на атомному та молекулярному рівнях. Найбільш інформативними підходами є три основні методи – скануюча зондова мікроскопія, інфрачервона (ІЧ) та комбінована (КР) спектроскопії.

Скануюча зондова мікроскопія (СЗМ), зокрема атомно-силова мікроскопія (AFM), є одним із головних методів вивчення топографії поверхні наноматеріалів. Завдяки використанню дуже чутливого зонда, що рухається над зразком, цей метод дозволяє отримати зображення з роздільною здатністю до нанометрів.

ІЧ-спектроскопія забезпечує інформацію про вібраційні моди молекул і функціональні групи, що входять до складу наноматеріалів. За її допомогою можна визначити ступінь гідроксилування, наявність органічних залишків, характер зв'язків у матеріалі. КР-спектроскопія (комбіноване розсіювання світла, або спектроскопія Рамана) дозволяє

додатково досліджувати структурну впорядкованість, фази та дефекти вуглецевих і неорганічних наноматеріалів.

Інтерпретація даних фізико-хімічного аналізу дозволяє не лише підтверджувати хімічний склад та структуру наноматеріалів, а й робити висновки щодо ефективності синтезу або модифікації. Це сприятиме формуванню цілісного уявлення про взаємозв'язок між нанорозмірними параметрами речовини та її функціональними характеристиками.

Метою роботи є ознайомлення з методами дослідження наноматеріалів (скануюча зондова мікроскопія наноматеріалів; ІЧ-спектроскопія наноматеріалів; КР-спектроскопія наноматеріалів), освоєння методики приготування зразків наноматеріалів, дослідження складу і структури наноречовин за допомогою описаних методів.

Порядок виконання роботи

6.1. Скануюча зондова мікроскопія (СЗМ; див. рис. 6.1).

Методика виконання дослідження:

1. Закріпити зразок на скануючій платформі мікроскопа.
2. Обрати режим сканування (контактний / неконтактний / tapping).
3. Здійснити сканування на площі 5×5 мкм² та 1×1 мкм².
4. Зберегти зображення топографії, профілю поверхні та 3D-візуалізацію.

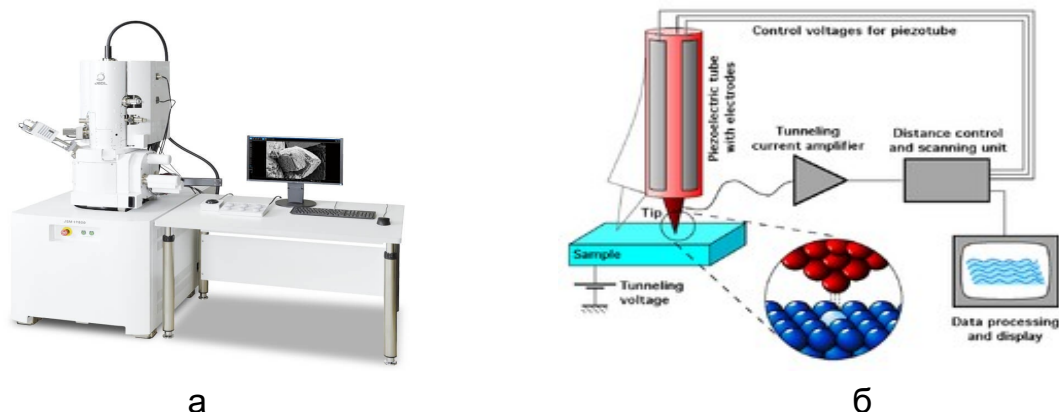


Рис. 6.1. Зовнішній вигляд (а) та схема роботи скануючого тунельного мікроскопа (б)

6.2. ІЧ-спектроскопія (FTIR спектроскопія); див. рис. 6.2, табл.

6.1.

Підготовка зразків:

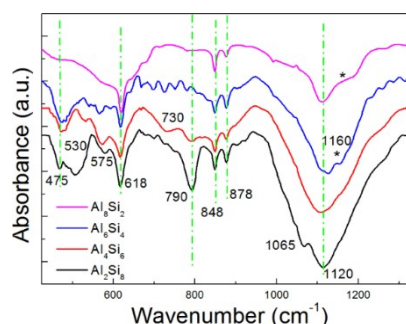
- Метод пресування зразка з KBr у таблетку (для порошкоподібних речовин).
- Альтернативно: нанесення тонкого шару зразка на ІЧ-прозору підкладку (CaF₂, KBr).

Методика виконання дослідження:

1. Вставити зразок у камеру ІЧ-спектрометра.
2. Встановити діапазон сканування (наприклад, 4000–400 см⁻¹).
3. Здійснити вимірювання.
4. Визначити основні піки поглинання та порівняти з базою даних.



а



б

Рис. 6.2. Зовнішній вигляд ІЧ-спектрометра (а) та FTIR-спектр наноксиду кремнію (б)

6.3. КР-спектроскопія (Раманівська спектроскопія); рис. 6.3.

Підготовка зразків:

- Нанесення наноматеріалу на скляну або кремнієву підкладку.
- Забезпечення однорідного тонкого шару (метод центрифугування або drop-casting).

Методика виконання дослідження:

1. Навести лазер на зразок (звичайно 532 або 785 нм).
2. Провести сканування в діапазоні 100–3500 см⁻¹.
3. Отримати спектр та ідентифікувати характерні вібраційні моди.

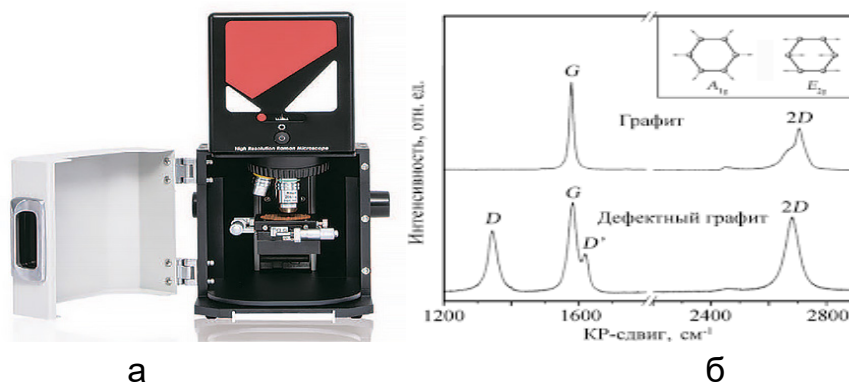
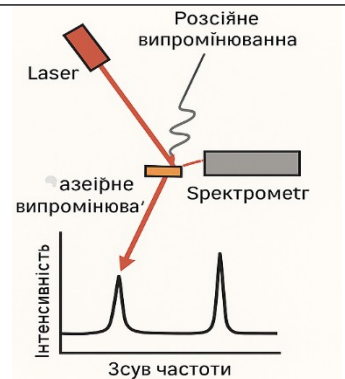


Рис.6.3. Зовнішній вигляд КР-спектрометра (а) та раманівські спектри графіту (б)

Таблиця 6.1

Характеристика методів дослідження наночастинок

Метод	Процес дослідження	Схема обладнання	Схема процесу
Скануюча зондова мікроскопія (СЗМ)	Сканування поверхні матеріалу гострим зондом, аналіз топографії на нано-рівні	Мікроскоп, вібраційний ізолятор, контролер сканування	
ІЧ-спектроскопія (FTIR-спектроскопія)	Поглинання ІЧ-променів молекулами, аналіз характерних коливань зв'язків	ІЧ-спектрометр з джерелом ІЧ-випромінювання і детектором	

<p>КР-спектроскопія (Раманівська спектроскопія)</p>	<p>Розсіювання лазерного променя на зразку, виявлення спектральних зсувів</p>	<p>Лазер, мікроскопічна система, спектрограф</p>	
---	---	--	---

6.4. Порівняння методів дослідження наночастинок.

На основі теоретичних матеріалів або прикладів, наведених у основних відомостях до лабораторної роботи, заповнити табл. 6.2, порівнюючи основні методи дослідження наноматеріалів.

Таблиця 6.2

Порівняння методів дослідження наночастинок

№	Критерій	СЗМ	ІЧ-спектроскопія	КР-спектроскопія
1	Об'єкт вимірювання			
2	Тип дослідження			
3	Підготовка зразка			
4	Основні результати			
5	Обмеження методу			

Запитання для обговорення:

1. Що таке скануюча зондова мікроскопія та які її різновиди існують?
2. Як підготувати зразок для ІЧ-спектроскопії?
3. Які відмінності між ІЧ-спектроскопією та КР-спектроскопією під час аналізу наноматеріалів?
4. Як можна інтерпретувати спектр ІЧ-поглинання наноматеріалів?

5. Чому для наноматеріалів критично важлива правильна підготовка зразків?
6. Які особливості аналізу топографії наночастинок за допомогою СЗМ?
7. Як КР-спектроскопія допомагає визначити кристалічну структуру наноматеріалів?

Лабораторна робота № 7. ОСНОВНІ МЕТОДИ ФОРМУВАННЯ НАНОСТРУКТУРНИХ ПОКРИТТІВ НА РОБОЧИХ ПОВЕРХНЯХ

Основні відомості

Формування наноструктурних покриттів на робочих поверхнях є ключовим етапом у створенні сучасних функціональних матеріалів, що поєднують захисні, декоративні, електронні та інші властивості. Існує два основні підходи до створення тонких плівкових структур – фізичним (PVD) та хімічним (CVD) осадженням з парової фази. Кожен із методів має свої технічні особливості, переваги та сфери застосування.

Методи фізичного осадження з парової фази (PVD – Physical Vapor Deposition) включають процеси, в яких речовина, що осаджується, спочатку випаровується або розпилюється в вакуумі, а потім конденсується на поверхні підкладки. Одним із найбільш поширених варіантів є магнетронне розпилення, де матеріал-мішень бомбардується іонами, утворюючи потік атомів, що осідають на оброблювану поверхню. Цей метод дає змогу наносити щільні, однорідні плівки з високим ступенем адгезії.

На відміну від фізичних методів, *хімічне осадження з парової фази (CVD – Chemical Vapor Deposition)* базується на хімічних реакціях між газоподібними прекурсорами безпосередньо на поверхні підкладки. В результаті реакцій утворюється тверда фаза у вигляді покриття. CVD забезпечує високу однорідність покриття навіть на складних за формою поверхнях і є основним методом у мікроелектроніці, оптиці, антикорозійному захисті.

Умови, що впливають на якість покриттів наступні: температура процесу, тиск у камері, склад газів, швидкість осадження. Також важливим є питання контролю товщини плівки, її кристалічної структури та поверхневої морфології. Ретельний контроль цих параметрів дозволяє керувати властивостями нанопокриттів на атомному рівні.

Особливе місце займає порівняльний аналіз PVD і CVD технологій, адже розуміння принципів відмінностей дає можливість обґрунтовано вибрати оптимальний метод для конкретного практичного застосування.

Метою роботи є ознайомлення з основними принципами формування нанопокриттів, вивчення методів фізичного (PVD) та хімічного (CVD) осадження з парової фази, освоєння методики приготування зразків для нанесення покриттів і дослідження їхніх властивостей.

Матеріали: газоподібні прекурсори (наприклад, силан, аміак), підкладки: кремнієві пластини, скло.

Прилади: вакуумна камера з джерелом напилення (термічне/магнетронне), реактор CVD з газовим потоком, скануючий електронний мікроскоп (SEM), профілометр.

Порядок виконання роботи:

1. Провести демонстрацію або модельне нанесення покриття PVD.
2. Підготувати газову реакційну суміш для CVD.
3. Провести дослідження покриттів методом СЗМ або оптичної мікроскопії.
4. Провести порівняння товщини та морфології нанесених шарів.

7.1. Методика PVD (термічне напилення); див. рис. 7.1.а:

1. Підготовка підкладки (очищення в ультразвуковій ванні).
2. Завантаження у вакуумну камеру.
3. Випаровування матеріалу (наприклад, Al) шляхом нагріву.
4. Конденсація парів на підкладці.
5. Аналіз товщини шару профілометром або SEM.

7.2. Методика CVD (газофазна хімічна реакція); див. рис. 7.1.б:

1. Установка підкладки в реакційну камеру.
2. Введення прекурсорів (наприклад, силан + аміак).
3. Реакція на гарячій поверхні (600–800 °C).
4. Осадження шару Si_3N_4 або графену.
5. Дослідження покриття за допомогою SEM або ІЧ-спектроскопії.

7.3. Порівняльна характеристика методів формування нанопокриттів на робочих поверхнях (табл. 7.1).

Таблиця 7.1

Методи осадження з парової фази

Метод	Принцип	Температура	Атмосфера	Приклади покриттів
PVD (Фізичне осадження з парової фази)	Напилення в вакуумі	200–500°C	Вакуум або інертний газ	TiN, Al, Au, ZnO
CVD (Хімічне осадження з парової фази)	Хімічні реакції з газових прекурсорів	400–1000°C	Реактивна атмосфера	SiO ₂ , TiO ₂ , графен

На основі теоретичних матеріалів або прикладів, наведених у основних відомостях до лабораторної роботи, заповнити табл. 7.2, порівнюючи основні методи формування нанопокриттів на робочих поверхнях.

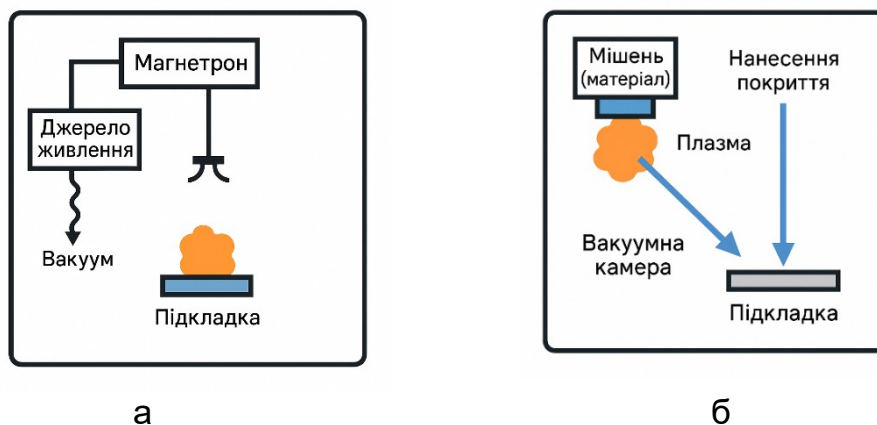


Рис. 7.1. Схема процесу нанесення покриттів: а) PVD-процес (магнетронне розпилення), б) CVD-процес (термічне нанесення)

Таблиця 7.2.

Порівняння методів фізичного та хімічного осадження нанопокриттів

Параметр	PVD (Фізичне осадження)	CVD (Хімічне осадження)
Робоча температура		
Вакуум		
Джерело матеріалу		
Механізм утворення		

покриття		
Адгезія покриття		
Однорідність покриття		
Швидкість осадження		
Приклади застосування		

Запитання до обговорення:

1. Які переваги та недоліки мають методи PVD та CVD?
2. Як вибір прекурсора впливає на властивості покриття?
3. Як змінюються характеристики шару залежно від температури процесу?
4. Чим відрізняються нанопокриття з металів і кераміки?
5. Чи можливе масштабування методів PVD/CVD для промисловості?

ЗМІСТ ІНДИВІДУАЛЬНИХ ЗАВДАНЬ

Змістовний модуль 2.

Індивідуальне завдання №1 для денної форми здобуття освіти. Підготовка індивідуального завдання (реферат-презентація) за переліком, наведеним нижче.

Пояснювальна записка, обсягом 10 – 15 аркушів друкованого тексту, складається з наступних розділів:

1. Вступ, в якому висвітлюється актуальність теми (2...3 сторінки).
2. Літературний огляд за темою роботи (8...11 сторінок), який подає характеристику вихідних речовин для синтезу, опис технології синтезу наноречовини, властивості та особливості застосування; екологічні та соціальні аспекти застосування наноматеріалу в промисловості.
3. Висновки (1 – 2 сторінки).
4. Перелік використаної літератури.

Основні положення пояснювальної записки виносяться на презентацію, яка має містити 7 – 10 слайдів. Захист відбувається у формі обговорення доповіді на тему індивідуальної роботи.

Перелік тем індивідуального завдання:

1. Історія розвитку нанотехнологій.
2. Наноефекти і нанооб'єкти в природі.
3. «Інтуїтивні» нанотехнології.

4. Стан розвитку нанотехнологій в різних галузях науки.
5. Інноваційні напрями розвитку нанотехнологій.
6. Технології отримання ізольованих наночастинок.
7. Технології отримання структурованих наноматеріалів.
8. Технології синтезу полімерних наноматеріалів та перспективи їх застосування.
9. Технології синтезу біологічних наноматеріалів та перспективи їх застосування.
10. Технології синтезу вуглецевих наноматеріалів та перспективи їх застосування.
11. Технології синтезу пористих наноматеріалів та перспективи їх застосування.
12. Технології синтезу порошкових наноматеріалів та перспективи їх застосування.
13. Технології синтезу об'ємних наноматеріалів та перспективи їх застосування.
14. Електронні методи дослідження наноструктур.
15. Спектральні методи дослідження наноструктур.
16. Скануючі спектральні методи дослідження наноструктур.
17. Магнітні методи дослідження наноструктур.
18. Скануюча зондова літографія як метод дослідження наноструктур.
19. Методи моделювання наноструктур.
20. Екологічні аспекти нанотехнологій.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. *Афтанділянц Є.Г.* Наноматеріалознавство : підручник / Є.Г. Афтанділянц, О.В. Зазимко, К.Г. Лопатько. – Херсон, ОЛДІ-ПЛЮС, 2015. – 550 с.
2. *Пономаренко В.С.* Нанотехнологія та її іноваційний розвиток / В.С. Пономаренко, Ю.Ф. Назаров, В.П. Свідерський та ін. – Харків : ВД «ІНЖЕК», 2008. – 280 с.
3. Хілл А. *Наноструктурні матеріали* / А. Хілл. – М.: Техносфера, 2009. – 448 с.
4. *Заячук Д.М.* Нанотехнології і наноструктури : навчальний посібник для ВНЗ / Д.М. Заячук. – Львів : Вид. нац. ун-ту «Львівська політехніка», 2009. – 581 с.
5. *Завражна О.М.* Основи нанотехнологій : навч.-метод. посібник / О.М. Завражна, А.І. Пасько. – Суми, СДПУ, 2016. – 184 с.
6. *Старостін В.В.* Матеріали і методи нанотехнологій : навч. посібник / В.В. Старостін. – М.: Біном, 2008. – 431 с.
7. *Раков Е.Г.* Нанотрубки і фулерени : навч. посібник / Е.Г Раков. – Універс. книга, Логос, 2006. – 376 с.
8. *Ткач О.П.* Наноматеріали і нанотехнології в приладобудуванні : навч. посібник / О.П. Ткач. – Суми, СДУ, 2014. – 126 с.
9. *Bhushan B.* (Ed.). Springer Handbook of Nanotechnology (4th ed.) / B. Bhushan (Ed.). – Springer. – 2017.
10. *Schmid G.* Nanoparticles: From Theory to Application. Wiley-VCH / G. Schmid. – 2011.
11. *Roco M.C.* (Eds.). Nanotechnology Research Directions for Societal Needs in 2020 / M.C. Roco, C.A. Mirkin, M.C. Hersam (Eds.). – Springer. – 2011.
12. *Charles M. Gilmore.* Materials Science and Engineering Properties. Cengage Learning / M. Charles. –2015. – 722 p.
13. *Donald R. Askeland, Wendelin J. Wright.* The Science and Engineering of Materials / R. Donald. – Cengage Learning, 2016. – 870 p.
14. *Ratner M.A.* (Ed.). Nanotechnology: A Gentle Introduction to the Next Big Idea / M.A. Ratner. – Pearson. – 2003.
15. www.nano.gov – National Nanotechnology Initiative (NNI).
16. www.nanowerk.com – Nanowerk.
17. www.nanoeurope.org – European Nanotechnology Community.

Навчально-методичне видання

ОСНОВИ НАНОТЕХНОЛОГІЙ

Методичні вказівки
до виконання практичних та лабораторних робіт
для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності
G1 «Хімічні технології та інженерія» освітньої програми «Новітні технології
стінових і оздоблювальних матеріалів»
денної та заочної форм навчання

Укладачі: **Суханевич** Марина Володимирівна,
Бондаренко Ольга Петрівна

Випусковий редактор *Л. С. Тавлуй*
Комп'ютерне верстання *К. А. Мавроді*

Підписано до друку 2025. Формат 60 x 84^{1/16}
Ум. друк. арк. 2,09. Обл.-вид. арк. 2,25.
Електронний документ. Вид. № 96/III-25

Видавець і виготовлювач:
Київський національний університет будівництва і архітектури

Проспект Повітряних Сил, 31, Київ, Україна, 03037

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру суб'єктів
видавничої справи ДК № 808 від 13.02.2002