

ДРОГОБИЦЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ПЕДАГОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ІВАНА ФРАНКА
Кафедра технологічної та професійної освіти

Юрій ПАВЛОВСЬКИЙ
Володимир ПОПОВИЧ

Сучасні матеріали в техніці: наноматеріали та
нанотехнології

Навчально-методичний посібник

Дрогобич
2024

УДК 620.22(072)

П12

*Рекомендовано до друку вченою радою
Дрогобицького державного педагогічного університету
імені Івана Франка (протокол №4 від 18.04 2024 р.)*

Рецензенти:

Кузик О.В. – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри фізики та інформаційних систем Дрогобицького державного педагогічного університету імені Івана Франка;

Малик В.Я. – кандидат технічних наук, доцент, завідувач відділення електричної інженерії та автомобільного транспорту Дрогобицького фахового коледжу нафти і газу.

Відповідальний за випуск –

Нищак І.Д. – доктор педагогічних наук, професор, професор кафедри технологічної та професійної освіти Дрогобицького державного педагогічного університету імені Івана Франка.

Павловський Ю.В., Попович В.Д.

Сучасні матеріали в техніці: наноматеріали та нанотехнології:

П12 навчально-методичний посібник. Дрогобич : Дрогобицький державний педагогічний університет імені Івана Франка, 2024. 76 с.

Навчально-методичний посібник містить короткі теоретичні відомості, перелік питань для самоконтролю, завдання для закріплення і перевірки знань та рекомендовану літературу з дисципліни «Сучасні матеріали в техніці».

Посібник призначений для студентів вищих навчальних закладів другого (магістерського) рівня вищої освіти, які навчаються за спеціальністю 014 Середня освіта (Трудове навчання та технології).

Бібліографія – 52 назв.

© Павловський Ю.В., Попович В.Д., 2024

© Дрогобицький державний педагогічний університет імені Івана Франка,

ЗМІСТ

Вступ	4
1. Основні поняття та сучасні досягнення у галузі нанотехнологій та наноматеріалів.....	6
2. Наноматеріали на основі різних модифікацій вуглецю	13
2.1. Графен.....	13
2.2. Вуглецеві нанотрубки.....	15
2.3. Фулерени.....	18
3. Наноматеріали конструкційного та функціонального класу	19
4. Сучасні методи отримання нанопорошків металів	22
5. Нановолокна та волокнисті матеріали.....	35
6. Сучасні нанокompatитні матеріали та їхнє практичне застосування.....	44
7. Функціональні властивості нанопокриттів.....	57
8. Завдання для самоконтролю та закріплення знань.....	61
8.1. Запитання для самоконтролю.....	61
8.2. Завдання для закріплення знань	63
8.2.1. Тестові завдання.....	63
8.2.2. Кросворд «Нанотехнології та наноматеріали»	68
ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК	71
Список використаних джерел.....	72

Вступ

У світі сучасних технологій слова «інновація» та «прогрес» стають практично синонімами для розкриття нових горизонтів у всіх сферах нашого життя. І тут ключову роль відіграють матеріали. Спостерігається шалений розвиток в галузі матеріалознавства, що уможливорює створювати такі матеріали, які ще десятиліття тому здавалися фантастичними. Сучасні матеріали в техніці, особливо наноматеріали та нанотехнології, сьогодні стали основою для великого спектру інновацій в електроніці, медицині, енергетиці, транспорті, будівництві та багатьох інших галузях.

Наноматеріали, або матеріали з нанорозмірними структурами, відкривають перед нами безліч можливостей. Вони мають унікальні фізичні, хімічні та механічні властивості, які відрізняють їх від традиційних матеріалів. Це відкриває шлях до створення нових продуктів та технологій, які революціонізують наше життя. Наприклад, наноматеріали вже застосовуються у виробництві легких та міцних конструкцій для авіації, створенні ефективних сонячних батарей, розвитку нових методів боротьби з раком та іншими хворобами, а також у виготовленні екологічно чистих матеріалів.

Нанотехнології, своєю чергою, відкривають шлях до точного контролю за будовою та властивостями матеріалів на атомному та молекулярному рівнях. Це дає можливість створювати матеріали з точно визначеними властивостями для конкретних застосувань. Наприклад, завдяки нанотехнологіям можна розробити сенсори з надзвичайно високою чутливістю, нанофільтри для очищення води від забруднень, або наноматеріали для створення ефективних каталізаторів.

Розвиток нанотехнологій (одного з розділів сучасного матеріалознавства), за прогнозами більшості експертів, визначить вигляд ХХІ століття. Підтвердженням цього є присудження за останні роки чотирьох Нобелівських премій у галузі хімії та фізики: за відкриття нової форми вуглецю – фулерену (1996 р.), за розробки в галузі напівпровідникової техніки та інтегральних схем (2000 р.), оптичних напівпровідникових сенсорів (2009 р.), за експерименти з двовимірним матеріалом – графеном (2010 р.).

Але що таке технологія? У свій час технологію вважали сукупністю знань про способи та засоби виробничих процесів [1]. Промислові технології, такі як хімічна, металургійна та будівельна, відповідали цьому визначенню. Однак

нанотехнологія відрізняється від цього, оскільки вона спрямована на вплив на окремі атоми та молекули у нанометровому просторовому масштабі, а не на макроскопічний рівень матеріалу, що складається з мільярдів атомів і молекул, що є типовим для традиційної технології. Ще однією особливістю нанотехнології є створення матеріалів з новими фізико-хімічними та біологічними властивостями. За останні десятиліття нанотехнології стали стратегічним напрямом у промисловості. Інтерес до матеріалів у нанометровому стані значно зріс через реальну можливість практичного використання їх унікальних властивостей у різних галузях науки та техніки [2].

Таким чином, людина не просто копіює механізми та матеріали, створені природою, як це було у попередніх науково-технічних революціях, а й створює нові матеріали, невідомі природі.

Така перспектива розвитку сучасного матеріалознавства вимагає невідкладного впровадження в освітні програми спеціальних тем, необхідних для підготовки фахівців, які могли б на сучасному рівні та досить ефективно вирішувати фундаментальні та прикладні завдання у галузі нанотехнологій та наноматеріалів. У цьому контексті актуальним є питання розробки учнівських проєктів, факультативних занять, науково-технічних гуртків з вивчення сучасних нанотехнологій та наноматеріалів.

Цілком зрозумілим є прагнення в галузі освіти розповісти про нанотехнології та наноматеріали в рамках однієї дисципліни, одного курсу. У цьому полягає складність, пов'язана з тим, що нанотехнологія – це міждисциплінарна галузь науки, в якій задіяні фізика, хімія, біологія, прикладні науки. Саме тому, незважаючи на наявність достатньої кількості навчальних посібників з означеної тематики, є потреба розробки навчально-методичних матеріалів, які інтегрують знання з різних наук в єдине ціле з наноматеріалів та нанотехнологій.

1. Основні поняття та сучасні досягнення у галузі нанотехнологій та наноматеріалів

Одна із перших згадок методів, які пізніше стали відомими як нанотехнології, пов'язана з промовою Річарда Феймана «Там внизу багато місця» («There's Plenty of Room at the Bottom»), яку він виголосив у 1959 році на зустрічі Американського фізичного товариства у Каліфорнійському технологічному інституті. Фейман розглядав можливість механічного переміщення окремих атомів за допомогою маніпулятора відповідного розміру. Він уявляв, що якщо б точно знати розташування окремих молекул і атомів речовини, то їх можна було б розподілити у заданій послідовності. Сьогодні під нанотехнологіями розуміють технології, які надають можливість керованого створення та модифікації наноматеріалів, а також їх інтеграції у повноцінні функціонуючі системи більшого масштабу [3].

Розвитку наноіндустрії сприяли:

- прагнення до мініатюризації виробів;
- необхідність розробки і впровадження матеріалів з новими (якісними та кількісними) властивостями;
- унікальні властивості матеріалів у наноструктурному стані;
- розвиток нових технологічних прийомів і методів, заснованих на принципах самоорганізації;
- практичне впровадженням сучасних приладів діагностування, дослідження та модифікації наноматеріалів;
- розвиток і впровадженням нових технологій, які є послідовністю процесів літографії, технологій отримання нанопорошків тощо;
- наближення до основних фізичних обмежень, таких як швидкість світла, відповідність розмірів наноструктур довжині хвилі електрона тощо.

Результатом впровадження нанотехнологій має бути:

- 1) створення нових екологічно чистих джерел енергії;
- 2) задоволення потреб у чистій воді і повітрі;
- 3) поліпшення здоров'я і збільшення тривалості життя;
- 4) максимальне збільшення продуктивності сільськогосподарського виробництва;
- 5) загальнодоступність інформаційних технологій;
- 6) прогрес в освоєнні космічного простору.

До наноматеріалів відносять дисперсні і масивні матеріали зі

структурними елементами, такими як зерна, кристаліти, блоки, кластери та інші, розміри яких в одному вимірі не перевищують 100 нм, і мають нові функціональні та експлуатаційні характеристики. Наприклад, для механічних властивостей, це може бути розмір бездефектного кристала, для електропровідності – довжина вільного пробігу електронів, для магнітних властивостей – розмір однодоменного кристала [4].

Наноматеріали появилися у середовищі існування людини раніше, ніж сам термін «наноматеріали», і використовуються вже не тільки у науці і техніці, але і в повсякденному житті (табл. 1).

Таблиця 1

Класифікація дисперсних систем за агрегатним станом фаз

Дисперсне середовище	Дисперсна фаза		
	Газова	Рідка	Тверда
Газова	–	Аерозолі, тумани, краплі	Аерогелі, аерозолі, порошки, дим, пил
Рідка	Піни, газові емульсії	Емульсії, креми	Золі, гелі, емульсії, пасти
Тверда	Тверді піни, фільтри, сорбенти, мембрани	Тверді емульсії	Тверді золі, сплави, композити, покриття, плівки

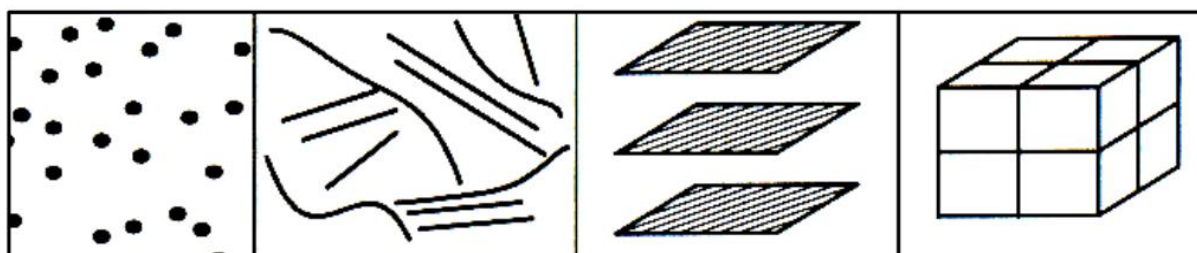
Класифікація наноматеріалів за розмірами представлена на рис. 1:

0D – квантові точки (структури, які складаються з менш ніж 10 атомів, всі розміри кластера не перевищують 100 нм);

1D – нитки, волокна, віскери (один розмір перевищує 100 нм);

2D – плівки, покриття (двовимірні утворення з нанорозмірною товщиною);

3D – об’ємні матеріали (полікристали, які складаються з нанозерен).



Кластери
(0D)

Нанотрубки,
волокна, віскери
(1D)

Плівки і шари
(2D)

Полікристали
(3D)

Рис. 1. Класифікація наноматеріалів

Сьогодні прийнято розрізняти два підходи до створення наноматеріалів:

- 1) «зверху вниз» » (англ. «top-down») – фізичні методи, подрібнення;
- 2) «знизу вверх» (англ. «bottom-up») – хімічні методи, синтез.

Принцип «знизу вверх» використовують для створення наноструктурних матеріалів, де атоми і молекули (нижній рівень) об'єднуються, утворюючи наночастинки (верхній рівень), і при цьому вихідні елементи структури збільшуються до частинок нанометрового розміру (рис. 2). Ця методика дає можливість створювати окремі наночастинки, нанопорошки та компактні наноматеріали. За принципом «зверху вниз» наноструктурні матеріали отримують шляхом редукції розмірів частинок до рівня нанометрів шляхом подрібнення більших частинок, порошоків або зерен твердих тіл. Технології цього типу використовують для отримання компактних наноматеріалів та нанопорошків з об'ємних заготовок [4].

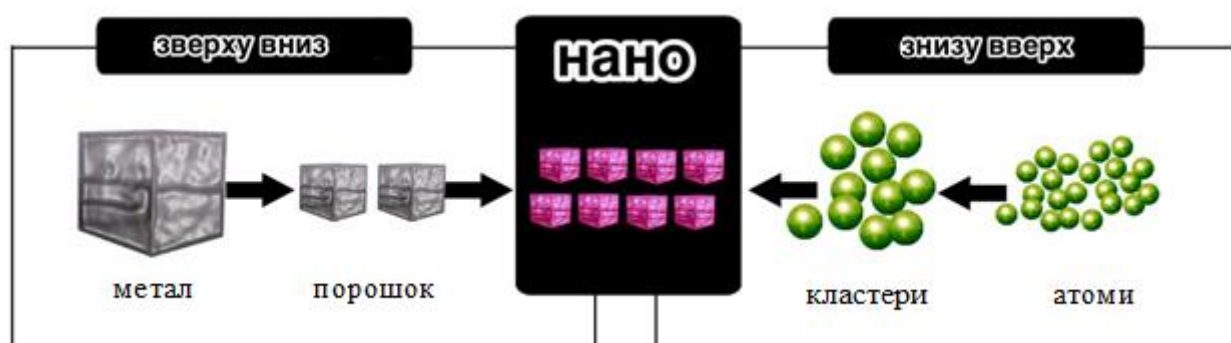


Рис. 2. Види нанотехнологій

Основою нанотехнології є наноматеріали – це матеріали, незвичайні функціональні властивості яких визначаються упорядкованою структурою нанофрагментів розміром від 1 до 100 нм.

Нині існує низка підходів до визначення наноматеріалів. Основні з них представлені на рис. 3. Перший підхід – найпростіший. Він визначає наноматеріали за геометричними розмірами їхньої структури. Критерієм приналежності до наноматеріалів вибрано розмір мікроструктури від 1 до 100 нм. Такі матеріали у літературі зустрічаються також під іншими назвами: наноструктурні, нанофазні, нанокристалічні, супрамолекулярні.

Методи і засоби нанотехнологій маніпулюють наночастинками, такими як атоми, молекули, іони та їх асоціати, для створення нанооб'єктів та наноматеріалів з чіткою молекулярною структурою. Ці матеріали мають або

зовсім нові, або значно поліпшені властивості порівняно з традиційними матеріалами, які сформовані з мікро- та макрочастинок [5].

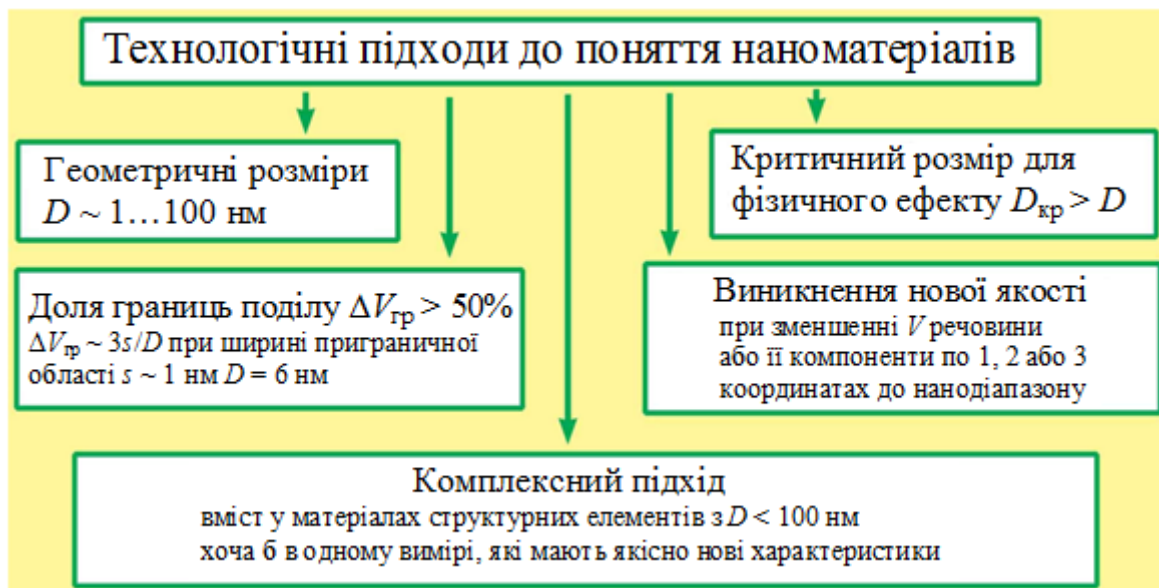


Рис. 3. Технологічні підходи до поняття наноматеріалів

До наноб'єктів відносять:

- тверді частки нанорозмірів;
- пори нанорозмірів;
- шорсткості нанорозмірів;
- плівки нанотовщини;
- волокна;
- нанопіни;
- нанокраплі у наноемульсії тощо.

Усі наноб'єкти можна умовно поділити на чотири основні класи (рис. 4):

- тривимірні наночастинки, які отримують, наприклад, методами плазмового синтезу, вибухання провідників або відновлення тонких плівок;
- двовимірні об'єкти, такі як плівки, які отримують за допомогою методів іонного або молекулярного нашарування;
- одновимірні об'єкти, такі як віскери, отримують шляхом введення речовин у циліндричні мікропори або за допомогою методу молекулярного нашарування;
- квантові точки [5].

Наноструктури збирають не тільки з окремих атомів чи молекул, а й з молекулярних блоків, таких як вуглецеві нанотрубки, графен, фулерени.

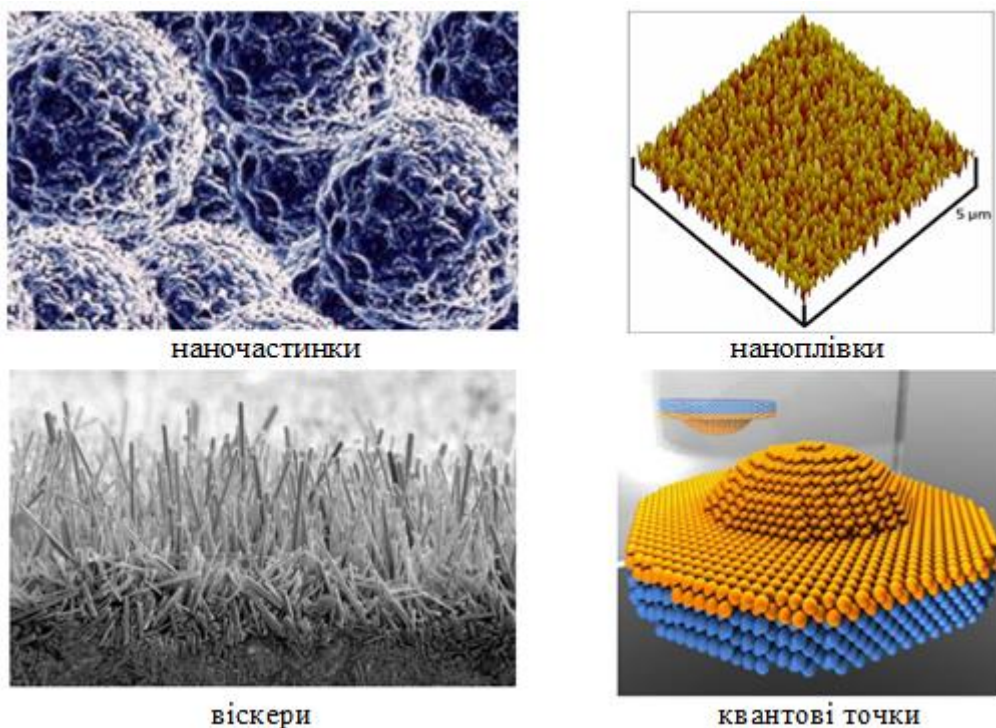


Рис. 4. Основні групи нанооб'єктів

Другий підхід до визначення наноматеріалів пов'язаний із великим впливом на їх властивості численних поверхонь поділу. Переглянемо рис. 3. Критерієм визначення наноматеріалів є об'ємна частка поверхонь поділу у загальному об'ємі матеріалу. При розмірі структурних елементів у наноматеріалах порядку кількох нанометрів вона становить приблизно 50 %.

Третій підхід бере за критерій визначення наноматеріалів критичний розмір фізичного явища – розмір матеріалу, в якому його певна властивість зберігається. Наприклад, для магнітних властивостей – це розмір однодомного кристалу, для електропровідності – довжина вільного пробігу електронів, для властивостей міцності – розмір бездефектного кристалу.

Четвертий підхід до визначення наноматеріалів, як критерій визначення висуває виникнення нової якості в об'єкті або композиції з таких об'єктів при зменшенні його об'єму за будь-якою координатою до розмірів нанометрового масштабу. У цьому підході головним є поява нової якості, а не лише розмір.

П'ятий підхід до визначення наноматеріалів є найбільш повноцінним. Він використовує у комплексі два критерії – розмір структурного елемента хоча б в одному напрямку менший 100 нм та наявність у матеріалу якісно нових характеристик.

Нанотехнологія – це сукупність методів та прийомів, завдяки яким можна

контрольовано створювати та модифікувати об'єкти з розмірами компонентів меншими 100 нм, які мають принципово нові якості та інтегруються у більшого масштабу, що повноцінно функціонують [2].

Наноматеріал – це матеріал, який містить структурні елементи, геометричні розміри яких хоча б в одному вимірі не перевищують 100 нм, і має якісно нові властивості, функціональні та експлуатаційні характеристики [5].

Наноматеріали поділяють на чотири основні категорії (рис. 5):

- нановироби;
- мікровироби;
- масивні матеріали;
- композити із компонентами з наноматеріалів.



Рис. 5. Класифікація наноматеріалів

До нановиробів належать матеріали у вигляді твердих тіл, розміри яких в одному, двох або трьох просторових координатах не перевищують 100 нм. Наприклад, нанодроги та нановолокна, нанорозмірні частинки (нанопорошки), нанотрубки, надтонкі плівки (завтовшки менше 100 нм) тощо. Вони можуть містити від одного структурного елемента або кристаліта (у випадку частинок порошку) до декількох шарів (у випадку плівки). У зв'язку з цим першу

категорію класифікують як наноматеріали з малою кількістю структурних елементів або наноматеріали у вигляді нановиробів [6].

Мікровиробами є матеріали, які представляють малорозмірні вироби з визначальним розміром у діапазоні 1 мкм – 1 мм. До них відносять стрічки, дроти, фольги. Такі матеріали характеризуються значною кількістю структурних елементів, що дозволяє визначати їх наноматеріалами з великою кількістю структурних елементів (кристалітів) або наноматеріалів, які мають вигляд мікровиробів.

Масивними матеріалами є об'ємні наноматеріали, в яких розміри виготовлених з них виробів входять у макродіапазон більший кількох міліметрів. Ці матеріали характеризуються великою кількістю нанорозмірних елементів (кристалітів) і є полікристалічними матеріали, які мають розмір зерна 1-100 нм. Таку категорію наноматеріалів поділяють на два класи.

Перший клас складається з однофазних матеріалів (мікроструктурно однорідні матеріали), у яких зміна структури та/або хімічного складу за об'ємом матеріалу відбувається лише на атомному рівні. Такими матеріалами є пересичені тверді розчини, гелі, скло.

Другий клас складається з мікроструктурно неоднорідних матеріалів, у складі яких є нанорозмірні елементи (кристаліти, блоки), які відрізняються структурою та/або складом. Наприклад, багатофазні матеріали з урахуванням складних металевих сплавів.

Інша назва мікровиробів та масивних матеріалів – нанокристалічні або нанофазні матеріали.

Композити, які мають компоненти наноматеріалів, відносять до композитних матеріалів. Компонентами є нановироби у вигляді нанопорошків, нанодротів, нановолокон, нанотрубок.

Можна виокремити чотири методи отримання наноматеріалів, кожен з яких має свої переваги та обмеження.

Перший спосіб – механічний метод, який ґрунтується на механічній обробці матеріалів, такій як подрібнення, молоття та перемелювання. Цей метод застосовується для одержання наночастинок у порошковій формі.

Другий спосіб – хімічний синтез, включає реакції між хімічними речовинами, які призводять до утворення наноструктурних матеріалів. Цей метод забезпечує контроль над структурними та хімічними властивостями наноматеріалів та широко використовується у наукових та промислових цілях.

Третій спосіб – топ-даун технологія, заснована на поділі та маніпуляції матеріалами у наномасштабі. Цей метод включає використання різних інструментів, таких як літографія, іонно-променева обробка й атомно-силового мікроскопія для створення наноструктур і нанопроводів.

Четвертий спосіб – біометод, який ґрунтується на використанні біологічних організмів або їх компонентів для синтезу наноматеріалів. Біологічні системи можуть надати унікальні можливості при створенні структур на нанорівні та можуть бути використані для отримання біологічних наноматеріалів з певними властивостями.

Незалежно від способу отримання, наноматеріали знаходять застосування у багатьох областях, таких як електроніка, оптика, каталізатори, медицина й енергетика. Вони можуть бути використані у різних пристроях, таких як наночастинки для доставки ліків, сонячні батареї з більш високою ефективністю та сенсори з підвищеною чутливістю.

2. Наноматеріали на основі різних модифікацій вуглецю

2.1. Графен

Наноструктури збирають не тільки з окремих атомів чи молекул, але й молекулярних блоків – графену, вуглецевих нанотрубок та фулеренів. Графен – це новий матеріал, який має унікальні електричні, оптичні та механічні властивості. Уперше графен у вільному стані був отриманий у 2004 р., що стало великим відкриттям, попри те, що – це вид простої речовини – чистого вуглецю. Його структура подібна до двомірної сітки, в якій кожен атом вуглецю жорстко зв'язаний з трьома сусідніми атомами (рис. 6) [7-10].

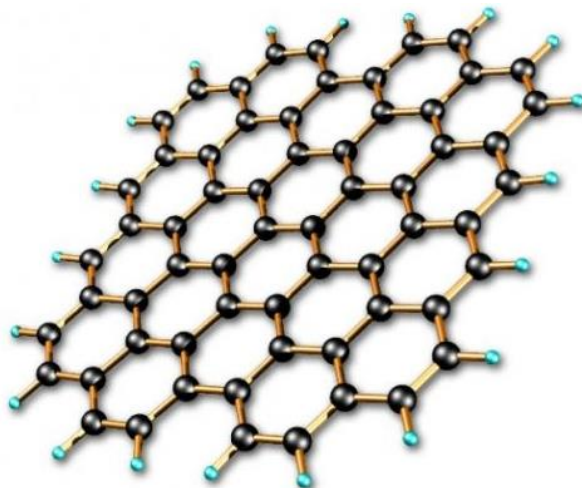


Рис. 6. Структура графену

Графен отримували нанесенням на клейку стрічку найтоншого шару графіту з подальшим видаленням основи. Це пов'язано з легким відділенням один від одного шарів графіту. Механічний вплив на високоорієнтований піролітичний графіт приводить до отримання шматочків графену. Створення досить тонких шарів відбувається при поміщенні плоских шматків графіту між липкими стрічками (скотч) та багаторазовому їх розщепленні. Скотч, на якому залишилися тонкі плівки графіту, надалі притискають до підкладки окисленого кремнію. Цей спосіб отримання графену має такий недолік, як неможливість його промислового використання. Ефективнішим способом отримання нового матеріалу став метод, в якому основою є шари міді, нікелю, кремнію, які потім видаляються методом травлення.

Графен (graphene) – новий матеріал з незвичайними якостями. Вже зараз фізики, хіміки та інженери-електроніки багато говорять про його унікальні можливості. Це найтонший матеріал з усіх, що нині існують – завтовшки один атомний шар. При цьому він надзвичайно міцний, з урахуванням його товщини це найміцніший матеріал у світі. Він чудовий провідник електрики та теплоти і до того ж прозорий. Уявіть собі вуглецеву пластину завтовшки лише в один атом, але міцнішу, ніж алмаз, і яка пропускає електрику в 100 разів краще, ніж кремній у комп'ютерних чипах. Через сітку атомів вуглецю проходить до 97,7 % світла. А стійкий прозорий електропровідний матеріал придатний для плоскопанельних екранів [7].

Графен не тільки найтонший, а й найміцніший у світі матеріал. Це довели вчені з Колумбійського університету в Нью-Йорку. Вони помістили графен над крихітними отворами у кристалі кремнію. Потім натисканням найтоншої алмазної голки спробували зруйнувати шар графену та виміряли силу тиску. Виявилося, що графен у 200 разів міцніший від сталі. Якщо уявити собі графеновий шар завтовшки у харчову плівку, він би витримав тиск вістря олівця, на протилежному кінці якого балансував би слон чи автомобіль. У графена є дві неповторні властивості. По-перше, його молекулярна структура стійка до пошкоджень; по-друге, електрони переміщуються у ньому набагато швидше і поводяться подібно до частинок з масою набагато меншою, ніж у металевих провідниках або суперпровідниках [8].

Можливі сфери використання графену – якісні та дешеві плоскопанельні сенсорні екрани, сонячні батареї, накопичувачі енергії, стільникові телефони, супершвидкі комп'ютерні чипи, швидкісні комп'ютери, суперчутливі газові

детектори, здатні виявити найменший витік газу [9]. До перспективних напрямів застосування графену можна віднести сонячні та паливні елементи, літєві батареї, мембрани для очищення води та повітря, різні датчики тощо (рис. 7).



Рис. 7. Можливості застосування графену

2.2. Вуглецеві нанотрубки

Вуглецеву нанотрубку можна представляти або як згорнутий у трубку лист графіту, або як розрізаний по середній лінії «м'ячик» фулерену, між половинками якого вставлені додаткові осередки атомів вуглецю. Отже, структуру фулерену можна розглядати як граничний, окремий випадок нанотрубки (рис. 8). Відповідно, нанотрубки бувають як із закругленими кінцями, закритими фулереновими ковпачками, так і з відкритими кінцями, а також одношаровими чи багатшаровими (рис. 9) [10].

Потенційно нанотрубки мають неймовірно широку сферу застосування, але перш ніж розглядати конкретні галузі їх використання, варто сказати кілька слів про ті чудові фізико-хімічні властивості, які зумовлюють такі можливості.

Залежно від внутрішньої конфігурації нанотрубки можуть бути провідниками металевого типу або напівпровідниками.

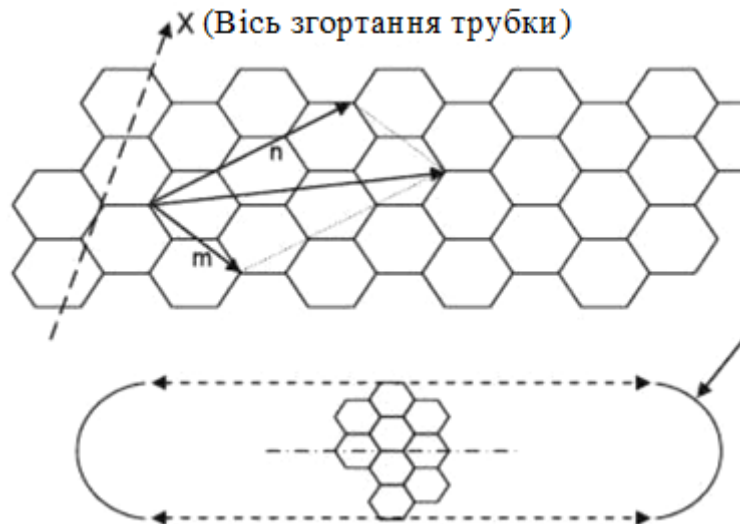


Рис. 8. Структура вуглецевої нанотрубки

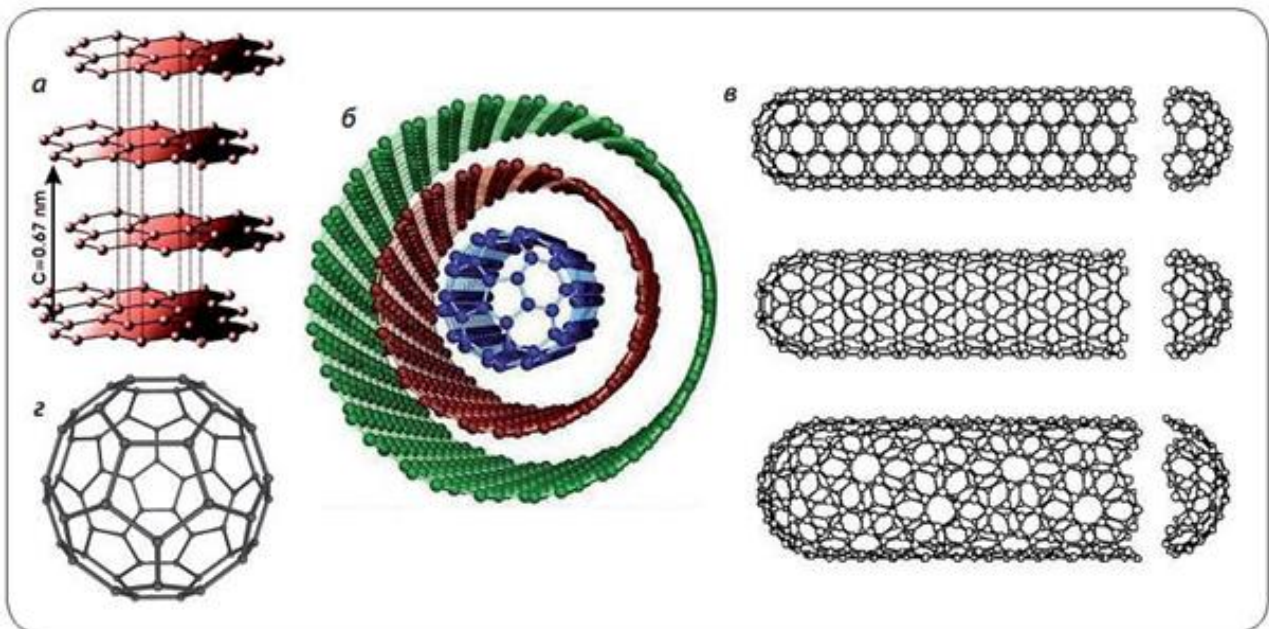


Рис. 9. Схема розташування вуглецевих атомів у гратці графіту (а), багат шарових (б) та одношарових (в) нанотрубках і нижчих фулеренах (г)

Хоча насправді вуглецеві нанотрубки не отримують шляхом згортання графітових листів, проте деякі властивості нанотрубок можна пояснити, виходячи з уявного розгляду способів такого згортання. Так, наприклад, провідні властивості нанотрубок пов'язані зі співвідношенням параметрів n та m . Якщо відношення $(n - m)/3$ є цілим числом, провідність нанотрубки буде металевого типу. Інакше провідність буде напівпровідниковою [11].

Нанотрубки із металевим типом провідності оцінюють як можуть пропускати

мільярд ампер на квадратний сантиметр. Для порівняння, провідність одного з найкращих металевих провідників – міді – не більше мільйона ампер на квадратний сантиметр. У випадку перевищення цього порогу мідний провідник плавиться. Однією з причин таких хороших властивостей є невелика кількість дефектів, які виникають при синтезі нанотрубки, а також висока теплопровідність. Вона майже вдвічі вища, ніж теплопровідні властивості алмазу.

Вуглецеві трубки дуже міцні. Наприклад, якщо порівнювати характеристики нанотрубок з характеристиками інших матеріалів за таким параметром міцності, як модуль Юнга, можна сказати, що він для вуглецевих нанотрубок має величину порядку 1,28-1,8 ТПа. Модуль Юнга хорошої сталі становить 0,21 ТПа, ебоніту – 2–3 ГПа, каучуку – 12 МПа. Тобто модуль пружності вуглецевих нанотрубок майже на порядок вищий, ніж модуль пружності сталі, і приблизно 100 000 разів вищий, ніж у каучуку [11].

Оскільки структура вуглецевих нанотрубок має мало дефектів, а співвідношення довжини трубки до її діаметра може бути дуже великим, крім високої жорсткості, вуглецева трубка має ще й значну гнучкість. Пруток з пучка нанотрубок можна багаторазово вигинати у різні боки, і при цьому він розпрямлятиметься без пошкоджень. Ця властивість є наслідком того, що стінки нанотрубки складаються з вуглецевих кілець, які при згинанні можуть деформуватися без розривів міжатомних зв'язків. Крім того, у вуглецевих кільцях вуглецеві зв'язки піддаються sp^2 -гібридизації і можуть перегібридизовуватися при згинаннях.

Межа міцності сталевих сплавів становить близько 2 ГПа, для нанотрубки ця – 45 ГПа. Таким чином, при випробуваннях на розрив нанотрубки приблизно у 20 разів міцніші від сталі.

Ще в 1996 р було виявлено, що окремі вуглецеві нанотрубки можуть мимоволі скручуватися у канатики зі 100–500 волокон-трубочок, причому їхня міцність виявилася більшою, ніж у алмазу (рис. 10). Точніше кажучи, вони у 10–12 разів міцніші та у 6 разів легші від сталі. Нитка діаметром 1 міліметр могла б витримати 20-тонний вантаж, у сотні мільярдів разів більший за її власну вагу!

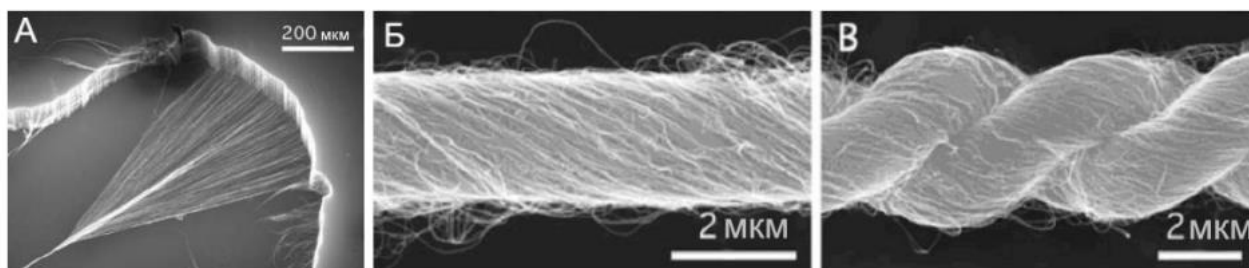


Рис. 10. Одержання канатів з вуглецевих нанотрубок: А – метод отримання; Б – одиничний канат; В – переплетений канат [12]

Вуглецеві нанотрубки мають також великі перспективи практичного використання у мікроелектроніці (нанопроводи, нанотранзистори), у паливних елементах, оптиці, нейрокомп'ютерних розробках, для моніторингу навколишнього середовища, у медичних, військових та біотехнологічних застосуваннях тощо.

2.3. Фулерени

Фулерени – це досить незвичайний клас молекул, що є однією з форм існування вуглецю (так званих алотропних модифікацій). Всім відомі алмаз і графіт – теж не що інше, як різні алотропні форми вуглецю, проте в структурі алмазу атоми вуглецю зібрані в тетраедри, графіт складається з плоских шарів, утворених шестикутниками, а фулерени – це кулясті молекули із замкненою поверхнею. Найпростіший з фулеренів містить 60 атомів вуглецю і дивним чином нагадує за своєю структурою футбольний м'яч (рис. 11): його поверхня утворена п'яти- і шестикутниками, які чергуються, причому розмір цього «м'яча» становить лише 1 нм (нанометр).



Рис. 11. Фулеренові молекули: а) C_{60} і футбольний м'яч; б) C_{70}

Відкриття фулеренів – один із яскравих прикладів прогностичної потужності науки: ще в 70-ті роки ХХ століття були зроблені теоретичні квантово-хімічні розрахунки, що передбачають існування подібних молекул, проте лише у 1985 році їх уперше виявили при дослідженні парів графіту після його лазерного опромінення. Пізніше фулерени були знайдені і в природних мінералах [13].

Фулерени – це щільна закрита структура у вигляді опуклих замкнутих багатогранників, що містить понад 20 атомів вуглецю і складається повністю з вуглецевих атомів із трьома зв'язками. Загалом виділяють такі різновиди фулеренів: фулеренова сажа; суміш C_{60}/C_{70} /вищі фулерени; фулерени C_{60} ; фулерени C_{70} ; вищі фулерени; ендоедральні фулерени; хімічні модифікації фулеренів; фулереномодифікована продукція.

Для фулеренів характерні такі властивості: 1) легування фулеренів C_{60} незначною концентрацією атомів лужних металів призводить до утворення матеріалу, який за низьких температур стає надпровідним; 2) висока сорбційна здатність (до поглинання газів, пари або речовин), як сорбенти фулерени набагато перевершують активоване вугілля; 3) фотопровідність; 4) висока механічна міцність; 5) нелінійні оптичні властивості; 6) висока пружність; 7) низька поверхнева енергія; 8) висока хімічна стабільність; 9) слабкі міжмолекулярні взаємодії; 10) біосумісність, що уможлиблює їх використання у медицині [14].

3. Наноматеріали конструкційного та функціонального класу

Сьогодні одним із найпопулярніших напрямів нанотехнологій для розв'язання різних проблем техніки є наноматеріали конструкційного та функціонального призначення. Основні матеріали цього класу –металеві, керамічні, полімерні і композитні. Для отримання наноматеріалів у консолідованому вигляді в основному використовується чотири методи: порошкова металургія (компактування нанопорошків), інтенсивна пластична деформація, кристалізація з аморфного стану та різні методи нанесення наноструктурних покриттів. Дослідження зі створення конструкційних наноматеріалів, придатних для широкого практичного застосування, перебувають на стадії розвитку і потребують використання різноманітних нанотехнологій [15–18].

Застосування того чи того матеріалу визначається набором

характеристик, який включає зв'язок між міцністю, пластичністю та в'язкістю. Великий інтерес до об'ємних наноматеріалів зумовлений тим, що їх властивості значно відрізняються від властивостей більших за розміром аналогів. У цьому контексті перспективними є дослідження з поліпшення уже використовуваних і розробки нових сталей та сплавів з нанокристалічною структурою.

Міцність матеріалів у нанокристалічному стані при розтягуванні суттєво перевищує міцність об'ємних аналогів, при цьому зберігаючи краще співвідношення між міцністю і пластичністю (рис. 12) [15].



Рис. 12. Залежність між міцністю та пластичністю для об'ємних і нанорозмірних матеріалів

Для отримання у сталях і сплавах нанокристалічної структури в основному використовують методи інтенсивної пластичної деформації. Наприклад, нержавіюча аустенітна сталь 12Х18Н10Т після рівноканального кутового пресування при кімнатній температурі з розміром зерна 100 нм досягає межі текучості 1340 МПа, яка практично у 6 разів перевищує межу текучості цієї сталі після термообробки. При цьому пластичність зберігається на досить високому рівні ($\sigma = 27\%$). Міцність низьковуглецевих малолегованих сталей із субмікроструктурою при кімнатній температурі в 2–2,5 раза вища від тих, що серійно випускаються, при збереженні пластичності та високої в'язкості [15].

При переході до наноструктурного стану спостерігається поліпшення механічних характеристик і в різних сплавах. Наноструктурний чистий титан, отриманий інтенсивною пластичною деформацією, має вищі властивості міцності ($\sigma_B = 1100$ МПа) і близькі значення пластичності у порівнянні з широко використовуваним сплавом Ti-6Al-4V. Титанові сплави типу ВТ1, ВТ8

тощо у наноструктурованому стані (розмір зерна < 100 нм) мають характеристики міцності в 1,5–2 рази вищі при збереженні пластичності у порівнянні з грубозернистими аналогами. Схожа ситуація і жароміцним сплавом RSR Rene 80 при переході до субмікроскопічної структури [16].

Зменшення розміру зерна сприяє прояву надпластичності. Наприклад, відносне видовження до руйнування нікелю зернистістю 35 нм при температурі 420°C становить приблизно 1000 %, а в субмікрокристалічному сплаві Al-3%Mg-0,2 %Se при температурі 400°C отримано видовження 2280 %. У алюмінієвих сплавів з нанокристалічною структурою значно підвищується зносостійкість [15].

Останнім часом широкого застосування набувають керамічні матеріали у наноструктурованому стані. У широкому сенсі до керамічних матеріалів відносять клас матеріалів, які одержують спіканням дисперсних порошків, досить тугоплавких та крихких у звичайних умовах речовин різної фізико-хімічної природи: нітриди, оксиди, карбіди, силіциди, бориди тощо. Керамічні матеріали іноді поділяють на дві групи: конструкційні та функціональні. До першої відносять матеріали, які використовують для створення механічно стійких конструкцій і виробів, а до другої – кераміку з особливими оптичними, магнітними й електричними властивостями. Серед ключових складових сучасних керамічних матеріалів варто виділити оксиди кремнію, алюмінію, титану, цирконію, берилію, магнію, а також нітриди алюмінію, кремнію, бору та карбіди тугоплавких металів, бору, кремнію тощо [17].

Практичне використання конструкційної кераміки зумовлене низкою її характеристик, таких як велика твердість, стійкість до корозії, міцність, висока температура експлуатації. Однак слабкими сторонами кераміки є її низька тріщиностійкість та пластичність. Випробування нанокераміки показали збільшення пластичності при низьких температурах, а при високих температурах нанокристалічні матеріали можуть навіть виявляти властивості надпластичності.

Серед різноманіття конструкційної кераміки варто виділити нітриди і карбіди тугоплавких металів (титан, вольфрам, тантал, ванадій тощо) та їх сплавів. Основні галузі використання цих матеріалів – створення зносостійких інструментів та різноманітних деталей (таких як фрези, свердла, вузли прокату, штампи тощо). Обсяг їх виробництва постійно зростає. Багато матеріалів конструкційного призначення базуються на основі оксидної нанокераміки,

зокрема на ZrO_2 , Al_2O_3 , V_2O_3 , TiO_2 тощо. Серед оксидної нанокераміки особливе місце займає діоксид цирконію. Нанокераміка, виготовлена на основі ZrO_2 , гарантує високу стійкість виробів у важких умовах, відзначається підвищеною стійкістю до впливу високих температур, зношування, термічних ударів і радіаційного випромінювання. Наприклад, термін експлуатації плунжерів шахтних pomp, виготовлених з ZrO_2 , перевищує термін служби плунжерів із легованої сталі у десять разів [17].

Нанокераміка на основі діоксиду цирконію відкриває нові перспективи для альтернативних джерел енергії. Наразі активно розробляються паливні елементи з керамічним оксидним електродом (SOFC), виготовлені з діоксиду цирконію. Ці елементи уможливають пряме перетворення хімічної енергії палива на електричну з високою ефективністю, оціненою на рівні 50...60 % [17].

До категорії конструкційних та функціональних наноматеріалів відносять також багатошарові композити, які складаються з нанорозмірних шарів. Такі нанокompозити отримують різними методами осадження, і товщина шарів у них змінюється від кількох до десятків нанометрів. Наприклад, багатошаровий нанокompозит Mo-W товщиною 50 мкм, сформований з молібденових та вольфрамових шарів товщиною 4 нм, демонструє твердість і міцність, що в 15 разів перевищують відповідні характеристики відповідних сплавів. Ще вищі показники міцності та провідності проявляють багатошарові нанокompозити на основі Fe-Cu I, Fe-A з товщиною шарів 20 нм [16].

Нанокompозити є також ефективним матеріалом для створення конструкцій накопичувачів і зберігання водню. Одними з ефективних матеріалів-гетерів є інтерметаліди системи Ti-Al. Додаткове введення ніобію у систему Ti-Al призводить до підвищення адсорбції водню за рахунок утворення нанорозмірних фаз типу Ti_2AlNb з орторомбічними ґратками, в результаті чого відбувається збільшення у п'ять разів поглинання водню [18].

4. Сучасні методи отримання нанопорошків металів

Сучасні способи отримання нанопорошків можна розділити на дві групи: **фізичні** та **хімічні** (рис. 13) [19].

До **фізичних методів** відносять: осадження з газової фази, розпилення розплаву, механічне подрібнення.

Осадження з газової фази є одним з методів отримання нанопорошків, який вже давно відомий та широко використовується. Ця популярність

пояснюється тим, що технології випаровування речовини за допомогою різних джерел високої енергії та подальше її осадження з парової фази є досить стабільними, легко контролюються та забезпечують високу чистоту порошку, особливо коли використовуються камери із контрольованою атмосферою (такі як вакуумні камери або камери, заповнені інертними газами, наприклад, гелієм, аргоном або ксеноном).

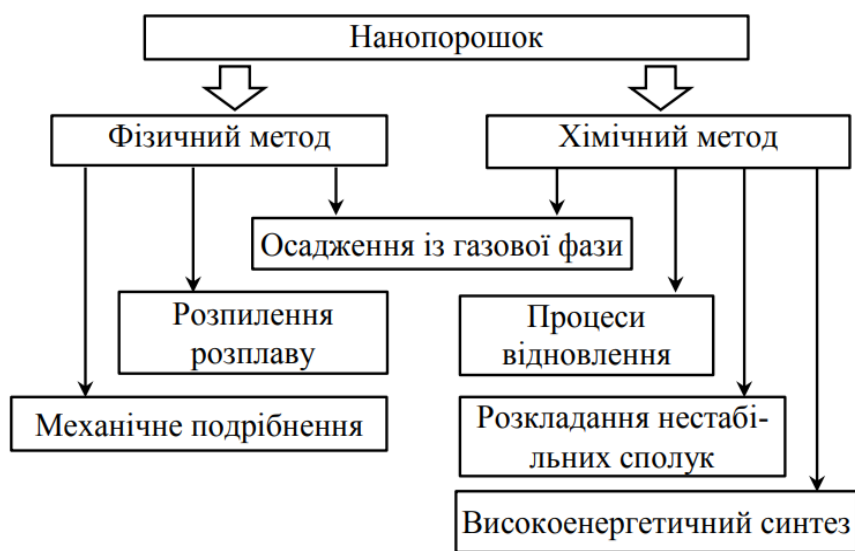


Рис. 13. Сучасні способи отримання нанопорошків

Розмір частинок порошку може залежати від методу їх отримання та технологічних параметрів і зазвичай коливається від 5 до 100 нм (рис. 14). Варіювання інертного газу у камері від гелію до ксенону при однаковому тиску (що впливає на густину газу) може призвести до зміни розміру частинок у декілька разів. При однакових умовах випаровування частинки, отримані з тугоплавких металів, зазвичай матимуть менший розмір.

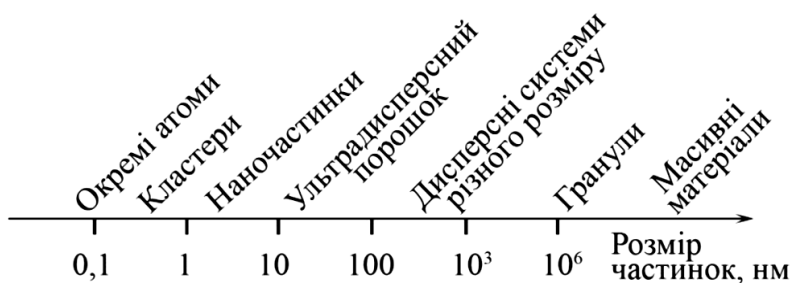


Рис. 14. Класифікація дисперсних матеріалів за розміром дисперсної фази

До методів осадження з газової фази відносять термічне випаровування, вибухове випарування та випарування в потоці інертного газу [20].

Під час *термічного випаровування* масивного матеріалу, яке може виконуватися різними способами, такими як резистивне, височастотно-індукційне, електронно-променеве, електродугове, плазмове або лазерне нагрівання, відбувається формування нанопорошку за певною схемою. Вона включає підведення теплової енергії до матеріалу, який має бути розпиленим, перетворення його у газоподібний стан, конденсацію на охолоджену підкладку та збирання порошку у контейнер для подальшого зберігання. На рис. 15 наведено приклад такої установки. Частинки порошку можуть мати як сферичну форму, так і ограновану, і можуть бути отримані з металів, інтерметалевих сполук або неметалевих матеріалів. Однією з переваг цього методу є отримання чистих порошоків з вузьким розподілом частинок за розміром, але недолік полягає у низькій продуктивності процесу через відсутність великих установок для використання у промисловому масштабі.

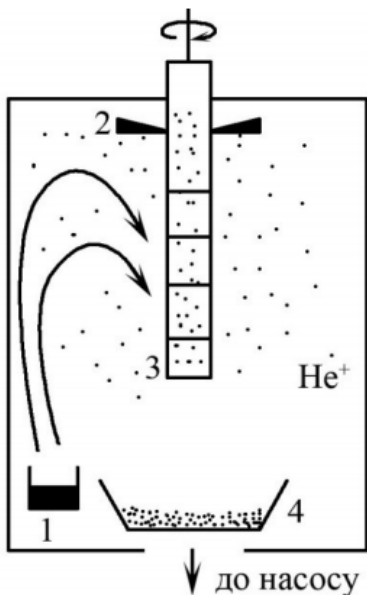


Рис. 15. Схема отримання нанопорошків методом конденсації матеріалу з парової фази: 1 – тигель з матеріалом; 2 – лопатка для збирання нанопорошку; 3 – стрижень, який охолоджується; 4 – ємність для нанопорошку

Вибухове випаровування полягає у надпотужному вивільненні енергії за дуже короткий проміжок часу. Під час цього процесу матеріал швидко переходить пароподібний стан, і після цього, внаслідок різкого збільшення об'єму, швидко охолоджується, утворюючи частинки дуже малого розміру (5–10 нм). Однак метод має певні недоліки, серед яких великі витрати енергії, що призводять до високих витрат на виробництво порошку, нерівномірність розміру частинок, що вимагає їх подальшого сортування. Крім того, через те, що частина матеріалу може не встигнути перетворитися у газоподібну фазу, можуть утворюватися рідкі краплі мікронних розмірів.

Розпилення розплавленого матеріалу є однією з широко використовуваних методик, яка ґрунтується на швидкому розпиленні та швидкому охолодженні розплаву вихідного матеріалу. Цей метод дозволяє отримувати порошок з розмірами від 10 нм до 500 нм. Використання методів ударного або електрогідродинамічного розпилення розплавленого матеріалу призводить до утворення частинок порошку розміром від 10 нм до 50 мкм з аморфною або нанокристалічною структурою. Після цього вони піддаються подрібненню за допомогою механічних методів, що є основним недоліком цього методу (рис. 16).

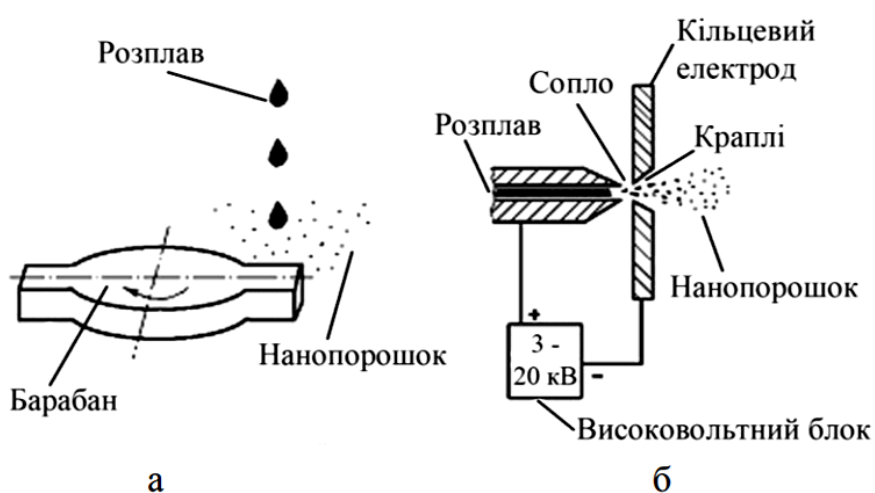


Рис. 16. Схема отримання нанопорошку з розплаву: а – ударне розпилення матеріалу; б – електрогідродинамічне розпилення матеріалу

У методі випаровування в потоці інертного газу метал випаровується в потоці інертного газу, наприклад, з краплі розплаву на кінці дротини, яка підігрівається високочастотним магнітним полем (рис. 17). Розмір утворених частинок зі збільшенням швидкості потоку газу може зменшуватися від 500 нм до 10 нм [19].

Метод механічного подрібнення використовується для одержання частинок розмірами від 5 нм до 200 нм за допомогою жорен. Розмір частинок визначається температурою плавлення металу і тривалістю процесу подрібнення, яка може коливатися від кількох годин до декількох днів. При вищих температурах плавлення металу і триваліших процесах подрібнення одержують частинки менших розмірів. Наприклад, при однаковій температурі та тривалості подрібнення найменший розмір частинок алюмінію (з температурою плавлення 660°C) становить 20 нм, вольфраму (з температурою

плавлення 3395°C) – 6 нм. Основним недоліком цього методу вважають забруднення нанопорошку через зношування робочих частин обладнання.

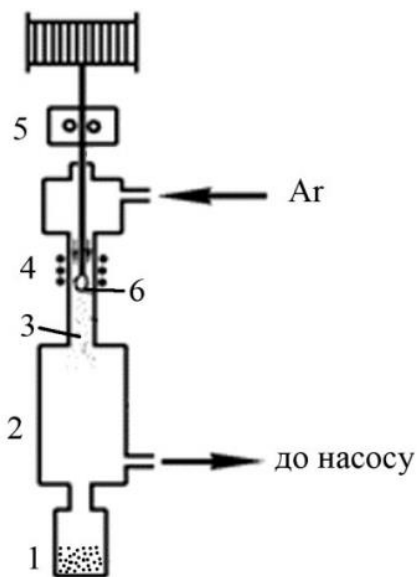


Рис. 17. Схема установки отримання нанопорошку металу в атмосфері інертного газу: 1 – ємність для нанопорошку; 2 – посудина для фільтрування наночастинок за розміром; 3 – газоподібна фаза металу; 4 – індукційний нагрівач; 5 – механізм подачі дротини; 6 – крапля розплавленого металу на кінці дротини

Подрібнення твердих тіл здійснюють у високоенергетичних установках. В установці, зображеній на рис. 18, порошок диспергується в плазмовому струмені на атомарному рівні і кристалізується в зоні охолодження у вигляді нанодисперсних частинок. У генераторі, (рис. 1) металевий дріт випаровується при індукційному нагріванні, краплі диспергують потужним струменем газу і конденсуються у зоні охолодження.

Властивості наноматеріалів відрізняються від властивостей макросистем, що зумовлено будовою наночастинок і її енергетичним станом.

У наноматеріалах змінюються властивості [21]:

- хімічні: поява хімічної активності (наприклад, у золота), збільшення розчинності;
- фізичні (наприклад, зниження температури плавлення);
- механічні (наприклад, твердість SiO_2 збільшується у чотири рази; міцність нанониток збільшується в кілька разів);
- оптичні (наночастинки можуть ставати прозорими через те, що розмір світлової хвилі більший за розмір частинки);
- магнітні (магнітний момент кожного атома збільшується при зменшенні розміру частинки);
- електронні (наночастинки поведуться, як квантові точки; перехід деяких металів у неметали (втрата електропровідності) Pb, Ag, Pd, Ni, Cu; поява надпровідності).

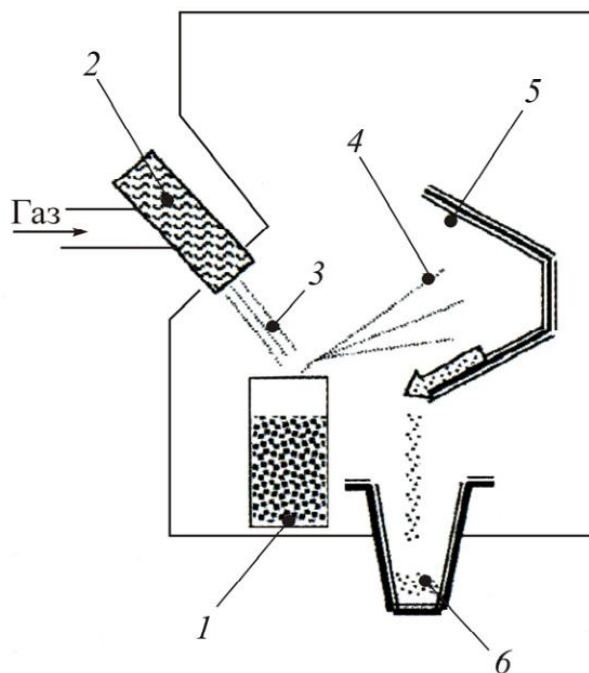


Рис. 18. Схема установки для отримання нанопорошків методом плазмового струменя: 1 – тигель із зразком; 2 – плазмотрон; 3 – плазма; 4 – зона конденсації; 5 – пластинчасті збірники наноматеріалу з водяним охолодженням; 6 – ємність для збирання продуктів

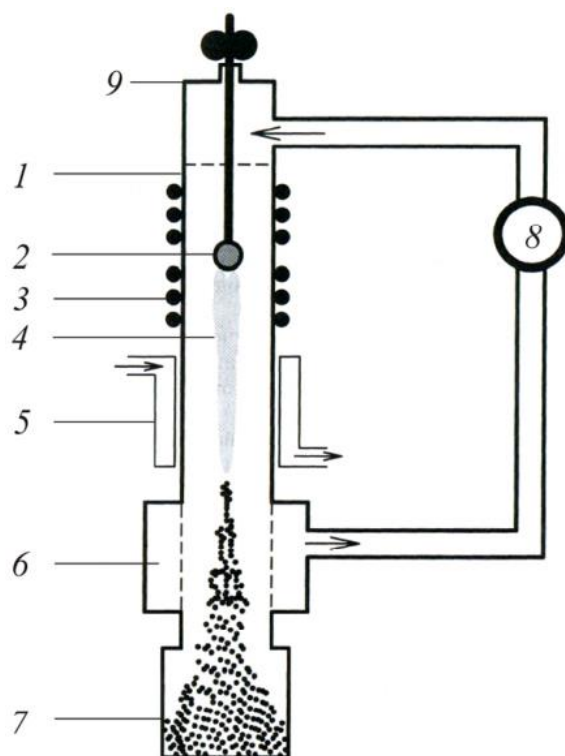


Рис. 19. Схема отримання високодисперсних металевих порошків у левітаційно-струменевому генераторі: 1 – випарник; 2 – крапля; 3 – індуктор; 4 – аерозоль; 5 – холодильник; 6 – фільтр; 7 – контейнер; 8 – помпа; 9 – механізм подачі дроту

Наночастинки мають низку особливостей. Першою особливістю структури наночастинок, отриманих будь-якими методами, є їхнє агрегування в об'єкти мікронних розмірів (рис. 20) [22].

Частка поверхні в наноматеріалах відіграє значну роль у формуванні їх властивостей. Схильність до агрегування обумовлена великим числом поверхневих атомів з «обірваними» зв'язками (рис. 21).

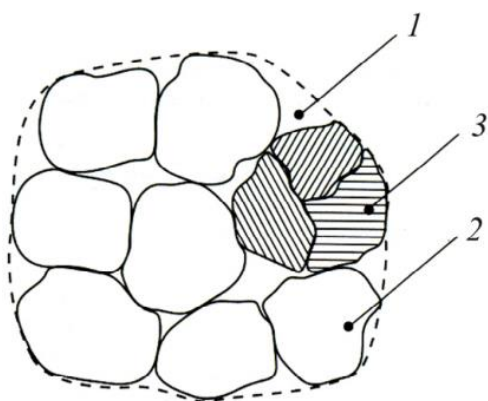


Рис. 20. Структура агрегату з наночастинок: 1 – агрегат; 2 – частинка; 3 – область когерентного розсіювання

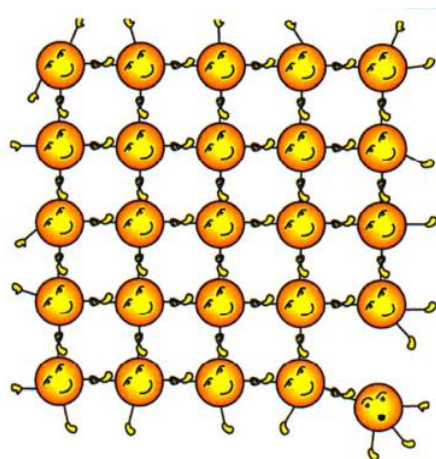


Рис. 21. Обірвані зв'язки атомів на поверхні частинки

Поверхнева енергія частинки залежить від кількості «обірваних» зв'язків атомів (рис. 22): що менша частинка, то більша доля поверхневих атомів:

$$\gamma = 1/2 \cdot N_b \epsilon \rho_a,$$

де γ – поверхнева енергія; N_b – число обірваних зв'язків; ϵ – сила зв'язку; ρ_a – густина поверхневих атомів.

Зі збільшенням площі поверхні (зменшенням радіусу частинки) поверхнева енергія зростає, тому наносередовища у порівнянні зі звичайними матеріалами мають більшу енергію.

Наслідком надлишку енергії є те, що наночастинки повинні самовільно укрупнюватися, щоб зменшити свою внутрішню енергію, тому вони схильні до самоорганізації.

Особливості структури поверхні наночастинок зумовлюють активну взаємодію між ними. Розглянемо цю взаємодію на прикладі живої природи.

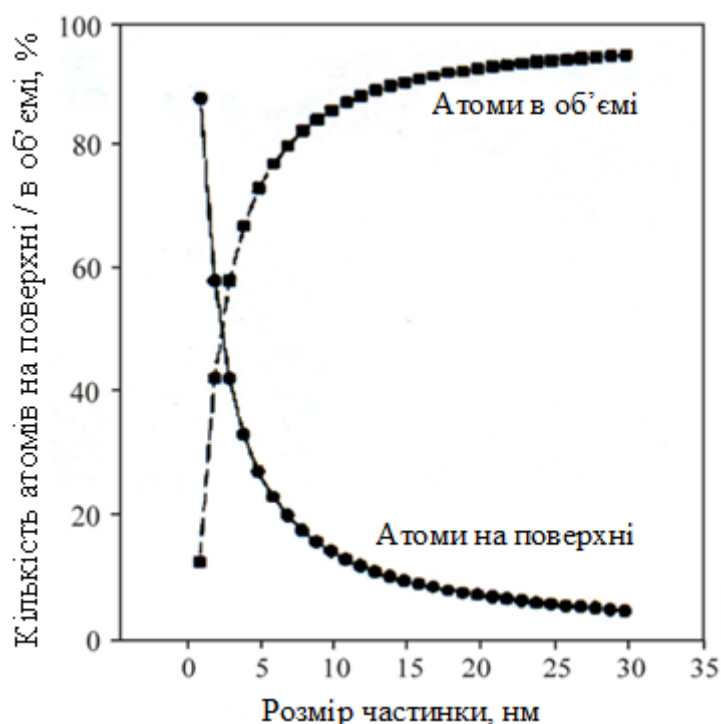


Рис. 22. Залежність кількості атомів в об'ємі і на поверхні частинки від її розміру

Ящірки гекони відзначаються здатністю лазити по крутих схилах, підніматися по гладких стінах зі швидкістю один метр за секунду, і навіть пересуватися догори ногами по стелі з полірованого скла. Пальці гекона майже ідеально прилипають до будь-якої поверхні, будь то метал, дерево, скло або граніт, навіть у воді або у вакуумі, і при цьому вони залишаються чистими, незношеними і не прилипають випадково до непотрібних місць. Пояснення цих здібностей гекона виявилось справжнім викликом для науковців, а пошук розгадки зайняв майже 100 років. У геконів немає залоз, які виділяють секретцію, так що теорія про клейкі речовини відпала відразу. Пропонувалися кілька пояснень: присмокування, електростатичне тяжіння, тертя, зчеплення між шорсткими поверхнями. У кінцевому підсумку дослідники виявили, що взаємодія щетинок на лапках гекона з поверхнею базується на зв'язках близької взаємодії між молекулами, отже, вони прилипають завдяки силам Ван-дер-Ваальса [21].

Ця сила діє на дуже коротких відстанях (між молекулами) і різко зменшується при збільшенні відстані між поверхнями. Вона починає діяти тільки тоді, коли поверхні максимально близько наближаються одна до одної. Але щоб така слабка сила утримувала гекона на вертикальній стіні, необхідна величезна площа близького контакту між лапкою гекона і поверхнею.

Складна будова лапок гекона забезпечує таку можливість (рис. 23). Використовуючи електронний мікроскоп, вчені вивчали гекона. Вони виявили, що на його пальцях є дуже тонкі волоски (щетинки), завдовжки лише 100 мкм, або 0,1 мм (дві товщини людської волосини). Вони дуже щільно розміщені – до 14 400 щетинок на 1 мм², або близько 1,5 млн на 1 см² (рис. 23, б).

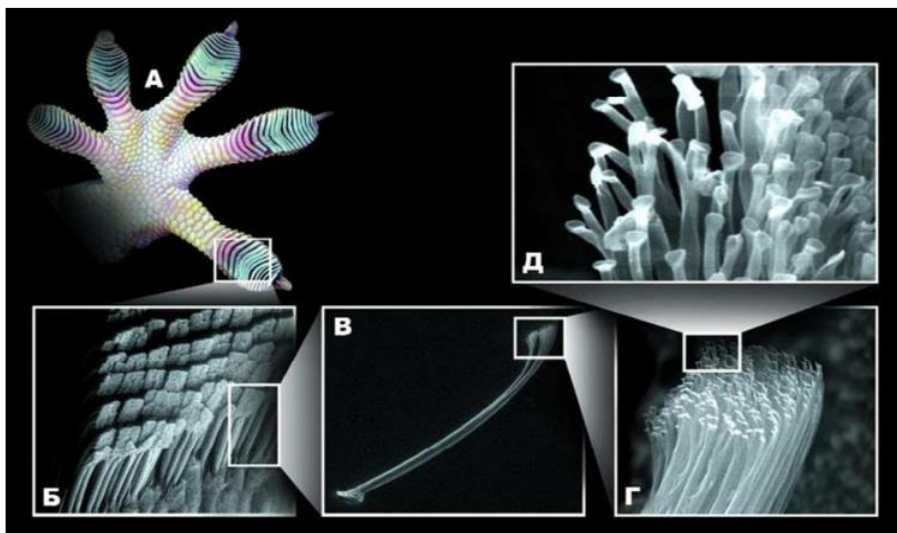


Рис. 23. Будова лапок гекона

Кожна щетина, зі свого боку, на кінці розходить на 400-1000 відгалужень (рис. 23, в). Кожне відгалуження закінчується на кінці трикутною лопаткою (рис. 23, г, д). Ці лопатки неймовірно крихітні і становлять у ширину всього 0,2 мкм, кожна лапка гекона площею контакту трохи більше 1 см² може торкатися до поверхні двома мільярдами закінчень. Щоб розмістити таку ж кількість людських волосин із середньою щільністю, потрібна була б площа цілого футбольного поля. Звичайна лапка гекона мала б набагато меншу площу близького контакту, лише в окремих місцях молекули лапки дуже близько наближалися б до поверхні. А особлива лапка гекона, завдяки щільному розміщенню щетинок і їх поділу (на кінці) до тисячі розгалужень, має у мільйони разів більшу площу близького контакту, а значить, і силу прилипання (сили Ван-дер-Ваальса). Саме дизайн (геометрія), а не хімічний склад поверхні, дає можливість гекону утримуватися навіть на стелі.

Одна щетина гекона досить міцна для утримання цілої мурашки. Теоретично 6 млн щетинок гекона можуть генерувати силу, достатню для утримання ваги двох людей.

Наслідком надмірного запасу енергії є і зниження температури плавлення

наночастинок (рис. 24). Температура плавлення знижується на величину ΔT

$$\Delta T = T_T - T \sim 1/r$$

де ΔT – зниження температури плавлення наночастинок; T_T – температура плавлення таблична; T – температура плавлення справжня; r – радіус частинки.

При плавленні поверхнева енергія речовини зменшується. При цьому вивільняється частина енергії, яка може бути використана на розплавлення.

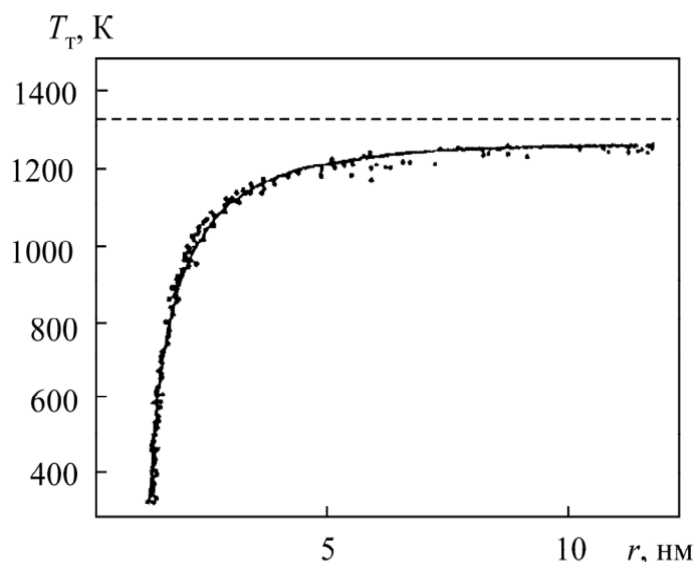


Рис. 24. Залежність температури плавлення частинки золота від її розмірів

Структура та, відповідно, особливості шкіри лапок гекона надихнули інженерів створити штучний матеріал, який імітує її властивості. У лабораторії Дрейпера в Кембриджі (США), яка працювала над проектами для Агентства передових оборонних досліджень, був розроблений матеріал GeckSkin (рис. 25).



Рис. 25. Структура матеріалу GeckSkin



Рис. 26. Людина з рукавицями з тканини GeckSkin

Матеріал GeckSkin – це спеціальна тканина, яка використовується для

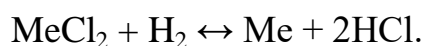
виготовлення рукавичок. Вона просочена клейким еластомером, що відтворює мікроструктуру шкіри гекона, дозволяючи людині прикріплюватися до поверхні, подібно до гекона. Розробники дослідили і продемонстрували як науковець у спеціальному обладнанні вагою 218 кг піднімається по скляній стіні (рис. 26).

Методи хімічного осадження з парової фази базуються на застосуванні хімічних реакцій сполук металів, які перебувають у газовій фазі. У реакційній камері відбувається термічний розпад сполук з утворенням твердого осаду у вигляді нанопорошку та газоподібних речовин, причому процеси відновлення та розпадань можуть повторюватися декілька разів. Початкові речовини включають галогеніди (хлориди) металів, алкільні сполуки, карбоніли, оксихлориди. Розмір отриманих частинок можна налаштувати за допомогою температури та швидкості осадження.

Технологія **отримання нанопорошків металів методом відновлення** полягає у використанні хімічних реакцій, які забезпечують конвертацію газоподібних сполук металів у тверду форму нанопорошку. У реакційній камері проходить взаємодія пари металів з хімічними сполуками або газами, які діють як реагенти. Ці сполуки можуть бути галогенідами металів, алкільними сполуками, карбонілами тощо. Під впливом теплоти чи іншого джерела енергії відбувається термічний розпад реагентів, у результаті якого металеві атоми відновлюються із газоподібної фази до твердої форми. Цей процес може супроводжуватися повторними реакціями відновлення та розпадань, що дає змогу досягти бажаного розміру та форми нанопорошку.

Технологія відновлення дозволяє одержувати високоякісні та досконало дисперговані (з однаковими розмірами) нанопорошки, які мають широкий спектр застосувань у різних галузях промисловості, включаючи виробництво електроніки, кераміки, каталізаторів тощо.

Як приклад можна навести таку типову реакцію відновлення металу в потоці водню:



Метод розкладання нестабільних сполук передбачає термічний і радіаційний розклад, який зумовлює утворення частинок порошку з розмірами від 20 нм до 300 нм. Основною перевагою цього методу є можливість отримання чистих (навіть хімічно інертних) елементів, таких, наприклад, як Pd та Cd. Високоенергетичний синтез заснований на реакціях, що протікають з

великою швидкістю в умовах, які далекі від рівноваги, під впливом високоенергетичної дії. Для отримання нанопорошків використовують детонаційний і плазмохімічний методи. При детонаційному синтезі на суміш початкових реагентів діє ударна хвиля з тиском до декількох десятків ГПа. Цей процес дає змогу отримувати алмазний нанопорошок із середнім розміром частинок 4 нм, а також нанопорошки Al_2O_3 , MgO , ZrO_2 , ZnO [19].

Плазмохімічний синтез здійснюють за допомогою низькотемпературної плазми, дугового або тліючого розрядів. Висока температура плазми (до 10^5 К) і великі швидкості взаємодії забезпечують перехід практично всіх початкових речовин у газоподібний стан, з подальшою конденсацією продуктів у вигляді нанопорошку з частинками правильної форми, які мають розміри від 10 нм до 200 нм. З використанням активних середовищ, які містять С, N, В або О, можна отримати нанопорошки карбідів, нітридів, боридів, оксидів різних елементів, а також багатокомпонентні сполуки [20].

Метод пластичної деформації. Метод інтенсивної пластичної деформації дозволяє отримати компактні, щільні дрібнозернисті матеріали з середнім розміром зерен у діапазоні від 30 нм до 500 нм. Його суть полягає у проведенні пластичної деформації, що призводить до значного роздроблення структури матеріалу та формування неупорядкованої структури, але зберігає залишкові ознаки рекристалізованого аморфного стану. Для цього використовують деформації, такі як кручення під гідростатичним тиском, рівноканальне кутове пресування, прокатування, всебічне кування, які призводять до значного подрібнення мікроструктури металів і сплавів до нанорозмірного рівня. Важливо, щоб деформація відбувалася однорідно по всьому зразку, щоб забезпечити стабільність властивостей матеріалу, при цьому уникнувши механічних пошкоджень та тріщин. Ці методи дають змогу отримувати об'ємні безпористі металеві наноматеріали, але з нерівномірною структурою [19].

Методи отримання тонких плівок / покриттів. Методи отримання тонких плівок і покриттів можна умовно поділити на технології, які базуються на фізичних і хімічних процесах. До першої категорії відносять осадження з газової фази (такі як термічне випарування, іонна імплантація, катодне та магнетронне розпилення), газотермічне (плазмове) напилення, лазерні методи (такі як легування або імплантація, аморфізація поверхні за допомогою лазерного випромінювання) [23]. Недоліками цих методів є складність визначення технологічного режиму для отримання покриття, особливо у

випадках, коли необхідна висока точність хімічного складу сполук, а також потреба у спеціальній підготовці поверхонь для нанесення покриттів.

Метод *термічного випаровування* реалізують у вакуумі при тисках приблизно 10^{-3} – 10^{-5} Па. Під час нагрівання речовина переходить у парову фазу і вільно осаджується на підкладку, яка має значно нижчу температуру, ніж парова фаза.

Метод термічного випаровування має свої переваги, такі як відносна простота обладнання і контролю процесу, але його недоліками є низька адгезія покриття через обмежену енергію атомів або молекул, які осаджуються на підкладку, а також висока чутливість до чужорідних плівок і забруднень, які можуть бути на поверхні підкладки.

До групи *технологій, які ґрунтуються на хімічних процесах*, відносять: хімічне осадження із газової фази; осадження за допомогою плазми тліючого розряду; світлову та електронну літографію; осадження із розчинів; хімічне та електрохімічне окислення (анодування).

Ці методи передбачають осадження плівок на нагріті деталі, де сполуки металів перебувають у газоподібному стані. Найбільш сприятливі умови для протікання хімічних реакцій часто настають при температурах від 500°C до 1500°C . Осадження зазвичай відбувається у спеціальній камері з низьким тиском за допомогою хімічних реакцій відновлення та піролізу.

Кристалізація аморфних сплавів. Аморфні металеві сплави відрізняються відсутністю впорядкованого розміщення атомів на великій відстані, що досягається завдяки надшвидкому охолодженню підкладки, на яку наноситься матеріал у газоподібному, рідкому або іонізованому стані. Можливість досягнення аморфного стану залежить від хімічного складу та швидкості охолодження. Для створення нанокристалічної структури в аморфному сплаві потрібна спеціальна термообробка, при якій формуються багато центрів кристалізації, але ріст кристалітів відбувається повільно [24].

Отже, основні методи отримання порошків для виготовлення наноматеріалів можна згрупувати так: випаровування і конденсація, високоенергетичне руйнування, синтез та термічний розклад, які, у свою чергу, поділяють на кілька варіантів. За допомогою певного методу можна отримати необхідні порошки металів, оксидів чи сполук (табл. 2).

Таблиця 2.

Основні методи отримання порошків для виготовлення наноматеріалів

Метод	Варіант метода	Матеріали
<i>Фізичні методи</i>		
Випаровування і конденсація	У вакуумі або в інертному газі	<i>Zn, Cu, Ni, Al, Be, Sn, Pb, Mg, Ag, Cr, MgO, Al₂O₃, Y₂O₃, ZrO₂, SiC</i>
	У реакційному газі	<i>TiN, AlN, ZrN, NbN, ZrO₂, Al₂O₃, TiO₂</i>
Високоенергетичне руйнування	Подрібнення	<i>Fe—Cr, Be, Al₂O₃, TiC, Si₃N₄, NiAl, TiAl, AlN</i>
	Детонаційна обробка	<i>BN, SiC, TiC, Fe, алмаз</i>
	електричний вибух	<i>Al, Cd, Al₂O₃, TiO₂</i>
<i>Хімічні методи</i>		
Синтез	Плазмохімічний	<i>TiC, TiN, Ti(C,N), VN, AlN, SiC, Si₃N₄, BN, W</i>
	Лазерний	<i>Si₃N₄, SiC, Si₃N₄-SiC</i>
	Термічний	<i>Fe, Cu, Ni, Mo, W, BN, TiC, WC-Co</i>
	Саморасповсюджуючийся високотемпературний синтез (Self-propagating high temperature synthesis (SHS))	<i>SiC, MoSi₂, AlN, TaC</i>
	Механохімічний	<i>TiC, TiN, NiAl, TiB₂, Fe-Cu, W-Cu</i>
	Електрохімічний	<i>WC, CeO₂, ZrO₂, WB₄</i>
	В розчині (розчинний)	<i>Mo₂C, BN, TiB₂, SiC</i>
	Кріохімічний	<i>Ag, Pb, Mg, Cd</i>
Термічний розклад	конденсовані прекурсори	<i>Fe, Ni, Co, SiC, Si₃N₄, BN, AlN, ZrO₂, NbN</i>
	Газоподібні прекурсори	<i>TiB₂, ZrB₂, BN</i>

5. Нановолокна та волокнисті матеріали

Нановолокна та нанотекстиль (тканина, трикотаж, нетканка) не є готовими продуктами. Нановолокна широко використовують у техніці (наповнювачі композитних пластиків) у виробництві власне текстилю. Нанотекстиль використовується у виробництві одягу, головних уборів, взуття, предметів домашнього користування тощо.

Волокна і нановолокна можуть мати різне походження: природні (рослинні, тваринні) (рис. 27) та хімічні – рукотворні (рис. 28).

Природні волокна: рослинні (бавовна, льон, пенька тощо) і тваринні (вовна, натуральний шовк) природа створює спочатку нанооб'єктами, оскільки вони мають надзвичайно розвинену нанопористість розміром близько 1-50 нм (рис. 27). Так 1 г бавовняного волокна має сумарну внутрішню поверхню пор

$> 100 \text{ м}^2$. Природні волокна є нанопористими контейнерами для розміщення там наночастинок різної природи (органічні, неорганічні, антимікробні, струмопровідні, фотоактивні тощо). Так, фарбування волокон формує шляхом інкорпорування наночастинок барвника в нанопори.

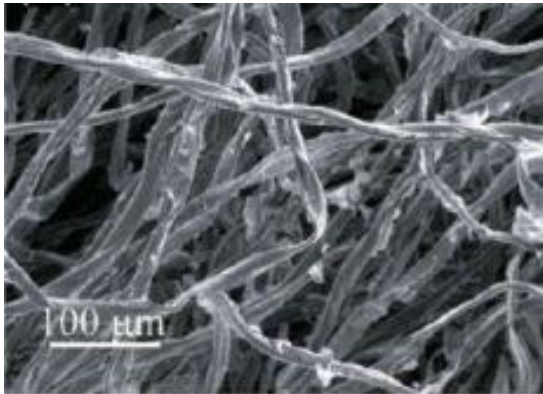


Рис. 27. Природні волокна з нанопористістю

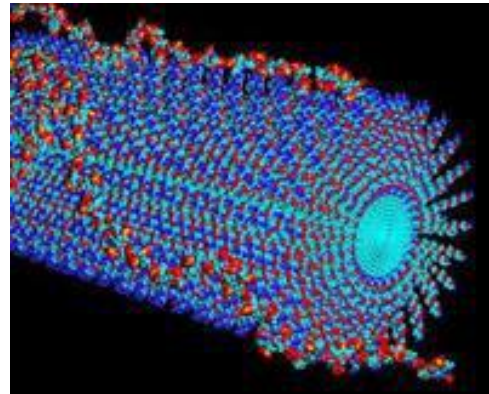


Рис. 28. Хімічні нановолокна

Волокна наповнені наночастинами почали виготовляти з 1990 р. Вони майже не зсідуються, мають підвищену міцність на розрив і стирання, знижену горючість, та залежно від природи введених наночастинок, можуть набувати інших захисних властивостей, потрібних для людини.

До структури будь-якого хімічного волокна (рис. 28) на стадії приготування розчину або розплаву волокнуотворювального полімеру можна вносити частинки наповнювача нанорозмірів. Залежно від хімічної природи наночастинок наповнювача отримують волокна з різними властивостями (висока механічна міцність, електропровідність, фотоактивність, антимікробні, сенсорні властивості, чутливість до зміни температури тощо). Звідси і потенційні сфери застосування: силові структури, спорт, медицина, домашній текстиль, одяг.

Як нанопаповнювачі використовують різні форми вуглецю (у тому числі фулерени), природні мінерали, оксиди різних металів (Ti, Mn, Si, Zn тощо). В принципі немає обмежень щодо введення наночастинок будь-якої природи у структуру волокон. Сьогодні триває широкий пошук у цьому напрямку [25].

Вуглецеві нанотрубки також використовують як наповнювачі волокон, причому як з однією, так і з декількома стінками. Такі волокна набувають унікальних властивостей – вони в 6 разів міцніші та в 100 легші від сталі. А якщо їх на 5–20 % від маси наповнити вуглецевими наночастинами, то вони

стають електропровідними як мідь та стійкими до багатьох хімічних речовин. За допомогою армування вуглецевими нанотрубками отримують особливо міцні матеріали, з яких виготовляють екрани дисплеїв, сенсорів, сховища для рідкого палива, повітряні зонди тощо. Відомо, що якщо наповнити вуглецевими нанотрубками полівінілспиртове волокно, яке виготовляють за коагуляційною технологією прядіння, то воно стає в 120 разів витривалішим від сталльної дротини і в 17 разів легшим за волокно Кевлар (використовують у бронежилетах) (рис. 29) [26].



Рис. 29. Кевлар найвідоміше і міцне хімволокно, яке одержують за традиційною технологією і використовують у бронежилетах

Сьогодні досліджують та виробляють синтетичні волокна, наповнені наночастинками оксидів металів: ZnO, Al₂O₃, TiO₂, MgO. Такі волокна мають низку специфічних властивостей [16]:

- електропровідність;
- антимікробні властивості;
- УФ-захист;
- фотокаталітична активність;
- брудовідштовхувальні властивості;
- фотоокислювальна здатність у різних біологічних та хімічних умовах.

Актуальним у виробництві нановолокон є напрямок надання їм нанопористої структури. Це забезпечує хорошу теплоізоляцію, різке зниження питомої маси (одержання легких матеріалів), стійкість до розтріскування. Наповнюючи нанопори різними рідинами, твердими тілами і навіть газоподібними речовинами, нановолокна набувають різного функціонального призначення (медицина, біологічний захист, ароматизація текстильних полотен).

Наступний спосіб одержання нановолокон – виробництво ультратонких

волокон (діаметром до 100 нм). Вони мають хорошу сорбційну здатність та каталітичну активність.

Хімічні волокна можна створювати в ультратонких розмірах за допомогою спеціальної технології електропрядіння. Під час цього процесу розчин або розплав волокноутворювального полімеру, який виходить із філь'ери, піддається впливу електричного поля. Початково цю технологію використовували для виготовлення надтонких волокон для спеціальних фільтрів. Сьогодні електропрядіння використовують для виробництва ультратонких та нановолокон, які знаходять застосування у медицині, виробництві гігієнічних матеріалів (наприклад, прокладки, памперси) тощо.

Усі хімічні нановолокна знаходять дуже широко застосовуються у різних галузях техніки та в побуті. Особливо широке використання нановолокон у виробництві композитів; маючи підвищену міцність, нановолокна надають композиту дуже високі фізико-механічні властивості. Такі композитні матеріали використовують у виробництві сучасних ракет, літаків, болідів, катерів, яхт, автомобілів, саней, лиж, ракеток тощо.

З нановолокон, наповнених струмопровідними та сенсорними наночастинками, виготовляють нанотекстиль і спеціальний наноодяг, гнучкі екрани дисплеїв та інші пристрої аудіо- та відеотехніки.

Сьогодні розвиваються нові методи одержання волокон на основі принципів біоміметики та генної інженерії. В основу створення нових хімічних волокон лягла ідея відтворення природних процесів для одержання поліпептидних волокон та ниток комахами – шовкопрядами, павуками тощо. У США, Японії, Європі та Ізраїлі проводяться інтенсивні розробки зі створення синтетичних білкових волокон, які імітують структуру павутини, яка має надзвичайно цікаві фізико-механічні властивості [27].

Нитку, яку створює павук-кругопряд (рис. 30), за міцністю можна порівняти лише з небагатьма матеріалами, створеними людиною (рис. 31). Серед цих матеріалів «кевлар». Він має різноманітне застосування – від виробництва бронежилетів та спортивного спорядження до продуктів авіаційної промисловості. Проте перед кевларом у павутини є значна перевага: вона еластична, тобто здатна ефективно поглинати енергію. Перш ніж порватись, нитка може розтягнутися на тридцять відсотків, а то й удвічі. Така її якість стає надзвичайно цінною, коли треба ловити кулі або затримувати альпіністів, які падають з вертикальних скель.



Рис. 30. Павутина



Рис. 31. Тканина – павучий шовк

«Павуковий шовк» знайшов застосування в хірургії (нитки), у виготовленні невагомих та надзвичайно міцних бронежилетів, у рибальстві (легкі вудилища та рибальські снасті).

Нанотекстиль та нанотехнології у фінальному оздобленні.

Нанотекстиль (тканину, трикотаж, нетканку) виготовляють, використовуючи такі прийоми:

- використовуючи нановолокна різної природи та видів. При цьому властивості нановолокон переносяться на властивості нанотекстилю;
- при одержанні звичайного текстилю на стадії виробництва, як правило, у хіміко-технологічній фазі (оздоблювальне виробництво), використовуючи прийоми нанотехнології і нанопрепарати (нанодисперсії, наноемульсії), на текстиль наносять та закріплюють наночастинки, які надають текстилю різні властивості, які залежать від їх природи (хімічна будова, розмір, геометрія, сформована структура). Це можуть бути антимікробні, лікувальні, захисні, сенсорні та інші властивості.

Природні волокна є нанопористими контейнерами і депо для розміщення в них наночастинок різної природи (органічні, неорганічні, антимікробні, струмопровідні, фотоактивні тощо). Так забарвлення волокон формується шляхом інкорпорування наночастинок барвника в нанопори.

Під час останньої стадії обробки текстильних матеріалів застосовують наночастинки різних речовин у стані наноемульсій та нанодисперсій. Найвідомішою нанотехнологією заключної обробки є обробка Teflon, яка забезпечує масло-, водо- і брудозахисні ефекти. Для цього використовують наноемульсії фторвуглецевих полімерів. Ці гідрофобні наночастинки, завдяки розташуванню на зовнішній поверхні кожного окремого волокна, утворюють на

молекулярному рівні захисну поверхню, яка є своєрідною «парасолькою», на кшталт того, що існує на зовнішній поверхні рослин, шерсті тварин, пір'ї птахів. Ця поверхня не дозволяє волокну вбирати вологу і притягувати частинки бруду та пилу [28].

Тефлон – це торгова назва політетрафторетилену, який випускається у США. Він був відкритий у 1938 р. хіміком Роем Планкеттом із компанії «DuPont». У результаті досліджень зі фтормісними газами вчений виявив, що новостворений ним полімер неймовірно стійкий до будь-яких хімічних речовин, не руйнується під впливом сонячних променів, витримує великі перепади температур (рис. 32).

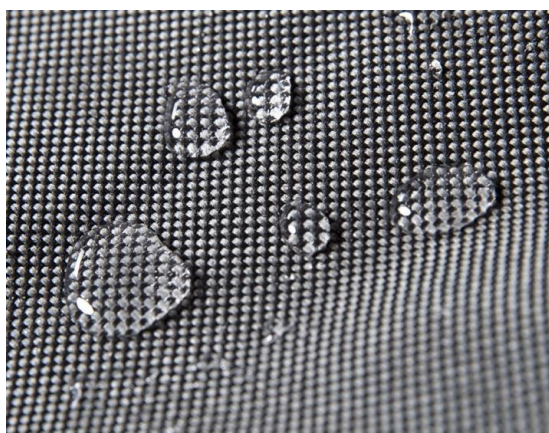


Рис. 32. Покриття DuPont Teflon для тканини

До 1956 р. тефлон використовували тільки у закритих військових областях і в космосі. Сьогодні тефлон застосовують практично скрізь, починаючи від сковорідок на кухні, взуття та одягу і до реставрації Статуї Свободи у США.

На противагу традиційним технологіям наночастинки, забезпечуючи аналогічні ефекти, не перекривають капілярно-пористу структуру волокнистого матеріалу, тобто такий матеріал «дихає», завдяки тому, що його мікропори залишаються відкритими для повітрообміну. Причому, забезпечені ефекти залишаються навіть після багатьох циклів прання. Оздоблення за нанотехнологіями забезпечує бавовноподібний зовнішнього вигляд текстильних матеріалів з хімічних волокон, а вироби з них не мнуться і набувають стійкої форми [29].

Сьогодні за допомогою нанотехнологій у різних країнах активно проводяться дослідження зі створення текстильних матеріалів, які

«самоочищаються». Дослідники ставлять перед собою завдання створити текстильний матеріал з ефектом, властивим живій природі: крилам метеликів та комах, панцирам жуків, листям рослин.

До прикладу, дослідники за допомогою електронного мікроскопу виявили, що листя та квіти деяких рослин (наприклад, листок лотосу) виробляють воскоподібну речовину – кутин, що складається із суміші вищих жирних кислот та їх ефірів. Ця речовина формує особливу структуру (нанорельєф) у вигляді «шипів» на поверхні листка (рис. 33, б). Вони також встановили, що контактний кут між поверхнею листка лотосу і краплею може досягати 170° (рис. 33, в). Крапля води, розташована на такій поверхні, має мінімальну площу контакту, тому набуває форми, подібної до сферичної. Площа контакту краплі води і листка становить менше 1 % від загальної площі краплі. Це призводить до того, що сили зчеплення між краплею води і частинками бруду виявляються набагато сильнішими, ніж між тими самими частинками та поверхнею листка. Тому крапля, скочуючись, прибирає забруднення з поверхні листка, що створює ефект самоочищення (рис. 33, г) [21].

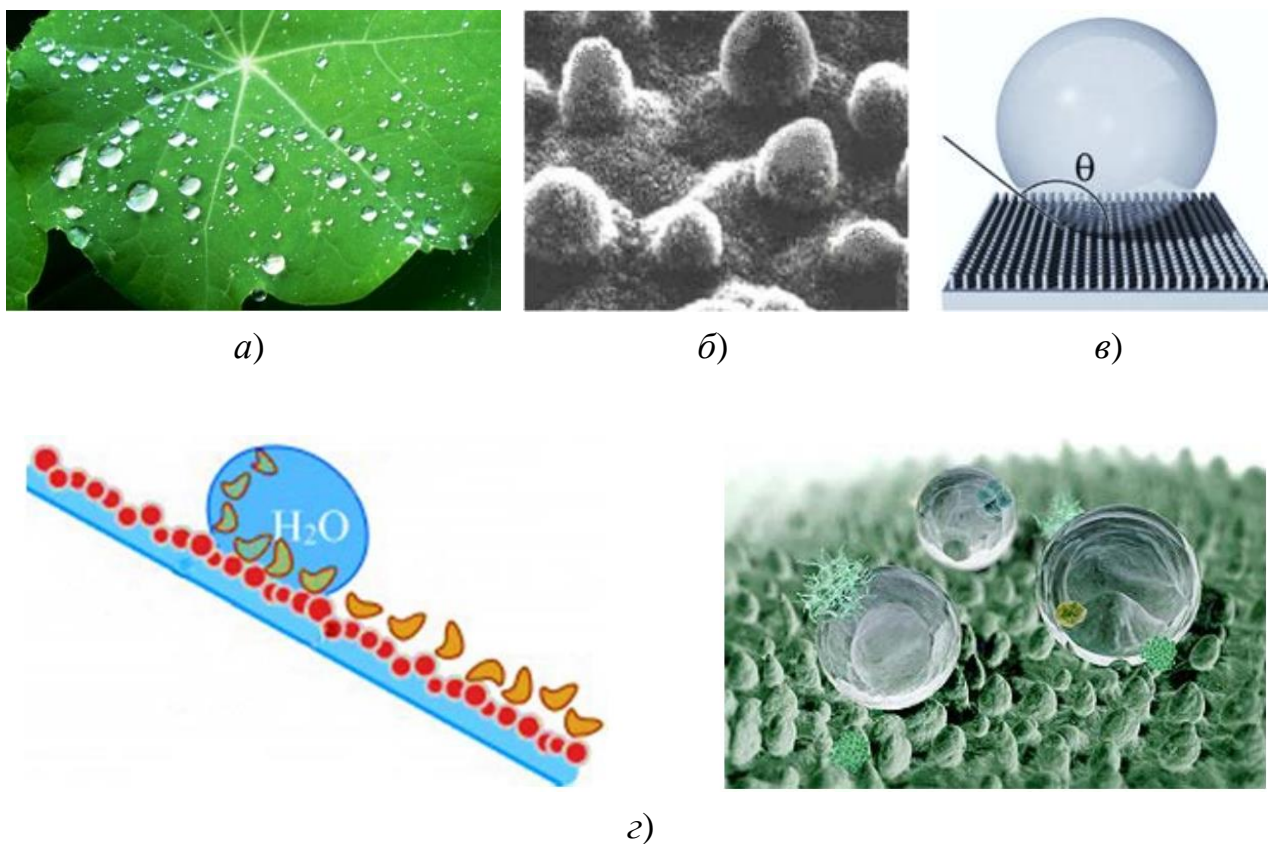
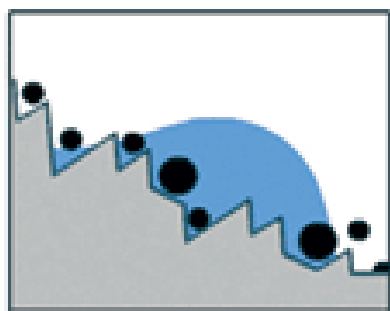


Рис. 33. Листок лотоса та нано-ефект самоочищення: а) крапля води на поверхні листка лотоса; б) нанорельєф поверхні литка; в) крапля води на супергідрофобній поверхні; г) ефект самоочищення

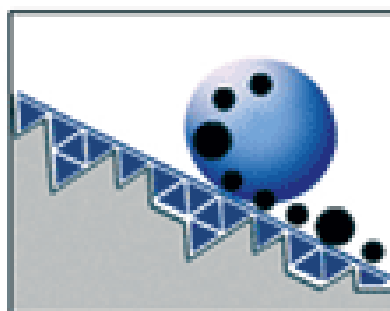
Останнім часом активно ведуться дослідження для розробки і виробництва виробів та покриттів, які можуть самостійно очищатися або залишатися стійкими до забруднення.

Технологія, яка базується на «ефекті лотосу», широко використовується в автомобільній промисловості для нанесення лакофарбових покриттів, обробки скла автомобілів, захисного водовідштовхувального й антибактеріального просочення внутрішнього покриття салону і тентів, модифікації гумотехнічних виробів тощо.

За допомогою наноемульсій на волокнах формується тонка тривимірна поверхнева структура, з якої вода, мастило та бруд легко скочуються та змиваються. «Супергідрофобний» ефект, який при цьому виникає, призводить до скочування круглої краплі, яка утворюється на поверхні матеріалу, при найменшому нахилі та не залишає жодних слідів. Разом із краплями води з поверхні волокна видаляються пил і сажа, тобто матеріалу притаманний ефект «самоочищення» (рис. 34) [27–29].



Частинки бруду та вода в мікропорах



Вода та частки не затримуються на самоочисній поверхні

Рис. 34. Ефект «самоочищення» текстильного матеріалу

За допомогою наноемульсій можна отримувати текстильні матеріали з бавовни, лицьова сторона яких має гідро-, масло-, брудовідштовхувальні властивості, а виворіт залишається гідрофільним, здатним поглинати потовиділення. Водночас такий матеріал може мати різні бактеріостатичні ефекти, наприклад, перешкоджання появі запаху поту. Основним призначення таких текстильних матеріалів є армійський та спортивний одяг, одяг для активного відпочинку тощо.

Впровадження мікрокапсул з корисними речовинами в нанотекстиль.

Технологія мікроінкапсуляції має три напрями:

- впровадження мікрокапсул з корисними речовинами (екстракти трав, зволожувальні компоненти тощо), які при носінні проникають у тіло через шкіру;
- впровадження у тканини мікродатчиків, які зчитують інформацію про пульс, тиск, температуру та відстежують стан власника та навколишнього середовища;
- створення тканин «для лінивих», які не потребують прасування, захищають від ультрафіолетових променів, вірусів, бактерій та шкідливих домішок, забезпечених антиалергенним або репелентним захистом, а також матеріалів, які зберігають тепло чи холод.

Нанокapsули, які називають наноконтейнерами, відкрили понад два десятиліття тому. Їхнє вивчення наптовхнуло вчених на думку: а якщо використовувати ці природні нанокapsули в нанотехнологіях? Адже вони є ідеальними контейнерами для доставки ліків, молекул ДНК, РНК; їх також можна використовувати у наноелектроніці.

Нанокapsула, інакше колоїдосома (англ. nanoparticle) – наночастинка, яка складається з полімерної, ліпідної або іншої оболонки, що оточує її внутрішню порожнину. Вона всередині порожня і не структурована. Фактично, наноконтейнери – це порожня оболонка, яка повинна щось утримувати. Зазвичай нанокapsула є сферичною порожнистою частинкою, оболонка якої утворена полімерами або фосфоліпідами (у цьому випадку вона називається ліпосомою або наносомою) (рис. 35), а всередині є низькомолекулярна речовина. Оболонка нанокapsул може бути виготовлена також з інших матеріалів, наприклад силікату кальцію, а також певним чином організованих молекул ДНК (рис. 36) [27].

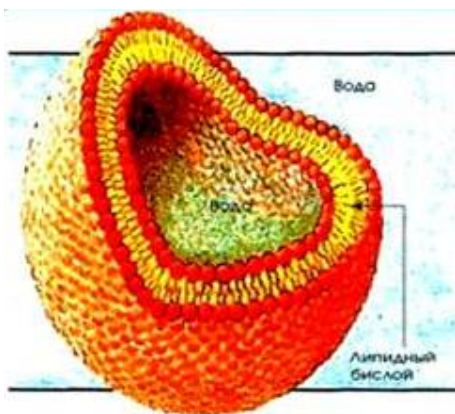


Рис. 35. Ліпосома

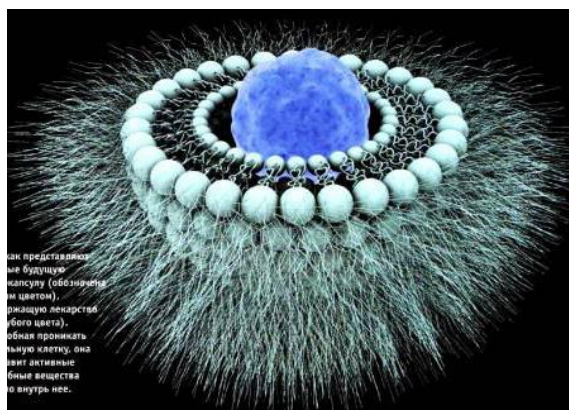


Рис. 36. Нанокapsула, яка містить всередині лікарство

Нанокапсули повинні бути хімічно стабільними, біоактивними, біосумісними з організмом, а також захищати поміщену речовину від негативного впливу, наприклад, розчинення у рідинах. Розміри нанокапсул зазвичай не перевищують 100 нм, а мікрокапсул – 600 мкм. Нанокапсули відзначаються високою проникною здатністю і можуть проникати навіть у головний мозок [27].

Біохімік Леонард Ром з Каліфорнійського університету, під керівництвом якого були відкриті у 1986 р. наноконтейнери, стверджує: «...це Троянські коні у медицині. Організм вважає їх своїми, у той час як всередині вони містять вантажі, які ми захочемо доставити всередину нього... Це дуже і дуже хороший доказ того, що можна використовувати наноконтейнери у ролі шатлів для доставляння ліків безпосередньо до живих клітин». Л. Ром бачить кілька можливих перспектив застосування цих наношатлів у майбутньому [25]:

- доставка ліків, у тому числі до клітин ракових пухлин;
- доставка або заміщення ензимів та ферментів, які призводять до порушення обміну речовин;
- стабілізація протеїнів для збільшення часу їх життя;
- створення біосенсорів, здатних відображати стан окремої клітини;
- доставка молекул ДНК для виправлення генетичних мутацій;
- детоксикація клітин та видалення з них шкідливих речовин;
- очищення навколишнього середовища від небезпечних біологічних об'єктів та токсичних металів;
- наноелектроніка: поміщені у наноконтейнері ключі на основі напівпровідників та металів, наноперемикачі тощо.

Нановолокна широко використовуються у техніці (наповнювачі композитних пластиків) у виробництві власне текстилю.

Нанотекстиль використовують у виробництві одягу, головних уборів, взуття, предметів домашнього користування тощо).

6. Сучасні нанокompозитні матеріали та їхнє практичне застосування

Нанокompозити – це клас матеріалів, які складаються з двох або більше фаз, одна з яких має нанометрові розміри. Ці матеріали відрізняються від традиційних композитів тим, що розмір наночастинок перебуває у межах від 1 нм до 100 нм. Вони можуть формуватися із різних речовин, включаючи

полімери, кераміку, метали та їх сплави. Наноккомпозити класифікують за характером зв'язності, формою структурних елементів та об'ємним розташуванням структурних елементів (рис. 37).



Рис. 37. Класифікація наноккомпозитів

Нанотехнології набувають широкого застосування і можуть використовуватися в усіх промислових галузях, зокрема у матеріалознавстві, медицині, війсьній промисловості, авто- й авіабудуванні, енергетиці, електроніці, екології тощо (рис. 38) [30].



Рис. 38. Області застосування наноккомпозитів

Перспективи практичного застосування нанокompозитів досить широкі через їхні унікальні властивості, які можна налаштовувати шляхом контролю розміру, форми та розподілу наночастинок. До основних переваг нанокompозитів належать: висока міцність і жорсткість, поліпшена втомостійкість, висока хімічна стійкість, а також нові функціональні властивості, які не зустрічаються у звичайних матеріалів.

Один із найважливіших напрямків застосування нанокompозитів – це в області технологій виробництва, включаючи авіаційну, автомобільну та космічну промисловість. Вони можуть бути використані для виробництва легких, але міцних конструкцій, поліпшених механічних компонентів, а також для створення захисних покриттів з високою стійкістю до корозії та зношування.

Крім того, нанокompозити знаходять застосування у медицині для створення біоматеріалів, таких як імплантати та протези, які поєднують у собі міцність металевих матеріалів і біологічну сумісність полімерів.

Отже, нанокompозити відкривають широкі можливості для новаторських застосувань у різних галузях, від промислового виробництва до медицини, забезпечуючи покращення властивостей матеріалів і створюючи нові можливості для технологічного прогресу.

Очікується, що металеві та керамічні нанокompозити сильно вплинуть на широкий спектр галузей промисловості, включаючи аерокосмічну, електронну та військову, натомість полімерні нанокompозити, ймовірно, використовуватимуться у катодах акумуляторів, мікроелектроніці, нелінійній оптиці, датчиках тощо. Поліпшені властивості включають значне підвищення міцності на розрив (приблизно удвічі) і жорсткості (приблизно вдвічі); відсутність залежного від часу зношування навіть при дуже низьких навантаженнях; підвищену міцність при високих температурах; підвищення твердості при високих температурах термічної обробки; можливість синтезу недорогих матеріалів; значне збільшення модуля Юнга [близько 105 %], модуля зсуву та міцності на руйнування (майже втричі порівняно з мікрокомпозитами). Вони досягаються, в основному, завдяки використанню нанорозмірного армування, яке забезпечує відповідну морфологію продуктів. У табл. 3 і табл. 4 приведено потенційні розробки, пов'язані з цими матеріалами у каталізаторах, датчиках, конструкційних матеріалах, електронних, оптичних, магнітних, механічних пристроях та пристроях перетворення енергії, запропоновані дослідниками у цій галузі [31].

Потенційне застосування керамічних нанокompatитних систем

Нанокompatити	Застосування
SiO ₂ /Fe	Високопродуктивні каталізатори, технологія зберігання даних
ZnO/Co	Польовий транзистор для оптичного фемтосекундного дослідження міжчастинкових взаємодій
Metal oxides/Metal	Каталізатори, сенсори, оптико-електронні пристрої
BaTiO ₃ /SiC, PZT/Ag	Електронна промисловість, високопродуктивні сегнетоелектричні пристрої
SiO ₂ /Co	Оптичні волокна
SiO ₂ /Ni	Хімічні сенсори
Al ₂ O ₃ /SiC, Si ₃ N ₄ /SiC	Конструкційні матеріали
Al ₂ O ₃ /NdAlO ₃ , Al ₂ O ₃ /LnAlO ₃	Твердотільні лазерні носії, люмінофори та оптичні підсилювачі
TiO ₂ /Fe ₂ O ₃	Магнітні носії високої щільності, ферорідини та каталізатори
Al ₂ O ₃ /Ni	Інженерні частини
PbTiO ₃ /PbZrO ₃	Мікроелектронні та мікроелектромеханічні системи

Потенційне застосування металевих нанокompatитних систем

Нанокompatити	Застосування
Fe/MgO	Каталізатори, магнітні пристрої
Ni/PZT	Зносостійкі покриття та термічно класифіковані покриття
Ni/TiO ₂	Фотоелектрохімічні застосування
Al/SiC	Аерокосмічні, морські та автомобільні конструкції
Cu/Al ₂ O ₃	Електронна упаковка
Al/AlN	Мікроелектронна промисловість
Ni/TiN, Ni/ZrN, Cu/ZrN	Високошвидкісні машини, інструменти, оптичні та магнітні запам'ятовуючі матеріали
Nb/Cu	Конструкційні матеріали для високотемпературних застосувань
Fe/Fe ₂₃ C ₆ /Fe ₃ B	Конструкційні матеріали
Fe/TiN	Каталізатори
Al/Al ₂ O ₃	Мікроелектронна промисловість
Au/Ag	Мікроелектроніка, оптичні прилади, перетворення світлової енергії

Керамічні композити на основі вуглецевих нанотрубок (ВНТ) є потенційними матеріалами для виготовлення аерокосмічних і спортивних товарів, композитних дзеркал й автомобільних запчастин, які потребують електростатичного фарбування. Такі матеріали можуть бути корисними для плоских дисплеїв, пристроїв зберігання газу, датчиків токсичних газів, Li⁺

аккумуляторів, міцних, але легких деталей та електропровідних фарб [32]. Одним із прикладів є композит Al_2O_3 -ВНТ, який демонструє високу стійкість до контактних пошкоджень без відповідного збільшення в'язкості та твердості. Це перспективний матеріал для інженерних і біомедичних застосувань.

Полімерні нанокompозити. Нанокompозити на основі полімерів сьогодні застосовуються значно ширше від металевих завдяки їх більш просунутому статусу розробок, на додаток до їхніх унікальних властивостей. Вони забезпечують 2–3-кратне підвищення міцності, навіть з низьким вмістом армування (1–4 мас. (%)) з повним усуненням порот / отворів; газозахисні властивості, біодеградацію та термостійкість [33].

Різні види нанокompозитів на основі полімерів, які містять ізоляційні, напівпровідникові або металеві наночастинки були розроблені для задоволення вимог конкретних застосувань. Нещодавно деякі нанокompозити з полімерних / шаруватих силікатів (PLS) стали комерційно доступними для застосування як аблятиви та як високоефективні біологічно розкладаючі композити, а також при виробництві електронних та харчових упаковок. До їх складу входять нейлон-6 і поліпропілен для пакування та виробів, виготовлений під тиском, напівкристалічний нейлон для контейнерів із надвисоким захистом і паливних систем, епоксидні ґрунтовки для електропокриття та ізоляції високої напруги, ненасичений поліестер для кріплення для водних транспортних засобів і зовнішні рекламні панелі, поліолефінові вогнезахисні кабелі, електричні кожухи та корпуси.

Нанокompозити також широко застосовуються у галузі газового захисту, армування та вогнестійкості. Наприклад, з термостійких полімерних нанокompозитів виготовляють захисний одяг пожежників, а також легкі компонент, придатні для роботи при високих температурах та тисках (капоті автомобілів і обшивки реактивних літаків). Вони також можуть замінити схильні до корозії метали при будівництві мостів та інших великогабаритних конструкцій на легші та міцніші. Крім того, нанокompозити з ненасиченого полієфіру (UPE) можна використовувати в армованих волокнами виробках, які використовуються у морській, транспортній та будівельній галузях. Наразі UPE / нанокompозити зі скловолокна використовуються для виготовлення аксесуарів для човнів, які є міцнішими та менш схильними до вицвітання.

Поліпшення механічних властивостей полімерних нанокompозитів також привело до численних загальних промислових застосувань. До цього належать

робочі колеса та наконечники для порохотягів, корпуси для електроінструментів, а також кожухи й кришки для портативного електронного обладнання, наприклад мобільних телефонів.

Іншим прикладом є використання полімерних нанокompatитів у клеях для виготовлення прес-форм у керамічній промисловості. Розробка екологічно чистих, кращих пакувальних матеріалів без фольги може зменшити кількість твердих відходів, покращити можливості виробництва упаковки та зменшити загальне логістичне навантаження на користувачів. У цьому контексті введення частинок нанокремнію у термопластичні смоли показало свою високу ефективність для покращення захисних властивостей і довговічності упаковки. Такі відмінні захисні характеристики викликають значний інтерес до кремнієвих нанокompatитів у харчовій упаковці як гнучкій, так і жорсткій. Конкретні приклади включають упаковку для обробленого м'яса, сиру, кондитерських виробів, круп і харчових продуктів, які готуються у пакувальних мішках, а також застосування екструзійного покриття у поєднанні з картоном для фруктових соків і молочних продуктів.

Очікується, що використання нанокompatитів значно збільшить термін зберігання багатьох видів харчових продуктів. Низка компаній проводять подальшу роботу над підвищенням ефективності захисної упаковки, намагаючись розробити неохолоджену систему упаковки, здатну зберігати свіжість продуктів протягом трьох років. Полімерно-кремнієві нанокompatити у нині демонструють значні перспективи для цього застосування.

Було також показано, що введення наповнювача на нанорівнях має значний вплив на характеристики прозорості та матовості плівок порівняно з полімерами зі звичайним наповненням. Здатність мінімізувати ступінь поглинання води може бути головною перевагою для полімерних матеріалів, які руйнуються у вологому середовищі.

ВНТ-полімерні композити є потенційними кандидатами для носіїв даних, фотоелектричних елементів і фотодіодів, оптичних обмежуючих пристроїв, барабанів для принтерів тощо.

Наноматеріали у машинобудуванні. Використання нанокompatитів у машинобудуванні відкриває безліч можливостей для покращення механічних, теплових та електричних властивостей матеріалів, які використовуються для виготовлення автомобілів, літаків та інших транспортних засобів. Ось деякі з важливих застосувань нанокompatитів у машинобудуванні [34–37]:

Легкість і міцність. Додавання наночастинок до полімерних матеріалів може значно підвищити їхню міцність при збереженні легкості конструкції. Наприклад, нанокompозити з карбонових нанотрубок або графену можуть бути використані для створення легких, але дуже міцних компонентів кузова автомобілів або аеродинамічних оболонок літаків.

Захист від корозії. Нанокompозитні покриття, які містять наночастинки оксидів або нітридів металів, можуть бути використані для захисту від корозії металевих деталей автомобілів або конструкцій літаків. Це допомагає збільшити тривалість служби транспортних засобів та знизити витрати на їх обслуговування.

Теплопровідність. Додавання наночастинок до матеріалів може поліпшити їхню теплопровідність, що особливо корисно для виробництва радіаторів, систем охолодження та інших компонентів, які відводять теплоту від двигуна або інших нагрівальних джерел.

Електронні пристрої. Нанокompозити можуть бути використані для виробництва електронних пристроїв, таких як сенсори або активні компоненти електричних систем управління транспортними засобами. Наприклад, нанокompозити на основі полімерів і наночастинок графену можуть бути використані для створення гнучких та легких електронних пристроїв у салоні автомобіля або у системах автоматизації виробничих процесів.

Шумоізоляція. Нанокompозитні матеріали можуть бути використані для покращення шумоізоляції транспортних засобів, знижуючи рівень зовнішнього шуму в салоні автомобіля або в кабіні літака.

Переходячи на нанотехнології, можна досягти зниження тертя, вирішити завдання боротьби з обледенінням і прилипанням до зовнішньої сторони конструкції літальних апаратів, зменшити їх помітність.

Наприклад, термопластичний нанокompозит, який містить нанолускоподібне зміцнення, використовується для розробки жорстких і легких зовнішніх деталей. Крім того, пористі полімерні нанокompозити можуть бути використані для розробки фільтрів забруднення. Іншим перспективним технологічним застосуванням є датчики повітряних подушок, де нанооптичні пластинки зберігаються всередині зовнішнього полімерного шару для передачі сигналів зі швидкістю світла, що дає змогу знизити рівень можливих пошкоджень від ударів. Нарешті, полімерні / неорганічні нанокompозити з поліпшеною провідністю, проникністю, водостійкістю та міжфазним опором на

електроді є природними кандидатами на заміну традиційного матеріалам у паливних елементах і зараз перебувають на стадії випробувань.

Зменшення пропускання розчинника є ще одним цікавим аспектом нанокompозитів полімер / кремній. Дослідження, проведене компанією UBE Industries, виявило значне зниження пропускання палива через полімери поліаміду-6/66 завдяки введенню наповнювача з нанокремнію. Як результат, ці матеріали є дуже привабливими для розробки удосконалених паливних баків і компонентів паливної магістралі для автомобілів. Крім того, зменшена подача палива означає значне зниження витрат.

Мала вага та висока якість має першочергове значення при використанні у аерокосмічних конструкціях, наприклад, для виробництва корпусів обладнання, інтер'єрів літаків, покриттів, кабін, спорядження екіпажу, високоміцних космічних дзеркал, сопел реактивних двигунів та підкладок сонячних батарей. Нанокompозитні матеріали забезпечують хімічну стабільність і вогнестійкість, а також низькі експлуатаційні витрати завдяки меншій вазі. Аерокосмічні конструкції піддаються впливу агресивних середовищ, наприклад, різким коливанням вологи і температури, а також контакту з реактивним паливом, антифризом та гідравлічною рідиною. Покриття повинні витримувати удари блискавки, інтенсивне ультрафіолетове опромінення та ерозію.

Нанокompозити в енергетиці. Багато людей вірять у потенціал нанотехнологій для розв'язання проблем енергетичної кризи. Ці технології можуть підвищити ефективність сонячних батарей, поліпшити каталізатори для нафти, створити нові методи зберігання енергії та удосконалити наявні (акумулятори, батарейки, паливні елементи). Для прикладу, завдяки нанотехнологіям уже виготовлені сонячні батареї, які мають товщину порівнянну з папером. Це нове покоління сонячних батарей відрізняється від попередніх значно меншою вагою, більшою гнучкістю та тривалістю служби. Також варто згадати про дослідження щодо використання водневого палива, як екологічно чистого джерела енергії, яке вже проводяться у розвинених країнах. Наноматеріали відіграють важливу роль у різних сферах енергетики, таких як створення пристроїв для прямого перетворення енергії, напівпровідникових матеріалів, матеріалів для водневої енергетики та інших [37].

Зокрема, використання нанопорошків ZrO_2 , стабілізованих ітрієм, знижує температуру синтезу кераміки на 100–200°C, що значно зменшує енерговитрати

при виробництві паливних елементів і підвищує ресурс роботи термічного обладнання. Це, своєю чергою, дозволяє застосувати принципово нові технології виготовлення паливних елементів. Крім того, появляється можливість зниження в 1,5–2 рази кількості паливних елементів в енергоустановці або робочої температури до 800°C.

Використання стабілізованих ітрієм нанопорошків ZrO_2 приводить до зниження температури синтезу кераміки на 100–200°C. Це, зі свого боку, значно зменшує енерговитрати у виробництві паливних елементів та підвищує ресурс роботи термічного обладнання. Такий підхід відкриває можливості для впровадження новітніх технологій у виробництво паливних елементів. Крім того, може призвести до зменшення кількості паливних елементів у енергоустановці в 1,5–2 рази або зниження робочої температури до 800°C.

У перспективі, розвиток енергетики буде неодмінно пов'язаний з широкомасштабною заміною твердих видів палива та горючих речовин на водень. Однак головною перешкодою стане проблема накопичення та зберігання газоподібного водню. Традиційні методи, такі як скраплення водню під тиском чи його охолодження до низьких температур, виявляються непрактичними. Високоперспективними матеріалами для розв'язання цих завдань є нанопористі речовини, які мають специфічно велику активну поверхню. Такими матеріалами можуть бути вуглецеві нанотрубки або металоорганічні структури стільникового типу. За допомогою цих структур створюються пористі речовини великих розмірів, які мають відкриті пори та канали нанометрового розміру, призначені для накопичення водню. Для створення таких пристроїв, які здатні накопичувати водень, наноматеріали, зокрема складні фулерени, можуть виявитися надзвичайно корисними. Уже нині розробляються ємності-сховища водню, що базуються на фулеренах та мають ефективність до 10 %.

Завдяки унікальним властивостям нанокompозитних матеріалів вчені зробили ще один великий крок до створення «корисних» реакторів термоядерного синтезу. Термоядерний реактор – мрія всіх енергетиків упродовж останніх десятиліть. Дослідники вже давно змогли здійснити реакцію ядерного синтезу, під час яких під впливом колосальних температур ядра водню сплавляються в ядра гелію. Проблема полягає у тому, що на здійснення керованої реакції зазвичай потрібно більше енергії, ніж утворюється в результаті – або замість реактора вийде термоядерна бомба. Також залишається

проблема: як побудувати реактор, здатний витримати величезні температури та тиск, необхідні для ядерного синтезу?

Коли у плазмовій суміші, розпеченій до мільйонів градусів, водень сплавляється в гелій, останній набуває здатності проникати навіть у металеві компоненти конструкції, роблячи їх пористими, деформуючи метал і утворюючи у ньому порожнини. Зрозуміло, що згодом це все позначається на міцності та працездатності всього реактора: навіть якщо інженери зможуть здійснити гіпотетичні енергопозитивні реакції, вони, найімовірніше, розірвуть реактор на частини швидше, ніж його робота окупить подібні заходи.

Майкл Демкович, професор матеріалознавства та інженерії з Техасу, пояснює це так: «З часом, гелієві бульбашки залишаються у металі назавжди, оскільки він є дуже міцним матеріалом. Чим більше гелію накопичується в ньому, тим крихкішими стають металеві конструкції». Але, на щастя, вчений зі своєю командою розробив спосіб подолання цієї проблеми. У новому дослідженні, опублікованому в журналі *Science Advances*, Демкович зі своїми колегами описали вплив бульбашок гелію на тверді наноккомпозити. У їхньому експерименті це був тонкий шар металу завтовшки не більше 50 нм, поміщений між товстішими шарами іншого матеріалу. У ході експериментів вчені поміщали нанопластину з міді між двох пластин ванадію, а потім гелій вводили в мідний шар (рис. 39) [38].

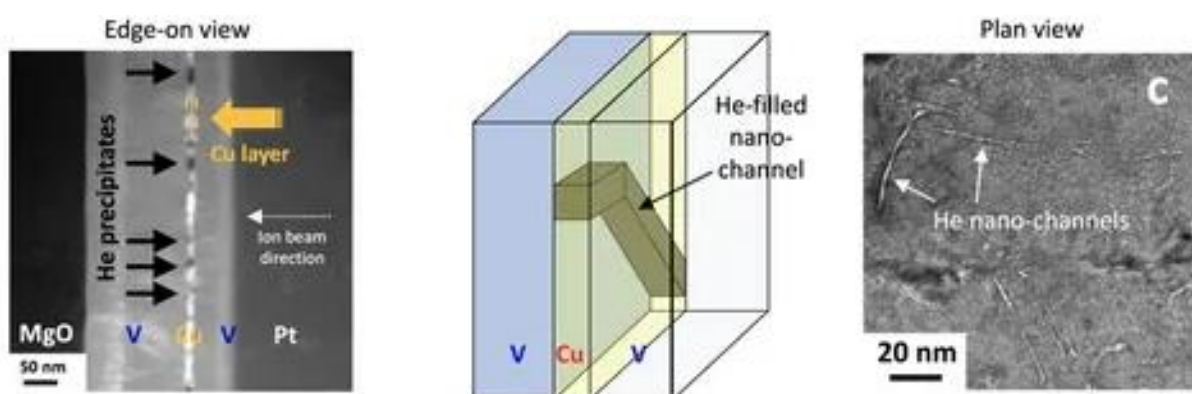


Рис. 39. Утворення наноканалів заповнених гелієм

Дослідники виявили, що в наноккомпозитних матеріалах гелій створює не звичні бульбашки, а цілі канали, які поширюються по всій площі матеріалу. Це несподівано хороша новина: коли у металі з'являється стабільний канал, яким гелій може вільно рухатися під час реакцій синтезу, зношування матеріалу

сповільнюється в рази. Демкович зазначає, що чим більше гелію вони поміщали у нанокompозит, тим більш хитромудрими ставали канали, поки в результаті вони мимоволі не утворили справжню капілярну мережу.

Основними сферами застосування нанокompозитів у паливних елементах є їх використання як полімерів у протонно-обмінних мембранах, сполучних речовин для електродів і матриць для біполярних пластин. Електроди складаються з вуглецевих та платинових частинок каталізатора і полімерного нафіонового (Nafion) сполучника. Наночастинки платини наносяться на одностінні вуглецеві нанотрубки з нафіоном як сполучною речовиною, для підвищення продуктивності у порівнянні зі звичайними електродами на основі вуглецю. Включення наночастинок у протонно-обмінну мембрану поліпшує механічні властивості, а також підвищує протонну провідність. Наночастинки були також використані для зменшення ефекту кросовера метанолу (транспортування метанолу від анода до катода через мембрану Nafion). Гетерополікислоти додаються до протон обмінної мембрани для поліпшення протонної провідності при вищій температурі. Наночастинки кремнезему в протон обмінних мембранах дають нижчий кросовер метанолу. Модифіковані нанокремнієм мембрани Nafion і монтморилоніт мають переваги над немодифікованими елементами управління. Фосфат цирконію, гідрофосфат цирконію та TiO_2 у протонно-обмінних мембранах показали перспективу в паливних елементах з прямим вмістом метанолу.

Нанокompозити в електроніці. Нанотехнології глибоко впроваджені у процес конструювання передових пристроїв для електронних і оптоелектронних застосувань. Розмірна шкала для електронних пристроїв тепер увійшла у нанодіапазон. Застосування нанокompозитів на основі полімерів у цих областях досить різноманітне. Один із конкретних типів нанокompозитів включає спряжені та вуглецеві нанотрубки. Його потенційні застосування включають фотоелементи, фотодіоди, надпровідники, датчики, світлодіоди та польові транзистори. Фотоелектричні пристрої на основі кремнію пропонують високу ефективність, відмінну стабільність і перевірену комерційну корисність. Фотоелектричні пристрої на органічній / полімерній основі мають потенціал для зниження вартості та більш гнучкого виробництва, і характеризуються вищою ефективністю та стабільністю. Зростання інтересу до графену в електроніці відбувається паралельно з відкриттям вуглецевих нанотрубок. Сполучені полімери з різними нанорозмірними включеннями наповнювача

були досліджені для сенсорних застосувань, таких як газові сенсори, біосенсори та хімічні сенсори [39, 40].

Біомедичне застосування нанокompatитів. Використання нанокompatитів у біомедичних цілях є однією галуззю нанотехнологій, що найшвидше розвиваються. Однією з областей інтенсивних досліджень є електропрядіння або виробництво каркасів із біовідновлюваних нановолокон для тканинної інженерії. Інший напрям – використання електропровідних нановолокон на основі сполучених полімерів для регенерації росту нервів у біологічній системі. Наночастинки срібла, оксид срібла та солі срібла включаються у полімерні матриці для забезпечення антимікробної активності. Полімерні нанокompatити на основі гідроксиапатиту $[\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2]$ розглядаються як перспективні при відновленні й імплантації кісток. Гідроксиапатит, основна складова твердої тканини, демонструє низькі механічні властивості при безпосередньому застосуванні, тому його замінюють на матричні нанокompatити на основі полімерів. Желатин, отриманий з колагену, і нанокompatити полі-2-гідроксіетилметакрилат / полі(3-капролактон) на основі гідроксиапатиту є прикладами систем, які розглядаються для технологій відновлення кісток. Електропрядіння полімерних розчинів є популярним методом виробництва нановолоконних каркасів для тканинної інженерії. Нанокompatити з полімерною матрицею були запропоновані для застосування у доставці / вивільненні ліків. Наночастинки оксиду заліза використовувалися для різноманітних застосувань, включаючи доставку ліків, посилення контрастності магнітно-резонансної томографії, імуноаналізу та клітинної терапії. Відомо, що наночастинки заліза і кобальту, інкапсульовані у полідиметилсилоксан, лікують розлади відшарування сітківки [41].

Наноматеріали для екологічних потреб. Для виконання широкого кола технологічних та екологічних завдань доцільне застосування наноматеріалів як високоефективних адсорбентів у сучасних мембранних технологіях (мембрани, мікрофільтри). Зокрема, наноксиди показали високу активність у процесах тонкого комплексного доочищення питної води від важких металів та органічних забруднень. Ці наноматеріали дозволяють витягувати з водних середовищ широкий спектр домішок неорганічного й органічного походження; очищати стоки гальванічних виробництв, підприємств видобутку, транспортування і переробки нафти та нафтопродуктів. Анофільтри дають можливість виділяти з води одновалентні і багатовалентні іони, знижувати

ступінь її жорсткості, очищати від солей, мікробів, пестицидів, гербіцидів і вуглеводнів.

Нанопорошки адсорбентів, завдяки відмінності у швидкостях адсорбції окремих іонів, можна також використовувати для вилучення і селективного виділення окремих цінних компонентів з бурових вод і водних промислових відходів.

Для очищення рідин від важких домішок розроблені фільтри з використанням нанокристалічних мембран. Основним вузлом таких пристроїв є фільтро-елементи – порожнисті циліндри з пористого поліетилену, на зовнішню поверхню яких нанесені пористі покриття з нанодисперсних нітридів, оксидів, оксинітридів титану, алюмінію, цирконію. У результаті отримані мембрани мають високі фільтрувальні характеристики, досить високу продуктивність фільтрації, здатність до багаторазової гідродинамічної регенерації без розбирання та тривалий термін експлуатації.

Створення високоефективної малогабаритної апаратури для очищення стічних вод, що містять нафту, стало можливим завдяки поєднанню нанопорошків адсорбентів з високоємними волокнистими матеріалами (вуглетканини, базальтові волокна та ін.). Один прилад, що містить три шари наноадсорбенту, розділених шарами волокнистого матеріалу, забезпечує очищення емульсій нафтопродуктів з вихідною концентрацією 200–300 мг/л рівня санітарних норм.

Використання нанопорошків металів дає змогу виробляти мікропористі матеріали з відкритою пористістю 35–70 %. Отримано мікропористі матеріали складу Ni_3Al , $NiAl$, Ti_3Al , які ефективні при виготовленні випарників, сепараторів та фільтрів у системах терморегулювання.

Для керамічних датчиків вологості також ґрунтується на адсорбційних властивостях наноматеріалів. У них використовуються нанопорошки діоксиду цирконію, розвинена поверхня яких спричиняє основний вплив на процес поглинання вологи з потоку повітря. У результаті отримані структури значно перевищують технологічні параметри датчиків вологості, які застосовувалися до цього.

Очищення промислових газів є важливим напрямом хімічного каталізу. Як відомо, у процесі роботи технологічного обладнання відбувається накопичення відпрацьованих масел, утилізація яких сьогодні здійснюється спалюванням. Вихлопні гази містять сажу, оксиди вуглецю, азоту, сірки, механічні домішки.

Зниження рівня шкідливих речовин у відпрацьованих газах шляхом варіювання режимів спалювання та встановлення фільтрів не дає необхідного ефекту. Введення безпосередньо в топковий пристрій разом з паливом мікроскопічних кількостей каталітично активних нанопорошків простих і складних оксидів перехідних і рідкісноземельних металів є принципово іншим підходом до розв'язання означеної проблеми. Завдяки малим розмірам та високій питомій поверхні нанопорошку, відбувається ефективне догорання сажі у вихлопних газах технологічних печей. Наприклад, каталізatori глибокого окислення, які містять нанопорошки оксидів неблагородних металів (склад CuCrCoNiCe – 60:30:5:2:3), показали ступінь очищення вихлопних газів печей від чадного газу і метану в межах 94–99 %.

Створені на основі наноматеріалів каталітичні нейтралізatori вихлопних газів автомобільних двигунів дозволили знизити вміст оксиду вуглецю для дизельного двигуна у 7–40 разів, для бензинового – більше ніж у 10 разів. Переробка промислових відходів – ще один напрям використання наноструктурних каталізаторів. Наприклад, при додаванні в каталізатор 1 % порошку заліза можна досягти високої ефективності у процесах глибокої переробки в'язких відходів нафтової промисловості до отримання бензинів та інших вуглеводнів. Крім того, залізо утворює оксид заліза III, який є ефективним каталізатором для знешкодження таких сполук, як CO, NO_x, SO₂.

7. Функціональні властивості нанопокриттів

Сучасний прогрес у галузі нанотехнологій дає підставу віднести нанопокриття до високотехнологічних матеріалів, структура і властивості яких можуть бути «запроектовані» за специфічними функціональними критеріями та рівнем впливу на навколишнє середовище. Вони мають унікальні характеристики у порівнянні зі звичайними покриттями.

Завдяки якостям, властивим нанорівню, нанопокриття зазвичай є багатофункціональними, виявляючи одну або комбінацію таких властивостей: самозалікування, самоочищення, антимікробна та антивірусна активність, каталітична активність, антистатика, сенсорна чутливість тощо. Принципово інноваційними є нанопокриття із пам'яттю форми та чутливі до відбитків пальців, а також енергоефективні покриття [42].

Нанопокриття забезпечують стійкість до коливань температури, внаслідок чого їх застосування різко зростає у виробках та конструкціях,

схильних до впливу перепадів температур і суворих кліматичних умов. Керамічна плитка, скляні вікна, резервуари для зберігання зріджених газів є типовими прикладами.

Наприклад, надтвердий нанокompозит $(Al_{1-x}Ti_xN)/\alpha-Si_3N_4$, розроблений чеською компанією SHM Ltd як трибологічне покриття для інструментів, підходить для жорстких і сухих операцій різання, таких як свердління, токарна обробка та фрезерування. У цьому випадку для промислового виробництва застосовується новий метод, який використовує вакуумно-дугове покриття з обертовим катодом. Цей надтвердий $(Al_{1-x}Ti_xN)/\alpha-Si_3N_4$ має високу міцність на розрив у діапазоні 10-110 ГПа та термін служби у 2–4 рази вищий, ніж у матеріалів, які зараз використовуються як зносостійкі покриття [43].

Сьогодні є повідомлення про поточне використання низки нанопокриттів у різних частинах автомобілів Audi, Evobus і Diamler Chrysler, а також про поточні випробування паливних елементів, пористих фільтрів (пінопластів) і компонентів перетворення енергії, що містять наноTiO₂-покриття. Крім того, повідомляється, що легкі частини, виготовлені з нанокompозитів на основі металу або полімеру з відповідним армуванням, мають низьку густину і дуже високу міцність (наприклад, вуглецеві волокна Бакі з міцністю 150 ГПа). Крім того, двофазні гетерогенні нанодіелектрики, які зазвичай називають діелектричними нанокompозитами, широко застосовуються в електричній та електронній промисловості.

Ефективні вогнезахисні нанопокриття отримують шляхом застосування подвійних нанорозмірних гідроксидів магнію-алюмінію (LDHs), нанодіоксиду титану (TiO₂) та нанодіоксиду кремнію (SiO₂) [44–46].

Нанопокриття створюють прозорий безбарвний захист, який неможливо виявити неозброєним оком. Це підтримує естетичний вигляд виробу, зберігає його природний блиск і прозорість. Крім того, вони практично не накопичують бруд. У тих окремих випадках, коли сторонні забруднювачі, такі як пил і бруд, прилипають до поверхні, їх можна легко видалити змиванням. Нанопокриття здатні забезпечити захист від ультрафіолетового світла (УФ) та стійкість до стирання. Це значно збільшує термін служби виробів та робить їх ідеальними для збереження лакофарбових поверхонь. Наночастинки діоксиду кремнію (SiO₂), діоксиду титану (TiO₂), оксиду алюмінію (Al₂O₃) та оксиду цирконію (ZrO₂) використовуються для підвищення твердості та механічних властивостей покриттів, тим самим підвищуючи їхню зносостійкість та стійкість до подряпин [47].

Нанопокриття значно підвищують корозійну стійкість конструкцій (залізобетону, кам'яних конструкцій, металів тощо), що збільшує їхню довговічність та термін служби [48].

Нанопокриття є антиадгезійними та більш гігієнічними порівняно зі звичайними покриттями. Вони перешкоджають розмноженню бактерій та мікроорганізмів. Конструкції та деталі з нанопокриттями не вимагають покривання воском для підтримки свого блиску. Крім того, вони також дихають, є екологічно чистими, нетоксичними, що дозволяє ефективно використовувати їх на різних продуктах, оскільки вони пригнічують вогкість та плісняву.

Серед матеріалів, одержуваних на основі нанотехнологій, які продукують німецькі та іспанські фірми з кінця 90-х років, виділяються покриття для повної гідрофобізації поверхонь, ліквідації потенційних джерел біоушкоджень – плісняви, грибків, мохів, лишайників тощо.

Гідрофобні покриття використовуються для надання поверхні водостійкості та корозійної стійкості. Так, гідрофобна система на основі нанодіоксиду кремнію (SiO_2) створює для води крайовий кут змочування більший 150° , а кут скочування – менший 10° . А отже, краплі води не затримуються на поверхні а скочуються з неї. А сучасні кремнійорганічні сполуки (КОС) можуть помітно поліпити ці показники [49].

Гідрофобізація сьогодні активно використовується для підвищення ефективності мінеральних утеплювачів («мінеральної вати»), що зводить до мінімуму їх водо- та паропоглинання. Області застосування гідрофобізованих утеплювачів включають нафтохімічний комплекс, суднобудування, цивільні будівлі (стіни, підлоги та стелі), теплові станції, нафтопереробні заводи, електростанції, студії звукозапису, конференц-зали, аеропорти та метрополітен, системи кондиціонування повітря, виготовлення сендвіч-панелей тощо.

Знакові зміни відбулися у сфері розробки та застосування нового покоління самоочисних покриттів. Як відомо, під впливом ультрафіолету модифікований TiO_2 працює як фотокаталізатор, виділяючи атомарний кисень з водної пари або атмосферного кисню. Виділеного активного кисню достатньо для окислення та розкладання органічних забруднень, дезодорування приміщень, знищення бактерій.

Сьогодні будівельні матеріали, які містять добавки TiO_2 -наночастинок, широко застосовуються у цементних фарбах, спеціальних цементах,

будівельних розчинах, дорожніх покриттях як бетонних, так і бітумних, матеріалах і конструкціях, які самоочищаються, повітроочисних матеріалах і конструкціях, антибактеріальних матеріалах і конструкціях, оздоблювальних матеріалах для зовнішніх і внутрішніх робіт.

Матеріали, які містять TiO_2 , цікаві не лише через властивості самоочищення. Дослідження показують, що вони мають хороший потенціал при контролі міського забруднення. Наприклад, фотокаталітичною системою TiO_2 /цемент можна знищити NO_x , SO_x , NH_3 , CO , леткі органічні вуглеводні, такі як бензол і толуол, органічні хлориди, альдегіди і конденсовані ароматичні сполуки. Легування мезопористої плівки TiO_2 невеликою кількістю наносрібла може посилити її антибактеріальний ефект навіть без опромінення ультрафіолетовим світлом.

Останнім часом усе більшого поширення набувають покриття із фазовим переходом, які використовуються як прихована система акумулювання теплоти. В основному вони використовуються на внутрішніх і зовнішніх поверхнях, наприклад, стінах, вікнах, підлогах, щоб регулювати їх температуру у певному діапазоні.

Нанохромні матеріали, наприклад, триоксид вольфраму (WO_3), нестехіометричні оксиди нікелю (NiO_x), діоксид титану (TiO_2) та діоксид ванадію (VO_2), можуть наноситися у вигляді тонкопліткових шарів на віконні скла як енергоефективні покриття. Електрохромні вікна є найбільш перспективними для зниження холодових навантажень, теплових навантажень та економії енергії освітлення в будинках, де вони здатні регулювати коефіцієнт пропускання до 68 % всього сонячного спектру [50–52].

Нанопористі плівки діоксиду титану (TiO_2) на тонкій плівці оксиду олова (SnO_2) успішно використовуються у фотоелектричних системах для отримання більшої кількості електроенергії.

Особливою групою є високоміцні, високоеластичні й ударостійкі покриття, які одночасно стійкі до хімічних впливів та захищають конструкції від корозії. Ключовою концепцією механізму забезпечення роботи нанопокриттів виступає їхня здатність до самовідновлення за допомогою процесу «самозбирання». Під ним розуміють явище, при якому компоненти системи мимоволі збираються у результаті взаємодії, утворюючи більшу функціональну одиницю. Така спонтанна організація може бути зумовлена безпосередніми специфічними взаємодіями та/або реалізовуватися опосередковано через оточення.

Цікава технологія отримання наноконпозиційних матеріалів, які містять проникні полімерні сітки на основі поліуретанів, епоксидних смол і акрилатів, модифікованих у рідкій фазі наночастинками SiO_2 , TiO_2 або іншими оксидами металів. Базовим елементом технології є розгалужені (дендроподібні) аміносилани, які слугують агентом для багатьох олігомерів. Вони уможливають інтродукувати силоксанові фрагменти у структуру епоксиамінової композиції, а додатковий гідроліз аміносиланового олігомеру – отримати вторинний наноструктурований сітчастий полімер, який істотно підвищує експлуатаційні характеристики компаунду. Такі наномодифіковані полімерні сітки створюють унікальну можливість керування мікро- та наноструктурними характеристиками нових композиційних матеріалів. Двокомпонентний компаунд поєднує високі механічні характеристики поліуретану та хімічну стійкість епоксидного сполучного матеріалу. Розроблені розгалужені дендроамінові затверджувачі є новим напрямом у хімічній технології циклокарбонатів, епоксидних і акрилових смол. Полімерні наноконпозити нового класу є екологічно чистими матеріалами, у складі яких нема шкідливих чи летких компонентів.

Сьогодні розробляються технології виробництва нових композиційних матеріалів та компаундів наногетерогенної структури, заснованої на використанні епоксидних смол, рідкого каучуку, амінних затверджувачів та фторвмісних поверхнево-активних речовин. Отримані наноструктуровані епоксикаучукові покриття для бетонних і залізобетонних конструкцій різко зменшують їхню деформативність при короткочасній та тривалій дії навантаження. Захисні епоксикаучукові покриття забезпечують збільшення міцності бетону на розтяг при згині в два-три рази і, отже, підвищують його тріщиностійкість. Вони мають хорошу хімічну стійкість, високі механічні характеристики і термостійкість.

8. Завдання для самоконтролю та закріплення знань

8.1. Запитання для самоконтролю

1. Що розуміють під нанотехнологією?
2. Що таке наноматеріали?
3. Як класифікують наноматеріали?
4. Назвіть методи для отримання наноматеріалів та вимоги до них.

5. Які основні методи використовують для отримання наноматеріалів у консолідованому вигляді?

6. Назвіть основні алотропні модифікації вуглецю.

7. Поясніть походження назви молекули C_{60} .

8. Назвіть основні види фулеренів.

9. Яку форму мають фулерени?

10. Назвіть основні способи одержання фулеренів.

11. З чого складаються вуглецеві нанотрубки?

12. Яку структуру можуть мати нанотрубки?

13. Нанотрубки яких розмірів одержують сьогодні?

14. Які особливості фізико-механічних властивостей нанотрубок?

15. Яке практичне застосування нанотрубок?

16. Які матеріали відносять до об'ємних наноструктурних?

17. У чому полягають принципи одержання наноструктур «зверху вниз» та «знизу вверху»?

18. Як впливає структура матеріалу на його основні механічні властивості?

19. Наведіть приклади природних волокон.

20. Охарактеризуйте основні способи виготовлення нановолокон.

21. Назвіть основні переваги волокон наповнених наночастинками?

22. Які речовини використовують як нанонаповнювачі волокна?

23. Які переваги волокон наповнених вуглецевими наночастинками?

24. Які перспективи використання нанокапсул?

25. Що таке нанокомпозити?

26. Як класифікують нанокомпозити?

27. Як поділяють нанокомпозити за характером зв'язності?

28. Як поділяють нанокомпозити за формою структурних елементів?

29. Як розрізняють нанокомпозити за об'ємним розташуванням структурних елементів?

30. Наведіть приклади застосування нанокомпозитів у машинобудуванні.

31. Як застосують нанокомпозити у медицині?

32. Наведіть приклади застосування нанокомпозитів в електроніці.

33. Як застосовують нанокомпозити в енергетиці?

34. Що таке нанопористі матеріали?

35. Яке практичне застосування нанопористих матеріалів?

36. Як впливає зменшення розмірів частинок магнітних матеріалів на їх магнітні властивості?

37. Наведіть приклади та практичне застосування матеріалів із спеціальними механічними властивостями.

38. Що таке інтелектуальні матеріали?

39. Яке практичне застосування інтелектуальних матеріалів?

40. Яка перспектива наноструктур на основі штучно синтезованих полімерів?

8.2. Завдання для закріплення знань

8.2.1. Тестові завдання

1. Чим є наноматеріали у вихідному стані?

- а) порошком із наночастинок;
- б) тонкими плівками з кристалічною чи аморфною структурою;
- в) матеріалами з поруватою або щільною структурою, які складаються із дрібнодисперсних зерен;
- г) всі варіанти правильні;
- д) правильної відповіді немає.

2. Методи отримання нанопорошків поділяють на

- а) фізичні та хімічні;
- б) технічні, фізичні та хімічні;
- в) технічні та фізичні;
- г) правильної відповіді немає.

3. До яких технологій одержання наноматеріалів належить осадження з використанням плазми тліючого розряду

- а) до технологій на основі фізичних процесів;
- б) до технологій на основі хімічних процесів;
- в) до технологій інтенсивної пластичної деформації.

4. На які види поділяють нанотехнології?

- а) «знизу вверху» і «від дрібного до великого»;
- б) «знизу вверху» і «зверху-вниз»;

в) «від атомів до частинок» і «від низів до верхів».

5. Наноматеріали – це:

- а) матеріали, незвичайні функціональні властивості яких визначаються упорядкованою структурою їх нанофрагментів розміром від 1 до 100 нм;
- б) матеріали розмірами кілька нанометрів;
- в) матеріали розмірами до 1 мкм.

6. На які основні категорії поділяють наноматеріали?

- а) нановироби, композити з компонентами з наноматеріалів;
- б) нановироби, мікровироби;
- в) нановироби, мікровироби; масивні матеріали; композити з компонентами з наноматеріалів.

7. До нановиробів належать:

- а) матеріали у вигляді твердих тіл, розміри яких в одному, двох або трьох просторових координатах не перевищують 100 нм;
- б) тверді тіла розмірами до 1 мкм;
- в) матеріали у вигляді твердих тіл, розміри яких в одному, двох або трьох просторових координатах не перевищують 10 нм.

8. На які основні класи поділяють наноб'єкти?

- а) наночастинки та квантові точки;
- б) наночастинки, наноплівки, віскери, квантові точки;
- в) наночастинки, наноплівки та квантові точки.

9. Графен – це:

- а) моношар вуглецю;
- б) матеріал, що складається з кристалічних ґраток, які утворюють шестикутники атомів вуглецю;
- в) матеріал із замкнутими молекулами вуглецю, в яких всі атоми розташовані у вершинах правильних шестикутників або п'ятикутників.

10. Згорнутий в трубку моношар графіту – це:

- а) графен;

- б) вуглецева нанотрубка;
- в) фулерен.

11. Матеріал із замкнутими молекулами вуглецю, в яких всі атоми розташовані у вершинах правильних шестикутників або п'ятикутників, що покривають поверхню сфери або сфероїду – це:

- а) графен;
- б) фулерен;
- в) вуглецева нанотрубка.

12. Що означає слово «нано»?

- а) одну дев'яту частину;
- б) одну соту частину;
- в) одну мільярдну частину.

13. Наночастинки мають розмір:

- а) від одного до ста нанометрів;
- б) від одного до двох нанометрів;
- в) від одного до тисячі нанометрів

14. Що таке спосіб отримання наночастинок «зверху вниз»?

- а) вихідний матеріал кидають з великої висоти, і він розпадається на наночастинки;
- б) вихідний матеріал подрібнюють доти, доки його частинки не стануть нанорозмірними;
- в) на вихідний матеріал зверху кидають щось важке, і він розпадається на наночастинки

15. Наношприц виготовлений на основі:

- а) нанотрубки;
- б) фулерена;
- в) молекули штучного білка.

16. Як називається пристрій для збирання наномеханізмів?

- а) мікроманіпулятор;

- б) асемблер;
- в) ікосаедр.

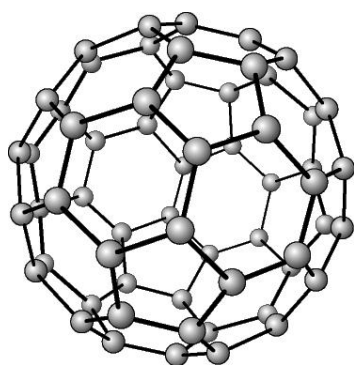
17. Які вчені займаються вивченням та створенням наноматеріалів?

- а) філософи та філологи;
- б) соціологи та економісти;
- в) фізики, хіміки, біологи та фахівці з комп'ютерних наук.

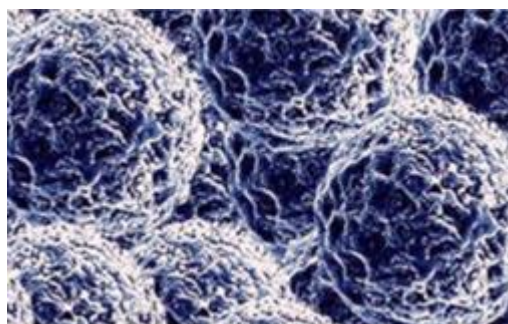
18. Які біологічні об'єкти можна порівняти з нанорозмірами?

- а) всі бактерії та молекули;
- б) гриби та цвіль;
- в) віруси та деякі бактерії;
- г) дрібні комахи та деякі плазуни.

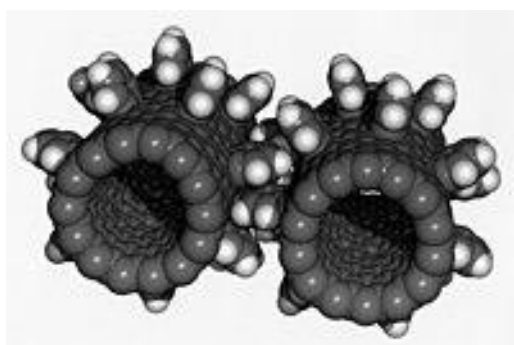
19. На якому рисунку зображена молекула фулерену?



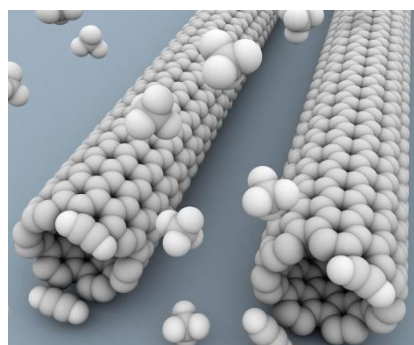
а)



б)



в)



г)

20. Доповніть визначення: нанокompозити – це структуровані матеріали розмір фаз яких ...

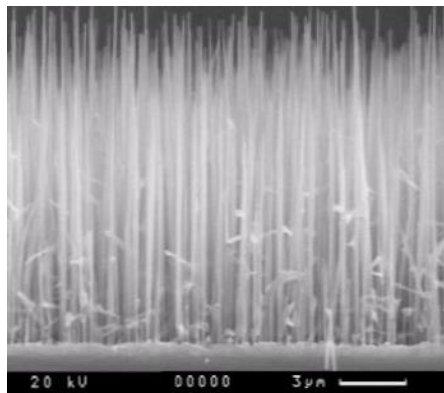
21. Завершіть висловлювання: до нанокompозитів відносять дисперсно-зміцнені сплави, зміцнення у них досягається шляхом штучного ... матеріалу.

22. Завершіть твердження: для віднесення композиту до наноматеріалів необхідно, щоб хоча би одна ... у певному напрямку мала ...

23. За морфологічними ознаками нанокompозити поділяють на такі типи:

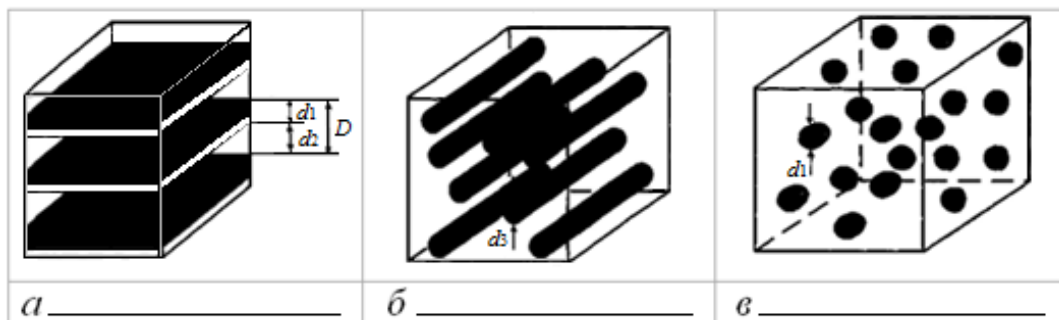
- а) наночаруваті, нановолокнисті, зі сфероїдними включеннями;
- б) наноноштинчасті, нанотрубчасті, наносферичні;
- в) наноциліндричні, наносферичні, нановолокнисті.

24. Який тип нанокompозитів представлено на рисунку?



- а) щітки; б) віскери; с) волокна.

25. Підпишіть тип композиційного матеріалу

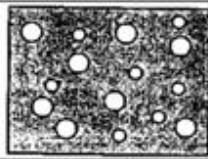
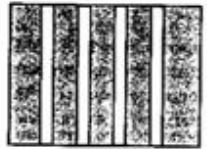



26. Які країни є лідерами у галузі нанотехнологій?

- а) Китай, Індія, Північна Корея;
- б) Бельгія, Нідерланди, Люксембург;
- в) США, Японія, Німеччина;
- г) Росія, Китай, Японія.

27. Доповніть таблицю

Основні типи нанопористих матеріалів

Нанопористі матеріали	Впорядковані	
		
З наскрізними порожнинами		

8.2.2. Кросворд «Нанотехнології та наноматеріали»

По горизонталі

1. Науковий напрям, який охоплює такі розділи, як обстеження, виправлення, конструювання та контроль біологічних систем людини на молекулярному рівні з використанням нанопристроїв і наноструктур.
2. Моноатомний шар атомів вуглецю із гексагональною структурою.
3. Спонтанне утворення складних структур із простих будівельних блоків.
4. Трубочасті наноструктури з вуглецю та інших органічних та неорганічних сполук.
5. Штучний матеріал, який складається з двох і більше компонентів, що істотно різняться за фізичними та хімічними властивостями.
6. Використання нанотехнології у косметичці, наприклад, ліпосом для доставки активних речовин.
7. Високоміцна молекула C_{60} .
8. Підхід до створення технологічних пристроїв, при якому ідея та основні елементи запозичуються з живої природи.
9. Кібернетичний пристрій нанометричних масштабів, виготовлений із атомарною точністю. Має функції руху, обробки та передачі інформації, а також виконання програм.
10. Технологія маніпулювання речовиною на атомному та молекулярному рівні.

Відповіді до кросворду:

По горизонталі

1. Наномедицина;
2. Графен;
3. Самозбірка;
4. Нанотрубка;
5. Композит;
6. Нанокосметика;
7. Фулерен;
8. Біоміметика;
9. Наноробот;
10. Нанотехнологія.

По вертикалі

1. Нанометр;
2. Нанобіотехнологія;
3. Віскери;
4. Нанокапсула;
5. Наночастинка;
6. Наноструктурування;
7. Фейнман.

ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК

Б

Біометод, 13

В

Вибухове випаровування, 24

Віскери, 7, 9

Вуглецева нанотрубка, 15

Г

Гекон, 29

Графен, 13

К

Квантові точки, 7, 9

Кевлар, 37

Кутин, 41

М

Матеріал GeckSkin, 31

Методом відновлення, 32

Метод пластичної деформації, 33

Метод розкладання нестабільних сполук, 33

Метод механічного подрібнення, 25

Механічний метод, 12

Н

Нановиріб, 11

Нановолокно, 35

Нанокapsула, 43

Нанокераміка, 22

Нанокompозит, 44

Наноматеріал, 7

Нанооб'єкт, 9

Нанотекстиль, 35

Нанотехнологія, 10

О

Осадження з газової фази, 22

Р

Розпилення розплавленого матеріалу, 25

Т

Термічне випаровування, 24

Тефлон, 40

Топ-даун технологія, 13

Ф

Фулерени, 18

Х

Хімічне осадження, 32

Хімічний синтез, 12

Список використаних джерел

1. Технологія. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Технологія>
2. Наноматеріали і нанотехнології: навчальний посібник / М.О. Азаренков та ін. Харків : ХНУ імені В.Н. Каразіна, 2014. 316 с.
3. Історія розвитку нанотехнологій. URL: <https://studfile.net/preview/5835401/>
4. Наноматеріали, нанотехнології, нанопристрої / М.О. Боровий та ін. Київ : «Інтерсервіс», 2015. 350 с.
5. Наноматеріали. Класифікація, особливості властивостей, застосування та технології отримання / Б.М. Балоян, А.Г. Колмаков, М.І. Алімов, А.М. Кротов. Харків : ХНУ імені В.Н. Каразіна, 2007. 125 с.
6. Наноматеріали, нанотехнології, нанопристрої / М.О. Боровий, Ю.А. Куницький, О.О. Каленик, І.В. Овсієнко, Т.Л. Цареградська. Київ : «Інтерсервіс», 2015. 350 с.
7. Графен: властивості, одержання, перспективи застосування в нанотехнології. URL: <https://sites.google.com/site/vseprographen/>
8. Колосов О.Є. Композиційні та наноматеріали : навчальний посібник [електронне видання]. Київ : КПІ імені Ігоря Сікорського, 2017. 224 с.
9. Ткач О.П. Наноматеріали і нанотехнології в приладобудуванні : навчальний посібник. Суми : СДУ, 2014. 127 с.
10. Куцова В.З., Котова Т.В. Вуглецеві наноматеріали : навч. посібник. Дніпропетровськ : НМетАУ, 2014. 61 с.
11. Вуглецеві нанотрубки як новий клас матеріалів для нанобіотехнології / С.В. Прилуцька, О.В. Ременяк, Ю.В. Гончаренко, Ю.І. Прилуцький. *Біотехнологія*. 2009. Т.2, №2. С. 55–66.
12. Zhang M., Atkinson K.R., Vaughan R.H. Multifunctional Carbon Nanotube Yarns by Downsizing an Ancient Technology. *Science*. 2004. V. 306. P. 1358–1361.
13. Проценко І.Ю., Шумакова Н.І. Наноматеріали і нанотехнології в електроніці : підручник. Суми : Сумський державний університет, 2017. 151 с.
14. Фулерени: перспективи практичного застосування в медицині, біології та екології / Д.В. Щур та ін. *Вісник Дніпропетровського університету. Біологія. Екологія*. 2012. Вип. 20, т. 1. С. 139–145.
15. Добровольський Олександр, Людвінська Тетяна. Конструкційні

наноматеріали – новий тип матеріалів з надзвичайними властивостями. *ГБДММ*. 2013. Вип. 81. С. 50–54.

16. Дорошенко А.М. Конструктивні і функціональні наноматеріали для медицини. *Вісн. НАН України*. 2014. № 10. С. 62–66.

17. Саввова О.В. Нові керамічні та скломатеріали спеціального призначення : конспект лекцій для студентів 1 курсу денної форми навчання другого (магістерського) рівня вищої освіти за спеціальністю 161 – Хімічні технології та інженерія. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2020. 106 с.

18. Панченко С.П. Функціональні наноматеріали : конспект лекцій для здобувачів ступеня бакалавра спеціальності 132 Матеріалознавство. Дніпро : НТУ «ДП», 2022. 47 с.

19. Методи отримання наноматеріалів. URL: <https://ua-referat.com/uploaded/hronologiya-rozvitku-nauki-nanotehnologiya-ta-nanomateriali/index1.html>

20. Нанопорошки і методи їх отримання. URL: <https://jak.koshachek.com/articles/nanoporoshki-i-metodi-ih-otrimannja.html>

21. Завражна О.М., Пасько О.О., Салтикова А.І. Основи нанотехнологій : навчально-методичний посібник для вчителів та студентів педагогічних університетів. Суми : Вид-во СумДПУ імені А. С. Макаренка, 2016. 184 с.

22. Сусліков Л.М., Дьордяй В.С. Фізика і технологія наноматеріалів : навчальний посібник для студентів фізико-технічних спеціальностей. Ужгород : Видавництво «Говерла», 2023. 437 с.

23. Тонкоплівкові матеріали та технології їх одержання : навч. посібник / Є.П. Калинушкін та ін. Дніпропетровськ : НМетАУ, 2009. 175 с.

24. Кристалізація аморфних сплавів. URL: http://ni.biz.ua/2/2_10/2_105157_kristalizatsiya-amorfnih-splavov.html

25. Герасимов В.В., Герасимова Е.І. Розвиток нанонауки та нанотехнологій в галузі легкої промисловості. *Науковий вісник Мукачівського технологічного інституту*. Мукачево : МТІ, 2007. №4. С. 50–56.

26. Куцова В.З., Котова Т.В., Аюпова Т.А. Наноматеріали та нанотехнології : навч. посібник : у двох частинах. Дніпропетровськ : НМетАУ, 2013. 103 с.

27. Богданов Г.Г., Захожай З.В. Еволюція матеріалів для одягу. Київ : КНУТД, 2009. 240 с.

28. Декоративні тканини в інтер'єрі. Текстильний дизайн – сучасні

тенденції. URL: <https://giropark.ru/uk/cold-water/dekorativnyi-tekstil-v-interere-tekstilnyi-dizain-sovremennye.html>

29. Інформація про нові властивості сучасних тканин. URL: <https://helpmasterservice.com.ua/informaciya-o-novykh-svoystvax-sovremennykh-tkanej-attention-required-cloudflare-svoystva-sovremennykh-tkanej-novye-svoystva-sovremennykh-tkanej/>

30. Лецишена В.П. Місце нанотехнологій в розвитку нового технологічного порядку. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Економічні науки*. 2013. № 4, Т. 3. С. 164–168.

31. Pedro Henrique Cury Camargo, Kestur Gundappa Satyanarayana, Fernando Wyruch. Nanocomposites: Synthesis, Structure, Properties and New Application Opportunities. *Materials Research*. 2009. Vol. 12, No. 1. P. 1–39.

32. Графен: властивості, одержання, перспективи застосування в нанотехнології. URL: <https://sites.google.com/site/vseprographen/>

33. Мішуров Д.О. Авраменко В.Л., Бровко О.О. Нанокompозити на основі полімерів і шаруватих силікатів. *Полімерний журнал*. 2013. Т. 35, № 3. С. 217–230.

34. Буренніков Ю.А., Сивак І.О., Сухоруков С.І. Нові матеріали та композити : навч. посіб. Вінниця : ВНТУ, 2013. 158 с.

35. Нові селективні нанокompозиційні матеріали на основі гідратованого діоксиду цирконію та основного оксонітрату вісмуту / Л.М. Рождественська та ін. *Доповіді Національної академії наук України. Серія: Математика. Природознавство. Технічні науки*. 2013. № 8. С. 135–140.

36. Надтверді, композиційні матеріали та покриття: отримання, властивості, застосування : тези доповідей Одинадцятої конференції молодих вчених та спеціалістів, 28–29 травня 2020 р., м. Київ. Київ : ІНМ НАНУ, 2020. 39 с.

37. Нові термоелектричні нанокompозитні матеріали (огляд) / Д.М. Фреїк, М.О. Галушак, О.С. Криницький, О.М. Матківський. *Фізика і хімія твердого тіла*. 2013. Т.14, № 2. С. 300–316.

38. Self-organization of helium precipitates into elongated channels within metal nanolayers / Di Chen et all. *Science Advances*. 2017. Vol. 3, Iss. 11. P. 1–6.

39. Заячук Д.М., Рухов А.В. Нанотехнології і наноструктури. Львів : Львівська політехніка, 2009. 580 с.

40. Поплавко Ю.М., Борисов О.В., Якименко Ю.І. Нанофізика,

наноматеріали, наноелектроніка : навч. посіб. Київ : НТУУ «КПІ», 2012. 300 с.

41. Дорошенко А. М. Конструктивні і функціональні наноматеріали для медицини. *Вісник Національної академії наук України*. 2013. № 8. С. 83–88.

42. Функціональні матеріали і покриття : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. М.О. Азаренков та ін. Харків : ХНУ ім. В.Н. Каразіна, 2013. 208 с.

43. Wang Z., Han E., Ke W. Influence of nano-LDHs on char formation and fire-resistant properties of flame-retardant coating. *Prog. Org. Coat.* 2005. Vol. 53, No. 1. P. 29–37.

44. Wang Z., Han E., Ke W. An investigation into fire protection and water resistance of intumescent nano-coatings. *Surf. Coat. Tech.* 2006. Vol. 201, No. 3. P. 1528–1535.

45. Wang Z., Han E., Liu F., Ke W. Fire and corrosion resistances of intumescent nano-coating containing nano-SiO₂ in salt spray condition. *J. Mat. Sci. Tech.* 2010. Vol. 26, No. 1. P. 75–81.

46. Innovative, scratch proof nanocomposites for clear coatings / Barna E., Bommer B., Kysteiner J., Vital A., et al., *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2005. Vol. 36, No. 4. P. 473–480.

47. Montemor M.F. Functional and smart coatings for corrosion protection: A review of recent advances. *Surf. Coat Tech.* 2014. Vol. 258. P. 17–37.

48. Muzenski, S., Flores-Vivian, I., Sobolev, K. Hydrophobic engineered cementitious composites for highway applications. *Cement and Concrete Composites*. 2015. V. 57. P. 68–74.

49. Deb S.K. Opportunities and challenges in science and technology of WO₃ for electrochromic and related applications. *Sol. Ener. Mat. Sol. Cel.* 2008. Vol. 92, No. 2. P. 245–258.

50. Progress in chromogenics: new results for electrochromic and thermochromic materials and devices / P.C. Lanseker et all. *Sol. Ener. Mat. Sol. Cel.* 2009. Vol. 93, No. 12. P. 2032–2039.

51. Baetens R., Jelle B.P., Gustavsen A. Properties, requirements and possibilities of smart windows for dynamic daylight and solar energy control in buildings: A state-of-the-art review. *Sol. Ener. Mat. Sol. Cel.* 2010. Vol. 94, No. 2. P. 87–105.

52. Granqvist C.G. Oxide electrochromics: Why, how, and whither. *Sol. Ener. Mat. Sol. Cel.* 2008. Vol. 92, No. 2. P. 203–208.

Навчально-методичне видання

Юрій ПАВЛОВСЬКИЙ
Володимир ПОПОВИЧ

**Сучасні матеріали в техніці:
наноматеріали та нанотехнології**

Дрогобицький державний педагогічний університет
імені Івана Франка

Редактор
Ірина Невмержицька
Технічний редактор
Ірина Артимко
Комп'ютерний набір
Юрій Павловський

Здано до набору 12.08.2024 р. Формат 60x90/16. Гарнітура Times. Ум. друк.
арк. 4.75 Зам. 75.

Дрогобицький державний педагогічний університет імені Івана Франка.
(Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до державного реєстру
видавців, виготівників та розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 5140 від
01.07.2016 р.). 82100, Дрогобич, вул. Івана Франка, 24, к. 203