

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

Ю. О. КАЗИМИРЕНКО, А. А. КАРПЕЧЕНКО

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до виконання курсової і лабораторних робіт
з дисципліни
"ДИСПЕРСНІ МАТЕРІАЛИ ТА КОМПОЗИТИ"**

Рекомендовано Методичною радою НУК

Електронне видання
комбінованого використання на DVD-ROM



МИКОЛАЇВ • НУК • 2018

УДК 621.762 (076)
К 14

Автори: Ю. О. Казимиренко, канд. техн. наук, доцент;
А. А. Карпеченко, канд. техн. наук, доцент

Рецензент А. В. Лабарткава, канд. техн. наук, доцент

Казимиренко Ю. О.

К 14 Методичні вказівки до виконання курсової і лабораторних робіт з дисципліни "Дисперсні матеріали та композити" / Ю. О. Казимиренко, А. А. Карпеченко. — Миколаїв : НУК, 2018. — 97 с.

Подано загальні вимоги, теоретичні передумови і рекомендації щодо виконання лабораторних робіт, індивідуальних завдань та курсової роботи з дисципліни "Дисперсні матеріали та композити".

Призначено для студентів денної форми навчання за спеціальністю 132 "Матеріалознавство"; галузь знань 13 "Механічна інженерія".

УДК 621.762(076)

Навчальне видання

КАЗИМИРЕНКО Юлія Олексіївна
КАРПЕЧЕНКО Антон Анатолійович

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до виконання курсової і лабораторних робіт
з дисципліни
"ДИСПЕРСНІ МАТЕРІАЛИ ТА КОМПОЗИТИ"**

Комп'ютерне верстання та складання *В. В. Москаленко*
Коректор *М. О. Паненко*

© Казимиренко Ю. О., Карпеченко А. А., 2018
© Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова, 2018

Формат 60×84/16. Ум. друк. арк. 5,7. Об'єм даних 2739 кб.
Тираж 15 прим. Вид. № 19 Зам. № 118.

Видавець і виготівник Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова
просп. Героїв України, 9, м. Миколаїв, 54025
E-mail : publishing@nuos.edu.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 2506 від 25.05.2006 р.

ВСТУП

Методичні вказівки містять теоретичні передумови і рекомендації щодо виконання лабораторних робіт, індивідуальних завдань та курсової роботи з дисципліни "Дисперсні матеріали та композити", яка входить до блоку дисциплін загально-професійної і практичної підготовки за напрямком "Матеріалознавство" та надає знання закономірностей, явищ і процесів, які мають місце при виробництві порошків різних матеріалів і волокон, їх формуванні та спіканні. Підготовка бакалаврів включає в себе виконання лабораторних робіт, індивідуальна робота зі студентами закріплює лекційний матеріал. Одержані результати можуть бути за бажанням студентів застосовані при виконанні курсової роботи "Вибір технологічних режимів та дослідження процесів структуроутворення дисперсних і композиційних матеріалів, одержаних методами порошкової металургії", яку студенти виконують у 10 семестрі і яка надає студентам теоретичних і практичних навиків щодо вибору вихідних компонентів та розробки технологічної схеми процесу одержання порошкових і композиційних матеріалів із заданими властивостями.

У методичних вказівках автори не прагнули надати розгорнутий довідниковий матеріал про різновиди порошкових і композиційних матеріалів та вживані технології, враховуючи, що дана інформація міститься у довідниковій літературі та інших джерелах інформації.

1. ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ

Цикл лабораторних робіт з дисципліни "Дисперсні матеріали та композити" складається з 10-ти робіт, при виконанні яких кожен зі студентів отримує як індивідуальне дослідницьке завдання (дослідження дисперсності, форми та інших морфологічних характеристик порошків на наповнювачів для композиційних матеріалів, пористості зразків, обробка та оформлення результатів досліджень), так і завдання для колективної творчості, де студенти під керівництвом викладача підготовлюють експериментальні зразки, набувають навиків з дозування, формування, пресування, спікання металевих, скляних, керамічних порошків, а також пробопідготовки, механічних випробувань, цифрової макрозйомки, досліджень мікроструктури методами оптичної та комп'ютерної металографії. Таким чином, у ході проведення лабораторних робіт студенти повинні продемонструвати знання відповідного теоретичного матеріалу; дослідницькі здібності; самостійність мислення; творчу активність; володіння комп'ютерною технікою, зокрема методами комп'ютерної металографії та методами статистичної обробки експериментальних даних; навиків щодо застосовування лабораторного обладнання; вміння раціонального поєднання колективної та індивідуальної форм виконання лабораторної роботи.

Лабораторні роботи повинні бути оформлені відповідно до ДСТУ 3008-95; звіт складається з титульного аркушу,

підписаного особисто виконавцем роботи; мети роботи; коротких теоретичних відомостей; електронних зображень порошків, волокон, наповнювачів, мікроструктур зразків порошкових і композиційних матеріалів; експериментальних даних; оброблених результатів, наведених у вигляді гістограм і таблиць. Наприкінці роботи необхідно зробити висновки, в яких треба проаналізувати одержані експериментальні результати і порівняти їх з відомими довідниковими та літературними даними.

Лабораторна робота № 1

ДОСЛІДЖЕННЯ МОРФОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТА ВИЗНАЧЕННЯ МІКРОТВЕРДОСТІ МЕТАЛЕВИХ І КЕРАМІЧНИХ ПОРОШКІВ

Мета роботи: за допомогою сучасних методів оптичної та комп'ютерної металографії дослідити форму, розмір, стан поверхні металевих і керамічних порошків; ознайомитись з методикою підготовки зразків та вимірювання мікротвердості порошків.

Короткі теоретичні відомості

Вибір технології, структура та властивості порошкових і композиційних матеріалів визначаються фізико-механічними властивостями порошків, зокрема дисперсністю та формою частинок, їх мікротвердістю.

За **дисперсністю** порошки поділяються на ультратонкі (з середнім розміром менш ніж 0,5 мкм), дуже тонкі (0,5...10 мкм), тонкі (10...40 мкм), середньої тонкості (40...150 мкм), грубі (150...1000 мкм). Методика визначення розмірів частинок порошку регламентована ГОСТ 23402-78. Для досліджень гранулометричного складу (розподілу порошку за розміром) застосовують ситовий аналіз (визначається дисперсність порошків до 40 мкм, в окремих випадках до 5 мкм), седиментаційний аналіз (50...1 мкм), оптичний мікроскопічний

аналіз (100...1 мкм), електронну мікроскопію (1...0,001 мкм), результати, як правило, наводяться у вигляді діаграм розподілу. За допомогою рентгеноструктурного аналізу, визначаючи розміри областей когерентного розсіювання, їх розподіл за розмірами, можна дослідити фазовий склад та будову дослідних порошків.

Форма частинок порошку (табл. 1.1) в залежності від методу його отримання може бути сферичною; почасти сферичною (округлою); краплеподібною; губчастою; дендритною; тарілчастою; осколочною; волокнистою; пелюстковидною, проте такий поділ є умовним, оскільки варіюючи режимами, можна отримати порошки з різною формою частинок (рис. 1.1).

Таблиця 1.1. Класифікація металевих порошків за формою

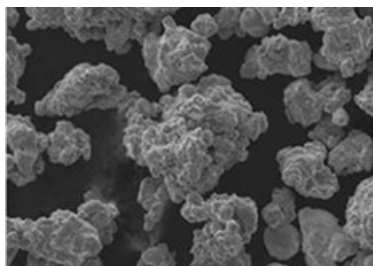
Форма частинок	Матеріал	Спосіб отримання порошку
Сферична ($F = 0,9...1$)	Бронза, залізо, нікель, мідь, срібло, нержавіюча сталь, сплави нікелю	Розпилення
	Мідь	Плазмове розпилення
Краплеподібна та округла ($F = 0,6...0,9$)	Залізо, нікель	Розкладення карбонілів; відновлення газами в автоклавах
Губчаста ($F = 0,2...0,5$)	Залізо	Відновлення газами та вуглецем
	Мідь	Відновлення газами
	Вольфрам, молібден, тантал, ніобій, титан, цирконій, хром	Металотермія
	Нержавіюча сталь, сплави нікелю	Спільне відновлення окисів
Дендритна ($F = 0,2...0,3$)	Нікель, мідь, срібло, хром	Електроліз
Тарілчаста ($F = 0,4...0,6$)	Залізо, нержавіюча сталь, сплави нікелю	Вихровий розмел

Експериментально форма порошків визначається за ГОСТ 25849-83, кількісним параметром вважається **фактор форми**, за яким розрізняють:

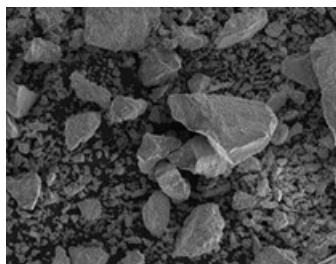
– *фактор нерівноосності частинок* – відношення максимального та мінімального розмірів частинок $F_n = D_{\max} / D_{\min}$;

– *фактор розвинуності поверхні* – відношення квадрату параметру, що спостерігається, частки (**P**) до площі, яку вона займає (**S**) $F_p = P^2 / S$;

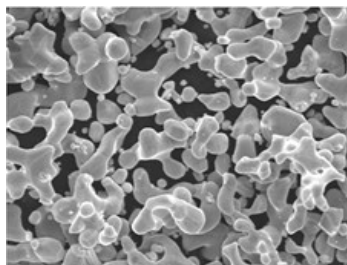
– *фактор форми Салтикова*: $F_c = 4\pi S / P^2$.



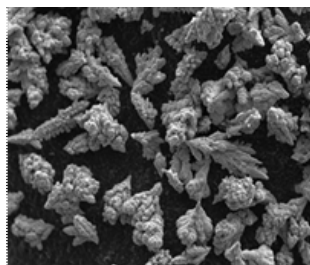
a



б



г



д

Рис. 1.1. Електронні мікрофотографії порошків:
a – заліза, отриманого відновленням; *б* – карбиду вольфрама, отриманого механічним здрібненням; *в* – титану, отриманого кальцієстермічним відновленням; *г* – міді (електролітичний)

Сукупно з дисперсністю, форма, периметр, площа, шорсткість та стан поверхні відносяться до морфологічних характеристик порошку. Для дослідження розмірних, геометричних і морфологічних характеристик (зокрема довжини, широти, висоти частинок, їх площі та периметра) застосовують комп'ютерно-технічні засоби автоматизованого діагностування, кінцевою задачею яких є статистична обробка одержаних результатів з побудовою графічних залежностей для візуалізації аналізу. Сучасні прикладні програми ("PHOTOM", "OPTIMAS", "IMAGE EXPERT PRO" та інші) ґрунтуються на автоматичній фільтрації чорно-білих цифрових зображень, які збережені у форматах .BMP або .JPG. Для виконання лабораторних робіт студентами пропонується застосування програмного комплексу "МЕГРАН" (рис. 1.2), розробленого на базі кафедри матеріалознавства і технології металів Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова.

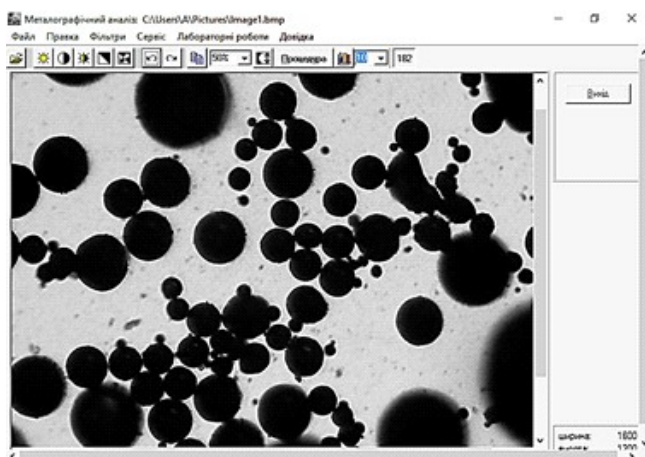


Рис. 1.2. Скриншот програми "МЕГРАН"

Цей комплекс програм пропонує автоматизацію рішень, пов'язаних з ручною та автоматизованою фільтрацією зображень, виконанням математичних розрахунків, таких як визначення розмірів, площі, периметра та фактору форми об'єктів (порошків, зерен, пор тощо), побудовою гістограм розподілу.

Здатність частинок порошку до деформування визначається його *мікротвердістю*, яку вимірюють за ГОСТ 9450-76 на спеціально підготовлених мікрошліфах за допомогою приладу ПМТ-3 (ТУ 3-3.1377-83), для чого порошки змішують з епоксидною смолою, після твердіння зразки полірують за стандартною методикою. Навантаження на індентор складає 20...100 г, тривалість перебування під навантаженням – 10 с, мікротвердість визначають вимірюванням діагоналі відбитка при втискуванні алмазної пірамідки з кутом при вершині 136° у шліфовану поверхню частки (рис. 1.3) під дією невеликих навантажень (до 2 мкН). На мікротвердість як пластичну характеристику суттєво впливають нерівномірність розподілу домішок по поверхні порошку та наклеп, що усувається через відпал, який у багатьох випадках виступає як підготовча операція до формування.

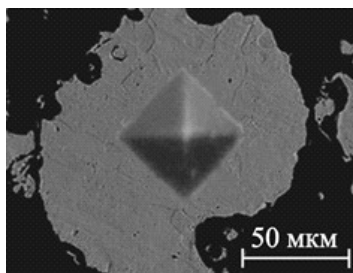


Рис. 1.3. Вимірювання мікротвердості порошку ПЖР-1: діагональ відбитка алмазної пірамідки ($H_{\mu 100} = 500$ МПа)

Прилади, зразки для досліджень, наочний матеріал

Прилади: мікроскоп металографічний MMP-2P, укомплектований цифровою камерою *Delta Optical HDCT-20C* та програмним забезпеченням для обробки зображень *Score Image 9.0*, комп'ютерне устаткування, комплект лабораторного хімічного посуду, мікротвердомір ПМТ-3.

Зразки: металеві порошки різного гранулометричного складу (марок ПЖВ-1, Пр-Бр-АМц9-2, ПА-3, АПС-1А, ПМС-1, ПР-Б83, ПНЭ-2, ПНК), керамічні (Al_2O_3 , SiC, ZrO_2), лабораторні зразки для вимірювання мікротвердості порошків.

Наочні матеріали, електронне та програмне забезпечення: фотоальбом з мікрофотографіями порошків, електронна база даних, програмний комплекс "МЕГРАН", таблиці з властивостями порошків.

Порядок виконання роботи

1. За вказівками викладача обрати для досліджень порошок певної марки.

2. З використанням методу оптичної металографії, застосовуючи оптичні мікроскопи, визначити розмір та фактор форми дослідних порошків, результати навести у табличній формі (табл. 1.2).

Таблиця 1.2. Результати досліджень форми та розмірів частинок порошку

№	Порошок	Форма частинок	d_{max}	d_{min}	Фактор форми

3. За допомогою цифрової камери *Delta Optical HDCT-20C* сфотографувати дослідний порошок, зберегти отриманий файл у форматі растрового рисунку (*BMP).

4. За допомогою методу комп'ютерної металографії "МЕГРАН" дослідити гранулометричний склад та фактор форми порошків. Результати навести у вигляді гістограм розподілу за розмірами у напрямках X та Y , периметром та фактором форми. Проаналізувати отримані дані.

5. Порівняти результати досліджень розміру і форми порошків, які отримані методами оптичної мікроскопії та комп'ютерної металографії.

6. На спеціально підготовлених для вимірювання мікротвердості зразках за допомогою мікротвердоміра ПМТ-3 визначити розмір відбитків та значення мікротвердості дослідних порошків, результати занести у табл. 1.3. Сфотографувати зразок.

Таблиця 1.3. Результати вимірювань мікротвердості порошків

Порошок	m , г	Діаметр відбитків, мм		H_{μ} , МПа
		d_1	d_2	

Порядок оформлення звіту

1. Коротко сформулювати мету роботи.
2. Навести дані про основні властивості порошків, форму, розмір частинок порошків та методи їх дослідження. Записати класифікацію порошків за формою частинок.
3. Навести цифрову мікрофотографію обраного порошку. Заповнити таблицю 1.2.
4. Навести гістограми розподілу порошків за розміром, периметром, площею та фактором форми.
5. Проаналізувати вплив способу одержання обраного порошку на розмір та форму частинок.

6. Навести цифрову мікрофотографію обраного порошку з відбитками приладу ПМТ-3. Заповнити таблицю 1.3.

7. На підставі аналізу отриманих даних зробити висновки, в яких слід зазначити середній розмір порошку, фактор форми і мікротвердість.

Контрольні питання

1. Наведіть класифікацію порошків за розміром.
2. Наведіть класифікацію порошків за фактором форми.
3. Назвіть та охарактеризуйте методи дослідження морфологічних характеристик порошків.
4. Поясніть, як впливає стан поверхні частинок порошків на властивості порошкових і композиційних матеріалів.
5. Опишіть мікротвердість порошків як важливу характеристику пластичності. Наведіть методи визначення мікротвердості.

Лабораторна робота № 2
**ДОСЛІДЖЕННЯ СТАНУ ПОВЕРХНІ
ТА ВИЗНАЧЕННЯ МІКРОТВЕРДОСТІ
НЕМЕТАЛЕВИХ ВОЛОКОН**

Мета роботи: з використанням методів оптичної металографії дослідити стан поверхні металевих, скляних, вуглецевих волокон; за допомогою мікротвердоміра ПМТ-3 визначити їх мікротвердість.

Короткі теоретичні відомості

Сучасний розвиток технологій дозволяє одержувати різноманітні види волокнистої продукції (металеву проволоку, безперервні та дискретні волокна, пряжу, ровінги, джути, нитковидні кристали, тобто віскери), які успішно застосовують у хімічній, текстильній промисловості, у ракетобудуванні, медицині, волоконній оптиці тощо. Властивості майбутніх композитів безпосередньо залежать від хімічних, фізико-механічних та технологічних властивостей волокон.

Волокна мають практично нульову текучість та високу насипну пористість, яка суттєво перевищує насипну пористість порошкових матеріалів. Головними механічними властивостями волокон є модуль пружності; міцність на згинання, розрив або кручення; мікротвердість. Особливістю волокнистих композиційних матеріалів є анізотропія їх механічних властивостей уздовж та поперек волокон і низька

чутливість до концентраторів напружень, що враховують при проектуванні виробів. Основним недоліком композиційних матеріалів з одно- та двомірним армуванням є низький опір міжшаровому зсуву та поперечному зриву, що не є характерним для композитів з об'ємним армуванням.

Морфологічними характеристиками волокон вважаються геометричні параметри (d , l/d) та стан поверхні волокон (скопичення домішок, наявність ультра- та мікропор) характеристики, для дослідження яких застосовуються методи оптичної та електронної мікроскопії. У більшості випадків волокна мають пористу та дефектну структуру, яка може змінюватися в результаті поверхневої обробки. Так, наприклад, рельєф поверхні вуглецевих волокон після опромінювання складається із періодично розташованих впадин та виступів, паралельних осі волокна.

Мікроскопічні дослідження волокон виконуються на спеціально підготовлених об'єктах, які характеризують поздовжній вигляд і поперечний зріз. Для одержання зразків для досліджень поздовжнього напрямку на предметне скло піпеткою або скляною паличкою наносять 1–2 краплі гліцерину або дистильованої води, у рідке середовище містять декілька волокон, які розділяють між собою за допомогою голки. Предметне скло з волокном покривають покривним склом таким чином, щоб між склом не утворювались пузирчики повітря, які заважають дослідженням. Для підготовки поперечного зрізу волокон застосовують металеву пластинку з отвором, в якому за допомогою клею з оргскла закріплюється пучок волокон. Зразок висушують, далі волокна охайно зрізають лезом з обох боків пластини. Для вимірювання мікротвердості волокон підготовлюють зразки з дискретно нарізаними волокнами, змішаними з епоксидним зв'язуючим. Результати одержують за вимірюванням діагоналей відбитку індентора приладу ПМТ-3.

Високі механічні властивості *вуглецевих волокон* обумовлені їх фібрилярною будовою (рис. 2.1). Фібрилярні кристали за зовнішнім виглядом схожі на стрічки, довжина кристалів досягає багатьох мікрон, а їх товщина звичайно не перевищує 10...20 нм, структура аморфного вуглецю не має дальнього порядку, проте характеризується великою кількістю дефектів та має підвищену хімічну активність.

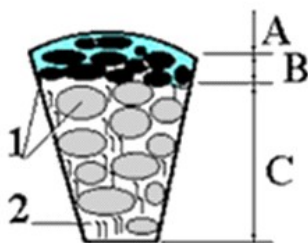


Рис. 2.1. Будова вуглецевого волокна:
А – поверхневий шар; В – високоорієнтована зона; С – низькоорієнтована зона; 1 – мікрофібрили; 2 – аморфний вуглець

Вуглецеві волокна (рис. 2.2,*а*) мають переважно закритопористу структуру з розміром пор голкоподібної форми $(1 - 3) \cdot 10^{-3}$ мкм.



а

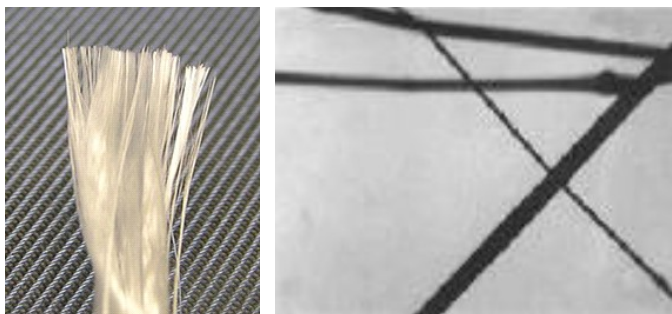


б

Рис. 2.2. Вуглецеві волокна:
а – мікрофотографія, $\times 100$; *б* – вуглецева тканина (зовнішній вигляд)

Тканини з вуглецевих волокон (рис. 2.2,*б*) застосовують у галузях медицини та хімічної промисловості, де вони виконують функцію сорбентів з розвинутою пористою структурою. Їх формування здійснюється за допомогою стандартних технологій виготовлення активованого вуглецю. Вихідною сировиною є нітрат-целюозна тканина, яку після просочення антипіреном витримують при температурі 200...300 °С, а потім піддають карбонізації при температурі 600 °С з активацією у водяній парі при температурі 850 °С.

Скловолокну (рис. 2.3) є перспективною сировиною для одержання будівельних, електроізоляційних та конструктивних композиційних матеріалів. Залежно від вмісту SiO_2 розрізняють високосилікатні та кварцові волокна.



a

б

Рис. 2.3. Скло-волокну:

a – пасма скляних волокон; *б* – оптична мікрофотографія, $\times 70$

Високосилікатні волокна містять 65 % SiO_2 , протягом отримання їх піддають обробці гарячими кислотами, що призводить до вилучення домішок, але не пошкоджує силікат. Кварцові волокна містять не менш ніж 99,95 % SiO_2 , їх отримують із природних кристалів кварцу та. Діаметр таких волокон складає від 0,010 до 10 мкм, а їх щільність лежить

у межах 1740...2200 кг/м³. Структура волокон залежить від умов рафінування скла у плавильній печі перед витягуванням, температури витягування, ступеня кристалічності та інших факторів, зокрема в'язкості розплаву та швидкості охолодження. Через швидке охолодження (зі швидкістю декілька сотень градусів у секунду) фіксується структура високотемпературного найбільш однорідного та рихлого розплаву скла. Тому щільність, модуль пружності, термічний коефіцієнт лінійного розширення, питома теплоємність і показник заломлення скляних волокон є декілька нижче ніж у масивного скла. Така структура волокон є нерівноважною і при термічній обробці прагне наблизитися до структури масивного скла.

На практиці максимальну міцність мають тонкі скляні волокна діаметром не більш ніж 10 мкм, що пояснюється однорідною структурою та відсутністю дефектів на поверхні. Границя міцності на розрив для високосилікатних скловолокон складає $\sigma_B = 2,4 \dots 3,5$ ГПа, для волокон із кварцового скла – $\sigma_B = 7 \dots 14$ ГПа.

Базальтові волокна (рис. 2.4) застосовують для виготовлення тепло- та звукоізоляції, вогнезахисту для житлових будинків, тепло- та паропроводів, енергетичних агрегатів, кисневих колон, кріотехнічного обладнання. Їх одержують розплавленням у плавильних печах (переважно індукційного типу) гірничих порід, до складу яких входять, мас.: % SiO₂ (47,5...55,0); TiO₂ (1,36...2,0), Al₂O₃ (14,0...20,0), Fe₂O₃ + FeO (5,38...13,5), MnO (0,25...0,5), MgO (3,0...8,5), CaO (7...11,0), Na₂O (2,7...7,5), K₂O (2,5...7,5), P₂O₅ (не більш ніж 0,5); SO₃ (не більш ніж 0,5). В залежності від діаметра базальтові волокна поділяються на мікротонкі ($d \leq 0,6$ мкм), ультратонкі ($d = 0,6 \dots 1,0$ мкм), супертонкі ($d = 1,0 \dots 3,0$ мкм), тонкі ($d = 9 \dots 15$ мкм), потовщені ($d = 15 \dots 25$ мкм), грубі ($d = 50 \dots 500$ мкм). Діаметр волокон суттєво впливає на щільність, теплопровідність, звукопоглинання майбутніх виробів.

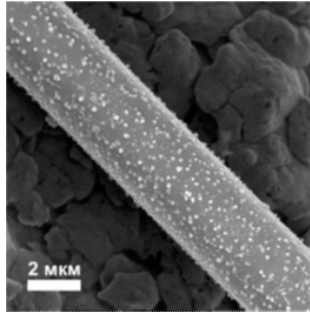


Рис. 2.4. Базальтові волокна, відпалені при 600 °С протягом 6 годин

Застосування спеціальної термічної обробки для супер-тонких волокон сприяє підвищенню стійкості у кислих та лужних середовищах, зниженню гігроскопічності через перебудову атомів у результаті кристалізації їх структури.

Віскери (англ. whisker – вуси, неорганічні волокна) – нитковидні кристали (рис. 2.5) з діаметром від 1 до 10 мкм і відношенням довжини до діаметра ≥ 1000 , є перспективним різновидом кристалічних матеріалів з унікальним комплексом властивостей. Віскери, як правило, мають ідеальну бездислокаційну структуру, що виключає звичайні механізми пластичної деформації і наближує їх міцність до теоретичних значень. Являючи собою одномірну кристалічну систему, віскери мають достатньо широкий діапазон застосування: від зміцнюючих волокон до медицини та наноелектроніки. Вони у десятки та сотні разів міцніші за звичайні кристали, мають більшу гнучність, корозійну стійкість та володіють кристалографічною анізотропією властивостей. Їх одержують за механізмами пара-рідина-кристал (випаровуванням з наступною конденсацією), осадженням з газової фази за участю хімічних реакцій, спрямованою кристалізацією евтектичних сплавів, кристалізацією розчинів тощо.

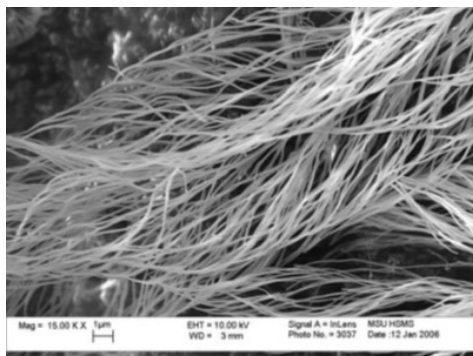


Рис. 2.5. Пір'євидні віскери SiO_2 , одержані за механізмом пара-рідина-кристал

Границя міцності на розрив $\sigma_{\text{в}}$ і модуль пружності E металевих віскерів наведені у табл. 2.1.

Таблиця 2.1. Міцнісні властивості металевих віскерів

Матеріал	$\sigma_{\text{в}}$, ГПа	E , ГПа
Залізо	12,75...13,40	199...214
Золото	1,40	-
Кадмій	0,89...0,92	68,5...71,0
Кобальт	3,20	—
Мідь	2,94...3,20	121...126
Молібден	3,4...3,9	—
Нікель	3,4...3,9	217
Срібло	1,65...1,80	75,5...78,0
Хром	8,05...9,0	238...245
Цинк	2,20...2,25	100...105

Прилади, зразки для досліджень, наочний матеріал

Прилади: мікроскоп металографічний MMP-2P, укомплектований цифровою камерою *Delta Optical HDCT-20C* та програмним забезпеченням для обробки зображень

Scope Image 9.0, комп'ютерне устаткування, комплект лабораторного хімічного посуду, гліцерин, дистильована вода, мікротвердомір ПМТ-3.

Зразки для вимірювання мікротвердості та пасма скляних, вуглецевих волокон, дискретні волокна з нержавіючої сталі 1Х18Н9Т.

Наочні матеріали, електронне та програмне забезпечення: фотоальбом з мікрофотографіями волокон та нитковидних кристалів, електронна база даних, таблиці з механічними властивостями металевих, скляних та вуглецевих волокон.

Порядок виконання роботи

1. За вказівками викладача обрати для досліджень певний вид волокна, підготувати дослідні зразки для оптичної мікроскопії з повздовжнім та поперечним виглядом волокон, сфотографувати їх за допомогою цифрової камери *Delta Optical HDCT-20C*.

2. За допомогою оптичного мікроскопа ММР-2Р визначити діаметр обраного волокна та дослідити стан його поверхні на наявність ультра- та мікропор.

3. Підготувати зразки для вимірювання мікротвердості.

4. На спеціально підготовлених для вимірювання мікротвердості зразках за допомогою мікротвердоміра ПМТ-3 визначити розмір відбитків та значення мікротвердості дослідних волокон, результати занести у табл. 2.1. Сфотографувати зразок.

Таблиця 2.2. Результати вимірювань мікротвердості волокон

Порошок	m , г	Діаметр відбитків, мм		H_{μ} , МПа
		d_1	d_2	

Порядок оформлення звіту

1. Коротко сформулювати мету роботи.
2. Навести дані про основні морфологічні характеристики волокон та їх механічні властивості.
3. Навести цифрову мікрофотографію обраного волокна. Описати стан його поверхні, визначити діаметр.
4. Навести цифрову мікрофотографію обраного волокна з відбитками приладу ПМТ-3. Заповнити таблицю 2.2.
5. Проаналізувати вплив фізико-хімічних процесів одержання волокна на його властивості. Навести приклади застосування дослідного волокна.
6. На підставі отриманих даних зробити висновки, в яких слід зазначити діаметр дослідного волокна та його мікротвердість.

Контрольні питання

1. Назвіть основні області застосування волокнистих композиційних матеріалів. Наведіть приклади.
2. Опишіть методи дослідження волокон.
3. Поясніть, що розуміють під терміном "морфологія волокон".
4. Назвіть та охарактеризуйте основні механічні властивості волокон. Охарактеризуйте мікротвердість як один з показників їх пластичності.
5. Охарактеризуйте нитковидні кристали (віскери) як перспективний вид сучасної волокнистої продукції.
6. Порівняйте будову та фізико-механічні властивості нитковидних кристалів та волокон.

Лабораторна робота № 3

ВИЗНАЧЕННЯ ГРАНУЛОМЕТРИЧНОГО СКЛАДУ, ОЗНАЙОМЛЕННЯ З МЕТОДАМИ ОДЕРЖАННЯ І ПІДГОТОВКИ НАПОВНЮВАЧІВ ДЛЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Мета роботи: за допомогою методів оптичної та комп'ютерної металографії дослідити гранулометричний склад наповнювачів для композиційних матеріалів; ознайомитись з методами їх одержання та підготовки.

Короткі теоретичні відомості

Для надання певних спеціальних властивостей до складу композиційних матеріалів додають наповнювачі (частинки з розмірами від 0,5...50 мкм до декількох міліметрів): зміцнювачі, стабілізатори, пігменти тощо. За *хімічним складом* наповнювачі поділяються на кремнеземи та силікати (азбест, тальк, каолін, кварцовий пісок, вулканічний пепел), карбонати (в основному це карбонати кальцію), окиси (наприклад, гідратований окис алюмінію). За *походженням* наповнювачі поділяються на природні матеріали (каолін, целюлозу, шунгіт, графіт), відходи виробництва (стружка, тирси, лушпиння, гумові відходи, бите скло), штучні наповнювачі (порошкоподібний поліетилен, мікросфери: скляні, керамічні, вуглецеві, фенольні тощо).

Природні наповнювачі на основі целюлози (деревна мука, тирси, рисове лушпиння) у своєму хімічному складі містять компоненти (целюлозу, геміцелюлозу, лігнін), які позитивно впливають на механічні властивості, зокрема на термічний коефіцієнт лінійного розширення. Застосування у технологіях порошкової металургії шунгіту дозволяє отримувати пористі матеріали з унікальними властивостями, зокрема фільтрів для очищення рідин і газів, електронагрівальних елементів, медичних виробів. У світовій практиці порошкоподібний каолін є перспективним для формування лакофарбових покриттів. Здрібнені та класифіковані частинки каоліну можуть містити низьку кількість пластинчастих силікатів (слюди, ілліта, хлорита, смектита) і кварц. Каолін має плоску структуру (рис. 3.1,*а*) з частинками у вигляді гексогональних пластинок та описується як шар кілець кремнію, з'єднаних через атоми кисню з шаром октаєдрів алюмінію (рис. 3.2,*б*).

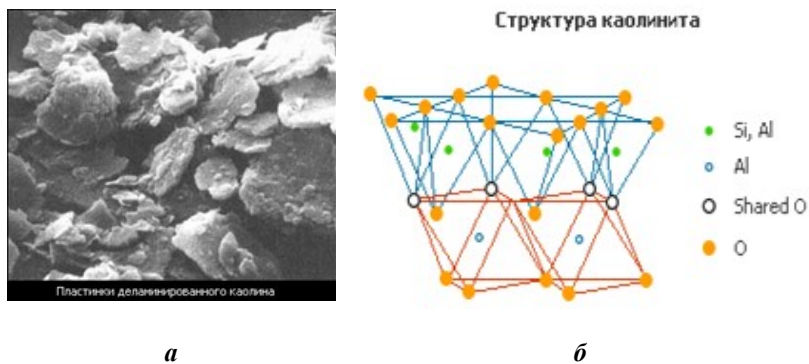
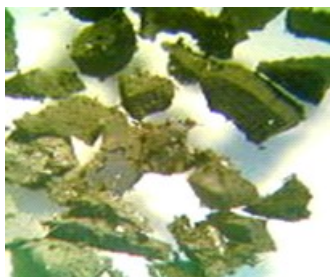


Рис. 3.1. Структура каоліну:

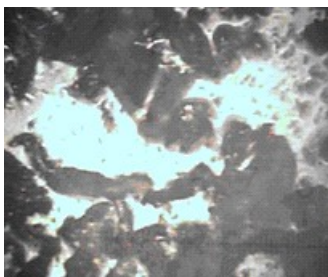
а – пластинчасті частинки делямінованого каоліну; *б* – модель структури

Наповнювачі для композиційних матеріалів є особливим видом сировини, застосування якої обумовлене зниженням вартості або наданням композиціям спеціальних властивостей,

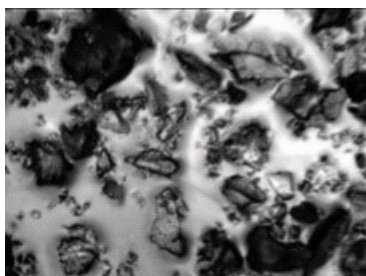
наприклад, зниження в'язкості та підвищення текучості, зниження маслопоглинання, підвищення термостійкості тощо. Застосування виробничих та побутових відходів (рис. 3.2) вирішує проблеми їх утилізації.



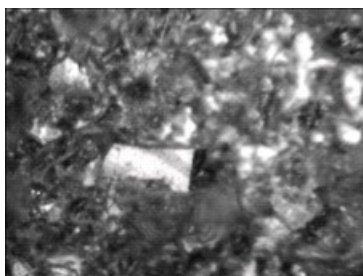
a



б



в



г

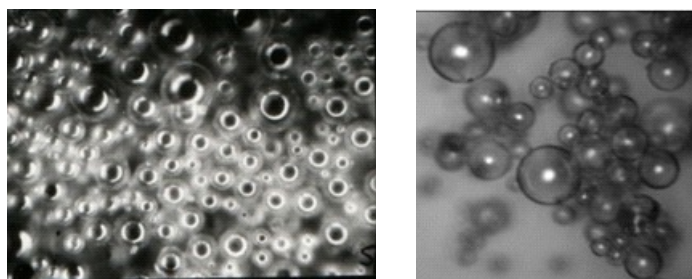
Рис. 3.2. Наповнювачі для композиційних матеріалів, які одержані з відходів виробництва:

a – гумове кришиво, $\times 8$; ***б*** – здрібнена стружка бабіту, $\times 300$;
в – здрібнений бій кришталевого посуду, $\times 350$; ***г*** – здрібнений бій свинцевмісного скла, $\times 350$

Застосування стружки, яка утворюється у металообробальному виробництві, є перспективним напрямком технологій порошкової металургії. Здрібнене скло у вигляді порошку можна застосовувати для одержання композиційних

матеріалів і покриттів. Перед введенням до складу композиційних матеріалів наповнювачі зазнають спеціальної підготовки, зокрема їх піддають просіюванню, просушуванню, знежиренню та класифікації за розмірами. Для цього застосовують мікроскопічні методи досліджень, які описані у попередніх роботах.

До *штучно одержаних* наповнювачів, які додають до складу композицій для надання спеціальних властивостей (зниженої щільності, термостійкості, демпфірувальних властивостей тощо), відносяться мікросфери: силікатні, скляні, вуглецеві, керамічні (рис. 3.3).



a

б

Рис. 3.3. Мікросфери:

a – порожні скляні мікросфери, $\times 200$;

б – алюмосилікатні мікросфери, $\times 350$

Так, наприклад, керамічні порожні мікросфери застосовують для виготовлення жаростійких КМ та високотемпературної ізоляції, високотемпературних фільтрів. Глиноземні мікросфери використовують до $1650 \dots 1750^\circ\text{C}$, а корундові – до 2000°C . Мікросфери з ZrO_2 , характеризуються найбільшою температурою плавлення – $2200 \dots 2650^\circ\text{C}$, їх застосовують у виробництві високотемпературних теплоізоляційних матеріалів. Порожні скляні мікросфери використовують

у суднобудуванні, атомній та ядерній техніці тощо. Вони є перспективною сировиною для наповнення різних композиційних матеріалів, які характеризуються низькою щільністю, високою питомою міцністю при об'ємному стисканні, жорсткістю, низькими значеннями діелектричної проникності та діелектричних втрат у широкому діапазоні, підвищеною теплоізоляційною здатністю. Традиційно у суднобудуванні порожні скляні мікросфери використовують для виготовлення матеріалів плавучості, а також для виготовлення легких клеїв, шпаклівок, герметиків. Їх уявна густина складає близько $0,21 \text{ г/см}^3$, але при температурі 490°C вони починають розм'якшуватися.

Силікатні мікросфери порівняно зі скляними характеризуються нижчою уявною густиною, але й меншою гідростатичною міцністю, що обмежує їх використання. Алюмосилікатні порожні мікросфери є перспективним наповнювачем для демпфіруючих, тепло- і звукоізоляційних композиційних матеріалів. Вони являють собою порожнисті, майже ідеальної сферичної форми, кульки дисперсністю $200\ldots 400 \text{ мкм}$. Вихідною сировиною для їх виготовлення є легкі фракції золи теплоелектростанцій, де процес спалювання вугілля відбувається в діапазоні температур $1500\ldots 1800^\circ\text{C}$. При таких температурах мінеральні частинки утворюють евтектичні суміші зі склофазою, газові включення у продуктах згорання при нагріванні розширюються і роздмухують окремі краплі розплаву; внаслідок врівноважування тиску газу силами поверхневого натягу утворюються порожнисті кульки. Вуглецеві порожні мікросфери застосовують у ракетній техніці, а також при виготовленні медичного обладнання для променевої терапії (наприклад столи для променевої терапії). Вони характеризуються складною молекулярною структурою, сировиною для їх одержання є рідкі фенольні смоли. Через складну

технологію та дороговартісну сировину цей вид наповнювачів має дуже високу вартість. Також у виробництві композиційних матеріалів широко застосовують мікросфери з неорганічної сировини: вулканічних порід, перліту (вулканічної породи з високим вмістом склофази), золи.

Прилади, зразки для досліджень, наочний матеріал

Прилади: мікроскоп металографічний MMP-2P, укомплектований цифровою камерою *Delta Optical HDCT-20C* та програмним забезпеченням для обробки зображень *Scope Image 9.0*, комп'ютерне устаткування, комплект лабораторного хімічного посуду, мікротвердомір ПМТ-3.

Зразки: наповнювачі природного походження (нарізка солома, шунгіт), відходи виробництва (стружка бабіту, алюмінію; бій віконного, посудного, лабораторного скла; порошкоподібний поліетилен, гумове кришиво), штучні наповнювачі (порожні скляні мікросфери, алюмосилікатні мікросфери).

Наочні матеріали, електронне та програмне забезпечення: фотоальбом з мікрофотографіями наповнювачів різного походження, електронна база даних, програмний комплекс "МЕГРАН", таблиці з властивостями.

Порядок виконання роботи

Студент виконує лабораторну роботу згідно з особистим завданням, виданим викладачем. У процесі виконання роботи студенту необхідно:

1. Обрати для досліджень певний вид наповнювача, сфотографувати його за допомогою цифрової камери *Delta Optical HDCT-20C*.
2. Ознайомитись з його походженням або одержанням.

3. За допомогою методів оптичної та комп'ютерної металографії дослідити форму і розмір обраних наповнювачів; результати навести у табличній формі (табл. 3.1).

Таблиця 3.1. Результати досліджень форми та розмірів наповнювачів

№	Порошок	Форма частинок	d_{max}	d_{min}	Фактор форми

4. Проаналізувати морфологічні та структурні характеристики обраного наповнювача.

5. Рекомендувати вид та режими (за необхідністю) підготовки обраного наповнювача до формування.

6. Проаналізувати зміни у структурі та морфології обраного наповнювача після проведення рекомендованих підготовчих операцій.

Порядок оформлення звіту

1. Коротко сформулювати мету роботи.

2. Навести дані про походження та властивості наповнювачів.

3. Навести цифрову мікрофотографію обраного наповнювача. Заповнити таблицю 3.1.

4. Навести гістограми розподілу наповнювачів за розміром, периметром, площею та фактором форми.

5. Описати процес одержання обраного наповнювача.

6. Навести рекомендації щодо виду та режимів підготовки обраного наповнювача до формування.

7. На підставі отриманих даних зробити висновки, в яких слід проаналізувати вплив методу одержання та підготовки наповнювача на його гранулометричний склад; проаналізувати зміни у структурі після проведення підготовчих операцій.

Контрольні питання

1. Назвіть призначення наповнювачів, які додають до складу композиційних матеріалів. Наведіть їх класифікацію за походженням та хімічним складом.

2. Охарактеризуйте основні види наповнювачів композиційних матеріалів. Наведіть методи їх підготовки для одержання композиційних матеріалів.

3. Обґрунтуйте доцільність застосування наповнювачів у перспективних технологіях одержання композиційних матеріалів. Поясніть, на підвищення яких властивостей спрямовано їх застосування.

4. Поясніть, як впливає попередня підготовка відходів виробництва (наприклад, стружки, скляного бою) на процеси структуроутворення та властивості майбутніх композитів.

5. Назвіть основні фізико-механічні характеристики наповнювачів як вихідної сировини, від яких безпосередньо залежать експлуатаційні властивості майбутніх композиційних матеріалів.

Лабораторна робота № 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПОПЕРЕДНЬОЇ ОБРОБКИ ПОРОШКІВ І ВОЛОКОН НА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ

Мета роботи: ознайомитись з методами попередньої обробки порошків і волокон; на прикладі розсіювання порошків і відпалювання порошків та волокон дослідити зміни їх фізико-механічних властивостей.

Короткі теоретичні відомості

Процеси підготовки порошків і волокон займають важливе місце у загальній схемі виробництва матеріалів. При цьому поряд з традиційними методами (розсіюванням, класифікацією, відпалюванням, змішуванням) набувають розвитку спеціальні методи підготовки порошків, такі як сфероїдизація, відкатування, гранулювання, покриття частинок зв'язуючим, одержання агломератів тощо.

Розсіювання порошків забезпечує виділення частинок з більш вузьким діапазоном розмірів у порівнянні з вихідним дисперсним складом. Внаслідок цього змінюються властивості пористого матеріалу.

Класифікація забезпечує відсортування порошків за певним діапазоном фракції, здійснюється за допомогою одинарних або багатодечних вібросит. Якщо вільне просівання порошку є складним, то використовуються протиральні ситові пристрої; для розсіювання частинок менше ніж 40 мкм застосовуються

зачинені повітряні класифікатори (сепаратори, циклоні-сепаратори) центробіжного та інерційного типів. Розділення порошку ґрунтується на залежності швидкості падіння частинок від їх розмірів. Повітряна сепарація є ефективною для розділення порошку з розмірами від 20 до 100 мкм.

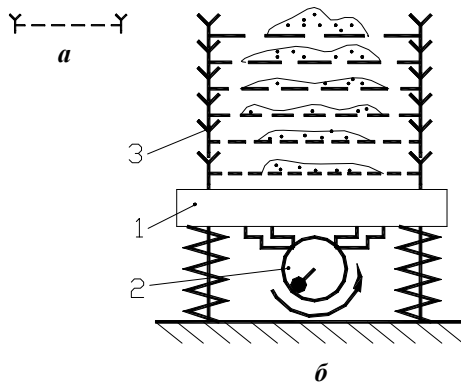


Рис. 4.1. Ситовий аналіз порошоків:
1 – платформа вібростенда; 2 – джерело вібрації; 3 – набір сит

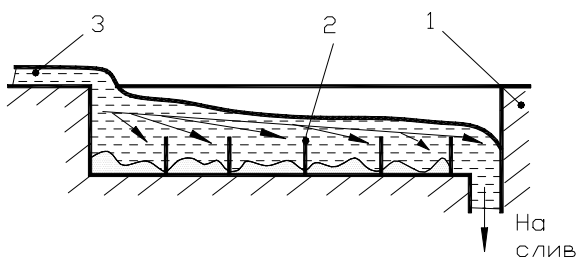


Рис. 4.2. Сепарація у горизонтальному потоку рідини:
1 – жолоб; 2 – перегородка, що розділяє жолоб на стінки;
3 – суспензія порошку

Відпалювання порошку здійснюється з метою стабілізації структури частинок, відновлювання оксидів на їх поверхні та

зняття наклепу. Температура відпалювання не перевищує більш ніж на 50...100 °С температуру початку рекристалізації металу або сплаву. Звичайно відпалюванню піддають металеві порошки, отримання механічним здрібненням, розпилюванням, електролізом та розкладанням карбонілів. Як відновлювальна атмосфера використовується водень або дисоційований аміак.

Сфероїдизація призначена для надання порошкам сферичної форми та здійснюється у плазмових пальниках нагріванням у інертних засипках і оплавленням у вертикальних високотемпературних печах. Процес сфероїдизації оснований на використанні сил поверхневого натягу при охолодженні ізольованих частинок порошку, нагрітих вище температури плавлення. Як інертні засипки використовуються вуглекислий газ і оксид алюмінію. Для порошків тугоплавких металів сфероїдизацію виконують у плазмових пальниках, для порошків титану і корозійної сталі – у високотемпературних печах.

З метою відокремлення сферичних порошків від несферичних виконують операцію *відкатування* на полірованих нахилених площинах або електросепарацію.

Сфероїдизація і відкатування у значній мірі підвищують фактор форми, пікнометричну щільність і текучість порошків, знижують пористість у стані вільного насипання та утрушування.

Гранулювання полягає у переробці стандартних промислових порошків дисперсністю менше 40 мкм у частинки-гранули розміром до 1 мкм. При механічному гранулюванні порошком спочатку пресують або прокатують, а потім піддають здрібненню. Рекомендований тиск пресування для порошків пластичних металів складає 5...100 МПа, для порошків твердих сплавів – 600 МПа.

Для порошків з низьким пресуванням (зокрема порошків твердих сплавів) заготовки між пресуванням і здрібненням

попередньо спікають при невисоких температурах. Це дозволяє знизити витрати енергії на термічну обробку, отримати порошки різного гранулометричного складу, зменшити витрати цінних компонентів матеріалу.

Для тонких порошоків, наприклад Ni, Nb, Mo, одержують *агломерати* з різною величиною частинок і практично з однаковою насипною пористістю.

Попередня підготовка волокон до формування включає в себе операції знежирення, відпалювання, закручування, войлокування (повстинування), осадження спеціальних речовин.

Відпалювання металевих волокон проводиться з метою підвищення їх пластичності та відбувається у печах з атмосферою водню або повітряною атмосферою.

Повстинування – процес формування матеріалів із неорієнтованих тонких дискретних волокон для наступного спікання або просочення. Розрізняють рідкісне, повітряне, гравітаційне і вакуумні види повстинування. В результаті зростає площа контактів між волокнами, що сприяє підвищенню міцнісних властивостей і утворенню капілярної структури фільтрів (рис. 4.3), теплових труб (рис. 4.4) тощо.

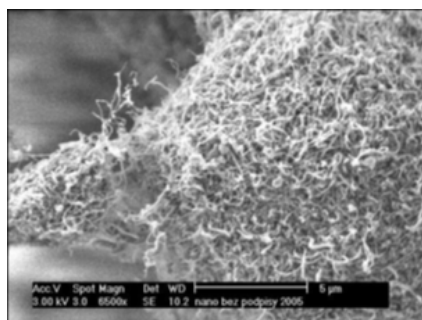


Рис. 4.3. Фільтрувальні елементи, модифіковані вуглецевим наноматеріалом "Таунит"

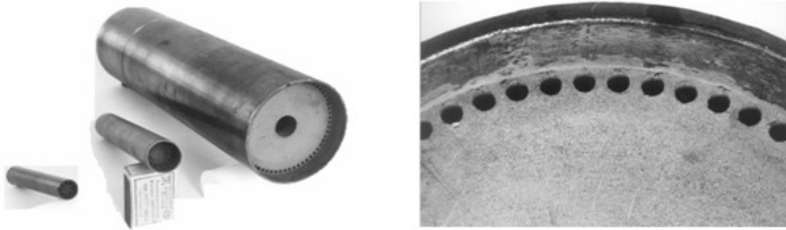


Рис. 4.4. Випарник контурної теплової труби
(композиція Cu–Al)

Прилади, зразки для досліджень, наочний матеріал

Прилади: набір вібростит, піч муфельна електрична ПМ-8, тигель, комплект лабораторного хімічного посуду, мікротвердомір ПМТ-3.

Матеріали: порошки алюмінію, заліза, сталеві волокна, хімічні реактиви.

Наочні матеріали, електронне та програмне забезпечення: мікроскоп металографічний ММР-2Р, укомплектований цифровою камерою *Delta Optical HDCT-20C* та програмним забезпеченням для обробки зображень *Score Image 9.0*, комп'ютерне устаткування, комплект лабораторного хімічного посуду, фотоальбом з мікрофотографіями, електронна база даних, програмний комплекс "МЕГРАН".

Порядок виконання роботи

Студенти виконують один або кілька варіантів за вказівками викладача.

Варіант 1. Дослідження процесу розсіювання порошків.

1. За вказівками викладача обрати порошок.
2. За допомогою вібростит розділити дослідний порошок на фракції.

3. За допомогою цифрової камери *Delta Optical HDCT-20C* сфотографувати дослідний порошок, зберегти отриманий файл у форматі растрового рисунку (*BMP).

4. За допомогою комп'ютерного комплексу "МЕГРАН" визнати гранулометричний склад кожної фракції.

5. Результати навести у вигляді гістограм розподілу за розмірами у напрямках X та Y , периметром та фактором форми. Проаналізувати отримані дані.

Варіант 2. Дослідження впливу відпалювання порошків на їх мікротвердість.

1. За вказівками викладача обрати порошок.

2. Підготувати дослідний зразок для вимірювання мікротвердості (див. роботу № 1).

3. За допомогою приладу ПМТ-3 виміряти мікротвердість порошка. Одержані дані занести до табл. 4.1.

4. Обґрунтувати вид та обрати режими термооброблювання порошку.

5. Засипати порошок у тигель, який потрібно розмістити у робочому просторі муфельної печі.

6. Встановити температуру та час відпалювання.

7. По закінченні операції дістати тигель з порошком. Після його остигання підготувати дослідний зразок для вимірювання мікротвердості.

8. За допомогою приладу ПМТ-3 виміряти мікротвердість порошку після термооброблювання. Отримані дані занести до табл. 4.1.

Таблиця 4.1. Результати експериментальних досліджень порошку

Порошок	$H_{\mu 0}$, МПа		t , °C	τ , хв	$H_{\mu 0}$, МПа (після τ/t_0)	
	d_1	d_2			d_1	d_2

Варіант 3. Дослідження впливу відпалювання металевих волокон на їх мікротвердість.

1. За вказівками викладача обрати волокно.
2. Підготувати дослідний зразок для вимірювання мікротвердості (див. роботу № 2).
3. За допомогою приладу ПМТ-3 вимірити мікротвердість волокна. Отримані дані занести до табл. 4.2.
4. Обґрунтувати вид та обрати режими відпалювання волокна.
5. Помістити пасма волокон у тигель, який потрібно розмістити у робочому просторі муфельної печі.
6. Встановити температуру та час відпалювання.
7. По закінченні операції дістати тигель з волокном. Після його остигання підготувати дослідний зразок для вимірювання мікротвердості.
8. За допомогою приладу ПМТ-3 вимірити мікротвердість волокна після відпалювання. Отримані дані занести до табл. 4.2.

Таблиця 4.2. Результати експериментальних досліджень волокна

Волокно	$H_{\mu 0}$, МПа		t , °С	τ , хв	$H_{\mu 0}$, МПа (після t/θ)	
	d_1	d_2			d_1	d_2

Примітка. Кожен студент виконує один із зазначених варіантів.

Порядок оформлення звіту

1. Коротко сформулювати мету роботи.
2. Навести стислі теоретичні відомості про основні методи підготовки порошків і волокон.

3. Обґрунтувати вибір певної обробки порошку (волокна) та навести технологічні режими.

4. Навести результати експериментальних досліджень (у табличній формі).

5. Сформулювати висновки, в яких необхідно відобразити вплив обраного виду обробки порошку (волокон) на їх фізико-механічні та технологічні властивості.

Контрольні питання

1. Назвіть основні види підготовчих операцій порошків і волокон.

2. Назвіть і охарактеризуйте традиційні методи підготовки порошків.

3. Назвіть і охарактеризуйте спеціалізовані методи підготовки порошків.

4. Обґрунтуйте доцільність застосування відпалювання порошків. Поясніть зміну їх властивостей.

5. Поясніть, для чого застосовують знежирення волокон.

6. Опишіть процес войлокування.

7. Поясніть доцільність застосування класифікації та розсіювання порошків за фракціями.

Лабораторна робота № 5

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОРИСТОЇ СТРУКТУРИ ПОРОШКОВИХ І КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Мета роботи: за допомогою методів гідростатичного зважування та комп'ютерної металографії дослідити об'єм та розмір пор зразків пористих порошкових і композиційних матеріалів.

Короткі теоретичні відомості

Пористість (відношення об'єму пустот до повного об'єму пористого тіла) є головною характеристикою тепло- та звукоізоляційних, фільтрувальних, антифрикційних та інших композиційних матеріалів (рис. 5.1), таких як пористі змішувачі, вогнезапобіжники, елементи поверхневої іонізації, хімічні джерела току, паливні елементи тощо, і суттєво впливає на їх експлуатаційні властивості: негативно – на міцність, проте надає тепло- та звукоізоляційних властивостей.

Розрізняють наступні види пористих і комірчастих матеріалів: пористі порошкові матеріали; пористі волокнисті матеріали; пористі сітчані матеріали; комбіновані пористі проникні матеріали; матеріали, виготовлені із пористих спіралей; високопористі комірчасті матеріали. Ідеальною структурою, що забезпечує підвищення характеристик міцності в умовах всебічного стискання, вважається комірчаста структура пінополіуретанів у формі витягнутого пентагонального

еліпсоїда обертання. Проте різновиди пінополіуретанів характеризуються низькою термостійкістю (до 160...180 °С), горючістю, токсичністю тощо, тому у цих умовах кращими до використання є металеві піноматеріали, які також одержали назву "*матеріали з комірчастою структурою*". Для їх одержання набули розвитку технології спікання металевих порошків, волокон, віток з піноутворювачем; дублювання структури пінополіуретану, що забезпечує формування пористості (40...85 %) у нержавіючих і жаростійких сплавах з ніхрому, сталей та інших сплавів на нікелевій, кобальтовій, мідній та алюмінієвих основах. Під час спікання відбувається рівномірний розподіл легуючих елементів по перемичках і гомогенізація хімічного складу.

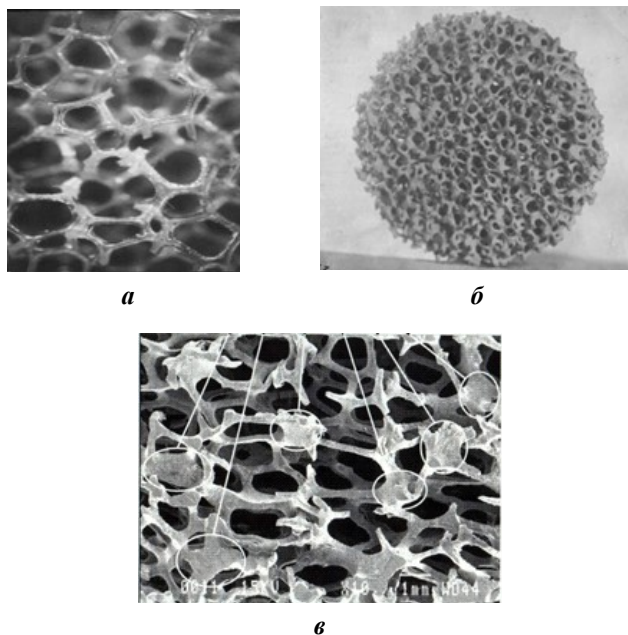


Рис. 5.1. Мікроструктура комірчастих матеріалів:
a – керамічного фільтру після гідравлічних випробувань, $\times 150$;
б – закритопористого піноскла (1:1); ***в*** – алюмінієва піна, $\times 150$

Розрізняють наступні види пористості: відкриту та закриту; розподіл пор за об'ємом може бути як рівноважним, так і нерівноважним. Основними характеристиками пористої структури є: форма та стан поверхні пор, розміри пор, питома поверхня пор, проникність, просвіт.

Форма та стан поверхні пор – залежить від форми та розміру частинок, тиску пресування, режимів спікання. Найбільш просту форму мають пористі матеріали із сферичних частинок одного розміру. Однак ця форма складна та змінюється в залежності від щільності пакування частинок.

Розміри пор. Для визначення характеристик пор зазвичай використовують їх розподіл за розміром. При цьому використовують такі поняття, як максимальний і мінімальний розмір пори. Максимальні пори грають суттєву роль при визначенні характеристик фільтрів, оскільки саме вони визначають максимальні розміри брудних частинок при фільтруванні рідини та газів. Середній розмір пор використовують для порівняння даних або при визначенні середніх значень при обробці експериментальних та теоретичних значень. Розподіл пор за розміром є більш інформативним параметром на відміну від середнього розміру пор.

Питома поверхня пор – це площа внутрішніх поверхонь пор в одиниці об'єму S_{num}^V , м²/м³ або в одиниці маси S_{num}^m , м²/г пористого матеріалу. Теоретично питому поверхню пор можна визначити тільки для пористих тіл, які складаються із частинок правильної форми, при цьому головною умовою є те, що відомі величини розміру контакту між частками:

Проникність – властивість ПМ пропускати через себе рідину або газ під дією градієнту тиску, який до нього прикладається. Характеризується коефіцієнтом проникності **K**, який

залежить від структурних показників та визначається співвідношенням (формула Дарсі):

$$K = \mu W_{\phi} l / (p_{\text{вх}} - p_{\text{вих}}),$$

де W_{ϕ} – швидкість фільтрації, $l / (p_{\text{вх}} - p_{\text{вих}})$ – градієнт тиску на пористому тілі товщиною l .

Коефіцієнт звивистості пор – це збільшення довжини пор порівняно з товщиною пористого тіла: $\alpha_{\text{зв}} = l_n / l$.

До основних експериментальних методів дослідження характеристик пористої структури належать: мікроструктурні методи дослідження, методи неруйнуючого контролю, пікнометричний метод (за допомогою пентапікнометру), методи насичування рідиною пробних зразків (з використанням дистильованої води, гасу), ртутної порометрії, витиснення рідини з пор, методи поверхневої адсорбції, розсіяння рентгеновських променів, метод фільтрації пористих систем. Метод вдавлювання ртуті оснований на її властивостях не змочувати тверді тіла. Для заповнення об'єму пор необхідно за допомогою зовнішнього тиску здолати сили капілярного опору. Саме цей метод має високу точність (3–4 %), з його допомогою можна досліджувати пори розміром від 0,01 до 100 мкм. Метод витиснення рідини з пор, як і метод вдавлювання ртуті, оснований на капілярній взаємодії. Вільний об'єм пористого зразка заповнюють рідиною (спирт або вода), а потім використовують тиск газу, який необхідний для витиснення рідини з пор. Для визначення розмірів малих пор (менш 5 мкм) пори заповнюють ізобутиловим спиртом. Поверхневий натяг у спирту або у гасу значно менше ніж у води. Тому у зразках, які насичені спиртом, відкриваються пори меншого розміру.

У лабораторних умовах величину загальної пористості можна визначити за методикою гідростатичного зважування

у дистильованій воді (ГОСТ 18847-84, ГОСТ 15139-69). Для досліджень характеристик пористої структури (характеру розташування, форми та розміру пор) застосовують методи оптичної та комп'ютерної металографії.

Прилади, зразки для досліджень, наочний матеріал

Прилади: мікроскоп металографічний ММР-2Р, укомплектований цифровою камерою *Delta Optical HDCT-20C* та програмним забезпеченням для обробки зображень *Scope Image 9.0*, комп'ютерне устаткування, комплект лабораторного хімічного посуду, терези з гирями; штангенциркуль, дистильована вода.

Зразки пористих матеріалів: керамічних фільтрів, матеріалів з комірчастою структурою, піноскла, пінобетону.

Наочні матеріали, електронне та програмне забезпечення: фотоальбом з мікроструктурами фільтрів та комірчастих матеріалів, електронна база даних, програмний комплекс "МЕГРАН", таблиці з властивостями.

Порядок виконання роботи

1. За допомогою методів оптичної металографії дослідити зразок обраного за вказівками викладача пористого матеріалу. Проаналізувати характер пористої структури.

2. За допомогою цифрової камери *Delta Optical HDCT-20C* сфотографувати дослідний зразок обраного пористого матеріалу, зберегти отриманий файл у форматі растрового рисунку (*BMP).

3. За допомогою методу комп'ютерної металографії "МЕГРАН" дослідити розмір та фактор форми пор. Результати навести у вигляді гістограм розподілу за розмірами у напрямках X та Y , периметром та фактором форми. Проаналізувати отримані дані.

4. Методом гідростатичного зважування визначити загальну пористість зразку.

Оформлення звіту

1. Коротко сформулювати мету роботи.
2. Охарактеризувати основні параметри пористої структури порошкових і композиційних матеріалів. Навести приклади їх застосування у техніці.
3. Навести цифрову мікрофотографію дослідного зразка.
4. Навести гістограми розподілу пор за розміром, периметром, площею та фактором форми.
5. Навести результати визначення загальної пористості дослідного зразку за методикою гідростатичного зважування. Порівняти результати з дослідженнями методом комп'ютерної металографії.
6. Зробити висновки, в яких проаналізувати особливості пористої структури дослідного зразка.

Контрольні питання

1. Дайте визначення поняттю "пористість". Назвіть та охарактеризуйте основні види пористих структур.
2. Охарактеризуйте форму та стан поверхні пор, розмір пор як важливі характеристики пористої структури. Назвіть головні характеристики пористої структури, які пред'являються до фільтрувальних матеріалів.
3. Поясніть, як форма та розмір порошків впливають на формування певної пористої структури матеріалів.
4. Назвіть основні технологічні напрямки формування пористої структури порошкових і композиційних матеріалів. Наведіть області їх застосування, назвіть головні експлуатаційні умови.
5. Назвіть та охарактеризуйте методи дослідження пористих структур.

Лабораторна робота № 6
**ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ
МІКРОСТРУКТУРИ ШАРУВАТИХ
І ГРАДІЄНТНИХ МАТЕРІАЛІВ**

Мета роботи: ознайомитись з методами одержання шаруватих і градієнтних композиційних матеріалів; дослідити мікроструктуру біметалічних градієнтних матеріалів та шаруватих композицій метал–кераміка, метал–скло; вимірити мікротвердість шарів.

Короткі теоретичні відомості

Останнім часом поширюється попит на матеріали, структура яких складається із шарів різного складу та властивостей. Це інструментальні, триботехнічні КМ для експлуатації в агресивному середовищі та в умовах абразивного зношування, у навантажених вузлах нафтохімічної і металургійної промисловості, жаростійкі порошкові матеріали на сталевих основах; трьохшарові тверді сплави на основі карбіду хрому з нікель-фосфорним зв'язуючим; порошкові матеріали на основі діоксиду цирконію та оксиду алюмінію тощо.

Особливості структури *шаруватих* порошкових і композиційних матеріалів (рис. 6.1) полягає у тому, що матеріал складається із робочих шарів, які виконують функціональні навантаження, та основи, яка розташована між ними та несе

міцнісне навантаження. Робочий шар може бути виготовленим із карбідів, нітридів, карбонітридів, оксидів хрому та алюмінію, основа – із нержавіючих порошкових сталей або неметалів. Основними технологіями отримання шаруватих порошкових і композиційних матеріалів є напресовування на основу, екструзія, гаряче ізостатичне пресування, проте недоліками цих методів є складне апаратурне оформлення, обмеження щодо форм та розмірів виробів, а також мала імовірність в управлінні мікроструктурою та властивостями шарів. Найбільш перспективними технологіями отримання шаруватих порошкових і композиційних матеріалів є гаряче штампування, інжекційне формування, методи хімічної інфільтрації. Одним з нових напрямків технологій формування композитів є одержання градієнтних матеріалів з об'ємним та поверхневим градієнтом властивостей.

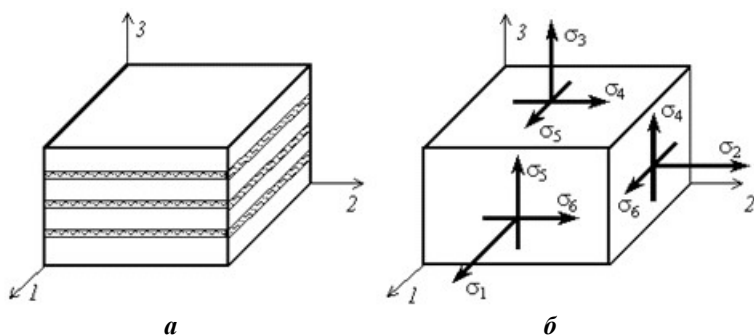


Рис. 6.1. Загальна модель структури шаруватого композиційного матеріалу:
а – розташування шарів; *б* – анізотропія механічних властивостей

Градієнтні матеріали (або функціональні градієнтні матеріали) (англ. functionally gradates materials) – є інженерними структурованими матеріалами, які характеризуються заданим

розподілом складу, структури або властивостей по об'єму або по поверхні. За своїми властивостями ця група матеріалів перевищує гомогенні та традиційні КМ та відрізняється від них наявністю градієнту структури та/або властивостей (твердості, щільності, теплопровідності, електропровідності тощо), формування якого можливе внаслідок особливих режимів одержання або термообробки. Градієнт одних властивостей визначається головним чином складом матеріалу (наприклад, модуль пружності, теплопровідність, теплоємність), інших – структурою (міцність, ударна в'язкість, оптичні, магнітні характеристики тощо). У простішому випадку для двофазної системи структура градієнтних матеріалів характеризується анізотропною спрямованістю розподілу одного компоненту в об'ємі іншого.

Термін "фаза" відноситься до елементу матеріалу, який складає однорідну структурну одиницю. Функціональні градієнтні матеріали (ФГМ) класифікують за: видом використання (матеріал, покриття, з'єднання); комбінацією компонентів (метал, кераміка тощо); утворенням градієнта та його природою (фізичний, хімічний, електрохімічний, структурний).

Універсальних технологій одержання градієнтних матеріалів не існує, проте серед відомих методів формування градієнту властивостей (фізичних, хімічних, електрохімічних, механічних, синтез, СВЧ-технології) найбільш економічними є технології порошкової металургії. Розрахунок градієнтів та розробка дизайну ФГМ-компоненту повинні ґрунтуватися на інформації стосовно умов експлуатації та можливих експлуатаційних обмеженнях. У табл. 6.1 наведені методи одержання перспективних систем ФГМ, а приклади їх використання – у табл. 6.2.

Таблиця 6.1. Методи одержання та приклади систем функціональних градієнтних матеріалів

Методи одержання	Приклади систем
Хімічне осадження, іонні технології	SiC/C/TiC, SiO ₂ /SiO ₂ (GeO ₂), BN/Si ₃ N ₄ , C/B ₄ C/SiC, Cr ₃ C ₂ /Cr, TiB ₂ /SiC, TiC/Ti, TiN/Ti, Ti/Al
Фізичне осадження	ZrO ₂ /Al ₂ O ₃ , ZrO ₂ (низька/висока щільність)
Електрохімічні методи	Cu/CuZn, Cu/CuNi, ZrO ₂ /Ni, SiC/C, CoNiReP
Золь-гель технології	SiO ₂ /TiO ₂ , SiO ₂ /GeO ₂
Інфільтрація, спрямована кристалізація	SiC/C, W/Cu, Al ₂ O ₃ /Al, Al ₂ O ₃ /Cu, Al ₂ O ₃ /Ni, Cu/неіржавіюча сталь, SiC/Al
Холодне пресування та спікання (всі види)	Різноманітні комбінації (порошки, волокна, шари)
Шлікерне литво	ZrO ₂ /NiCr, ZrO ₂ /неіржавіюча сталь, Al ₂ O ₃ /W, Al ₂ O ₃ /ZrO ₂ , Al ₂ O ₃ /Al ₂ TiO ₅
Седиментація	Al ₂ O ₃ /NiAl, Al ₂ O ₃ /W, Al ₂ O ₃ /Ni
Спікання, СВС-технології	TiB ₂ /Cu, SiC-AlN/Mo, W, Al ₂ O ₃ /Cu, MgO/MgAl ₂ O ₄ /Cu, ГАП/TiSiC-AlN
Гаряче пресування (зокрема ізостатичне)	ZrO ₂ /Mo, Al ₂ O ₃ /Ni, MgO/Ni, AlN/Ni, TiC/Ni, SiC/AlN/Mo, Si ₃ N ₄ /Mo, Cr ₃ C ₂ /Ni, Cr ₃ C ₂ /TiC, MoSi ₂ /TiAl
Дифузія, хімічні реакції	ZrO ₂ /NiNb, Al ₂ O ₃ /Sn/Nb, SiC/C, Mo ₂ SiB ₂ /Ni, Ti ₅ Si ₃ /Ti, ZrSi ₅ /Zr, Al ₂ O ₃ /ZrO ₂

Таблиця 6.2. Приклади застосування градієнтних матеріалів

ФГМ системи	Область застосування
WC-Co, кермети	Інструменти, зокрема буровий інструмент
W-Cu	Мішені для лазерів, енергетика, алмазні інструменти, космічна техніка
Метал-кераміка	Корпуса для електроніки, космічна та ракетна техніка, термоядерна енергетика, теплостійкі та антикорозійні покриття
Сталі, сплави	Газові турбіни, медичинська техніка
Напівпровідники	Електронні пристрої, системи перетворення енергії, матеріали «Стелс»
Композити	Конструкційні вироби, біоматеріали
Скло	Волоконна оптика з градієнтним коефіцієнтом переломлення, електронно-оптичні пристрої, пристрої для акумулювання енергії

Як приклад на рис. 6.2 наведені мікроструктури керамічного градієнтного матеріалу і двофазних ФГМ системи W–C, одержаних методом вільного просочення сплавом-зв'язкою (мельхіором НММц 20-20, латунню Л62) пористого каркасу.

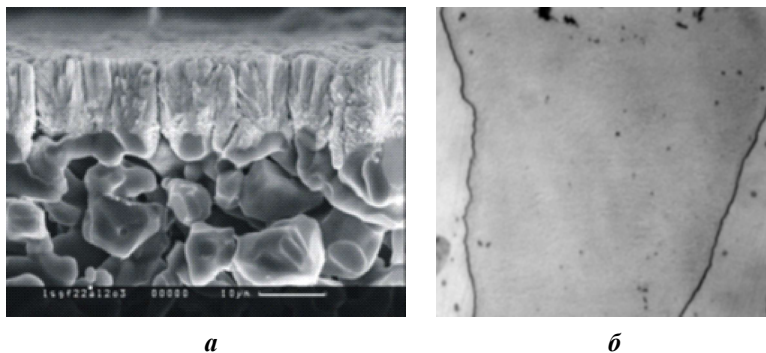


Рис. 6.2. Мікроструктура градієнтних матеріалів:
a – керамічна мембрана; *б* – (W–C/НММц) + (W–C/Л62), $\times 400$

Прилади, зразки для досліджень, наочний матеріал

Прилади: мікроскоп металографічний ММР-2Р, укомплектований цифровою камерою *Delta Optical HDCT-20C* та програмним забезпеченням для обробки зображень *Scope Image 9.0*, комп'ютерне устаткування, комплект лабораторного хімічного посуду, мікротвердомір ПМТ-3.

Зразки біметалічних композиційних матеріалів, композицій метал–кераміка, метал–скло.

Наочні матеріали, електронне та програмне забезпечення: фотоальбом з мікрофотографіями, електронна база даних, програмний комплекс "МЕГРАН", таблиці з властивостями шаруватих та градієнтних матеріалів різного призначення.

Порядок виконання роботи

1. За допомогою методів оптичної металографії дослідити зразок обраного за вказівками викладача шаруватого або градієнтного композиційного матеріалу.

2. За допомогою цифрової камери *Delta Optical HDCT-20C* сфотографувати дослідний зразок, зберегти отриманий файл у форматі растрового рисунку (*BMP).

3. Використовуючи цифрову мікрофотографію проаналізувати структуру матеріалу, зокрема порядок розташування шарів (горизонтальне, вертикальне), виміряти їх товщини, структуру перехідної зони.

4. За допомогою мікротвердоміра ПМТ-3 виміряти мікротвердість кожного з шарів.

5. Використовуючи узагальнені моделі структури шаруватих (градієнтних) композиційних матеріалів, пояснити особливості властивостей дослідного матеріалу.

Порядок оформлення звіту

1. Коротко сформулювати мету роботи.

2. Навести дані про використання та особливості структури і властивостей шаруватих і градієнтних композиційних матеріалів.

3. Схематично зобразити та проаналізувати узагальнені моделі структури шаруватих (градієнтних матеріалів).

4. Навести цифрову мікрофотографію дослідного зразка, описати його мікроструктуру.

5. Навести результати вимірювання мікротвердості шарів дослідного зразку.

5. Зробити висновки, в яких проаналізувати взаємозв'язок між структурою та властивостями шаруватих і градієнтних матеріалів.

Контрольні питання

1. Наведіть приклади застосування шаруватих композиційних матеріалів. Охарактеризуйте методи формування їх структури.
2. Охарактеризуйте особливості структури шаруватих порошкових і композиційних матеріалів.
3. Опишіть процеси структуроутворення функціональних градієнтних матеріалів.
4. Поясніть вплив градієнту властивостей на експлуатаційне призначення ФГМ.
5. Опишіть узагальнені моделі структури шаруватих (градієнтних) композиційних матеріалів.

ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ХОЛОДНОГО СТАТИЧНОГО ПРЕСУВАННЯ МЕТАЛЕВИХ ПОРОШКІВ

Мета роботи: на прикладі однобічного статичного пресування металевих порошків у зачинених прес-формах ознайомитись з процесами структуроутворення, які відбуваються на етапі формування матеріалів деформаційними методами.

Короткі теоретичні відомості

Формування, яке полягає в отриманні заготовки із заданою формою та розмірами, є однією із головних технологічних операцій при одержанні виробів із порошкових і композиційних матеріалів. Формування заготовки за допомогою прикладання тиску називається *пресуванням*. Порошкове тіло, яке отримано через пресування, називається *пресовкою*.

У стані насипки між частками утворюються порожнини, що пов'язано з *арочним ефектом*. Після додавання тиску в першу чергу заповнюються ці порожнини, і частки переміщуються один відносно іншого.

Найбільш розповсюдженим є пресування у зачинених прес-формах (рис. 7.1), де порошок засипається у порожнину матриці 1, через верхній пуансон 2 за допомогою пресу (рис. 7.2) прикладається певний тиск, після зняття якого заготівка виймається з порожнини матриці. Ця операція здійснюється за допомогою або одного з пуансонів, або з використанням спеціального виштовхувача. Порошок під тиском пуансонів поводить деякою мірою подібно до рідини – він прагне розтікатися в сторони, що обумовлює виникнення тиску на стінки прес-форми, тобто *бічний тиск*, який є значно меншим за тиск

пресування. У процесі пресування між зовнішнім шаром порошку й стінками прес-форми також виникають сили тертя, які зростають зі збільшенням тиску пресування та призводять до появи значного перепаду тиску по висоті пресовки, і як наслідок, нерівномірності ущільнення порошку. Сили тертя також виникають між поверхнями пуансонів і верхнім шаром порошку.

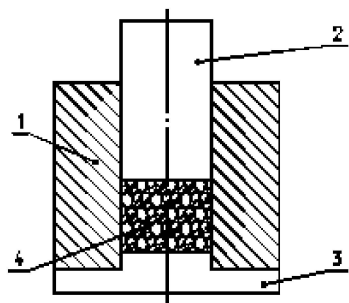


Рис. 7.1. Схема зачиненої прес-форми для пресування порошків:

1 – матиця; 2 – верхній пуансон; 3 – нижній пуансон; 4 – порошок



Рис. 7.2. Лабораторна установка для пресування порошків

У процесі пресування частинки порошку зазнають пружної та пластичної деформації, у результаті чого у пресовці накопичуються значні напруження, через які вона після зняття навантаження вона прагне розширитися. Проте у напрямку, перпендикулярному напрямку пресування, цьому перешкоджають стінки прес-форми. У напрямку пресування може мати місце часткове розширення: повному розширенню та повному зняттю пружних напружень перешкоджають саме сили тертя. Спресований брикет після зняття тиску міцно утримується у порожнині прес-форми. В результаті цього для видалення брикету з прес-форми потрібно прикласти певний тиск, який називається *тиском випресування*, або *виштовхування*. Пружні напруження, які накопичилися у брикеті в процесі пресування, після звільнення брикету з прес-форми призводять до його розширення як в напрямку пресування, так і в перпендикулярному напрямку.

Втрати тиску на зовнішнє тертя при відсутності змащення досягають 60...90 %, що обумовлює нерівномірний розподіл щільності по висоті пресуемого брикету та змушує використовувати змащення. У загальному випадку втрати зусилля пресування на зовнішнє тертя повинні залежати від:

- коефіцієнта тертя в парі "матеріал пресувального брикету – матеріал прес-форми";
- схильності до схоплювання у цій парі; якості обробки стінок прес-форми;
- наявності змащення; висоти пресуемого порошку;
- діаметра прес-форми.

Крім тертя порошку об стінки прес-форми, при пресуванні певну роль відіграє тертя між частками порошку, яке відрізняється від зовнішнього тертя та має назву *внутрішнього тертя*: він у кілька разів вищий за коефіцієнт зовнішнього тертя, що обумовлено недосконалістю поверхні порошкових

частинок, що також призводить до нерівномірного розподілу щільності у спресованих виробах.

Після виштовхування у пресовці виникає явище *пружної післядії*, яке полягає у розширенні порошкового тіла у напрямку, протилежному до пресування. Величина пружної післядії залежить від багатьох факторів, зокрема дисперсності, форми, стану поверхні частинок, вмісту окислів, механічних властивостей порошків, величини тиску, наявності змащування внутрішніх стінок прес-форми, пружних властивостей матриці прес-форми та пуансонів. Для запобігання виникнення тріщин до формувальної суміші додають пластифікатори у вигляді стеарата, дисульфіда молібдену, графіта, парафіна, етилового спирта та інших поверхнево активних речовин.

Обладнання, пристосування, зразки для досліджень, наочний матеріал

Обладнання та пристосування: пресувальна машина, прес-форма із нержавіючої сталі, аналітичні ваги GR200, мікроскоп металографічний MMP-2P, укомплектований цифровою камерою *Delta Optical HDCT-20C* та програмним забезпеченням для обробки зображень *Scope Image 9.0*, комп'ютерне устаткування.

Матеріали: металеві порошки (заліза, нікелю, міді), пластифікатор, зразки пресовок.

Наочний матеріал: альбом з мікрофотографіями пресовок, електронна база даних, програмний комплекс "МЕГРАН", таблиці з властивостями пресовок.

Порядок виконання роботи

1. За вказівками викладача вибрати порошок для пресування, визначити його масу.
2. Перевірити комплектність прес-форми та підготувати її до пресування. Замірити її геометричні розміри.

3. За вказівками викладача виконати дозування навішення порошків.
4. Заміряти висоту пресовки.
5. Встановити прес-форму в пресувальний пристрій.
6. Зафіксувати вихідний стан на діаграмі ущільнення порошку.
7. Виконати пресування порошку, побудувати діаграму ущільнення.
8. Витягти спресований брикет з прес-форми.
9. Замірити висоту пресовки, розрахувати усадку.
10. Визначити щільність пресовки. Проаналізувати процес ущільнення порошку протягом холодного статичного пресування.
11. Дослідити за допомогою мікроскопа ММР-Р мікроструктуру пресовки, сфотографувати її за допомогою цифрової камери *Delta Optical HDCT-20C*.
12. За допомогою методу комп'ютерної металографії, а саме програмного комплексу "МЕГРАН" проаналізувати розмір та форму пор одержаної пресовки.

Порядок оформлення звіту

1. Коротко сформулювати мету роботи.
2. Записати сутність процесу статичного пресування. Схематично зобразити процес одnobічного статичного пресування.
3. За результатами замірів навести ескіз прес-форми.
4. Навести діаграму ущільнення порошку. Описати процеси, які супроводжують ущільнення порошків протягом холодного статичного пресування.
5. Навести цифрову мікрофотографію одержаної пресовки.
6. Навести гістограми розподілу пористості пресовки за розміром та фактором форми.
7. Описати мікроструктуру пресовки.

Контрольні питання

1. Опишіть сутність однобічного статичного пресування.
2. Охарактеризуйте процеси внутрішнього та бічного тиску при пресуванні порошку.
3. Опишіть фактори, які впливають на рівномірний розподіл щільності у спресованих матеріалах.
4. Охарактеризуйте явища пружної післядії та арочного ефекту.
5. Охарактеризуйте вплив дисперсності та форми порошків на їх пресованість і характер міжчасткових контактів при формуванні пресовок.

Лабораторна робота № 8

ВИБІР РЕЖИМІВ, ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ СПІКАННЯ МЕТАЛЕВИХ ПОРОШКІВ ТА ЇХ СУМІШЕЙ

Мета роботи: на прикладі металевих порошків ознайомитись з процесами, які відбуваються протягом спікання; обрати режими спікання, набути навиків з підготовчих робіт щодо формування, дозування та аналізу процесів структуроутворення порошкових і композиційних матеріалів на етапі спікання.

Короткі теоретичні відомості

Спіканням порошкової суміші називають її нагрівання та витримку при температурі нижче точки плавлення (або розм'якшення) основного компонента з метою забезпечення заданих механічних і фізико-механічних властивостей. Спікання є обов'язковою технологічною операцією, результат якої полягає у перетворенні неміцного порошкового тіла у міцно спечений виріб зі властивостями, наближеними до властивостей литого металу. Таке перетворення здійснюється внаслідок зміни характеру міжчасткових контактів та заповнення об'єму відкритих пор розм'якшеною речовиною.

Основною задачею теорії спікання є встановлення зв'язку між геометричними параметрами та структурою частинок

порошкового тіла у вихідному стані та кінетики зміни міжчасткових контактів, ущільнення та формування структури спекеного матеріалу.

Властивості матеріалу (щільність, міцність, пористість) безпосередньо залежать як від властивостей вихідних компонентів, так і від умов виготовлення матеріалу, а саме: температури та середовища спікання, часу ізотермічної витримки та інших факторів (активація процесу, прикладання тиску, накладання електромагнітних імпульсів, ультразвукових коливань тощо). Розрізняють два основних різновиди спікання – *твердофазне*, тобто без створення рідкої фази, та *рідкофазне* (спікання у присутності рідкої фази), при якому порошкову формовку нагрівають при температурі, яка забезпечує наявність рідкої фази.

Основні процеси, які відбуваються при твердофазному спіканні металевих порошків. Більшість металів мають кристалічну будову, характерною особливістю якої є впорядкованість розташування атомів, що займають визначені місця у кристалічних ґратках. Для спікання металевих порошків характерний процес *поверхневої та об'ємної дифузії*.

Механізм поверхневої дифузії залежить від рухливості атомів та їх місця у кристалічних ґратках. Однією з важливих ознак спікання металевих порошків є зміцнення порошкового тіла без зменшення сумарного об'єму пор, що викликано поверхневою дифузією. Зменшення сумарного об'єму пор при нагріванні можливо тільки при затіканні у них металу, що відбувається в результаті об'ємної самодифузії його атомів.

Усадка. У більшості випадків при спіканні металевих порошків мають місце усадочні процеси, які характеризуються зменшенням розмірів порошкового тіла в уздовжньому та поперечному напрямках. Процес усадки умовно можна поділити на три стадії, між якими немає чіткої межі. При спіканні

кристалічних металевих порошків виділені наступні характерні процеси:

- на першій (початковій) стадії щільність порошкового тіла є малою та швидкість ущільнення залежить від процесів, що відбуваються в зоні стічних порошків. Під дією поверхневого натягу в результаті об'ємної дифузії здійснюється заповнення пор металом, при цьому швидкість усадки є достатньо високою;

- на проміжній стадії підвищується щільність матеріалу. Сукупність пор у порошковому тілі являє ансамбль пор, при цьому зменшення кожної з них відбувається фактично незалежно від інших. У випадку однорідної пористості ущільнення здійснюється рівномірно по всьому об'єму;

- на останній стадії порошкове тіло містить у собі деякі ізольовані пори, які зменшуються в результаті об'ємної дифузії атомів. До зникнення пор може відбуватися процес їх росту (коалесценція), коли дрібні пори поглинаються більш крупними та зникають, тоді як сумарний об'єм пор не змінюється.

У процесі спікання зменшується запас вільної енергії, що можливо тільки за рахунок скорочення сумарної поверхні, яка являє собою поверхню поділу між речовиною порошку та порами. Тому більш дисперсні порошки через більший запас вільної енергії ущільнюються при нагріванні з більшою швидкістю. У деяких випадках при спіканні металевих порошків спостерігається порушення процесу усадки, що супроводжується зростанням розмірів формовки. Виділяють наступні причини цього явища: зняття (релаксація) пружних напружень, що виникають при формуванні; наявність невідновлених оксидів; фазові перетворення та виділення газів (адсорбованих на поверхні частинок та які утворюються при хімічних реакціях відновлення оксидів). Зростання спечених тіл спостерігається при утворенні зачиненої пористості у випадку,

коли загальна пористість складає близько 7 %. При цьому розширення газів перешкоджає ущільненню порошку при спіканні та викликає зростання брикету.

Рекристалізація. Зростання (рекристалізація) зерен є однією з важливих ознак при спіканні металевих порошоків. Оскільки при цьому зникають дрібні зерна, то зменшується сумарна поверхня розділу між частками. В ідеальному випадку через достатньо великий проміжок часу з конгломерату частинок різного розміру утворюється монокристал. Однак на практиці зростання зерен продовжується до деякого їх середнього розміру, а не до утворення монокристалу. Це пов'язано з тим, що на границях зерен знаходяться побічні включення, такі як пори, газові та оксидні плівки на поверхні частинок порошку, домішки та інше. Збільшення розміру частинок при невеликих температурах відбувається за рахунок рекристалізації на поверхні частинок (поверхневої рекристалізації). З підвищенням температури рекристалізація розпочинається по всьому об'єму брикету і має назву міжчасткової збиральної рекристалізації. Як правило, спечені брикети характеризуються зернами з невеликими розмірами, однак в окремих випадках можна отримати крупнозернисту структуру.

Перенос атомів через газову фазу пов'язаний з процесом випарування речовин з поверхні одних частинок та їх конденсації на поверхні інших частинок, що здійснюється при підвищенні температури. Чим більше зігнута поверхня частинок порошку, тим легше випаровуються з неї атоми речовин. Перенос атомів через газову фазу впливає на зміну пор (робить їх більш округлими), а також підвищує міцність міжчасткового зачеплення. Однак цей процес не впливає на зміну щільності брикету при його спіканні. Вплив переносу атомів через газову фазу на структуру та властивості порошкових матеріалів зростає при збільшенні температури,

а також в результаті хімічних реакцій між порошковим тілом та газоподібною атмосферою печі.

Поряд з описаними явищами спостерігається дифузія по межах частинок та пластична плинність матеріалу.

Особливості рідкофазного спікання. Рідкофазне спікання порошкової суміші характеризується наявністю рідкої фази, яка утворюється за рахунок розплавлення більш легкоплавкого компонента або структурної складової у процесі нагрівання порошкової формовки. При цьому рідиною змочуються частки порошку, які залишаються твердими, що сприяє полегшенню розвитку сил зчеплення між ними. Це приводить до збільшення швидкості дифузії атомів та полегшує переміщення частинок один відносно іншого, сприяє заповненню пор розплавленою речовиною. Однак у випадку недостатнього змочування (крайовий кут змочування більше 90°) рідка фаза уповільнює процес спікання та перешкоджає ущільненню формовки. При використанні рідкофазного спікання можна отримати безпористі матеріали та композиції, оскільки ступінь ущільнення порошків значно більший, ніж у випадку твердофазного спікання.

Розрізняють три основні стадії рідкофазного спікання, які включають: перегрупування твердих частинок під дією течії рідини; процеси розчинення – осадження; утворення жорсткого скелету з твердих частинок в результаті їх припікання (що являє твердофазне спікання). Спочатку процес усадки здійснюється більш інтенсивно, а потім його швидкість сповільнюється. В залежності від виду металевих компонентів, що спікаються, кількості рідини, розміру твердих частинок та початкової пористості порошкової формовки одна зі стадій стає переважною. Самі стадії накладаються одна на іншу. Рідка фаза у деяких випадках присутня до кінця ізотермічної

витримки. Однак вона може зникати через деякий час після її появи. В останньому випадку рідка фаза розчиняється у твердій або утворює більш тугоплавке з'єднання. Тоді останній період процесу являє твердофазне спікання. Найбільш характерними прикладами спікання зі зникненням рідкої фази є виробництво залізонікельальюмінієвих магнітів, бронзових і бронзографітових антифрикційних матеріалів. У будь-якому із випадків кількість рідкої фази, яка утворюється у процесі спікання, повинна бути від 3...5 до 50 % по об'єму (оптимальним є варіант 25...30 % об'ємн.). Коли кількість рідкої фази досягає 50 %, є можливість втрати форми виробу, яка отримана в результаті формування порошку. Однак недостатня кількість рідкої фази не дає всіх переваг використання цього виду спікання.

Вплив температури, тривалості та атмосфери спікання на формування структури порошкових матеріалів. При підвищенні температури зростають щільність та міцність спечених виробів. У звичайних випадках температура спікання знаходиться у межах $0,7...0,9 T_{пл}$ більш легкоплавкого компонента, що входить до складу матеріалу. Велике значення має швидкість підйому температури. Підвищення швидкості підйому температури в крупногабаритних брикетах призводить до нерівномірності прогрівання його по висоті, а потім до викривлення форми виробу.

Ізотермічне спікання, яке являє витримку порошкового тіла при постійній температурі, викликає спочатку зростання щільності, яке потім уповільнюється. Максимальна міцність досягається за достатньо короткий час, а потім не змінюється. Тривалість ізотермічної витримки продовжується від десятків хвилин до декількох годин. Температура та тривалість спікання деяких металевих порошків наведена у табл. 8.1.

Таблиця 8.1. Температура та тривалість спікання металевих порошків

Матеріал	Температура спікання, °С	Тривалість спікання, хв
Залізо	1000...1500	30...45
Мідь	850...950	43...60
Залізграфіт	1050...1150	45...60
Корозійностійка сталь	1200...1300	60...90
Нікельграфіт	1150...1200	90...120
Ферит	1100...1400	60...180

На ефективність процесу спікання металевих порошків також впливає атмосфера. У відновлювальному середовищі щільність та міцність спечених матеріалів вищі порівняно зі спіканням цих самих порошків у нейтральному середовищі. Це пояснюється хімічним впливом відновлювача на оксидні плівки, в результаті чого відбувається віддалення кисню та посилюється міграція атомів до контактних ділянок стічних частинок порошку. Достатньо повно та швидко здійснюється спікання металевих порошків у вакуумі.

Виготовлення сумішей з різнокомпонентних порошків. Процес виготовлення суміші складається із класифікації порошків за розміром частинок, змішування та попередньої обробки.

Змішування – це виготовлення однорідної механічної суміші із порошків різного хімічного та гранулометричного складу або суміші металевих порошків із неметалевими. Це є однією із найважливіших операцій при отриманні порошкового матеріалу. Від однорідності суміші, що виготовлюється, залежать кінцеві властивості виробу. Тому найбільш важливою задачею є забезпечення однорідності суміші.

Використовують механічне змішування компонентів у кульових млинах, а також у змішувачах. Рівномірний розподіл

частинок порошку в об'ємі суміші досягається при використанні порошків з близькими значеннями щільності. При значній різниці у щільності має місце явище *сегрегації*, тобто розшарування компонентів. Змішування компонентів різної щільності часто здійснюють у рідкому середовищі (а саме – у спирті, гліцерині, бензині), проте це не завжди економічно корисно, оскільки значно ускладнює технологічний процес.

На процес формування різнокомпонентних порошків впливають стабільні та високотехнологічні властивості порошків, а саме: текучість та постійна насипна щільність. Незалежно від способу дозування при заповненні прес-форми необхідно забезпечити в ній рівномірний розподіл порошку. Це досягається через використання вібрації або застосування спеціальних розрівнювачей.

У більшості випадків до металевих порошків додають технологічні присадки, які полегшують процес пресування та отримання заготовок високої якості; легкоплавкі добавки, що поліпшують процес спікання; а також інші металеві порошки для легування та отримання нових порошкових матеріалів. Тому часто спікання суміші порошків супроводжується появою рідкої фази.

Обладнання, пристосування, зразки для досліджень, наочний матеріал

Обладнання та пристосування: піч муфельна електрична ПМ-8, комплект сталевих та графітових прес-форм, комп'ютерне устаткування, аналітичні ваги GR200, мікроскоп металографічний MMP-2P, укомплектований цифровою камерою Delta Optical HDCT-20C та програмним забезпеченням для обробки зображень Score Image 9.0, комп'ютерне устаткування.

Матеріали: металеві порошки олова, алюмінію, бабіту, міді, бронзи; пресовки.

Наочні матеріали, електронне та програмне забезпечення: фотоальбом з мікроструктурами порошкових і композиційних матеріалів, електронна база даних, таблиці з властивостями, діаграми стану.

Порядок виконання роботи

1. Підготувати форму для дозування порошків та їх спікання.
2. За вказівками викладача виконати дозування та формування навішення порошків.
3. Під керівництвом викладача вибрати режими спікання. Розташувати прес-форму у робочому просторі печі, задати режими спікання.
4. Після досягнення температури спікання встановити час ізотермічної витримки. Після закінчення процесу спікання піч відключити, зразок дістати після повного остигання робочого простору.
5. За допомогою металографічного мікроскопу ММР-2Р одержати цифрову мікрофотографію зразку.
6. Дослідити мікроструктуру одержаного зразка.

Порядок оформлення звіту

1. Коротко сформулювати мету роботи.
2. Використовуючи відповідні діаграми стану обґрунтувати вибір температури спікання, виходячи з геометричних розмірів експериментального зразку розрахувати час проміжного прогрівання та ізотермічної витримки.
3. Навести і охарактеризувати мікроструктуру одержаного зразка.

4. Проаналізувати процеси структуроутворення одержаного матеріалу.

5. Сформулювати висновки, в яких необхідно відобразити особливості процесу спікання обраних порошків.

Контрольні питання

1. Сформулюйте суть і призначення процесу спікання.

2. Охарактеризуйте особливості структуроутворення порошкових і композиційних матеріалів при твердофазному спіканні металевих порошків. Наведіть приклади.

3. Охарактеризуйте особливості структуроутворення порошкових і композиційних матеріалів при рідкофазному спіканні металевих порошків. Наведіть приклади.

4. Опишіть процеси усадки, поверхневої та об'ємної дифузії, переносу атомів через газову фазу, рекристалізації, які відбуваються під час спікання металевих порошків.

5. Охарактеризуйте вплив температури, тривалості та атмосфери спікання на процеси структуроутворення порошкових і композиційних матеріалів.

Лабораторна робота № 9

ВИБІР РЕЖИМІВ, ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ГАРЯЧОГО ПРЕСУВАННЯ ПОРОШКІВ ТА ЇХ СУМІШЕЙ

Мета роботи: ознайомитись з технологією гарячого пресування порошків, обрати режими, дослідити усадочні процеси.

Короткі теоретичні відомості

Метод гарячого пресування є одним з перспективних для формування порошкових заготовок і виробів, якій дозволяє під дією температури та зусилля, що додається, реалізувати процес термічної консолідації порошкових компонентів в одному технологічному циклі. Існуючі конкурентоспроможні технології, які є розвинутими модифікованими напрямками гарячого пресування, ґрунтовані на пропусканні електричного струму крізь прес-форму та заготівку, забезпечують швидке попереднє нагрівання та короткочасний технологічний цикл, проте обмежуються діапазонами електропровідності порошків. У ряді випадків (спікання крихких порошків, теплоі електроізоляторів, формування аморфних структур, пресування гетерофазних сумішей) єдиним методом одержання композицій є застосування гарячого пресування з механічним способом прикладання тиску: це забезпечує рівноважний

розподіл структури і властивостей по об'єму та висоті пресовки. Розвиток методу гарячого пресування безпосередньо пов'язаний з формуванням нових наноструктурних, градієнтних і шаруватих порошкових матеріалів та потребує розробки нового обладнання та устаткування, за допомогою якого стає можливим процес одержання композицій із декількох компонентів з різною температурою плавлення, дисперсністю, температурним коефіцієнтом лінійного розширення.

Гарячим називають пресування металевого порошку або порошкової формовки при температурі, яка перевищує температуру рекристалізації основного компонента. Загальний принцип одержання зразків шляхом спікання порошків під тиском складається із засипки формувальної суміші у прес-форму, прикладання тиску та встановлення температурних режимів. Поєднання операції формування заготовки із порошку з її нагріванням при температурі $0,5...0,9 T_{пл}$ основного компонента дозволяє реалізувати при ущільненні підвищення текучості пресувального матеріалу. Сили тиску підсумовуються із зусиллями всередині порошкового тіла, що призводить до більш інтенсивного ущільнення. За допомогою гарячого пресування отримують матеріали з мінімальною пористістю при використанні порівняно малих значень тиску пресування. Ця методика використовується для виготовлення щільних виробів з малопластичних або крихких металів, сплавів та з'єднань типу карбідів, боридів, силіцидів та інших.

Механізм ущільнення порошкового тіла при гарячому пресуванні ідентичний механізму спікання у вільному стані: утворення міжчасткового контакту, зростання щільності та зменшення пористості. Властивості гарячепресованих виробів суттєво залежать від умов проведення процесу. На відміну від матеріалів, які отримані в результаті статического пресування з наступним спіканням, гарячепресовані вироби

характеризуються підвищеною міцністю, твердістю, електропровідністю та більш точними розмірами і відрізняються більш дисперсною структурою, витримка при температурі пресування складає від 1...3 до 15...20 хв, а при звичайному спіканні порошкових формовок – більше 30...60 хв.

Гарячим може бути будь-який із відомих способів формування; найбільш розповсюдженим є пресування нагрітого порошку або заготовки у прес-формі. Важливу роль грає спосіб прикладання та зняття навантаження у процесі пресування. Більш доцільно спочатку нагріти порошкове тіло до деякої температури (у звичайних випадках ця температура відповідає $0,5 T_{cn}$), а потім прикладати зусилля. При такому способі прикладання навантаження забезпечується видалення газів, які адсорбовані порошком, що сприяє його подальшому ущільненню. Знімати навантаження рекомендується лише після достатньо повного остигання спресованого матеріалу, що зменшує втрати їм щільності через проявлення пружної післядії.

Для ознайомлення з особливостями гарячого пресування студентами пропонується експериментальна установка (рис. 9.1), яка складається з шахтної лабораторної печі вертикального завантаження з номінальною температурою 900 °C та окислювальною атмосферою, механічного пресуючого пристрою та блоку управління.

Дослідження усадочних процесів відбувається за допомогою індикатора переміщення пуансона, показання якого за допомогою секундоміра фіксуються кожну хвилину. Обов'язковою умовою при проведенні експериментальних робіт є вимірювання висоти засипки l_0 до прикладання тиску пресування. Оброблені результати представляються у вигляді кінетичних кривих усадки $\Delta l / l_0 = f(\tau)$ як величина деформації за кожну хвилину, що віднесена до початкової висоти засипки (рис. 9.2).

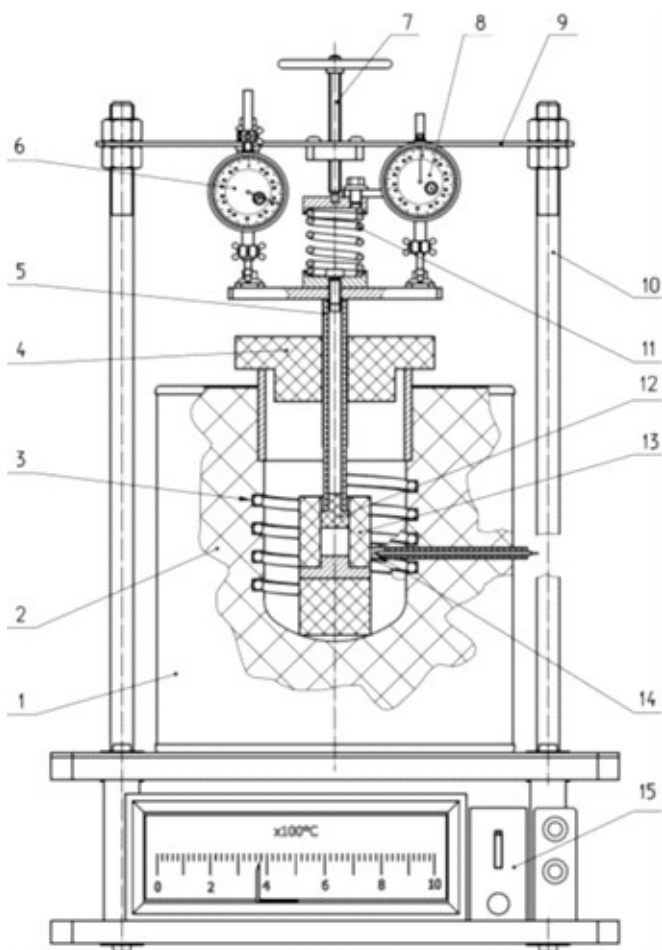


Рис. 9.1. Схема установки для горячего пресования:
 1 – корпус печи; 2 – теплова ізоляція; 3 – ніхромова електрична спіраль;
 4 – кришка печі; 5 – шток; 6 – індикатор переміщення пуансона;
 7 – навантажувальний гвинт; 8 – індикатор стиснення пружини;
 9 – траверза; 10 – силова штанга; 11 – пружина; 12 – пуансон
 прес-форми; 13 – прес-форма; 14 – перетворювач
 термоелектричний; 15 – блок управління

За результатами кінетичних кривих усадки можна аналізувати основні етапи структуроутворення композицій: температура початку усадки, як правило співпадає з температурою початку розм'якшення найбільш легкоплавкого компоненту, побудова кінетичних кривих усадки у логарифмічних координатах дозволяє визначати температурно-часовий інтервал, в якому відбувається інтенсивне формування структури матеріалу; контроль усадкових процесів дозволяє зупинити процес у певний момент з метою одержання необхідної структури та властивостей.

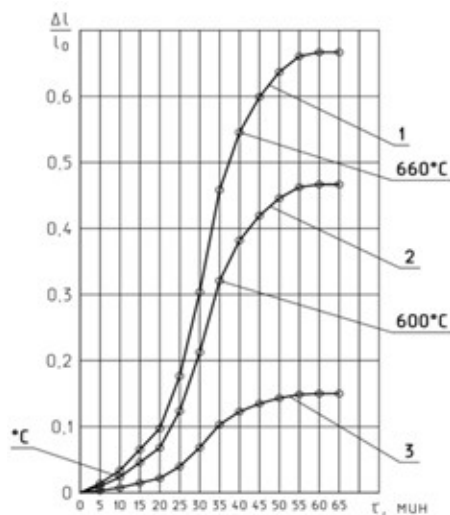


Рис. 9.2. Кінетичні криві усадки процесу гарячого пресування ($P = 0,7$ МПа) формувальної суміші з пудри алюмінію (марка АПС-1А) і порожніх скляних мікросфер (50 % об'ємн.) при температурах:
1 – 660 °C; 2 – 600 °C; 3 – 550 °C

Незважаючи на суттєві переваги способу гарячого пресування, розширення його використання ускладнюється через

низьку виробність та складність обладнання, обмежені можливості формування виробів складної конфігурації та великі розміри.

Обладнання, пристосування, зразки для досліджень, наочний матеріал

Обладнання та пристосування: установка для гарячого пресування, комплект прес-форм, електронні ваги, мікроскоп металографічний MMP-2P, укомплектований цифровою камерою *Delta Optical HDCT-20C* та програмним забезпеченням для обробки зображень *Score Image 9.0*, комп'ютерне устаткування, штангенциркуль.

Матеріали: металеві порошки (алюмінію, бабіту, олова), скляні наповнювачі (порошки, порожні скляні мікросфери), керамічні порошки (Al_2O_3 , SiC).

Наочні матеріали, електронне та програмне забезпечення: фотоальбом з мікроструктурами порошкових і композиційних матеріалів, таблиці з властивостями, електронна база даних, діаграми стану.

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитись з принципами роботи установки для гарячого пресування.
2. За вказівками викладача виконати дозування та формування навішення порошків.
3. Під керівництвом викладача обрати режими гарячого пресування, задати температуру проміжного прогрівання.
4. По досягненні температури проміжного прогрівання задати тиск та час.
5. Встановити температуру ізотермічної витримки.
6. При початку усадочних процесів, виконати вимірювання переміщення пуансону. Одержані результати занести до таблиці.

Таблиця 9.1. Результати вимірювання усадки

τ, хв	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Δh, мм											

7. По закінченні часу ізотермічної витримки відключити установку від джерела живлення.

Порядок оформлення звіту

1. Коротко сформулювати мету роботи.
2. Навести схему установки для гарячого пресування.
3. Навести обґрунтування технологічних режимів.
4. Заповнити таблицю.
5. За результатами вимірювань побудувати кінетичні криві усадки.
6. Сформулювати висновки, в яких необхідно відобразити особливості гарячого пресування обраних порошків.

Контрольні питання

1. Охарактеризуйте сутність процесу гарячого пресування порошкової формовки.
2. Назвіть і охарактеризуйте основні технологічні параметри гарячого пресування, обґрунтуйте їх вибір.
3. Опишіть принципи роботи установки для гарячого пресування.
4. Охарактеризуйте процеси усадки або зростання порошкової пресовки.
5. Поясніть відмінні особливості процесу гарячого пресування від спікання під тиском.
6. Опишіть процеси структуроутворення гарячепресованих композиційних матеріалів.

Лабораторна робота № 10
**ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ АКТИВАЦІЇ ПРОЦЕСУ
СПІКАННЯ ПОРОШКІВ ТА ЇХ СУМІШЕЙ**

Мета роботи: ознайомитись з активованим спіканням металевих порошків та їх сумішей, обрати режими, дослідити мікроструктуру зразків.

Короткі теоретичні відомості

Активованим називають спікання порошкової формовки при дії фізичних або хімічних факторів, які підвищують інтенсивність процесу і викликають зміну властивостей порошкових виробів. Сучасні методи активації підрозділяються на два види: **хімічні** – основані на використанні окиснювально-відновлювальних реакцій, процесах дисоціації хімічних з'єднань, хімічного транспорту речовини тощо та **фізичні**, пов'язані з інтенсивним здрібненням порошку, дією на нього опромінення, високих частот, ультразвуку, магнітного поля тощо.

Хімічні методи активації класифікують за складом активаторів, за їх джерелами (з газової фази, із захисної засипки або їх домішків порошків); за етапом введення (до спікання або протягом спікання); поведінки (залишаються активатори у спеченому виробі або ні). Одним з простих та ефективних методів хімічної активації є *зміна атмосфери спікання*:

при цьому атоми металів на виступах поверхонь часток (як найбільш активні) реагують зі з'єднаннями, які додаються до атмосфери спікання. Утворюються певні з'єднання металів, які потім відновлюються, атоми металів конденсуються у місцях з мінімальним запасом вільної енергії (впадини на поверхні частинок, області міжчасткових контактів та ін.), що сприяє переносу речовини. Активована атмосфера також сприяє видаленню домішок та рафінуванню матеріалу.

Додавання домішок – один з ефективних методів активації спікання, який полягає у введенні до порошкової суміші малої кількості (соті або тисячні частки) речовин з меншої температурою плавлення, наприклад: до ванадію додаються нікель, до заліза – алюміній. При цьому питома поверхня порошоків-домішок повинна дорівнюватись питомій поверхні основної фази. У випадках застосування чистих металів, основний метал повинен розчинюватись та дифундувати у металі, який додається. У свою чергу, метал, який додається під час спікання, не повинен розчинятися в основному металі, що дозволяє легко деформовним міжзеренним прошаркам залишатися у стійкому стані.

Застосування захисних засипок – захід, який запобігає негативному впливу атмосфери печі на пресовку під час спікання. При цьому заготівки укладають у піддони, короба або лодочки та засипають кварцовим піском, оксидом алюмінію або графітовою крупкою, у окремих випадках застосовують засипки комбінованого складу, наприклад, Al_2O_3 (корракс) з додаванням графітової крупки, хрома, кремнія; оксид магнія з додаванням хрома. Склад обирають таким чином, щоб за її допомогою утворити найбільш сприятливу атмосферу; температура плавлення засипки повинна бути вищою за температуру спікання. Застосування захисних засипок також сприяє рівномірному прогріванню виробів, що спікаються, запобігає їх коробленню або припіканню один до одного.

Механічні способи активації включають в себе активацію процесу спікання шляхом інтенсивного здрібнення порошку; циклічне спікання; дію ультразвука, СЧВ-обробку, вібрацію; спікання під тиском; накладання сильного магнітного поля тощо.

Інтенсивне здрібнення порошку викликає зростання сумарної поверхні частинок; їх збільшена кривизна утворює у порошковому тілі суттєвий надлишок вільної енергії, що приводить до швидкісного зростання його щільності та міцності під час спікання. Механічно активовані частинки мають підвищену реакційну здатність, легше ніж інші порошки вступають у хімічні реакції. Це пов'язано з тим, що під час здрібнення порошок зазнає співудару з молотковими тілами і стінками барабана; при високих швидкостях в результаті інтенсивної механічної обробки відбувається зміна їх фізико-механічних властивостей. Для здрібнення порошків застосовують планетарні, вібраційні, кульові, центробіжні, вихрові млини та атритори. Таким чином здрібнюють порошки Al , Al_2O_3 , TiO_2 , SiC , твердих сплавів, а також відходи виробництва, зокрема стружку.

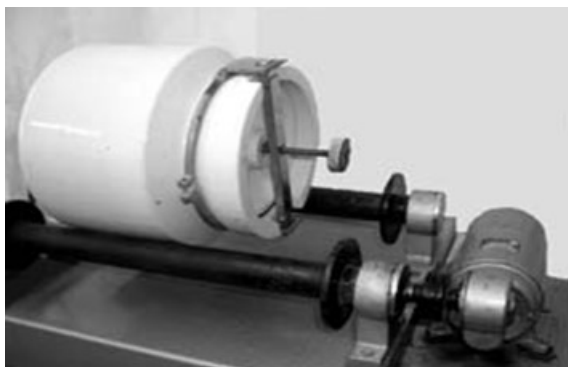


Рис. 10.1. Кульовий млин

Циклічне спікання порошків полягає у циклічній зміні температури, що викликає структурні зміни у відповідності з діаграмами стану.

Ультразвукова обробка реакційних сумішей порошків дозволяє інтенсифікувати дифузійні процеси, які відбуваються під час твердофазного спікання, та застосовується для керамічних виробів.

Застосування *мікрохвильової обробки* активізує такі важливі фізико-хімічні процеси як дегідратація, синтез багатокомпонентних з'єднань, знижуючи при цьому витрати енергії та часу у порівнянні традиційними методами. Для спікання застосовуються пристрої, у яких мікрохвильове поле трансформується у теплову енергію, типова конструкція пристрою наведена на рис. 10.2.

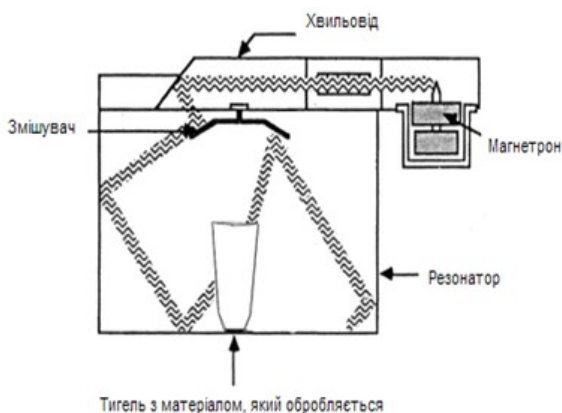


Рис. 10.2. Схема установки для мікрохвильового спікання керамічних порошків

Перевага нових високочастотних і надвисокочастотних технологій полягає у зниженні температури спікання на 200...300 °С та можливості отримання дрібнокристалічної

структури при одночасному поліпшенні експлуатаційних властивостей. Цей метод використовується для отримання керамічних, зокрема наноструктурованих виробів.

Обладнання, пристосування, зразки для досліджень, наочний матеріал

Обладнання та пристосування: кульовий млин, піч муфельна електрична ПМ-8, установка для гарячого пресування, комп'ютерне устаткування, комплект сталевих та графітових прес-форм, піддон, короб аналітичні ваги GR200, мікроскоп металографічний ММР-2Р, укомплектований цифровою камерою *Delta Optical HDCT-20C* та програмним забезпеченням для обробки зображень *Score Image 9.0*, комп'ютерне устаткування.

Матеріали: металеві порошки олова, алюмінію, бабіту, міді, бронзи; пресовки з алюмінію, бронзи; кварцовий пісок, графітова крупка.

Наочні матеріали, електронне та програмне забезпечення: фотоальбом з мікроструктурами порошкових і композиційних матеріалів, електронна база даних, таблиці з властивостями, діаграми стану.

Порядок виконання роботи

Студенти виконують один або кілька варіантів (за вказівками викладача).

Варіант 1. Дослідження циклічного спікання порошків. Студенти обирають режими (температуру і час кожного циклу) та виконують циклічне спікання пресовки (з міді, алюмінію тощо); у графічному вигляді наводять технологічний цикл. Після охолодження досліджують мікроструктуру зразків.

Варіант 2. Дослідження процесу спікання порошків під тиском. Студенти обирають режими (температурні параметри, тиск пресування, час витримки) спікання порошків (обраних за вказівками викладача); у графічному вигляді наводять технологічний цикл. Після охолодження досліджують мікроструктуру зразків.

Варіант 3. Дослідження спікання порошків у захисних засипках. Студенти обирають вид захисної засипки, укладають пресовки у короб, ставлять у піч, задають температуру та час спікання. Після охолодження досліджують мікроструктуру зразків.

Варіант 4. Дослідження впливу дисперсності порошку на інтенсивність процесу спікання. За допомогою кульового млина студенти додатково здрібнюють порошок (наприклад, порошок алюмінію), потім досліджують його гранулометричний склад. Після цього за допомогою лабораторного пресу одержують дві пресовки (одну з вихідного порошку, другу – із здрібненого), які спікають за обраними режимами. Після охолодження досліджують мікроструктуру зразків.

Примітка. Кожен студент виконує один із зазначених варіантів.

Порядок оформлення звіту

1. Коротко сформулювати мету роботи.
2. Записати сутність процесів активованого спікання порошків.
3. Обґрунтувати вибір температурно-часових параметрів спікання.
4. Обґрунтувати обраний метод активації спікання.
5. Навести і охарактеризувати мікроструктуру одержаного зразка.

6. Проаналізувати процеси структуроутворення одержаного матеріалу.

7. Сформулювати висновки, в яких необхідно відобразити особливості процесу активованого спікання обраних порошків.

Контрольні питання

1. Наведіть класифікацію методів активації під час спікання порошків.

2. Обґрунтуйте доцільність застосовування хімічних методів активації спікання. Охарактеризуйте їх, наведіть приклади.

3. Поясніть вплив здрібнення порошків на інтенсифікацію процесів їх спікання. Наведіть приклади матеріалів і виробів.

4. Опишіть вплив фізичних методів активації на кінетику спікання та структуроутворення порошкових і композиційних матеріалів. Наведіть приклади.

5. Обґрунтуйте вибір технологічних параметрів для певних видів активованого спікання (наприклад, для спікання у засипці з Al_2O_3).

2. ЗАВДАННЯ, ЗМІСТ ТА СТРУКТУРА КУРСОВОЇ РОБОТИ

Курсова робота "Вибір технологічних режимів та дослідження процесів структуроутворення дисперсних і композиційних матеріалів, одержаних методами порошкової металургії" виконується у 6 семестрі та є першою самостійною роботою студентів, виконання якої спрямовано на придбання ними навичок щодо досліджень та розробки технологій порошкових і композиційних матеріалів; аналізування фізико-хімічних процесів, що відбуваються під час їх одержання, досліджень мікроструктури за допомогою сучасних методів.

Приклади тем курсових робіт наведено у таблиці.

Таблиця. Приклади тем курсових робіт

Номер варіанта	Тема курсової роботи
1	Вибір технології та дослідження процесів структуроутворення мідних пористих матеріалів
2	Вибір технології та дослідження процесів структуроутворення композиційних матеріалів системи Al-Cu
3	Вибір технології та дослідження процесів структуроутворення пористих бронзових матеріалів
4	Вибір технології та дослідження процесів структуроутворення спечених матеріалів з порошку Ni
5	Вибір технології та дослідження процесів структуроутворення композиційних матеріалів, наповнених порошком SiC

Продовж. таблиці

Номер варіанта	Тема курсової роботи
6	Вибір технології та дослідження процесів структуроутворення композиційних матеріалів, наповнених нитковидними кристалами SiO_2
7	Вибір технології та дослідження процесів структуроутворення матеріалів на основі порошку заліза
8	Вибір технології та дослідження процесів структуроутворення матеріалів на основі порошку ПКХ18Н15
9	Вибір технології та дослідження процесів структуроутворення композиційних матеріалів з базальтових волокон
10	Вибір технології та дослідження процесів структуроутворення міднографітових композиційних матеріалів

Студент також може запропонувати власну тему курсової роботи, однак потрібно при цьому обґрунтувати доцільність виконання дослідження саме з цієї проблеми.

Як вихідні дані студенту надаються різновиди порошкових, волокнистих компонентів, які застосовуються для одержання саме обраного матеріалу; за необхідністю студенти можуть використати електронну базу даних мікроструктур. При виконанні студенти використовують лабораторне обладнання, а також сучасні методи мікроаналізу і комп'ютерної металографії. Курсова робота містить теоретичні та експериментальні дослідження, які студенти виконують самостійно та під керівництвом викладача та складається зі вступу, оглядової та дослідницької частин, висновків, джерел інформації та додатків (за необхідністю). Одержані результати повинні бути чітко обґрунтованими та містити посилання на літературні джерела, кожен з розділів закінчується висновками.

Вступ повинен містити пояснення щодо актуальності застосування обраного порошкового або композиційного

матеріалу; стисле обґрунтування та формування мети курсової роботи.

1. Оглядова частина обов'язково повинна мати назву, яка відповідає проведеному аналізу джерел літератури (наприклад, "Аналіз умов експлуатації та технологій одержання пористих бронзових матеріалів"). Саме ця частина курсової роботи повинна показати глибину знайомства студента з фаховою літературою, його вміння систематизувати джерела, виділяти найбільш перспективні досягнення та невирішені питання. Матеріали використаних джерел необхідно логічне систематизувати, при цьому студент повинен вказати відповідні посилання на технічну літературу (підручники, монографії, наукові статті, патенти тощо). На підставі огляду літератури студент виділяє невирішені, проте актуальні питання та формулює мету роботи. Оглядова частина поділяється на наступні пункти:

1.1 Призначення та аналіз умови експлуатації порошкового або композиційного матеріалу, який містить всебічний аналіз особливостей умов роботи, а також визначення вимог, які пред'являються до цього порошкового або композиційного матеріалу.

1.2 Визначення основних технологічних етапів, яку складено за результатами аналізу джерел інформації.

1.3. Аналіз невирішених питань та постановка завдань досліджень.

Обсяг оглядової частини не повинен перевищувати 5–7 сторінок основного тексту роботи.

2. Дослідження вихідних компонентів включає мікροструктурні дослідження форми, розмірів, стану поверхні вихідних компонентів (порошків, волокон, наповнювачів природного або штучного походження), аналіз їх технологічних властивостей, стислу характеристику фізико-хімічних процесів одержання. Для виконання цього розділу студенти викори-

стовують методи мікроаналізу та сучасні методи комп'ютерної металографії. Результати досліджень мають табличну форму або наводяться у вигляді побудованих гістограм розподілу частинок за розмірами та фактором форми, містять аналіз стану поверхні (відомості про наявність мікро- та ультрамікропор, мікродефектів тощо). Фізичні та хімічні властивості порошків, волокон та інших наповнювачів наводяться у вигляді таблиць. Характеристика фізико-хімічних процесів одержання вихідних порошкових, волокнистих компонентів та інших видів наповнювачів повинна бути представлена у стислій формі та супроводжуватися відповідними хімічними реакціями.

3. Вибір технологічних режимів одержання матеріалу включає в себе ретельне обґрунтування кожного з технологічним параметрів, вказаних у технологічній схемі у п. 1.2. (зокрема величин тиску пресування, температури і атмосфери спікання). Кожен технологічний етап формування матеріалу повинен бути описаний через процеси структуроутворення (наприклад, деформацію частинок під час пресування, їх взаємну розчинність протягом спікання). Наведену інформацію необхідно супроводити графічним матеріалом у вигляді кінетичних кривих ущільнення під час формування, кінетичних кривих усадки протягом спікання, схемами деформації частинок або волокон. За необхідністю у розділ повинні бути включені відповідні хімічні реакції, які характеризують процеси, що відбуваються протягом спікання у обраному середовищі. Фізико-хімічні процеси доцільно підкріпити аналізом відповідних діаграм стану, а також необхідними розрахунками, наприклад, пористості на різних стадіях формування та спікання, ступеня спікаємості за різними умовами.

4. Дослідження особливостей мікроструктури порошкових або композиційних матеріалів включають в себе: вибір методики дослідження мікроструктури та типу пористої

структури; результати дослідження пористості ПКМ, які повинні включати визначення типу пористості структури ПКМ та побудову гістограм розподілу за її розмірами та фактором форми, аналіз впливу такого виду пористості на властивості ПКМ.

Крім того, проведені дослідження повинні містити: аналіз дефектів мікроструктури та вплив на них режимів формування та спікання; дослідження зміни морфології компонентів у результаті формування та спікання; характеристику фізико-механічних властивостей обраних матеріалів, вплив на них особливостей мікроструктури.

Загальні висновки, в яких необхідно відобразити особливості мікроструктури обраного ПКМ; вплив на особливості мікроструктури та властивостей фізико-хімічних процесів, які супроводжують одержання матеріалу, та доцільність застосування ПКМ у зазначеній галузі.

Список літератури складається з використаних джерел, до яких відносяться: підручники, наукові статті, патентна література, держстандарти тощо. Загальна кількість використаних публікацій повинна складати не менше, ніж 15–20 літературних джерел.

Додатки можуть містити діаграми стану сплавів та неметалевих композицій, допоміжні розрахункові дані, загальні схеми тощо.

Курсова робота оформлюється відповідно до вимог ЕСКД і ЕСТД обсягом 20...25 аркушів формату А 4 та захищається у встановлений керівником термін.

ЗАВДАННЯ ДЛЯ ІНДИВІДУАЛЬНОЇ ТА САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ

У цьому розділі методичних вказівок наводяться завдання для індивідуальної та самостійної роботи студентів, які вони виконують протягом 5-го та 10-го семестрів.

5 семестр

Змістові модулі: Класифікація та загальна характеристика дисперсних металів, порошкових і композиційних матеріалів. Характеристики пористої структури та поверхні поділу фаз у дисперсних матеріалах та композитах.

Варіант 1.

1. Проаналізуйте процеси одержання металевих порошків методом відновлення хімічних з'єднань.
2. Проаналізуйте фізико-хімічні процеси, які характерні для отримання скляних волокон.
3. Опишіть використання методу сорбції пару як один із найбільш поширених методів аналізу пористих структур.
4. Наведіть класифікацію утворення тріщин у металевих композиційних матеріалах, використовуючи при цьому основні моделі поверхні поділу фаз.

Варіант 2.

1. Проаналізуйте процеси одержання металевих порошків через відновлення твердих з'єднань газами.

2. Проаналізуйте фізико-хімічні процеси, які характерні для отримання вуглецевих волокон.

3. Опишіть використання методів переносу сумішей рідини як один із перспективних методів аналізу пористих структур.

4. Сформулюйте механічні вимоги до поверхні поділу фаз у металевих композиційних матеріалах.

Варіант 3.

1. Проаналізуйте процеси одержання металевих порошків через відновлення твердих з'єднань вуглецем.

2. Проаналізуйте фізико-хімічні процеси, які характерні для отримання металевих волокон.

3. Опишіть та охарактеризуйте методи дослідження пористої структури матеріалів, які ґрунтуються на дифузії газів у капілярних або пористих середовищах.

4. Сформулюйте фізико-хімічні вимоги до поверхні поділу фаз у металевих композиційних матеріалах.

Варіант 4.

1. Проаналізуйте фізико-хімічні процеси одержання металевих порошків через комбіноване відновлення хімічних з'єднань.

2. Проаналізуйте фізико-хімічні процеси, які характерні для отримання керамічних волокон.

3. Опишіть та охарактеризуйте основні методи дослідження мікро- та ультрамікропористості порошкових і композиційних матеріалів.

4. Охарактеризуйте природу зв'язку в металевих композиційних матеріалах.

Варіант 5.

1. Проаналізуйте фізико-хімічні процеси одержання легированих порошків.

2. Проаналізуйте фізико-хімічні процеси, які характерні для отримання нитковидних кристалів. Наведіть приклади матеріалів.

3. Охарактеризуйте основні напрямки теорії капілярної конденсації для аналізу характеру пористої структури порошкових і композиційних матеріалів.

4. Опишіть напружений стан навколо поверхні поділу фаз у металевих композиційних матеріалах.

Варіант 6.

1. Проаналізуйте процеси одержання порошків металотермічними методами.

2. Проаналізуйте фізико-хімічні процеси, які характерні для отримання віскерів. Наведіть приклади матеріалів.

3. Опишіть та охарактеризуйте використання методів ртутної порометрії для дослідження пористої структури порошкових і композиційних матеріалів.

4. Опишіть напружений стан навколо поверхні поділу фаз у металевих композиційних матеріалах, армованих короткими волокнами або вусами.

Варіант 7.

1. Проаналізуйте процеси одержання металевих порошків методом відновлення газоподібних з'єднань воднем.

2. Проаналізуйте фізико-хімічні процеси, які характерні для отримання скляних мікросфер як перспективних наповнювачів композиційних матеріалів.

3. Опишіть та охарактеризуйте використання мікроскопічних методів для дослідження пористих структур порошкових і композиційних матеріалів.

4. Наведіть приклади металевих композиційних матеріалів з механічним зв'язком на поверхні поділу фаз. Опишіть особливості властивостей цих композитів.

Варіант 8.

1. Проаналізуйте фізико-хімічні процеси одержання металевих порошків електролізом.

2. Проаналізуйте фізико-хімічні процеси, які характерні для отримання вуглецевих мікросфер як перспективних наповнювачів композиційних матеріалів.

3. Опишіть та охарактеризуйте використання методів електронної мікроскопії для досліджень пористої структури порошкових і композиційних матеріалів.

4. Наведіть приклади металевих композиційних матеріалів, зв'язок на поверхні поділу фаз яких утворений шляхом змочування або розчинення. Опишіть особливості властивостей цих композитів.

Варіант 9.

1. Проаналізуйте фізико-хімічні процеси одержання порошків методом термічної дисоціації.

2. Проаналізуйте фізико-хімічні процеси, які характерні для отримання зольних мікросфер як перспективних наповнювачів композиційних матеріалів.

3. Опишіть та охарактеризуйте основні методи дослідження та аналізу пористої структури порошкових і композиційних матеріалів, які ґрунтуються на явищах змочування рідиною частинок.

4. Наведіть приклади металевих композиційних матеріалів з реакційним зв'язком на поверхні поділу фаз. Опишіть особливості властивостей цих композитів.

Варіант 10.

1. Проаналізуйте фізико-хімічні процеси одержання металевих порошків методом термодифузійного насичення.

2. Проаналізуйте фізико-хімічні процеси, які характерні для отримання керамічних мікросфер як перспективних наповнювачів композиційних матеріалів.

3. Опишіть та охарактеризуйте використання радіографічних методів аналізу пористої структури порошкових і композиційних матеріалів.

4. Наведіть приклади металевих композиційних матеріалів з обмінно-реакційним зв'язком на поверхні поділу фаз. Опишіть особливості властивостей цих композитів.

6 семестр

Змістові модулі: Структурування порошкових і композиційних матеріалів при використанні різних методів формування. Фізико-хімічні основи спікання.

Варіант 1.

1. Охарактеризуйте пластичні характеристики порошкових матеріалів.
2. Охарактеризуйте процеси структурування порошкових матеріалів при пластичному деформуванні.
3. Охарактеризуйте процеси легування порошків під час спікання. Наведіть приклади.
4. Дайте характеристику процесам, які відбуваються під час спікання.

Варіант 2.

1. Охарактеризуйте механічні властивості ортотропних композиційних матеріалів.
2. Охарактеризуйте процеси структурування порошкових матеріалів при інжекційному формуванні.
3. Охарактеризуйте особливості спікання аморфних порошків. Наведіть приклади.
4. Наведіть основні положення теорії повзучості пористих тіл при високих температурах.

Варіант 3.

1. Охарактеризуйте властивості порошку як пластично деформівного тіла.
2. Охарактеризуйте процеси структурування порошкових матеріалів при центробіжному формуванні.

3. Охарактеризуйте особливості спікання керамічних порошків. Наведіть приклади матеріалів.

4. Дайте характеристику процесам, які відбуваються під час рідкофазного спікання.

Варіант 4.

1. Наведіть характеристики напружено-деформованого стану односпрямованих композиційних матеріалів.

2. Охарактеризуйте процеси структуроутворення порошкових матеріалів при формуванні вибухом.

3. Охарактеризуйте особливості спікання волокнистих матеріалів. Наведіть приклади.

4. Охарактеризуйте процеси припікання взаємно-нерозчинних порошкових тіл, а також процеси взаємного припікання твердих розчинів.

Варіант 5.

1. Наведіть та охарактеризуйте експериментальні методи визначення пластичних властивостей порошкових матеріалів.

2. Охарактеризуйте процеси структуроутворення порошкових матеріалів при гідродинамічному формуванні.

3. Охарактеризуйте особливості формування структури армованих композиційних матеріалів під час спікання. Наведіть приклади.

4. Охарактеризуйте дифузійні процеси при спіканні різнокомпонентних порошків та опишіть роль газової фази в процесах спікання різнокомпонентних металів.

Варіант 6.

1. Опишіть поведінку порошкового тіла при різних схемах механічного навантаження.

2. Охарактеризуйте процеси структуроутворення порошкових матеріалів при електромагнітному формуванні.

3. Опишіть процеси "хімічного спікання". Наведіть приклади.

4. Охарактеризуйте особливості спікання двокомпонентних порошкових композицій.

Варіант 7.

1. Охарактеризуйте механічні властивості пористих ортотропних матеріалів з ізотропними включеннями.

2. Наведіть та охарактеризуйте безперервні способи формування порошкових матеріалів. Охарактеризуйте структуроутворення матеріалів.

3. Проаналізуйте кінетику зникання ізолюваних пор в анізотропному середовищі.

4. Охарактеризуйте механізм легування порошків у процесі спікання.

Варіант 8.

1. Наведіть та охарактеризуйте експериментальні методи визначення механічних властивостей металевих волокнистих матеріалів.

2. Наведіть та охарактеризуйте способи формування порошкових матеріалів з постійним збільшенням тиску. Охарактеризуйте структуроутворення матеріалів.

3. Проаналізуйте поля напружень навколо ізолюваної пори.

4. Проаналізуйте вплив температури, тривалості та атмосфери на кінетику та інтенсивність процесу спікання.

Варіант 9.

1. Наведіть та охарактеризуйте експериментальні методи визначення механічних властивостей волокнистих матеріалів з металевою матрицею.

2. Наведіть та охарактеризуйте високошвидкісні методи формування порошків. Охарактеризуйте структуроутворення матеріалів.

3. Проаналізуйте процеси інтенсифікації ущільнення армованих композиційних матеріалів.

4. Проаналізуйте вплив факторів зовнішньої дії, таких як гаряче пресування, ультразвукове коливання, електроімпульсне спікання та інших на кінетику та механізм спікання порошкових матеріалів.

Варіант 10.

1. Наведіть та охарактеризуйте параметри міцності та тертя порошку.

2. Охарактеризуйте процеси динамічного ущільнення композиційного матеріалу типу "сандвіч".

3. Проаналізуйте СВС-технології в спіканні керамічних матеріалів.

4. Проаналізуйте модель ізольованої пори у твердому тілі, включаючи поле напружень навколо неї.

ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Інженерне матеріалознавство. Підручник [Текст] / О. М. Дубовий, Ю. О. Казимиренко, Н. Ю. Лебедєва, С. М. Самохін. – Миколаїв: Видавництво НУК, 2009. – 444 с.
2. **Косторнов, А. Г.** Материаловедение дисперсных и пористых металлов и сплавов: в 2 томах: Том 1 [Текст] / А. Г. Косторнов. – Киев: Наукова думка, 2002. – 569 с.
3. **Косторнов, А. Г.** Материаловедение дисперсных и пористых металлов и сплавов в 2- томах: Том 1. [Текст]. – Киев : Наукова думка, 2003. – 670с.
4. Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни "Теорія процесів формування структури и властивостей порошкових і композиційних матеріалів" [Текст] / А. І. Івлієв, Ю. О. Казимиренко, М. Ю. Комаров. – Миколаїв : НУК, 2005. – 36 с.
5. Неорганическое материаловедение [Текст] / В. В. Скороход, Г. Г. Гнесин, В. А. Ажажа и др. Энциклопедическое издание в 2-х томах: Т. 1. Основы науки о материалах – Киев : Наукова думка, 2008. – 1152 с.
6. Неорганическое материаловедение [Текст] / В. В. Скороход, Г.Г. Гнесин, В.А. Ажажа и др. Энциклопедическое издание в 2-х томах: Т. 2. – Киев: Наукова думка, 2008. – 840 с.
7. **Рагуля, А. В.** Консолидированные наноструктурные материалы [Текст] / А. В. Рагуля, В. В. Скороход. – Киев : Наукова думка, 2007. – 341 с.

8. Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни "Теорія процесів формування структури і властивостей порошкових і композиційних матеріалів" [Текст] / А. І. Івлієв, Ю. О. Казимиренко, М. Ю. Комаров. – Миколаїв : НУК, 2005. – 36 с.

ЕЛЕКТРОННІ РЕСУРСИ

1. Красная книга микроструктур новых функциональных материалов. Выпуск 1. Наноструктурированные материалы [Електронний ресурс] : [навч. посіб. для вузів (ілюстративні матеріали)] / уклад. : Ю. Д. Третьяков. – Електрон. дані. – М. : МГУ им. М. В. Ломоносова. Факультет наук о материалах, 2006. – Режим доступу до журналу : [http. / www.frim.msu.ru](http://www.frim.msu.ru). – Назва з екрану.

2. Ceramic matrix composites, C/SiC [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http // www.fz-juelich.de](http://www.fz-juelich.de). – Назва з екрану

3. Composites [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http // www.snfo.lu.farmindale.edu](http://www.snfo.lu.farmindale.edu) – Назва з екрану

4. Leichtbaukonstruktion sm Möbelbau [Електронний ресурс] [http // www.fh-luh.de](http://www.fh-luh.de) – Назва з екрану

ЗМІСТ

Вступ	3
1. Лабораторні роботи	4
<i>Лабораторна робота № 1</i>	6
<i>Лабораторна робота № 2</i>	14
<i>Лабораторна робота № 3</i>	23
<i>Лабораторна робота № 4</i>	31
<i>Лабораторна робота № 5</i>	39
<i>Лабораторна робота № 6</i>	45
<i>Лабораторна робота № 7</i>	52
<i>Лабораторна робота № 8</i>	58
<i>Лабораторна робота № 9</i>	68
<i>Лабораторна робота № 10</i>	75
2. Завдання, зміст та структура курсової роботи	82
Завдання для індивідуальної та самостійної роботи	87
Використана література	95
Електронні ресурси	96