

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

**О. М. ДУБОВИЙ, Ю. О. КАЗИМИРЕНКО,
Н. Ю. ЛЕБЕДЄВА, М. М. БОБРОВ**

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до виконання практичних робіт з дисципліни
«СПЕЦІАЛЬНІ ПИТАННЯ
ІНЖЕНЕРІЇ КОМПОЗИЦІЙНИХ
ТА ПОРОШКОВИХ МАТЕРІАЛІВ,
ПОКРИТТІВ»**

Рекомендовано Методичною радою НУК



ВИДАВНИЦТВО
НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
КОРАБЛЕБУДУВАННЯ
ІМ. АДМІРАЛА МАКАРОВА

2022

УДК 621.762:621.793

М54

Автори:

О. М. Дубовий, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри матеріалознавства і технології металів;

Ю. О. Казимиренко, д-р техн. наук, доцент, професор кафедри;

Н. Ю. Лебедєва, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри;

М. М. Бобров, канд. техн. наук, доцент кафедри

Рецензент

В. Ф. Квасницький, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри зварювального виробництва

Рекомендовано Методичною радою НУК

Методичні вказівки до виконання практичних робіт з дисципліни «Спеціальні питання інженерії композиційних та порошкових матеріалів, покриттів» / О. М. Дубовий, Ю. О. Казимиренко, Н. Ю. Лебедєва, М. М. Бобров. – Миколаїв : НУК, 2022. – 72 с.

Подано загальні вимоги, теоретичні передумови і рекомендації щодо виконання практичних робіт з дисципліни «Спеціальні питання інженерії композиційних та порошкових матеріалів, покриттів».

Призначено для студентів денної форми навчання за спеціальністю 132 «Матеріалознавство», галузь знань 13 «Механічна інженерія».

УДК 621.762:621.793

© Дубовий О. М., Казимиренко Ю. О.,
Лебедєва Н. Ю., Бобров М. М., 2022

© Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова, 2022

ВСТУП

Дисципліна «Спеціальні питання інженерії композиційних та порошкових матеріалів, покриттів» є однією із складових комплексної підготовки магістрів з галузі знань 13 «Механічна інженерія» спеціальності 132 «Матеріалознавство» за освітніми програмами «Композиційні та порошкові матеріали, покриття» та «Інжиніринг зварювання та споріднених процесів».

Дисципліна «Спеціальні питання інженерії композиційних та порошкових матеріалів, покриттів» носить міждисциплінарний характер, розрахована на студентів-магістрів, які здобули освітньо-кваліфікаційний рівень «бакалавр» та вивчали такі дисципліни, як «Фізико-хімічні та технологічні основи створення покриттів», «Дисперсні матеріали та композити», «Основи нанотехнологій та наноструктурне матеріалознавство», «Особливості виробництва порошкових матеріалів та обладнання підприємств».

Дисципліна «Спеціальні питання інженерії композиційних та порошкових матеріалів, покриттів» забезпечує підготовку студентів до виконання магістерської дипломної роботи. Методичні вказівки містять теоретичні передумови і рекомендації щодо 7 практичних робіт, виконання яких разом з опрацюванням лекційного матеріалу сприятиме формуванню та розвитку вмінь щодо вибору матеріалів та проєктування сучасних технологічних процесів виготовлення деталей із захисними покриттями, професійному вибору інноваційних рішень технічних проблем у галузі композиційних та порошкових матеріалів, покриттів.

У методичних вказівках автори не прагнули надати розгорнутий матеріал про все різноманіття композиційних матеріалів і напилених покриттів та вживані технології, враховуючи, що дана інформація міститься в рекомендованій літературі та інформаційних ресурсах.

ВИЗНАЧЕННЯ СТРУКТУРНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ТА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ З ЖАРОМІЦНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Мета роботи:

1) на прикладі металоматричних і керамічних композиційних матеріалів одержати уявлення про взаємний зв'язок між функціональними властивостями жароміцних матеріалів і особливостями їх структури;

2) на основі теоретичних основ матеріалознавства дисперсних металів та композиційних матеріалів підібрати відповідні композиції для виготовлення певних жароміцних деталей; скласти технологічну схему виготовлення деталі та обрати технологічні режими, використовуючи діаграми стану.

Короткі теоретичні відомості

Розвиток авіа- та ракетобудування, енергетичного та галузевого машинобудування вимагатиме впровадження ***жароміцних композиційних матеріалів*** з високим опором до пластичної деформації та руйнування в умовах високих температур і окиснювальних середовищ. Їх важливими робочими характеристиками вважаються:

- жароміцність – властивість конструкційних матеріалів (металевих, керамічних, полімерних тощо) при високих температурах чинити опір деформуванню і руйнуванню під дією механічних навантажень;
- жаростійкість (окалиностійкість) – здатність матеріалів протидіяти газовій корозії при підвищених температурах;

- високі значення границі повзучості ($\sigma_{l/\tau}^t$) – напруження, яке викликатиме у матеріалі задану деформацію (l) при певній температурі (t) і тривалості випробувань (τ);

- високі значення границі тривалої міцності (σ_{τ}^t) – напруження, яке витримуватиме матеріал без руйнування при заданих температурі t та тривалості випробування τ ;

- термостійкість – властивість крихких матеріалів зберігати механічні характеристики і структуру при одно- або багаторазовій термічній дії. Визначається здатністю матеріалу чинити без руйнування опір напруженням, зумовленим зміною температури при нагріванні або охолодженні;

- термостабільність – здатність хімічних речовин і матеріалів зберігати сталими хімічну будову і фізичні властивості при підвищенні температури.

Крім загальноприйнятих фізико-механічних властивостей жароміцні композити повинні мати коефіцієнт теплопровідності не нижче 17,3 Вт/(м·К) та витримувати робочі температури на рівні 0,8...0,9 від температури плавлення найбільш легкоплавкого компонента, що сприятиме зростанню проєктної потужності двигунів, швидкості роботи механізмів та зниженню металоємності конструкцій. Для цього застосовуються металеві матеріали, виготовлені з легованих сталей і сплавів, та композити на основі тугоплавких з'єднань.

Металоматричні композити застосовуються у виробництві відповідальних деталей газових і парових турбін, двигунів внутрішнього згоряння, температура експлуатації яких не перевищує 800...1000 °С. Для порівняння матеріалів за критеріями жароміцності застосовуються температурні критерії (табл. 1.1), де найбільш інформативним вважається відношення робочої температури до температури плавлення сплаву ($T_{\text{роб}}/T_{\text{пл}}$), яке для більшості матеріалів знаходиться у діапазоні 0,5...0,9. Тому основною задачею технології

виготовлення жароміцних композитів є одержання безпористого матеріалу: залишкова пористість значно знижуватиме їх жароміцність та жаростійкість.

Таблиця 1.1. Робочі температури жароміцних металоматричних матеріалів [13]

Основа жароміцних композиційних матеріалів	Температура плавлення основного компонента, °С	Робоча температура, °С	$T_{\text{роб}}/T_{\text{пл}}$
Магній	650	100...350	0,4...0,68
Алюміній	660	150...350	0,45...0,67
Спечені алюмінієві порошки (САП)	660	350...500	0,53...0,8
Титан	1670	450...550	0,37...0,42
Мідь	1083	450...600	0,53...0,64
Кобальт	1495	800...900	0,6...0,69
Нікель	1455	850...1030	0,65...0,75
Хром	1875	700...1150	0,45...0,66

Для виготовлення металоматричних композиційних матеріалів використовуються рафіновані порошки Ni, Ti, Cr (табл. 1.1), металеві порошки з алюмомарганцевих, алюмотитанових сплавів, високолегованих сталей, сплавів хрому та ін., одержані дифузійним насиченням з точкових джерел, а також за технологіями кальцієстермічного відновлення, розпилення розплавів газом. Важливими вимогами до порошків є їх висока хімічна стійкість, що забезпечує зниження процесів окислювання під час спікання. Як приклад на рис. 1.1 наведено мікроструктури жароміцних композиційних матеріалів, які застосовуються у двигунобудуванні та теплоенергетиці. Технологічний процес складається з етапів змішування порошків до гомогенної консистенції (для чого застосовуються V-подібні змішувачі, а процес триватиме від 4 до 24 год) та пресування у зачинених прес-формах під тиском 600...700 МПа з наступним спіканням

у вакуумі протягом 3...20 год. Прикладання під час спікання тиску 1...10 МПа забезпечує формування щільної однорідної структури. Далі заготовки зазнають деформаційної та термічної обробки: це може бути обтиснення або екструзія за наступним гартуванням і старінням. З метою виключення процесів збіднення поверхонь заготівель на Al і Ti, які саме й утворюють зміцнювальну фазу в структурі композитів, для термічної обробки застосовуються інертні середовища. Так, наприклад, композиції системи Ni–Al зазнають нагрівання при температурах 1150...1200 °С з охолодженням у воді з наступним старінням протягом 6...12 год у діапазоні 900...950 °С.

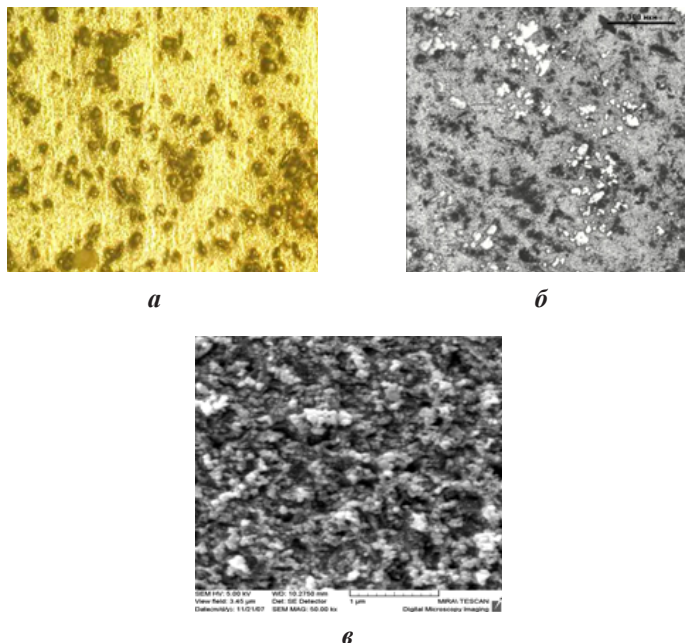


Рис. 1.1. Мікроструктури жароміцних

алюмоматричних композиційних матеріалів:

a – на основі порошку АМг5 з наповнювачем з SiC (10 % мас.), $\times 200$;

б – з матрицею з А99, зміцненого частками Ti (3% мас.)

та Al_2O_3 (0,1 %); *в* – системи Ni–Al [зроблено авторами]

Крім жароміцних металокомпозитів у ракетній техніці для виготовлення авіаційних і морських двигунів застосовуються керамічні композиційні матеріали на основі SiC та Si₃N₄ з робочими температурами до 2000 °С. Їх властивості наведені у табл. 1.2.

Таблиця 1.2. Властивості керамічних композиційних матеріалів на основі SiC і Si₃N₄ [4]

Властивості	SiC	Si ₃ N ₄
Щільність, кг/м ³	≈ 3200	≈ 3190
Температура плавлення з розм'якшенням склоподібної фази, °С	≈ 2830	≈ 2530...2265
Лінійний коефіцієнт термічного розширення, К ⁻¹ (300...1200 К)	(4,2...5,1)·10 ⁻⁶	3,4·10 ⁻⁶
Теплопровідність, Вт/(м·К)	490 (при 20°С)	62,8 (при 20 °С)
	90 (при 930°С)	20 (при 1300 °С)
Мікротвердість, ГПа	28...35	34,8...45,3
Модуль пружності, ГПа	405	314
Термоудар, °С	200	650

На відміну від металокомпозитів керамічні матеріали з Si₃N₄ здатні витримувати термоциклічні перепади при 1050/460 °С. Їх навіть безпористу структуру забезпечують технології реакційного спікання. Заготовки формуються методами шлікерного литва, екструзії, інжекційного пресування тощо. Сформований напівфабрикат зазнає нагрівання у середовищі азоту (або суміші N₂+H₂) при температурах 1250...1450 °С, що дає змогу отримувати одразу вироби з високою розмірною точністю (з допуском за розмірами 0,1 %). Мікроструктура реакційно зв'язаного Si₃N₄ являє собою щільний каркас із повздовжніх взаємнопереплечених одинарних зерен α- Si₃N₄ з вкрапленнями одинарних зерен β-фази (рис. 1.2). Змінюючи умови азотування, можна отримати матеріал з різним співвідношенням фаз.

Нітридокремнієві матеріали – це типово крихкі матеріали, які не проявляють мікропластичності при руйнуванні

у широкому діапазоні температур. Керамічні композити з Si_3N_4 є хімічно стійкими до більшості кислот та залишаються інертними до розплавів Al, Pb, Zn, Au, Ag, проте вони зазнають руйнування металами перехідних груп, утворюючи силіциди. Негативний вплив також спостерігається з боку розплавлених Mg, Cr, Cu, ніхрому та нержавіючих сталей. Конструкційні композиційні матеріали на основі нітридної кераміки є перспективними для двигунобудування (рис. 1.3): з них виробляються соплові апарати для газотурбінних двигунів, робочі колеса, газоходи тощо. Для двигунів внутрішнього згоряння – це товкачі клапанів, вихлопні канали, вставки гільз, циліндрів, накладок на поршень тощо.

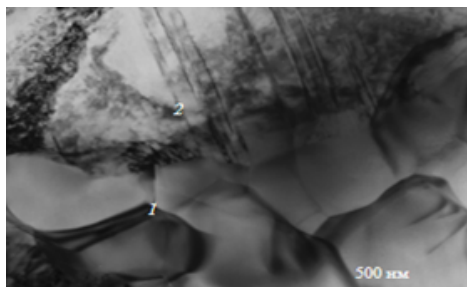


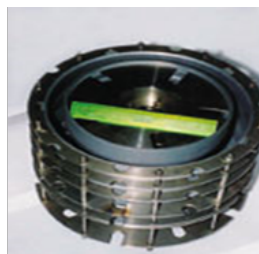
Рис. 1.2. Мікроструктура реакційно зв'язаного Si_3N_4 [1]:
1 – зерна α - Si_3N_4 ; 2 – зерна β -фази



a



б



в

Рис. 1.3. Керамічні вироби для двигунобудування [17]:
a – сопловий апарат; *б* – робоче колесо; *в* – газохід

Керамічні композити на основі SiC являють собою гетерогенні композиції (рис. 1.4), у яких зерна SiC «зацементовані» зв'язками, відмінними за складом та властивостями від основної фази: в основному це кремнеземисті, глиноземні, нітридокремнієві та нітридоалюмінієві зв'язки, які вводяться до порошкової шихти разом з SiC.

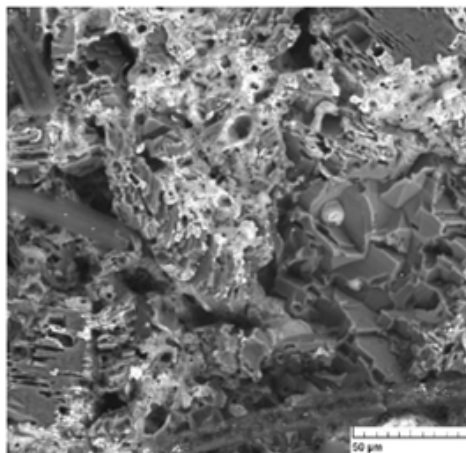


Рис. 1.4. Мікроструктура реакційно спеченого SiC з додаванням $Y_2O_3-Al_2O_3$ (3:5) [14]

В залежності від технології одержання розрізняють наступні типи кераміки на основі SiC:

- монокристалічні, технологія одержання яких пов'язана з процесами перекристалізації через рідкометалеві розплави, пересублімації через газову фазу, дисоціативне випаровування;
- рекристалізовані, які одержані без використання зв'язуючих та активованих додатків у результаті процесів дисоціативного випаровування SiC та його пересублімації при температурі 2100...2300 °C;
- гарячепресовані, що одержані за технологіями гарячого пресування при температурі 1900...2100 °C та тиску 15...20 МПа у присутності активаторів;

- реакційно спечені («самозв'язані») – матеріали, які отримуються під дією хімічних реакцій протягом спікання з утворенням вторинного карбіду кремнію.

Наочний матеріал, електронне та програмне забезпечення

При виконанні практичної роботи студенти використовують фотоальбом з мікроструктурами металоматричних і керамічних жаростійких матеріалів, рентгенограми, таблиці з властивостями, електронну базу даних «*Composit data*», діаграми стану (наприклад, Cu-Ni, Al-CuAl₂, Al-Si, Pb-Mg, Cu-Al, Cd-Zn, Mg-Ca, Si-C, Si-N), виробничі технологічні інструкції.

Порядок виконання роботи

1. За особистими вказівками викладача підібрати композиційний матеріал для виготовлення певної жароміцної деталі згідно з варіантом (Додаток А).

2. Обґрунтувати та скласти технологічну схему виготовлення деталі. Приклад технологічної схеми наведено у Додатку Б.

3. Використовуючи електронну базу даних «*Composit data*», оберіть мікроструктуру певного жароміцного виробу, опишіть її особливості.

4. Оформити звіт, у якому необхідно сформулювати мету практичної роботи, навести короткі теоретичні відомості, результати виконання та висновки.

5. Надати відповіді на контрольні питання.

Контрольні питання

1. Назвіть та охарактеризуйте застосування жароміцних композиційних матеріалів у техніці. Підкріпіть відповідь прикладами.

2. Наведіть вимоги, які пред'являються до жароміцних порошкових і композиційних матеріалів. Назвіть особливості їх властивостей.

3. Дайте характеристику технологіям одержання металоматричних жароміцних матеріалів.

4. Наведіть та охарактеризуйте особливості структури металоматричних жаростійких матеріалів.

5. Узагальнено охарактеризуйте структуру та властивості безкисневих керамічних матеріалів. Наведіть приклади виготовлення з них жароміцних виробів.

6. Охарактеризуйте особливості структури реакційно зв'язаного Si_3N_4 . Поясніть переваги його застосування для жароміцних виробів.

7. Дайте характеристику керамічним композитам на основі SiC : наведіть основні типи структур за технологіями отримання, узагальнено опишіть їх фізико-механічні властивості; наведіть приклади застосування.

ВИЗНАЧЕННЯ СТРУКТУРНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ТА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ З ФУНКЦІОНАЛЬНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Мета роботи:

1) на прикладі сітчастих, електроконтактних, ущільнюючих, комірчастих, біокерамічних композиційних матеріалів одержати уявлення про взаємозв'язок між функціональними властивостями й особливостями структури;

2) проаналізувати та теоретично обґрунтувати вибір технологічних параметрів виготовлення деталей з функціональних композиційних матеріалів.

Короткі теоретичні відомості

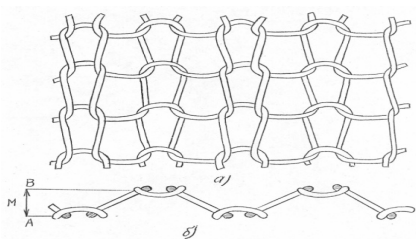
Розробка нових технологій створення функціональних композиційних матеріалів є важливою науково-технічною проблемою неорганічного матеріалознавства. Різноманіття сітчастих, електроконтактних, ущільнюючих, фільтрувальних, біокерамічних композитів пов'язано з потребами військової, хімічної, медичної та інших галузей.

Сітчасті блискавкозахисні композиційні матеріали.
В'язані та в'язано-паяні дротові сітки застосовуються для систем блискавкозахисту авіаційних конструкцій та військової техніки, зовнішні елементи яких виготовлені з неметалевих матеріалів, зокрема полімерів або кераміки.

Електропровідні мідні сітки трикотажної структури (рис. 2.1,*а*) через особливості в'язаних плетінь (рис. 2.2,*б*) можуть забезпечити ефективний механізм розсіювання електричної, теплової та механічної складових ударів блискавки та електромагнітних випромінювань, значно знижуючи пошкодження техніки.



a



б

Рис. 2.1. Структура мідних сітчастих матеріалів:

a – каркас; *б* – плетіння [10]

Петлі таких сіток можуть бути утворені однією, двома або більшою кількістю дротів. Інформативним параметром структури є поверхнева щільність – маса 1 кв. м сітчастого полотна, яка вимірюється у г/м^2 , що обмежує масогабаритні показники виробів та впливає на їх питомий електричний опір, міцність, жорсткість тощо. Підвищення міцності сітчастих матеріалів, отриманих за трикотажами технологіями з використанням різних в'язальних технік, досягається шляхом додаткової пайки місць контактів дроту з послідовним пресуванням. Обробка тиском здійснюється при температурі на $40\ldots 60^\circ\text{C}$ вище температури плавлення припою.

Електроконтактні порошкові матеріали. Електроконтактні матеріали (рис. 2.2) застосовуються для обладнання сильнотоківних пристроїв контактної дії для комутації струмів у сильнотоківних пристроях з навантаженням до мільйона вольт та сотень тисяч ампер.

Для замикання електроланцюгів у високо- та низьковольтних апаратах та приборах застосовуються розривні електроконтактні матеріали з підвищеними значеннями міцності, тепло- та електропровідності. За складом електроконтактні матеріали ділять на: металеві; металографітні;

металооксидні; металокарбідні, металоборидні, металонітридні тощо.

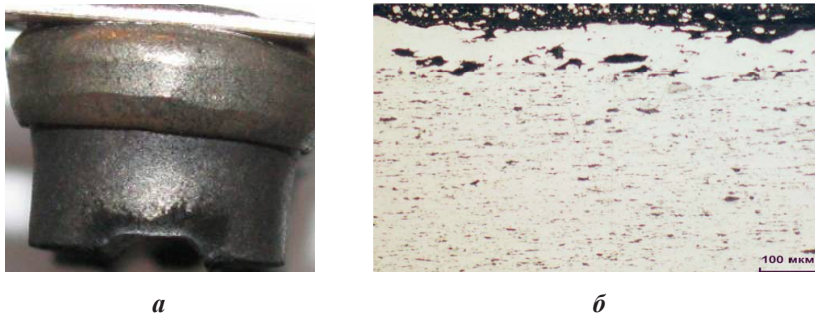


Рис. 2.2. Срібно-графітовий електроконтактний матеріал [2]:

а – після 500 тис. циклів випробувань на режимі 24В/2А;

б – оптична мікрофотографія мікроструктури, $\times 600$

До металевих порошкових електроконтактних матеріалів відносяться:

- однокомпонентні: Ag, W, Mo, Au, Pt;
- двокомпонентні: Ag-Ni, Ag-Mo, Ag-W, Cu-W, Cu-Mo, Au-W, Au-Mo, Fe-Cu;
- три- та більше компонентні: Ag-Ni-Cd, Ag-Ni-Cu, W-Cu-Ni, W-Ag-Ni, Fe-Cu-Bi, Ag-Pd-Au, Ag-Pd-Ni, Ag-Ni-Cd-Te.

Серед металографітових електроконтактних матеріалів найбільш поширені композиції систем Ag-C та Cu-C.

До металооксидних електроконтактних матеріалів відносяться матеріали систем Ag-CdO, Ag-CuO, Ag-ZnO, Ag-ZrO₂, Ag-Ta₂O₅, Ag-HfO₂, Ag-Cr₂O₃.

Прикладами металокарбідних, боридних, нітридних є матеріали Ag-WC, W-WC, Cu-Ni-WC, Me-TiC, TiB₂, TiN, Me-ZrB₂, ZrN.

Для виготовлення електроконтактних матеріалів застосовуються технології подвійного пресування та інфільтрації порошкових пресовок, прокатки та екструзії.

Ущільнюючі композиційні матеріали використовуються у двигунобудуванні, хімічній промисловості, енергетичній галузі тощо. Їх функціональним призначенням є зменшення перетікання газу або рідини через зазори між деталями машин, механізмів, двигунів. До ущільнюючих матеріалів пред'являються вимоги пластичності, термостійкості, зносостійкості, забезпечення завданої рухливості, хімічна і корозійна стійкість, висока міцність на стикування та згинання, зберігання твердості при температурі експлуатації. Для цього застосовуються металокерамічні карбідохромові тверді сплави (наприклад, КХН-15); вуглецеві матеріали; графітізовані вуглецеві матеріали; нікель-графітні порошкові і композиційні матеріали; міднографітні порошкові матеріали; силіцьовані графіти; стрічки ущільнюючі спечені, які виготовлені з порошкових матеріалів (наприклад, ПХ20Н80).

Вуглець-вуглецеві композиційні матеріали (C-C, C/C, CCC) – загальна назва широкого класу матеріалів, які складаються з вуглецевої або графітової матриці, армованої вуглецевими або графітовими волокнами (рис. 2.3). Виготовлені з них конструкції та вузли впроваджуються у системи життєдіяльності з нетрадиційними джерелами енергії, у ракетну техніку, техніку високих температур, хімічну промисловість тощо.

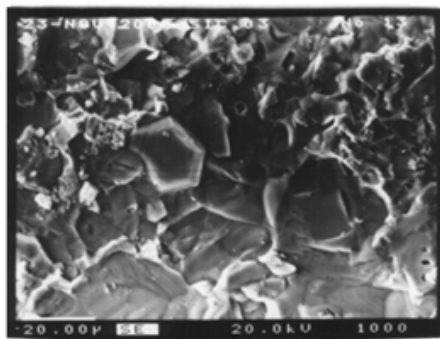


Рис. 2.3. Мікроструктура силіцьованого графіту [2]

Завдяки високій міцності структурних елементів вуглець-вуглецеві композиційні матеріали є найміцнішими за відомі конструкційні матеріали та сплави, які працюють в умовах високих температур. Для їх формування використовуються вуглецеві та графітові волокна, сажа, скловидний вуглець тощо; волокна можуть бути розташовані хаотично, одно-, дво- та триспрямовано.

Композиційні матеріали з комірчастою структурою застосовуються для виготовлення теплової ізоляції, об'єктів плавучості для глибоководної техніки, заповнення сандвічевих конструкцій, захисту обладнання у хімічній промисловості тощо. Серед основних методів отримання комірчастих матеріалів найбільш поширеними вважаються спікання металевих порошків (або металевих волокон, сіток) з піноутворювачем та метод дублювання структури пінополіуретану. Технології спікання дають можливості отримувати матеріали з відкритою та закритою пористістю, не вимагають дороговартісної сировини та вважаються енергоефективними. На відміну від них метод дублювання структури пінополіуретану забезпечує формування комірки з формою витягнутого пентагонального еліпсоїда обертання та підвищенні механічні показники в умовах всебічного стискання. Більш складна технологія вимагатиме тривалих процесів термообробки з використанням вартісних сировинних компонентів. Процес полягатиме в тому, що на підготовлену поверхню пінополіуретану рівномірно наноситься стабілізована суспензія металевих або керамічних порошків, сформована заготовка просушується та термооброблюється, після чого зазнає активації. Для надання електропровідності хімічно осаджують нікель, а потім за допомогою електрохімічного способу наносять недостатню частину металу і через термообробку із заготовки вилучають пінополіуретан. Кінцевою операцією є спікання, під час якого відбувається процес гомогенізації з розподілом легуючих елементів по перемичках комірки.

Метод дублювання структури пінополіуретану використовується для одержання пористих жаростійких сплавів з ніхрому, сталі та інших сплавів на нікелевій, кобальтовій, мідній та алюмінієвих основах і більш складного хімічного складу. На рис. 2.4 як приклад наведені мікроструктури металевих комірчастих матеріалів на основі ніхрому (*а*) та алюмінію (*б*).

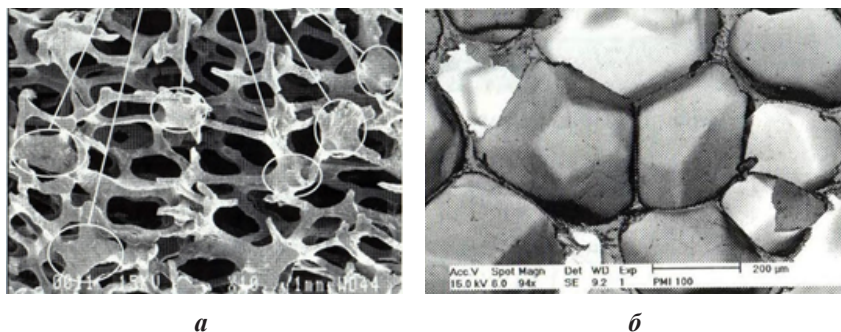


Рис. 2.4. Мікроструктура ($\times 150$)
металевих комірчастих матеріалів на основі:
а – ніхрому; *б* – алюмінію [8]

Пористі керамічні матеріали з двовимірною або тривимірною структурою комірки (рис. 2.5) використовуються для термоізоляції печей та космічних апаратів, протипожежних покриттів, виготовлення фільтрів, у дизельних двигунах, електроніці та біомедицині.

Завдяки структурі комірки композиційні матеріали мають підвищену міцність: руйнування стінки тривалий час не призводить до руйнування всієї деталі або конструкції.

Біокерамічні матеріали. Відносно новим напрямком порошкового матеріалознавства є розробка нових біокерамічних матеріалів, так званих імплантантів, які широко застосовуються у галузях хірургії та стоматології (рис. 2.6). Основна задача використання біокераміки – замінити кістку, що порушена, матеріалом, який успішно зможе працю-

вати в умовах організму, а саме при взаємодії з корозійно-сольовими розчинами при температурі 37 °С, одночасної дії ферментних та клітинних систем під одночасною дією багатоосьових, циклічних та змінних навантажень.

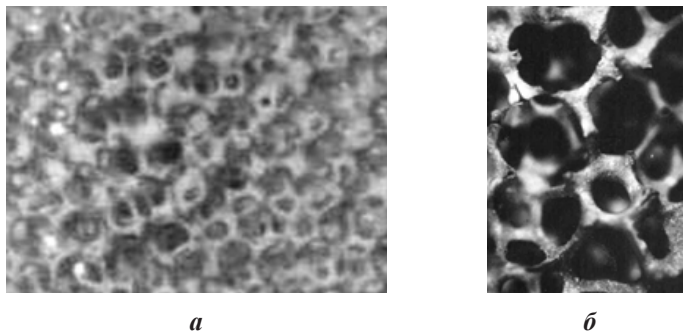


Рис. 2.5. Мікроструктура пінокераміки:
а – $\times 50$; *б* – $\times 150$ (після руйнування) [зроблено авторами]

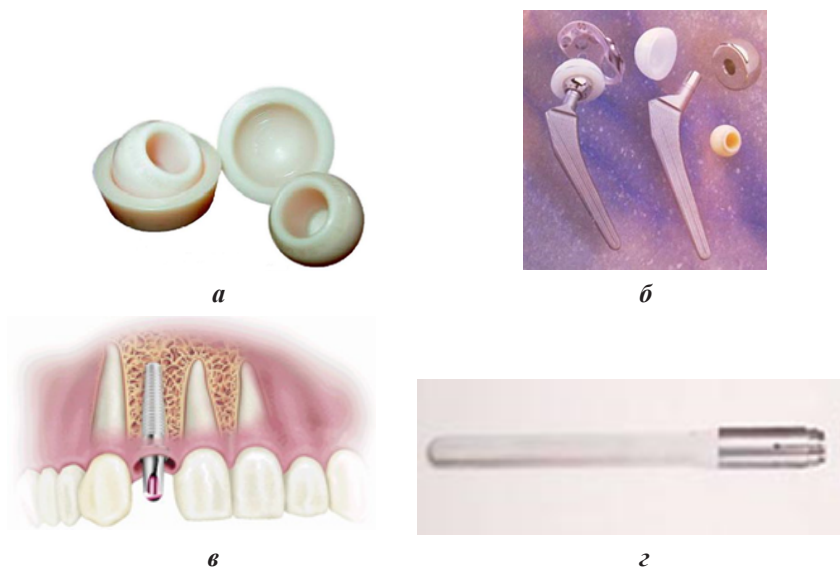


Рис. 2.6. Приклади біокерамічних виробів, виготовлених з ZrO_2 [1]:
а – головка шейки стегна; *б* – тазобедрені суглоби (титанові та керамічні деталі);
в – у зубному протезуванні; *г* – протез плечевого суглобу
 (титанові та керамічні деталі)

У табл. 2.1 наведено основні категорії біоматеріалів.

Таблиця 2.1. Категорії біоматеріалів [1]

Категорії матеріалів	Характеристика за реакцією організму
Біотоксичні матеріали	Реакція організму: відмирання, патологічна зміна живої тканини біля матеріалу внаслідок хімічних, гальванічних та інших процесів
Біоінертні матеріали	Реакція організму: сумісність з матеріалом без шкідливих змін, відокремлення від матеріалу шаром фіброзної тканини різної товщини
Біоактивні матеріали	Реакція організму: утворення з поверхнею матеріалу біохімічного зв'язку
Біорезорбуючі матеріали	Реакція організму: поступове розчинення матеріалу в організмі, заміщення властивостей без наявності токсичності та гноблення

У табл. 2.2 наведено різновиди матеріалів, які відносяться до виділених категорій.

Таблиця 2.2. Види матеріалів за категоріями [1]

Категорії матеріалів	Види матеріалів
Біотоксичні матеріали	Сплави, які містять кадмій, ванадій та інші токсичні елементи. Вуглецеві сталі, карбіди, метилметакрилат
Біоінертні матеріали	Тантал, титан. Різновиди керамік на основі Al_2O_3 і ZrO_2
Біоактивні матеріали	Високощільний гідроксилапатит (ГАП), трикальційфосфат, біоскло
Біорезорбуючі матеріали	Трикальційфосфат, пористий гідроксилапатит, кальційфосфатні солі, різновиди біостекол та поліуретану

Головними вимогами, що пред'являються до імплантів, є відсутність токсичності, взаємодії з інерідним тілом, побіч-

них реакцій у рідині та тканинах людини, резорбної здатності за винятком біорезорбіруємої кераміки. Крім того, це корозійна та хімічна стійкість матеріалів, з яких виготовлено імплант, та стабільність їх механічних властивостей.

З усього різноманіття неорганічних матеріалів біоактивними та біорезорбіруемими матеріалами можуть бути тільки різновиди біокерамік, які були розроблені як альтернатива медичним сплавам на основі титану. Проте суттєвим недоліком всіх біокерамічних матеріалів є невисокі у порівнянні з металами показники тріщиностійкості, повна відсутність пластичності, труднощі, пов'язані з механічною обробкою під час підгонки. Поєднання покриттів з біокерамічних матеріалів на металевих імплантах вирішує ці недоліки. Тобто, це дозволяє сумістити пластичність і тріщиностійкість металів з всіма перевагами кераміки.

До складу біоактивних і біорезорбіруємих керамік входить гідроксилапатит (ГАП) – $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$, аналог хімічного складу зубної емалі. Зубна емаль містить 97 % неорганічного ГАП та включає у себе також фтор $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH}, \text{F})_2$. Також, як матеріал біоактивної та біорезорбіруємої кераміки використовується β -трикальцієфосфат (ТФК) – $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$; при взаємодії з внутрішнім середовищем організму всі кальцієфосфатні фази перетворюються у ГАП. Саме хімічний склад зумовлює фізико-механічні властивості використаних матеріалів. Проте не менш важливою характеристикою є їх структура. Згідно із загальними положеннями неорганічного матеріалознавства поняття «структура матеріалу» включає у себе: тип кристалічної ґратки, розмір кристалів, топологію каркасу, розмір включень і пор. Дослідження структури здійснюється за допомогою методів електронної та оптичної мікроскопії, рентгеноструктурного аналізу а інших з використанням сучасного обладнання. Результати досліджень можуть бути оформлені у вигляді анотованого звіту та підкріплені мікрофотографіями. Як приклад

на рис. 2.7 наведено оптичну мікрофотографію пористого трикальцієфосфату (рис. 2.7,*а*) й електронну мікрофотографію напиленого гідроксилапатиту (рис. 2.7,*б*).

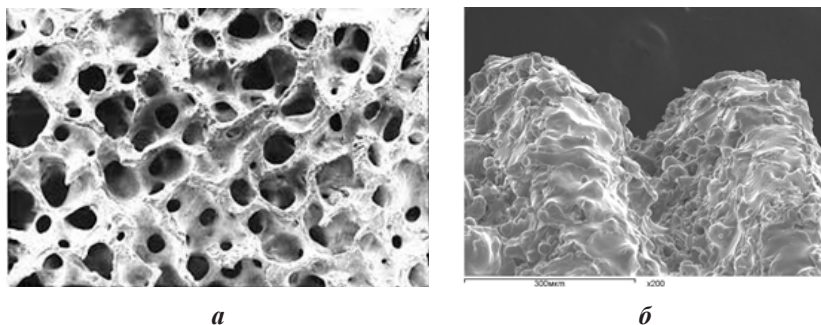


Рис. 2.7. Цифрові мікрофотографії [9]:

а – оптична мікрофотографія пористого трикальцієфосфату;
б – електронна мікрофотографія напиленого гідроксилапатиту

Склокристалічні матеріали можна розглядати як кераміку з підвищеним вмістом склафази: $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{O}, \text{OH}, \text{F})$; β -волластоніт ($\beta\text{-CaO}\cdot\text{SiO}_2$); флагопіт $((\text{Na}, \text{K})\text{Mg}_3(\text{AlSiO}_{10})\text{F}_2)$; віктоліт ($\beta\text{-Ca}_3(\text{PO}_4)_2$). Керамічні матеріали на основі оксиду алюмінію та діоксиду цирконію відносяться до біоінертних керамік.

Кераміка із оксиду алюмінію ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) – перша із різновидів керамічних матеріалів, що знайшла широке клінічне застосування. Це високощільний композит із загальною пористістю 1...3 %, з високочистим хімічним складом (сума домішок менш ніж 0,5 %), має дрібнозернисту структуру (розмір зерен менше 4 мкм). Така кераміка практично біоінертна, тобто володіє підвищеною корозійною стійкістю у живому організмі, біосумісна, має високі значення міцності та твердості. Крім того, зберігає форму та високоякісне полірування, які досягаються в результаті механічної обробки. При цьому шорсткість поверхні повинна відповідати $Ra \leq 0,02$ мкм, а у випадку пари тертя відхілення від сфе-

ричності складає $\leq 0,15$ мкм. Найвищі значення міцності, втомленої міцності та тріщиностійкості формуються завдяки дрібнозернистій структурі матеріалу, в якому сума домішок не перевищує 0,3 %. Збільшення середнього розміру зерен до значень більш ніж 7 мкм зменшує механічні властивості приблизно на 20 %.

Крім виробів, одержаних за керамічними технологіями, в хірургічній практиці використовуються головки ендопротезів та пар тертя, виготовлені із монокристалів $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (сапфіру). Для формування їх монокристалічної структури застосовуються методи спрямованої кристалізації розплавів, що дозволяє усунути виникнення окремих пор, які знижують трибологічні властивості поверхні. Проте тріщиностійкість монокристалів є нижчою, ніж у тонкозернистої кераміки, а анізотропія властивостей ускладнює одержання малих відхилень від сферичності при фінішній обробці виробів.

Діоксид цирконію (ZrO_2) – високобіосумісний, фактично абсолютно біоінертний керамічний матеріал. Незважаючи на те, що безпосереднє його зростання з кісткою не є можливим, в організмі не спостерігається негативних наслідків. Це обумовлено тим, що на відміну від корундової біоінертної кераміки, в якій присутня одна стабільна фаза $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, високоміцна кераміка на основі ZrO_2 складається не менше ніж з двох фаз – тетрагональної та моноклінної. Саме така особливість структури пояснює підвищену тріщиностійкість цього виду кераміки. Дослідження, які були проведені в Інституті проблем матеріалознавства НААН України, довели, що хімічно агресивні середовища стимулюють фазовий перехід в кераміку з ZrO_2 , що призводить до зменшення її міцності. Аналогічна ситуація реалізується, коли керамічний імплантат знаходиться всередині живого організму, який є багатофакторним агресивним середовищем, проте застосовування ZrO_2 дозволяє виготовляти вироби різних типорозмірів.

Наочний матеріал, електронне та програмне забезпечення

При виконанні практичної роботи студенти використовують фотоальбом з мікроструктурами сітчастих, електроконтактних, ущільнюючих, комірчастих, біокерамічних композиційних матеріалів; рентгенограми, таблиці з властивостями, електронну базу даних «*Composit data*», діаграми стану (наприклад, Cu–Ni, Ag–Ni, $\text{ZrO}_2\text{--Y}_2\text{O}_3$; $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--ZrO}_2$), виробничі технологічні інструкції.

Порядок виконання роботи

1. За особистими вказівками викладача обрати певний сітчастий матеріал (мідний, вуглець-вуглецевий трикотаж, кевлар тощо); проаналізувати та охарактеризувати особливості його структури, встановити взаємозв'язок між структурними особливостями та функціональними властивостями; визначити основні технологічні етапи одержання виробу.

2. За допомогою електронної бази даних «*Composit data*» обрати мікроструктуру певного електроконтактного композиційного матеріалу (наприклад, Ag–Ni, Ag–C, C–C тощо); описати його структуру та визначити вплив структурних особливостей на функціональні властивості. Використовуючи відповідні діаграми стану та технологічні інструкції, визначити режими та умови спікання порошків.

3. Підібрати відповідний композиційний матеріал для виготовлення ущільнюючого елемента (у двигунобудуванні, хімічному виробництві тощо); визначити умови його експлуатації залежно від складу та особливостей структури.

4. Використовуючи електронну базу даних «*Composit data*», обрати мікроструктуру певного (за варіантом) комірчастого матеріалу; проаналізувати та обґрунтувати вибір технологічних параметрів його отримання за умовами формування певної геометрії комірки.

5. За особистими вказівками викладача обрати композиційний матеріал для виготовлення ендопротезу, штучної

кістки, зубного імпланту тощо. Визначити взаємозв'язок між технологічними параметрами, структурою і властивостями. Обґрунтувати відповідь.

6. Оформити звіт, у якому необхідно сформулювати мету практичної роботи, навести короткі теоретичні відомості, результати виконання та висновки.

7. Надати відповіді на контрольні питання.

Контрольні питання

1. Наведіть приклади та обґрунтуйте доцільність застосування сітчастих матеріалів у техніці.

2. Розкрийте особливості виготовлення сітчастих матеріалів за трикотажними технологіями.

3. Назвіть та охарактеризуйте призначення, умови та вимоги щодо експлуатації електроконтактних матеріалів.

4. Дайте характеристику порошковим системам, які застосовуються для виготовлення електроконтактних композиційних матеріалів.

5. Опишіть технології порошкової металургії, за якими виготовляються електроконтактні матеріали.

6. Назвіть та охарактеризуйте основні перспективні види матеріалів з комірчастою структурою. Охарактеризуйте призначення та наведіть приклади їх застосування.

7. Охарактеризуйте технології одержання матеріалів з комірчастою структурою. Наведіть та обґрунтуйте переваги технології «дублювання структури пінополіуретану».

8. Назвіть класифікацію, охарактеризуйте призначення та умови експлуатації біокерамічних матеріалів.

9. Розкрийте основні напрямки технологій отримання біокерамічних матеріалів.

10. Наведіть та охарактеризуйте особливості структури та властивостей біокерамічних матеріалів.

ВИЗНАЧЕННЯ СТРУКТУРНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ТА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ З ТВЕРДИХ ТА НАДТВЕРДИХ ПОРОШКОВИХ СПЛАВІВ

Мета роботи:

- 1) на прикладі вольфрамів та безвольфрамів порошкових сплавів набути уявлення про взаємний зв'язок між функціональними властивостями твердих і надтвердих матеріалів та особливостями їх структури;
- 2) на основі теоретичних основ матеріалознавства підібрати відповідні композиції для виготовлення певних твердосплавних виробів; скласти технологічну схему виготовлення деталі та обрати технологічні режими.

Короткі теоретичні відомості

Твердими сплавами називають сплави, які виготовлені методом порошкової металургії і складаються з карбідів тугоплавких металів (WC, TiC, TaC), зв'язаних кобальтом. Це композиційні матеріали особливого класу, які характеризуються високими значеннями твердості, міцності та зносостійкості при порівняно високих температурах (600...800 °C).

За складом сучасні тверді сплави підрозділяються на вольфрамові (системи WC-Co; WC-TiC-Co; WC-TiC-TaC(NbC)-Co) та безвольфрамові сплави (наприклад, системи TiC(TiN)-Ni-Mo). Сучасна промисловість спрямована на виготовлення вольфрамів твердих сплавів (марок ВКЗ, ВК6, ВК8, ВК10 і ВК20, ВК25); титановольфрамів (марок Т30К4, Т15К6, Т14К8, Т5К10, Т5К12); титанотанталовольфрамів (ТТ7К12, ТТ8К6, ТТ10К8-Б, ТТ20К9). Їх структура складається з тугоплавких з'єднань (як правило, карбідів) та «легкоплавкої» металевої зв'язки.

З названих класів сплави системи WC-Co є найміцнішими, але вони недостатньо тверді та зносостійкі. Про-

мислові марки цієї групи розрізняються за вмістом кобальту 3...25 % (ВК3...ВК-8). Цей вид твердих сплавів застосовується для обробки виробів з чавуну, бронзи, нержавіючих сталей, титанових сплавів тощо. Їх структура складається з твердого розчину кобальту в карбіді вольфраму та залишкових кристалів карбідів вольфраму. Порошкові сплави системи WC-TiC-Co випускаються, головним чином, для оснащення інструментів для обробки сталей різанням, проте вони поступаються міцністю сплавам системи WC-Co, але є більш твердими та окалійностійкими. Збільшення вмісту карбіду титана призводить до одночасного підвищення зносостійкості сплаву та падіння міцності. Порошкові сплави системи WC-TiC-TaC(NbC)-Co вважаються «універсальними» і використовуються для обробки різанням чавунів та сталей. За міцністю вони наближуються до сплавів системи WC-Co, а за твердістю – до сплавів системи WC-TiC-Co.

Безвольфрамові тверді сплави були розроблені як альтернатива сплавам першої та інших груп, мають підвищену твердість та зносостійкість при різанні сталей, але внаслідок підвищеної крихкості застосовуються при чистових та напівчистових операціях.

Як приклад на рис. 3.1 наведено мікроструктури твердих сплавів.

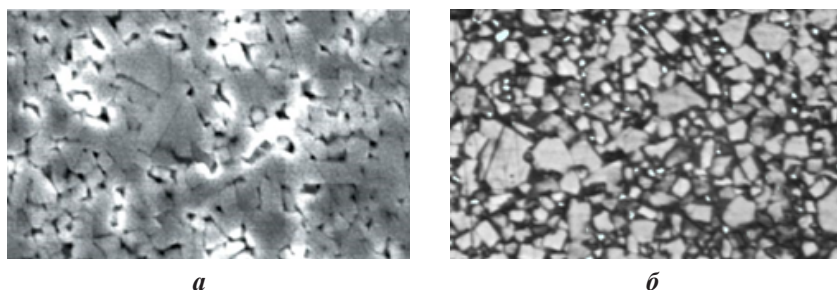


Рис. 3.1. Мікроструктури твердих сплавів [14]:
a – системи WC-Co, (розмір зерна карбіду менше 1 мкм), $\times 2000$;
б – марки ВК-8, $\times 650$

Для формування наноструктурних елементів, які надають матеріалам підвищених функціональних властивостей, застосовуються нанопорошки (рис. 3.2).

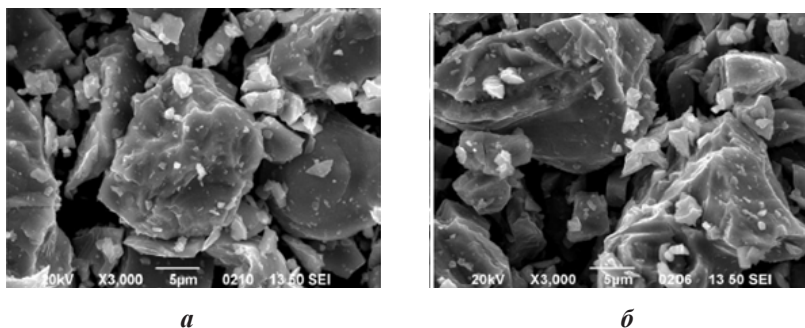


Рис. 3.2. Морфологія порошків [15]:

a – гідриду титану; *б* – титану

Твердосплавні вироби матимуть вигляд стандартних пластин різної форми, за допомогою яких оснащується різальний інструмент (різці, фрези, свердла). З них виготовляються матриці для пресування напівфабрикатів і волочіння дроту, калібрувальний інструмент тощо (рис. 3.3).



Рис. 3.3. Твердосплавні вироби [2]

Більшість технологій одержання виробів ґрунтується на холодному пресуванні порошкових сумішей з пластифікатором та наступному спіканні у водні в діапазоні темпе-

ратур 950...1150 °С. Як альтернатива холодному пресуванню застосовуються гідростатичне пресування, екструзія, прокатка. Важливими технологічними параметрами є температурні діапазони, під час яких відбуваються певні процеси структуроутворення (табл. 3.1).

Таблиця 3.1. Процеси структуроутворення твердих сплавів під час спікання у середовищах водню або вакууму [11]

Діапазони температур	Процеси структуроутворення
200...400 °С	Вигорання пластифікатору
400...700 °С	Відновлення окислів W, Co, Ni, Fe
800...1000 °С	З'єднання окремих зерен карбідів за механізмом «контактного плавлення»
1150...1300 °С	Утворення твердих розчинів на основі Co, відбуваються інтенсивні усадочні процеси
1300...1400 °С	Утворення рідкої фази через плавлення евтектики WC–Co, відбувається ущільнення заготовок за механізмом поверхневого натягу
1400...1500 °С	Утворення карбідного скелету з ростом зерен WC
1500 °С	Кристалізація рідкої фази, яку утворено при температурі 1400 °С

Надтверді порошкові і композиційні матеріали застосовуються для виготовлення елементів бурового, абразивного інструменту, інструментів для обробки каміння та гірничих порід, а також різального інструменту у медицині. Більшість композиційних матеріалів одержується з використанням порошків синтетичних алмазів марок AC80, AC160, AC65 125/100 та природних алмазів, наприклад, марки А 1000/800. Як зв'язка застосовуються кобальт та вольфрамокобальтові сплави (наприклад, В60ОМ, ВК15); вибір зв'язки безпосередньо залежить від виду оброблювального матеріалу. Так, протягом експлуатації відрізного кола на зв'язку впливає стружка, яка активно зношує її.

Якщо зв'язка надто твердою та міцною, то у структурі утворюються маленькі впадинки для розміщення стружки та знижується ріжуча здатність інструменту. При зростанні розміру таких впадин збільшується випадіння зерен. Стабільність властивостей у важких умовах експлуатації можна підвищити через введення до складу композицій наповнювачів типу дисульфиду молібдену, графіту, фторопласта та фториду кальцію. При введенні цих добавок у 2–3 рази підвищується продуктивність, у півтора рази зменшується його зношування.

Наочний матеріал, електронне та програмне забезпечення

При виконанні практичної роботи студенти використовують фотоальбом з мікроструктурами твердих та надтвердих порошкових сплавів, рентгенограми, таблиці з властивостями, електронну базу даних «*Composit data*», виробничі технологічні інструкції.

Порядок виконання роботи

1. За особистими вказівками викладача підібрати композиційний матеріал для виготовлення певного тердосплавного виробу згідно з варіантом (Додаток В).

2. Обґрунтувати та скласти технологічну схему виготовлення деталі. Приклад технологічної схеми наведено у Додатку Б.

3. Використовуючи електронну базу даних «*Composit data*», оберіть мікроструктуру певного тердосплавного виробу, опишіть її особливості.

4. Оформити звіт, у якому необхідно сформулювати мету практичної роботи, навести короткі теоретичні відомості, результати виконання та висновки.

5. Надати відповіді на контрольні питання.

Контрольні питання

1. Наведіть та охарактеризуйте області застосування та особливості експлуатації твердих та надтвердих порошкових сплавів.
2. Охарактеризуйте особливості мікроструктури та властивостей порошкових твердих сплавів.
3. Опишіть особливості технологій одержання твердих порошкових сплавів.
4. Охарактеризуйте особливості мікроструктури та властивостей надтвердих порошкових сплавів.
5. Розкрийте особливості технологій одержання надтвердих порошкових сплавів.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ НАКЛАДАННЯ ІМПУЛЬСІВ ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ НА ПРОЦЕС ФОРМУВАННЯ НАПИЛЕНИХ ПОКРИТТІВ

Мета роботи: ознайомитися з фізико-хімічними процесами, що мають місце при накладанні імпульсів струму на процес формування напилених покриттів. Оцінити їх вплив на частинки дисперсної фази під час руху у високотемпературному гетерофазному струмені при напиленні.

Короткі теоретичні відомості

Газотермічне напилення (ГТН) покриттів дозволяє підвищити ресурс машин та механізмів у 2–8 разів. Узагальнення даних аналізу, виконаного у Німеччині, Китаї, США, Франції, Південній Кореї, Японії, показало, що річний обсяг світового ринку ГТН щороку зростає на 8...9 %. У даних країнах освоєння техніки ГТН додатково стимулюється за рахунок вирішення екологічних проблем шляхом інтенсивного витіснення гальванічних, екологічно дуже брудних технологій з промисловості та їх заміни на більш ефективні газотермічні покриття. Сформована ситуація в промисловості України в останні роки також обумовлює впровадження технологій ГТН у виробництво та їх адаптацію відповідно до умов вітчизняних промислових підприємств. Газотермічне напилення за енергетичними ознаками поділяють на газополумєневе, детонаційне, електродугове та плазмове, саме які і є найбільш поширеними.

Електродугове напилення характеризується простотою та технологічністю, високими енергетичним ККД розпилення і коефіцієнтом використання матеріалу, низькою вартістю та найвищою продуктивністю. Плазмовий метод дозволяє отримувати покриття з широкого спектру мате-

ріалів без обмеження за їх температурою плавлення, характеризується ефективним управлінням процесом формування покриттів. Але поряд з цим є властиві обом методам недоліки: високий рівень пористості (від 6 до 12 %), низька міцність зчеплення з основою (до 30 МПа для електродугових покриттів і до 50 МПа для плазмових), а міцнісні властивості є найважливішими характеристиками покриття.

Аналіз ефективності сучасних способів підвищення фізико-механічних властивостей газотермічних покриттів показує, що основний результат їх застосування полягає переважно у забезпеченні високих енергетичних параметрів напилених частинок та зменшенні їх розмірів. Перспективними є способи, у яких використовується імпульсний вплив на процес наплення, зокрема механічний, акустичний, електричний, лазерний, гідравлічний та ін. Серед них слід відмітити використання електроімпульсного впливу, який характеризується низьким енергоспоживанням та невисокою вартістю додаткового обладнання.

Для обґрунтування можливості підвищення фізико-механічних властивостей наплених покриттів електроімпульсною дією на гетерофазний високотемпературний струмінь необхідно розглянути виникнення додаткових сил та процесів при даному впливі на дистанції наплення. У даному випадку при накладанні високовольтних електричних імпульсів виникає зовнішнє електричне поле на дистанції наплення, що призводить до наступних можливих процесів:

- утворення несамостійного газового розряду;
- виникнення сил Ампера;
- виникнення ефекту Пельт'є на границі поділу фаз;
- виникнення електричних сил за рахунок взаємодії

зовнішнього електричного поля з напиленими частинками у гетерофазному високотемпературному струмені.

Попередні розрахунки з урахуванням технологічних параметрів напилення показують, що виникнення несамостійного газового розряду та ударних хвиль малоімовірно через низький рівень сили струму у каналі розряду. Вплив сил Ампера та ефекту Пельт'є з великою ймовірністю нівелюватиметься низькою силою струму. Але електричні сили, що пов'язані зі взаємодією зовнішнього електричного поля з напилюваними частинками, можуть забезпечити додаткове здрібнення та прискорення останніх, що має суттєвий вплив на властивості покриттів. Дрібніші частинки формують покриття з меншими показниками пористості. Підвищення швидкості частинок забезпечує збільшення комплексу їх фізико-механічних та експлуатаційних властивостей, зокрема міцності зчеплення, зносостійкості та твердості.

Взаємодія зовнішнього електричного поля з напилюваними частинками у гетерофазному високотемпературному струмені. При плазмовому напиленні для розігрівання та прискорення напилюваного матеріалу використовують плазму. На незаряджену напилювану частинку при напиленні спрямовані потоки електронів та іонів з плазми. Як і в теорії електричних зондів, прийнято вважати, що потрапивши на поверхню частинки електрони й іони поглинаються і рекомбінують, а нейтральні частинки, що утворюються у процесі рекомбінації, або залишаються на поверхні, або повертаються до плазми. Внаслідок більш високої рухливості електронів їх потік значно перевищує потік іонів, і нейтральна частка починає заряджатися негативно. Таким чином, напилення можна розглядати як окремий випадок так званої пилової плазми. Пилова плазма представляє собою іонізований газ, який містить частинки зарядженої конденсованої речовини.

З явищем набуванням заряду частинками конденсованої фази пов'язані процеси нестійкості. Явищу нестійкості зарядженої поверхні рідини присвячена велика кількість

публікацій у зв'язку з численними академічними, технічними і технологічними додатками, у яких проаналізовано стан досліджень у різних сферах використання обговорюваного явища та основні його закономірності. Електростатична нестійкість виникає, якщо поверхнева щільність кулонівських сил відштовхування електричних зарядів провідної рідини перевищує сили поверхневого натягу. Безрозмірний параметр (параметр Релея) – критерій нестійкості зарядженої краплі дорівнює відношенню подвоєної енергії кулонівської взаємодії до енергії поверхневого натягу та знаходиться за формулою

$$T = \frac{q^2}{16\pi^2\epsilon_0\sigma R^3}, \quad (4.1)$$

де q – заряд частинки, Кл; R – радіус частинки, м.

Для реалізації нестійкості параметр T має бути більшим за одиницю. Таким чином, заряд необхідний для реалізації нестійкості складає

$$q = 16\pi^2\epsilon_0\sigma R^3. \quad (4.2)$$

Інтенсифікувати процеси розпаду заряджених провідних крапель можливо за допомогою зовнішнього змінного електричного поля. Краплі електропровідної рідини у зовнішньому змінному електричному полі теж зазнають нестійкості та розпадаються за схемою, що приведена на рис. 4.1.

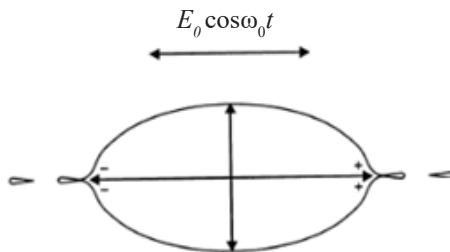


Рис. 4.1. Схематичний вид краплі, що зазнає нестійкості у змінному електричному полі

Слід відмітити, що залежно від частоти зовнішнього змінного електричного поля виділяють нестійкості двох типів: резонансну та параметричну. Резонансна нестійкість пов'язана з власними коливаннями краплі, коли подвоєна частота напруженості зовнішнього електричного поля співпадає з однією з частот власних капілярних коливань краплі. Параметрична нестійкість реалізується, коли частота зовнішнього електричного поля потрапляє в одну з резонансних зон у діапазоні власних частот капілярних коливань краплі.

У залежності від в'язкості рідини існує як мінімум два ймовірних механізми розпаду крапель у зовнішніх електричних полях. Коли в'язкість рідини мала, то при реалізації нестійкості крапля витягується у фігуру, близьку до сфероїда обертання. На вершинах такого сфероїда за рахунок суперпозиції високих мод, які зазнають нестійкості при витягуванні краплі у сфероїд через збільшення поверхневої густини заряду на його вершинах, формуються емітуючі виступи. З вершин таких виступів починається скидання заряду шляхом емісії достатньо великої кількості сильно заряджених високодисперсних дочірніх крапель. Якщо ж в'язкість рідини в краплі висока, то реалізується інший механізм розпаду: при розвитку нестійкості, яка починається з втрати стійкості капілярних коливань, що відповідає витягуванню краплі у сфероїд, емісійні виступи на вершинах сфероїда не встигають виникнути, і сильно витягнута капля розривається на дві, три, чотири частини порівняних розмірів. Таким чином, при русі частинки у частково іонізованому середовищі вона набуває заряду та при дії зовнішнього електричного поля виникає електрична сила у напрямку дії поля, що призводить до прискорення частинки. Також при поміщенні рідкої частинки до зовнішнього електричного поля виникають додаткові електричні сили, що направлені протилежно силами поверхневого натягу і призводять до втрати стійкості частинки та її дроблення. Інтенсифікувати процеси здрібнення можна за

допомогою застосування змінного електричного поля за рахунок реалізації резонансу частоти зміни поля з частотою власних коливань частинки.

Наочний матеріал, електронне та програмне забезпечення

При виконанні практичної роботи студентами використовуються: оптичний металографічний мікроскоп ММУ-3; цифрова камера *Delta Optical HDCE-20C*, що укомплектована програмним забезпеченням для обробки зображень *Scope Image 9.0*; об'єкт мікрометр ГОСТ 7513-55; мікрошліфи плазмових та електродугових покриттів, нанесених за традиційною технологією та з використанням електроімпульсної дії; металографічний комплекс *MEGRAN*.

Порядок виконання роботи

1. За допомогою оптичного металографічного мікроскопа ММУ-3 та цифрової камери *Delta Optical HDCE-20C* отримати знімки мікрошліфів плазмових та електродугових покриттів, нанесених за традиційною технологією та з використанням електроімпульсної дії.

2. Виміряти на отриманих знімках середню висоту ламелей вказаних покриттів за рахунок використання програмного забезпечення для обробки зображень *Scope Image 9.0*.

3. Визначити пористість покриттів за отриманими знімками шляхом використання металографічного комплексу *MEGRAN*.

4. Оформити звіт, у якому сформулювати мету роботи та навести результати виконання індивідуального завдання у вигляді результатів дослідження мікроструктури покриттів. Зробити висновки щодо впливу накладання імпульсів електричного струму на процес формування напилених покриттів та їх мікроструктуру.

5. Надати відповіді на контрольні питання.

Контрольні питання

1. Якими перевагами характеризуються такі методи газотермічного напылення, як електродуговий та плазмовий?
2. Які переваги має використання електроімпульсного впливу при напыленні має у порівнянні з іншими способами підвищення фізико-механічних властивостей покриттів?
3. До виникнення яких можливих процесів призводить накладання високовольтних електричних імпульсів на дистанції напылення?
4. За допомогою якого механізму можливо інтенсифікувати процеси розпаду заряджених провідних частинок?
5. Від чого залежить величина сили Ампера у каналі газового розряду?
6. Як залежать фізико-механічні властивості газотермічних покриттів від розміру та швидкості напылюваних частинок?

ВИЗНАЧЕННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ЧАСТОТНОГО ДІАПАЗОНУ ВПЛИВУ ІМПУЛЬСНОЇ АКТИВАЦІЇ ПРОЦЕСІВ НАПИЛЕННЯ

Мета роботи: навчитися будувати адекватні математичні моделі процесів напилення за допомогою планування повного факторного експерименту та проводити оптимізацію амплітудно-частотних параметрів електроімпульсної дії.

Короткі теоретичні відомості

На якість електродугових та плазмових покриттів при традиційній технології напилення впливає істотна кількість факторів, таких як напруга на дузі, величина струму, витрати розпилюючого (плазмотвірного) газу, дистанція напилення та ін. Тому, в залежності від умов експлуатації виробу і вимог, що пред'являються до покриття, для кожного конкретного випадку режим електродугового напилення підбирається експериментально. Для скорочення числа дослідів та виділення впливу лише параметрів електроімпульсної дії на властивості отриманих покриттів, при визначенні оптимальних параметрів електроімпульсної дії необхідно забезпечити фіксований режим нанесення покриття. Вирішується поставлена задача за допомогою планування експерименту. Необхідно реалізувати повний факторний експеримент типу 2^k , де $k = 2$ (число факторів). На основі експериментальних та літературних даних як незалежні змінні (фактори) необхідно обрати: частоту електричних імпульсів – X_1 та амплітуду – X_2 . Такі фактори, як сила струму, напруга, дистанція напилення і т. д. зафіксувати. Параметром оптимізації (функцією відгуку) обирається важлива для експерименту властивість покриття: пористість, твердість, міцність зчеплення тощо. Будуються

таблиці інтервалів варіювання та рівнів факторів, плану і результатів проведених дослідів, приклади яких показано у табл. 5.1 і табл. 5.2.

Таблиця 5.1. Інтервали варіювання та рівні факторів при плануванні експерименту напilenня з електроімпульсною дією

Найменування фактора	Частота, кГц	Напруга, кВ
Кодоване позначення	X_1	X_2
Нульовий рівень X_{i0}	6	7,5
Інтервал варіювання ΔX	2	2,5
Нижній рівень X_i	4 (-)	5 (-)
Верхній рівень X_i	8 (+)	10 (+)

Таблиця 5.2. План і результати дослідів щодо напilenня з електроімпульсною дією

№ досліду	Кодоване значення факторів				Функція відгуку, МПа					Y_i , МПа	s_i^2 , МПа
	X_0	X_1	X_2	X_{12}	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5		
1	+	+	-	-							
2	+	-	-	+							
3	+	+	+	+							
4	+	-	+	-							

Перехід від натуральних значень факторів до кодованих виконується за формулою

$$x_i = \frac{\tilde{x}_i - \tilde{x}_{i0}}{\Delta \tilde{x}_i}, \quad (5.1)$$

де x_i – безрозмірний вигляд значень i -го фактора; $\tilde{x}_i$ – розмірний вигляд значень i -го фактора; $\tilde{x}_{i0}$ – нульовий рівень

i -го фактора в розмірному вигляді, який розраховується за формулою

$$\tilde{x}_{i0} = \frac{\tilde{x}_{i\max} + \tilde{x}_{i\min}}{2}, \quad (5.2)$$

де $\tilde{x}_{i\max}$ – найбільше значення i -го фактора у діапазоні варіювання у розмірному вигляді; $\tilde{x}_{i\min}$ – найменше значення i -го фактора у діапазоні варіювання у розмірному вигляді; $\Delta\tilde{x}_i$ – інтервал варіювання i -го фактора у розмірному вигляді, який можна розрахувати за формулою

$$\Delta\tilde{x}_i = \frac{\tilde{x}_{i\max} - \tilde{x}_{i\min}}{2}. \quad (5.3)$$

Для широкого застосування результатів дослідження, отримані оптимальні значення факторів необхідно перетворити до розмірного вигляду за допомогою формули зворотного перетворення

$$\tilde{x}_i = x_i \Delta\tilde{x}_i + \tilde{x}_{i0}. \quad (5.4)$$

Статистична обробка паралельних дослідів дозволяє отримати розподіл функції відгуку для вибірових значень, які є сукупністю результатів дослідів. Серед цих результатів можуть бути і помилкові значення, а саме розподіл може бути отримано з похибкою. Для зменшення похибки необхідно виключити з дослідів помилковий результат.

Для полегшення цих дій значення функції відгуку для кожної експериментальної точки розташовуються у порядку їх збільшення. Логічно припустити, що помилковий результат – найбільший або найменший з ряду значень. У даній роботі пошук грубих помилок пропонується проводити за допомогою критерію Ст'юдента. Не використовуючи сумнівний результат y_c , знаходять середнє арифметичне Y_i та дисперсію S_i^2 , а потім обчислюють критерій Ст'юдента за формулою

$$t = \frac{|y_c - Y_i|}{\sqrt{S_i^2}}. \quad (5.5)$$

Якщо $t > t_{\text{кр}}$, то сумнівний результат є грубою помилкою та вилючається. Критичне значення $t_{\text{кр}}$ знаходять з таблиць, складених для різних значень рівня значущості q (приймаємо 0,05) в залежності від числа ступенів вільності $f = m - 1$. Однорідність дисперсій, що характеризує похибку експерименту по окремих точках, перевіряється за допомогою критерію Кохрена за наступними формулами:

– підрахунок дисперсії у кожному горизонтальному рядку матриці:

$$s^2 = \frac{\sum_1^n (y_q - \bar{y})^2}{n - 1}, \quad (5.6)$$

де s – дисперсія; $y_q, \bar{y}$ – результат окремого досліду та математичне очікування; n – кількість паралельних дослідів експериментальної точки;

– критерій Кохрена

$$G = \frac{s_{\text{max}}^2}{\sum_1^N s_i^2}, \quad (5.7)$$

де s_{max}^2 – найбільше значення дисперсії; s_i^2 – сума дисперсій кожної точки; N – кількість експериментальних точок.

З цим критерієм пов'язані числа ступенів свободи $f_1 = n - 1$ та $f_2 = N$. Гіпотеза про однорідність дисперсій підтверджується, якщо експериментальне значення критерію Кохрена не перевищує табличного.

Коефіцієнти регресії знаходяться за формулами:

$$b_0 = \frac{\sum_{i=1}^N Y_i}{N}, \quad (5.8)$$

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^N Y_i x_j}{N}. \quad (5.9)$$

Перевірка значущості коефіцієнтів регресії виконується за довірчим інтервалом. Значення t -критерію знаходяться за табличними даними, наприклад, при $\alpha = 0,95$ і числі ступенів свободи рівним $f = m \cdot (n-1) = 16$, де m – кількість експериментальних точок, n – кількість паралельних дослідів експериментальної точки $t_{\text{кр}}(16;0,05) = 2,12$. Потім розраховується дисперсія дослідів за формулою

$$S_y^2 = \frac{\sum S_i^2}{n}, \quad (5.10)$$

де S_y^2 – значення дисперсії у кожному досліді; n – кількість дослідів.

Потім знаходили значення довірчого інтервалу Δb_j за формулою

$$\Delta b_j = t \frac{\sqrt{S_y^2}}{\sqrt{n \cdot m}}. \quad (5.11)$$

При виконанні умови $|b_i| > \Delta b_j$ коефіцієнт регресії являється значущими. На основі статистично оброблених експериментальних даних (табл. 5.1, 5.2) розраховуються коефіцієнти регресії, проводиться перевірка їх значущості й адекватності отриманих моделей реальному процесу наплення покриттів. Дисперсія адекватності розраховується за формулою

$$s_{a0}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta y_i^2}{f}, \quad (5.12)$$

де Δy_i^2 – різниця між дослідними та розрахованими даними; f – число ступенів свободи, яке розраховується за формулою

$$f = N - (k + 1), \quad (5.13)$$

де N – кількість експериментальних точок; k – число факторів.

Перевірка гіпотези про адекватність отриманих моделей проводиться за допомогою дисперсійного відношення Фішера:

$$F = \frac{s_{\text{ад}}^2}{s_{\{y\}}^2}, \quad (5.14)$$

де $s_{\text{ад}}^2$ – дисперсія адекватності; $s_{\{y\}}^2$ – дисперсія відтворюваності експерименту. Критичне значення критерію Фішера $F_{\text{кр}}(q; k_1; k_2)$ обирається відповідно до таких параметрів, як: рівень значимості $q = 1 - \alpha$, де α – довірча ймовірність; $k_1 = k_{\text{ост}} = N - B$ – залишкова кількість ступенів свободи (кількість ступенів свободи чисельника); $k_2 = k_{\text{експ}} = N$ – кількість ступенів свободи експерименту (кількість ступенів свободи знаменника). Якщо $F_{\text{розн}} < F_{\text{кр}}$ то отримана математична модель є адекватною об'єкту дослідження і не підлягає подальшому ускладненню. Якщо $F_{\text{розн}} > F_{\text{кр}}$, то необхідно доопрацювати модель до досягнення її адекватності.

Методи пошуку оптимальних умов поділяють на аналітичні, числові та експериментальні. Аналітичні методи застосовують у разі аналітичного задання цільової функції з невеликим числом обмежень. У цьому разі цільову функцію можна продиференціювати і знайти екстремум, прирівнявши до нуля її похідні. Якщо цільову функцію неможливо обчислити і не відомий її вигляд, то єдиним способом знаходження оптимуму є експериментальний. Найпоширенішими методами експериментальної оптимізації є градієнтні. Серед них одним з найефективніших являється метод крутого сходження, оскільки об'єднує переваги трьох методів, тому саме його й використовували для пошуку оптимальних параметрів електроімпульсної дії при електродуговому та плазмовому напиленні. Завдання мето-

ду крутого сходження полягає в тому, щоб у напрямку найшвидшого зростання вихідної змінної Y здійснювати кроковий рух за градієнтом.

Користуючись отриманими адекватними лінійними моделями, планується рух за градієнтом в область екстремуму цільової функції. Починати круте сходження необхідно від основних рівнів значущих факторів. Оскільки набагато істотніший вплив на цільову функцію має частота імпульсів, то цей фактор обирається за базовий. Напруга імпульсів фіксується на одному значенні, оскільки її вплив майже відсутній та підвищення напруги імпульсів призводить до проблем з ізоляцією. Для забезпечення більшого значення цільової функції (наприклад твердості) необхідно підвищувати частоту імпульсів (фактор X_1). Зсув у напрямку крутого сходження за базовим фактором приймається на рівні 0,5 кГц, що пояснюється точністю регулювання частоти імпульсів. Проводиться ряд експериментів та обирається за оптимальний режим з максимальним (або мінімальним) рівнем функції відгуку.

Наочний матеріал, електронне та програмне забезпечення

При виконанні практичної роботи студентами використовуються: таблиці з результатами визначення твердості електродугових та плазмових покриттів, нанесених на різних амплітудно-частотних параметрах електроімпульсної дії.

Порядок виконання роботи

1. Отримати у викладача таблиці з результатами визначення твердості напилених покриттів, нанесених на різних амплітудно-частотних параметрах електроімпульсної дії.
2. За формулами (5.1), (5.2) та (5.3) перейти від натуральних значень факторів до кодованих.

3. Підрахувати середні значення твердості для кожного досліду та дисперсію у кожному горизонтальному рядку матриці за формулою (5.6).

4. Провести вилучення грубих помилок на прикладі максимального значення твердості для одного досліду за критерієм Ст'юдента за формулою (5.5).

5. Провести перевірку однорідності дисперсій за критерієм Кохрена за формулою (5.7).

6. Розрахувати коефіцієнти регресії за формулами (5.8), (5.9).

7. Перевірити значущість коефіцієнтів регресії за допомогою t -критерію при виростанні формул (5.10), (5.11).

8. Провести розрахунки для перевірки адекватності побудованої математичної моделі за критерієм Фішера при використанні формул (5.12)–(5.14).

9. Оформити звіт, у якому сформулювати мету роботи та навести результати виконання індивідуального завдання у вигляді таблиць та результатів розрахунків. Зробити висновки.

10. Надати відповіді на контрольні питання.

Контрольні питання

1. Які фактори впливають на процес електродугового та плазмового напилення?

2. Що називають функцією відгуку при плануванні повного факторного експерименту?

3. За яким критерієм проводиться вилучення грубих помилок?

4. Як перевіряється однорідність дисперсій?

5. За яким критерієм проводиться перевірка значущості коефіцієнтів регресії?

6. Як проводиться пошук оптимального частотного діапазону імпульсної активації процесів напилення?

Практична робота № 6

ДОСЛІДЖЕННЯ ЧАСТОТНИХ ТА ІНШИХ ТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЖЕРЕЛА ІМПУЛЬСНОГО СТРУМУ

Мета роботи: ознайомитися з будовою генератора імпульсного струму для активації процесів напilenня. Визначити частоту генерованих імпульсів на різних режимах його роботи.

Короткі теоретичні відомості

Форми імпульсів, що використовуються в імпульсних пристроях різного призначення, різноманітні. Найбільш розповсюджені з них наведені на рис. 6.1.

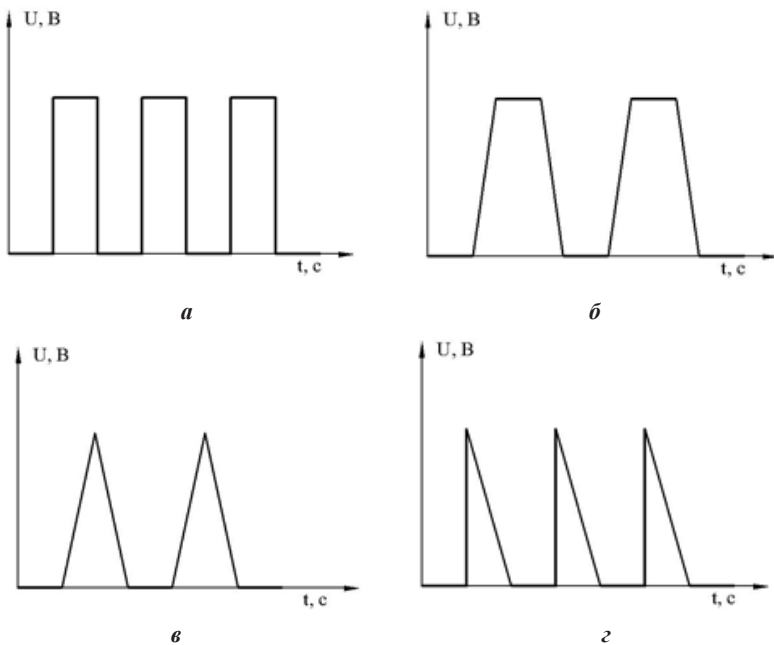


Рис. 6.1. Схеми ідеалізованих імпульсів різного вигляду:
a – прямокутний; *б* – трапецієдальний; *в* – трикутний; *г* – пилоподібний

Так, у роботах, присвячених плазмовому напilenню з модуляцією дуги, використовуються імпульси саме пилкоподібної форми, що пояснюється простотою конструктивної схеми їх генерації. Генератори здійснюють перетворення енергії джерела постійного струму в змінний струм необхідної частоти та виконуються на основі підсилювачів з ланкою позитивного зворотного зв'язку, що забезпечує стійкий режим самозбудження на необхідній частоті. Найпростішим способом отримання коливань є спосіб компенсації втрат у LC -коливному контурі. Генератори з коливальним контуром у ланцюзі зворотного зв'язку отримали назву LC -генераторів. LC -генератори застосовують, як правило, для генерування сигналів високої частоти. У них використовують властивості паралельного коливального контуру, у якому за певних умов виникають затухаючі коливання (через опір у контурі). Для отримання незатухаючих коливань (постійної амплітуди) необхідно періодично поповнювати енергію, що втрачається в контурі, від джерела живлення за допомогою підсилювача з позитивним зворотним зв'язком. На стабільність частоти LC -генератора впливає напруга джерела живлення, тому використання високоякісного стабілізатора напруги для живлення генератора є одним з факторів, що забезпечують високу стабільність частоти генерації. LC -генератори застосовують для генерування високочастотних коливань. На цих частотах досить легко можна реалізувати коливальний контур з високою добротністю. Застосування LC -генераторів на низьких частотах стає нераціональним через зростання габаритів і маси елементів коливального контуру.

Для діапазону низьких частот застосовують RC -генератори. Для стабілізації амплітуди вихідного сигналу RC -генератора використовують різні нелінійні елементи: терморезистори, фоторезистори, лампи розжарювання, діоди, стабілітрони, польові транзистори та ін. Дані генератори характеризують-

ся простим та зручним регулюванням частоти у широкому діапазоні. Її виконують за допомогою конденсатора змінної ємності або змінного резистора, що підключений до схеми замість постійних конденсатора або резистора. Таким чином, RC -генератори характеризуються високою стабільністю, легко піддаються налаштуванню і дозволяють отримувати коливання з дуже низькими частотами (від кількох герц до декількох кілогерц), тому для генерування високовольтних імпульсів обрано схему на базі саме RC -генератора (рис. 6.2).

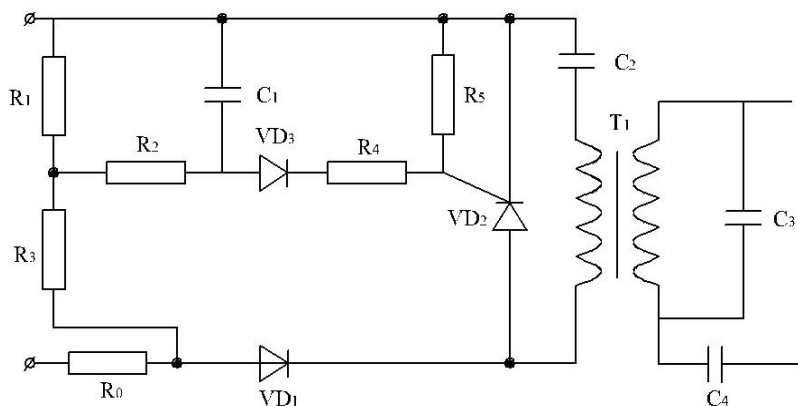


Рис. 6.2. Схема генератора високовольтних електричних імпульсів

Випрямлена напруга згладжується конденсатором C_1 . На цьому конденсаторі утворюється постійна напруга близько 300 В, яка використовується для живлення релаксаційного генератора, складеного з елементів R_4 , R_5 , C_2 , VD_1 , VD_2 , VD_3 . Його навантаженням є первинна обмотка трансформатора T_1 . З вторинної обмотки знімаються імпульси амплітудою до 10 кВ та частотою до 8 кГц (залежно від конденсатора в контурі). Діод VD_1 використовували марки Д246А, тиристири VD_2 , VD_3 – КУ202Н та КН102 відповідно. Як трансформатор T_1 у наведеному пристрої використовували доопрацьований рядковий трансформатор ТВС–90ЛЦ2–1 6Х0.472.014ТУ, що призначений для роботи

у вихідному каскаді рядкової розгортки телевізійних приймачів кольорового зображення. Його високовольтна обмотка має 1900 витків, які намотані дротом ПЕВ-2 діаметром 0,08 мм. При його доопрацюванні її залишили, а замість первинної намотали низьковольтну від 35 до 70 (залежно від необхідної амплітуди імпульсів) витків дротом ПЕВ 0,5 мм. Номінали опорів склали: $R_0=360$ Ом, $R_1=33$ кОм, $R_2=22$ кОм, $R_3=100$ кОм, $R_4=51$ Ом, $R_5=51$ Ом. Як фільтри використовуються конденсатори C_3 та C_4 . Грубе налаштування частоти імпульсів здійснювали підбором конденсативів C_2 від 0,01 мкФ до 0,22 мкФ, точне – резистором змінного опору R_0 . Вимірювання частоти електричних імпульсів виконується за допомогою осцилографа універсального С1-99 (або USB-осцилографа *IRIS*) та дільника 1:1000. Зі збільшенням ємності конденсатора C_2 частота високовольтних електричних імпульсів зменшується, оскільки треба більше часу на його зарядження.

Наочний матеріал, електронне та програмне забезпечення

При виконанні практичної роботи студентами використовуються: генератор високовольтних високочастотних електричних імпульсів, генератор сигналів типу ГЗ-109, USB-осцилографа *IRIS* з відповідним програмним забезпеченням або осцилограф універсального типу С1-99, дільник напруги 1:1000.

Порядок виконання роботи

1. За допомогою генератора сигналів типу ГЗ-109 згенерувати високочастотні імпульси напругою 10 В та частотою 1000, 2000, 3000, 4000 Гц.
2. Провести запис сигналів USB-осцилографом *IRIS* у режимі самописця та зберегти дані у форматі *Microsoft Excel*.

3. За отриманими даними побудувати осцилограми та визначити частоту, період та амплітуду отриманих сигналів.

4. За допомогою генератора високовольтних високочастотних електричних імпульсів згенерувати високовольтні високочастотні імпульси. Зменшити амплітуду за рахунок дільника напруги 1:1000.

5. Підключити *USB*-осцилограф *IRIS* та провести запис сигналів відповідно до пункту 2.

6. Побудувати осцилограми та визначити частоту, період та амплітуду згенерованих сигналів.

7. Оформити звіт, у якому сформулювати мету роботи та навести результати виконання завдання у вигляді отриманих осцилограм. Зробити висновки.

8. Надати відповіді на контрольні питання.

Контрольні питання

1. Які форми імпульсів застосовують в імпульсних пристроях різного призначення?

2. Який спосіб генерації коливань є найпростішим?

3. Який коливальний контур застосовують для генерації імпульсів низьких частот?

4. Який параметр впливає на стабільність частоти *LC*-генератора?

5. Які переваги мають *RC*-генератори?

ФОРМУВАННЯ ЗДРІБНЕНОЇ І НАНОРОЗМІРНОЇ ПОЛІГОНІЗАЦІЙНОЇ СУБСТРУКТУРИ У НАПИЛЕНИХ ПОКРИТТЯХ

Мета роботи: ознайомитися з процесом формування здрібненої і нанорозмірної полігонізаційної субструктури в електродугових і плазмових покриттях. Оцінити можливості підвищення фізико-механічних властивостей покриттів.

Короткі теоретичні відомості

Відомо, що при напилюванні покриттів відбувається інтенсивна пластична деформація частинок внаслідок їх високої швидкості співудару з підкладкою (в промислових умовах напилювання до 300 м/с). При цьому величина деформації може складати 90...95 %, а швидкість охолодження деформованої частинки досягає 10^8 °C/с, що запобігає протіканню динамічної рекристалізації у матеріалі покриття. Короткочасна витримка зразків з напиленими покриттями при температурі рекристалізації і наступне прискорене охолодження на повітрі (більше 5 °C/с) забезпечує підвищення твердості покриттів завдяки фіксуванню передрекристалізаційного стану матеріалу покриття.

Дослідження впливу часу витримки зразків з плазмовими покриттям із нікелю (ПНК-2К10) при температурі початку первинної рекристалізації 480 °C показало, що твердість HV_5 спочатку підвищується, досягає максимальних значень 3,45 ГПа після витримки 5 хв і далі знижується. Після напилення твердість зразків складала 2,05 ГПа.

Аналогічна залежність твердості від часу витримки при температурі первинної рекристалізації (880 °C) спостерігається при термічній обробці зразків з плазмовим покриттям із порошку ПХ18Н15. Максимальне значення

твердості досягається після витримки 1,5 хвилини і складає 3,63 ГПа (після напилення ~ 2 ГПа).

Твердість електродугового покриття із Св-08Г2С після напилення складала 1,64 ГПа. Після термічної обробки при 500 °С, яка відповідає температурі первинної рекристалізації матеріалу покриття, максимальне значення твердості 2,32 ГПа, середній розмір субзерен 62 нм зафіксовано після витримки 1,5 хвилини, що на 40 % більше від твердості після напилення.

Дослідження мікроструктури плазмового покриття із нікелю при збільшенні до 3000 крат показали, що змін у мікроструктурі до і після термічної обробки не спостерігається. Рентгеноструктурний аналіз напилених покриттів встановив наявність кристалічних фаз не менше 99 %. На підставі чого можна виключити процес кристалізації з аморфної фази і констатувати, що у процесі передрекристалізаційної термічної обробки формується здрібнена полігонізаційна субструктура.

Вплив параметрів режиму напилення та параметрів термічної обробки на субструктуру напилених покриттів оцінювали за зміною розмірів областей когерентного розсіювання рентгенівських променів (ОКР) (табл. 7.1) які отожднюють з розміром субзерна.

Згідно з наведеними у табл. 7.1 даними, для плазмового напилення найбільш ефективним є режим № 3 для покриття з порошку ПР-Х18Н9, що забезпечує наномасштабний розмір ОКР 90 нм і найбільшу твердість.

Найбільш ефективний режим електродугового напилення, що забезпечує отримання наномасштабних субзерен після передрекристалізаційної термічної обробки, є режим № 2.

Наномасштабна субструктура забезпечує високі міцності властивості при низькій, інколи достатній пластичності. Зафіксовано одночасне підвищення міцності і пластичності при рівноканальному кутовому пресуванні. Відмічено, що

походження цього явища пов'язано зі збільшенням частки великокутових границь зерен при збільшенні ступеня деформації і наступною зміною переважаючих механізмів деформації через зростаючі тенденції до активації зерно-граничного проковзування й обертання зерен. Все це вселяє надію щодо можливості проявлення такого ефекту для полігонізаційної наномасштабної субструктури. Підвищити пластичність металів і сплавів можливо управлінням наномасштабною субструктурою.

Таблиця 7.1. Залежність розмірів ОКР рентгенівського випромінювання газотермічних покриттів від режиму напилення

Параметри режиму напилення			Розмір ОКР, нм	
№ режиму	Потужність, кВт	Дистанція напилення, мм	Без термічної обробки	Після термічної обробки на режимах, що забезпечує максимальну твердість
Плазмові покриття з порошку ПР-Х18Н9				
1	25,0	200	125	108
2	37,5	250	106	91
3	50,0	300	112	90
Електродугові покриття з дроту Св-08Г2С				
1	2,0	100	144	112
2	3,0	100	106	62
3	4,2	110	119	87

Передрекristалізаційна термічна обробка напилених покриттів забезпечує здрібнення полігонізаційної субструктури з приростом твердості на 9...38 %. Найбільша ефективність цієї термічної обробки проявляється на плазмових і особливо на електродугових покриттях, в яких зафіксовано наномасштабні середні розміри субзерен.

Встановлено, що передрекristалізаційна термічна обробка консолідованого нікелю та плазмового покриття знижує теплопровідність на 30...50 %. Виявлено також зменшення теплопровідності електродугових покриттів із сплавів на основі нікелю та нержавіючої сталі відповідно на 48 і 40 %, причому збільшення величини деформації викликає більший ефект зниження теплопровідності.

Досліджували можливість підвищення фізико-механічних властивостей плазмових порошкових теплозахисних покриттів з $\text{ZrO}_2\text{--}7\%\text{Y}_2\text{O}_3$ передрекristалізаційною термічною обробкою.

Вибір оптимальних температуро-часових параметрів, які забезпечують максимальну твердість після напилення, передрекristалізаційної термічної обробки покриттів здійснювали за показниками мікротвердості. Попередні дослідження проводили при нагріванні до 1100 °C з витримкою 10, 20, 30 хв і швидкістю охолодження 34 °C/с. Ефекту зміцнення при цьому не зафіксовано, тому у подальшому застосовували вищі показники температури.

Результати впливу тривалості витримки на мікротвердість покриттів при температурі 1200 °C та 1300 °C з охолодженням до кімнатної температури зі швидкістю 34 °C/с представлені на рис. 7.1. Нагрівання до більш високих температур не застосовують через імовірність підплавлення границь зерен металевих сплавів. У відповідності до діаграми стану системи $\text{ZrO}_2\text{--Y}_2\text{O}_3$ фазові перетворення у кераміці складу $\text{ZrO}_2\text{--}(6\text{--}8)\%\text{Y}_2\text{O}_3$ відбуваються в інтервалі температур 600...800 °C за евтектоїдним механізмом – тетрагональна модифікація при охолодженні розпадається на моноклінну і кубічну. Швидкість евтектоїдного перетворення в системі $\text{ZrO}_2\text{--Y}_2\text{O}_3$ досить низька і прискорене охолодження дозволяє його уникнути. Крім цього, фазові перетворення в системі $\text{ZrO}_2\text{--Y}_2\text{O}_3$ здійснюється зі значним температурним гістерезисом. Мікротвердість керамічного шару після напилення складала 11,5 ГПа.

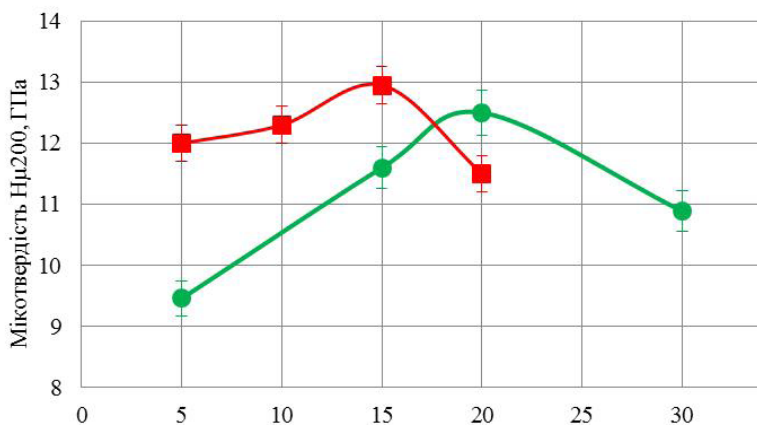


Рис. 7.1. Залежність мікротвердості плазових теплозахисних покриттів з $\text{ZrO}_2 - 7\% \text{Y}_2\text{O}_3$ від тривалості витримки при передрекристалізаційній термічній обробці:
 ● – температура 1200 °C; ■ – температура 1300 °C

Згідно з представленими даними встановлено, що залежність носить екстремальний характер з виразним максимумом, при цьому відповідну температуру і витримку можна вважати оптимальними. Значення мікротвердості керамічного шару підвищується після передрекристалізаційної термічної обробки при температурі 1200 °C і витримці 20 хв на 10 %, при температурі 1300 °C, витримці 15 хв – 13 %. Отже, при підвищенні температури точка максимального зміцнення зміщується у діапазон менших витримок, що пов'язано, можливо, зі збільшенням швидкості полігонізаційних процесів за рахунок термічної активації.

Представлені мікроструктури теплозахисного плазового градієнтного покриття (рис. 7.2) складаються з трьох послідовно напилених шарів: перший підшар Co-Cr-Al-Y-Si, товщина якого становить 110 мкм; другий (проміжний) шар – механічна суміш Co-Cr-Al-Y-Si + 10 % (мас.) $\text{ZrO}_2 - 7\% \text{Y}_2\text{O}_3$ товщиною 90 мкм; третій шар $\text{ZrO}_2 - 7\% \text{Y}_2\text{O}_3$ товщиною 280 мкм. Підшар і проміжний шари слабо диферен-

ціюються, мають лускату будову, що пов'язано з достатнім проплавленням металевої складової покриття. У проміжному шарі проглядається сіра фаза $ZrO_2-7\%Y_2O_3$. Пористість керамічного шару в обох випадках складає близько 10 %. Величина деформації керамічних частинок складає 76 %.

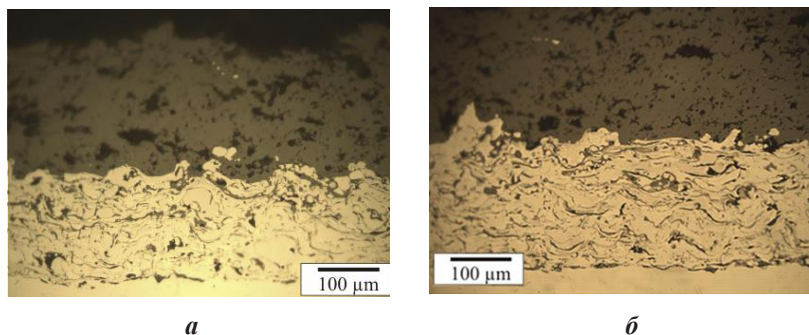


Рис. 7.2. Мікроструктури теплозахисного градієнтного покриття:
a – після напilenня; *б* – після оптимальної передрекристалізаційної термічної обробки

Порівняльний аналіз мікроструктур показав, що змін у структурі покриттів до і після термообробки не спостерігається. Це свідчить про те, що зміцнювальний ефект забезпечують структурні елементи, розмір яких менший за 0,5 мкм, що пояснюється роздільною здатністю людського ока та оптичного мікроскопу.

Визначення теплопровідності лише керамічного шару без підкладки та проміжних шарів показало, що передрекристалізаційна термічна обробка забезпечує зниження коефіцієнта теплопровідності на 15 %. Зниження теплопровідності забезпечується лише за рахунок субструктурних змін.

Таким чином, експериментально підтверджена можливість підвищення фізико-механічних властивостей плазмових порошкових теплозахисних покриттів з $ZrO_2-7\%Y_2O_3$ передрекристалізаційною термічною обробкою. Визначений

оптимальний режим передрекристалізаційної термічної обробки теплозахисного градієнтного плазмового покриття з $\text{ZrO}_2\text{--}7\%\text{Y}_2\text{O}_3$, що забезпечує підвищення твердості на 13 % та зниження теплопровідності керамічного шару на 15 % у порівнянні зі станом після напилення за рахунок субструктурних змін. Режим полягає у нагріванні до температури 1300 °С, витримці протягом 15 хв та охолодженні на повітрі.

З практичної точки зору основним недоліком передрекристалізаційної термічної обробки металів є невелика тривалість витримки у декілька хвилин, тому актуальним являється дослідження можливості стабілізації здрібненої полігонізаційної субструктури напиленого покриття при більш тривалій витримці у процесі термічної обробки за рахунок наступної деформації.

Для досліджень обрали електродугові покриття з дроту Св-08Г2С, оскільки вони характеризуються найменшим значенням ОКР та найвищим ефектом підвищення твердості після передрекристалізаційної термічної обробки (рис. 7.3).

З метою гальмування руху дислокаційних субграниць у процесі збиральної полігонізації, який проявляється при нагріванні (тривалій витримці) здійснювали додаткове деформування покриття двома способами: пресуванням на гідравлічному пресі при навантаженні 10 т (ступінь деформації 30 %) та шляхом поверхневої пластичної деформації (ППД) сталевими кульками діаметром 0,1...0,3 мм протягом 2 хв. Температуру нагрівання деформованих зразків знизили до 400 °С з огляду на те, що при збільшенні величини деформації температурний поріг рекристалізації знижується. Результати наведені в табл. 7.1, рис. 7.3.

Аналіз наведених даних показує, що використання наступної деформації забезпечує несуттєве зниження твердості при підвищенні тривалості витримки при передрекристалізаційній термічній обробці до 15 хв. Дана тенденція спостерігається для обох видів деформації покриття. Так,

наприклад, твердість покриття без наступної деформації при підвищенні тривалості витримки з 2 хв до 15 хв зменшується з 2,7 ГПа до 2 ГПа (–35 %), а при проведенні наступної деформації – з 3 ГПа до 2,8 ГПа (–7 %) та з 3,1 ГПа до 3 ГПа (–3 %) для ППД та пресування відповідно. Взагалі, достатньо високі значення твердості забезпечуються при витримці до 40 хв для ППД, а для пресування навіть більше. Пояснюється це тим, що при здійсненні повторної деформації дислокаційна взаємодія закінчується виникненням від 50 % до 75 % дислокаційних бар'єрів (Хірша, Ломер-Коттрелла), решта бере участь у формуванні дислокаційних сплетінь. Дані дислокаційні бар'єри, які виникають уздовж напрямку, перпендикулярного осі деформації, стримують рух дислокацій та, як наслідок, зменшують рухливість полігонізаційних субграниць, чим знижується швидкість полігонізаційних процесів і забезпечується стабілізуючий ефект.

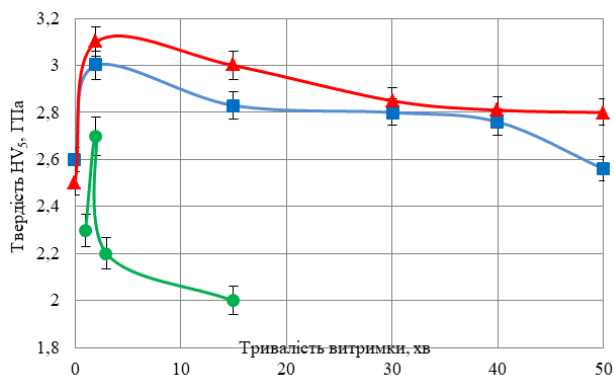


Рис. 7.3. Залежність твердості електродугових покриттів з дроту Св-08Г2С від тривалості витримки та виду наступної деформації:

- – без додаткової деформації (температура 450 °С);
- – ППД; ▲ – пресування

Таким чином, деформування напиленого покриття приводить до підвищення термічної стійкості полігонізаційної

субструктури і розширює можливості практичного застосування передрекристалізаційної термічної обробки.

Обладнання, матеріали, електронне та програмне забезпечення

При виконанні практичної роботи студенти використовують: оптичний металографічний мікроскоп ММУ-3; твердомір типу Віккерс (HV); мікротвердомір ПМТ-3 (Н μ); мікрошліфи електродугових та плазмових покриттів без та з передрекристалізаційною термічною обробкою; металографічний комплекс MEGHAN.

Порядок виконання роботи

1. За допомогою оптичного металографічного мікроскопу ММУ-3 дослідити та описати мікроструктуру покриттів після напилювання і передрекристалізаційної термічної обробки.

2. Визначити та порівняти твердість (HV) покриттів без та з передрекристалізаційною термічною обробкою.

3. Визначити та порівняти мікротвердість (Н μ) окремих ламелей покриттів без та з передрекристалізаційною термічною обробкою.

4. Визначити пористість покриттів шляхом використання металографічного комплексу MEGHAN.

5. Оформити звіт, у якому сформулювати мету роботи та навести результати аналізу мікроструктури покриттів, порівняльного аналізу твердості та мікротвердості покриттів без та передрекристалізаційною термічною обробкою. Зробити висновок щодо можливостей формування здрібненої і нанорозмірної субструктури у напилених покриттів та підвищення їх фізико-механічних властивостей, зокрема твердості.

6. Подати письмові відповіді на контрольні питання.

Контрольні питання

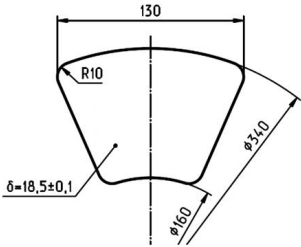
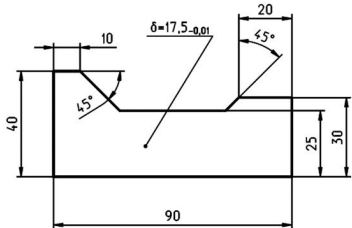
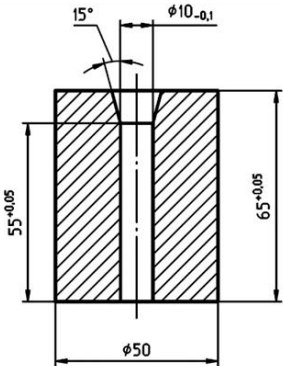
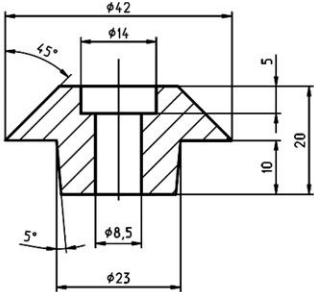
1. Чому зазначену термічну обробку напилених покриттів назвали передрекристалізаційною?
2. Які передумови використання передрекристалізаційної термічної обробки напилених покриттів?
3. Обґрунтуйте можливість оптимізації часу витримки при передрекристалізаційній термічній обробці щодо максимальної твердості.
4. Подайте пояснення підвищенню твердості напилених покриттів після передрекристалізаційної термічної обробки.
5. Яким чином і чому можливо збільшити час витримки при передрекристалізаційній термічній обробці напилених покриттів?

ДОДАТКИ

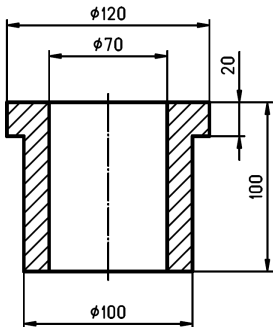
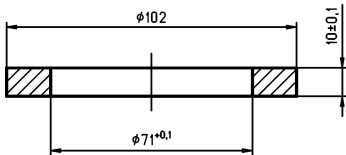
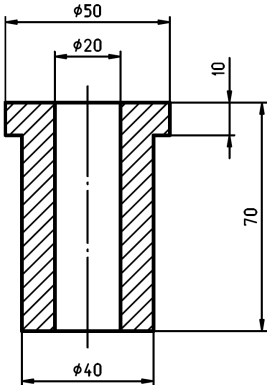
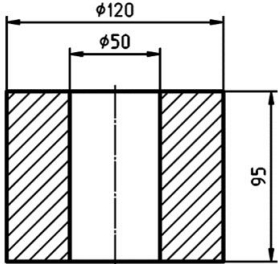
Додаток А

ГЕОМЕТРІЯ ТА ВЛАСТИВОСТІ ЖАРОМІЦНИХ ДЕТАЛЕЙ

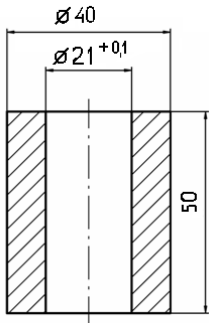
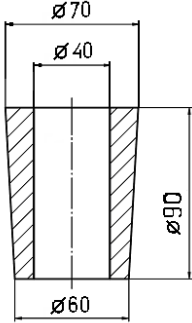
Таблиця А.1. Геометрія деталей

№ варіанта	Геометрія деталі	№ варіанта	Геометрія деталі
1		2	
3		4	

Продовж. табл. А.1

№ варіанта	Геометрія деталі	№ варіанта	Геометрія деталі
5		6	
7		8	

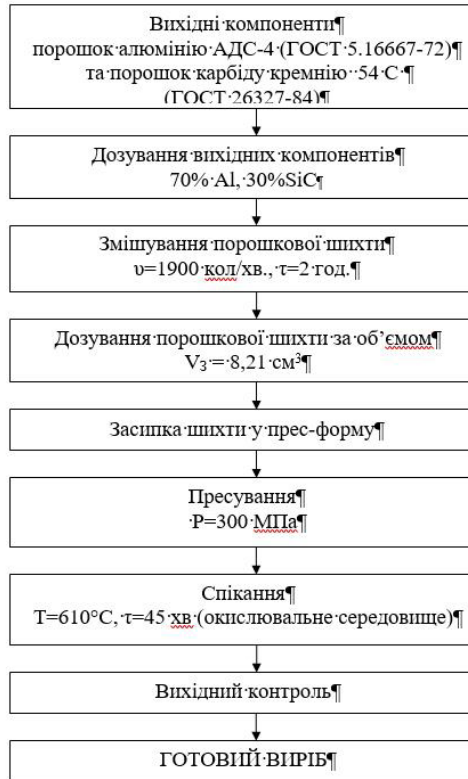
Продовж. табл. А.1

№ варіанта	Геометрія деталі	№ варіанта	Геометрія деталі
9		10	

Таблиця А.2. Необхідний рівень властивостей деталей з композиційних матеріалів

№ варіанта	σ_b , МПа	$\sigma_{изг}$, МПа	δ , %	НВ, МПа	a_n , кДж/м ²	Експлуатаційні властивості
1	170	—	12	460	350	—
2	400	—	2,0	1320	220	—
3	260	—	3,0	730	—	—
4	290	—	7,0	880	—	—
5	350	—	1,5	920	—	—
6	530	950	—	2200	80	—
7	710	830	—	3200	440	—
8	400	—	12	1000	—	—
9	340	—	7	—	70	—
10	550	—	20	1550	16	—

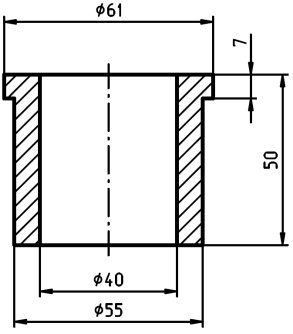
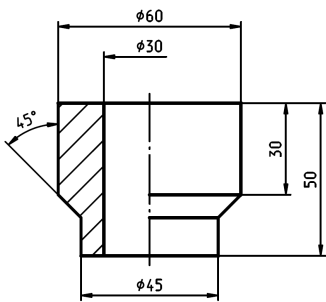
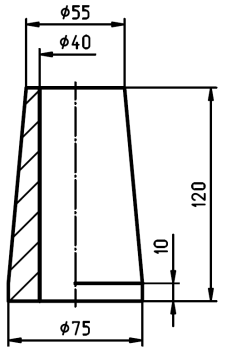
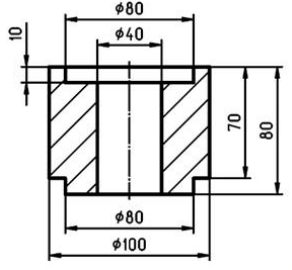
ПРИКЛАД ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СХЕМИ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ З КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ



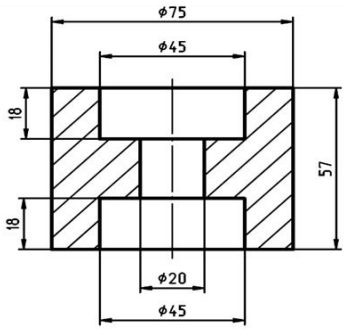
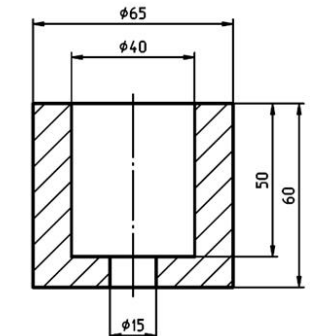
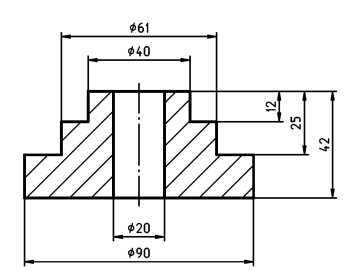
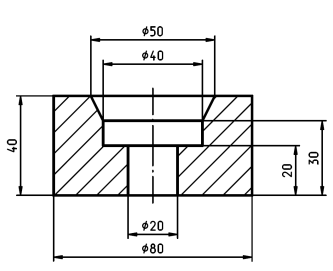
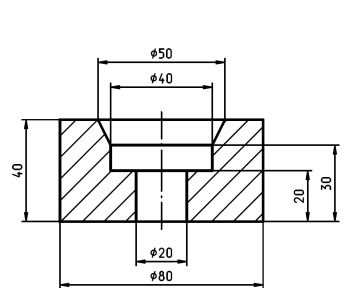
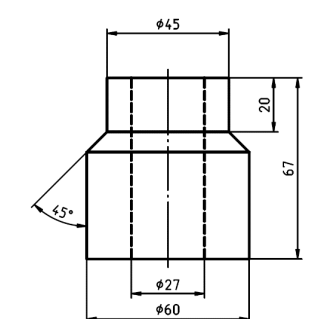
Технологічна схема виготовлення кільця
з композиційного матеріалу системи Al-SiC

ГЕОМЕТРІЯ ТА ВЛАСТИВОСТІ НАДТВЕРДИХ ДЕТАЛЕЙ І ВИРОБІВ

Таблиця В.1. Геометрія деталей та виробів

№ варіанта	Геометрія деталі	№ варіанта	Геометрія деталі
1		2	
3		4	

Продовж. табл. В.1

№ варіанта	Геометрія деталі	№ варіанта	Геометрія деталі
5		6	
7		8	
9		10	

Таблиця В.2. Необхідний рівень властивостей деталей та виробів, виготовлених з твердих порошкових сплавів

№ варіанта	$\sigma_{\text{в}},$ МПа	$\sigma_{\text{изг}},$ МПа	$\delta, \%$	НВ, МПа	$a_{\text{и}}, \text{кДж/м}^2$	Експлуатаційні властивості
1	120	250	—	70	39	$f_{\text{ж.гр.}} = 0,06$
2	150	300	—	100	40	$f_{\text{ж.гр.}} = 0,04$
3	106	180	—	150	20	$f_{\text{ж.гр.}} = 0,02$
4	60	—	—	60	13	$f_{\text{ж.гр.}} = 0,01$
5	215	430	—	900	2	$f_{\text{ж.гр.}} = 0,05$
6	40	—	—	1000	—	$f_{\text{с.тр.}} = 0,37$
7	24	—	—	280	—	$f_{\text{с.тр.}} = 0,3$
8	480	750	—	850	—	$f_{\text{ж.тр.}} = 0,005$
9	—	190	—	440	20	—
0	—	340	—	480	98	—

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА ТА ІНФОРМАЦІЙНІ РЕСУРСИ

1. Горобець С. В., Горобець О. Ю., Горбик П. П., Уварова І. В. Функціональні біо- та наноматеріали медичного призначення. – Київ: Видавничий дім «Кондор». – 2018. – 480 с.

2. Геворкян Е. С., Семченко Г. Д., Тимофєєва Л. А., Нерубецький В. П. Нові матеріали та технології їх отримання: підручник. – Харків: Укр ДУЗТ, 2015. – 345 с.

3. Дубовий О. М., Карпеченко А. А., Бобров М. М. Технологія газотермічного і вакуумно-конденсаційного нанесення покриттів (українською та англійською мовами). – Миколаїв: видавець Торубара В. В., 2018. – 202 с.

4. Дубовий О. М., Казимиренко Ю. О., Лебедєва Н. Ю., Самохін С. М. Інженерне матеріалознавство: підручник. – Миколаїв : НУК, 2009. – 444 с.

5. Дубовой О. М., Степанчук А. М. Технологія наплення покриттів : підручник. – Миколаїв: НУК, 2007. – 236 с.

6. Корж В. М., Кузнецов В. Д., Борисов Ю. С., Ющенко К. А. Інженерія поверхні : підручник. – К.: Наукова думка, 2007. – 560 с.

7. Косторнов А. Г. Материаловедение дисперсных и пористых металлов и сплавов. Том 2. – Киев: Наукова думка, 2003. – 670 с.

8. Металургія кольорових металів / під ред. докт. техн. наук, професора Червоного І. Ф. – ЗДІА, Запоріжжя, 2009. – 452 с.

9. Матеріалознавство в стоматології : навчальний посібник / Д. М. Король, М. Д. Король, О. Д. Оджубейська [та ін.]. – Вінниця: Нова Книга, 2019. – 400 с.

10. Неорганическое материаловедение / 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.

11. Неорганическое материаловедение / 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.
12. Кузнєцов В. Д., Пашенко В. М., Борисов Ю. С., Ющенко К. А. Фізико-хімічні основи інженерії поверхні. – Київ. – 2005. – 372 с.
13. Порошковая металлургия и напыленные покрытия / под ред. Б. С. Митина. – М.: Металлургия, 1987. – 792 с.
14. Рагуля А. В., Скороход В. В. Консолидированные наноструктурные материалы. – К.: Наукова думка, 2007. – 341 с.
15. Сизоненко О. Н., Ивлиев А. И., Баглюк Г. А. Перспективные процессы изготовления порошковых материалов : учебник. – Николаев: НУК, 2014. – 374 с.
16. Скороход В. В., Уварова І. В., Рагуля А. В. Фізико-хімічна кінетика в наноструктурних системах. – Київ: Академперіодика, 2001. – 180 с.
17. Триньов О. В. Наукові основи локального охолодження теплонапружених деталей ДВЗ : монографія. – Х.: Вид-во «Підручник НТУ «ХП», 2014. – 240 с.

Інформаційні ресурси

1. Ceramic matrix composites, C/SiC [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http // www.fz-juelich.de](http://www.fz-juelich.de) – Назва з екрану.
2. Composites [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http // www.snfo.lu.farindale.edu](http://www.snfo.lu.farindale.edu) – Назва з екрану.
3. Leichtbaukonstruktion sm Möbelbau [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http // www.fh-luh.de](http://www.fh-luh.de) – Назва з екрану.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	3
<i>Практична робота № 1. Визначення структурних особливостей та технологічних параметрів виготовлення деталей з жароміцних композиційних матеріалів.....</i>	<i>4</i>
<i>Практична робота № 2. Визначення структурних особливостей та технологічних параметрів виготовлення деталей з функціональних композиційних матеріалів.....</i>	<i>13</i>
<i>Практична робота № 3. Визначення структурних особливостей та технологічних параметрів виготовлення деталей з твердих та надтвердих порошкових сплавів.....</i>	<i>25</i>
<i>Практична робота № 4. Дослідження впливу накладання імпульсів електричного струму на процес формування напилених покриттів.....</i>	<i>32</i>
<i>Практична робота № 5. Визначення та оптимізація частотного діапазону впливу імпульсної активації процесів напilenня.....</i>	<i>39</i>
<i>Практична робота № 6. Дослідження частотних та інших технічних характеристик джерела імпульсного струму.....</i>	<i>47</i>
<i>Практична робота № 7. Формування здрібненої і нанорозмірної полігонізаційної субструктури у напилених покриттях.....</i>	<i>52</i>
ДОДАТКИ.....	62
<i>Додаток А. Геометрія та властивості жароміцних деталей.....</i>	<i>62</i>
<i>Додаток Б. Приклад технологічної схеми виготовлення деталі з композиційного матеріалу.....</i>	<i>65</i>
<i>Додаток В. Геометрія і властивості надтвердих деталей і виробів.....</i>	<i>66</i>
РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА ТА ІНФОРМАЦІЙНІ РЕСУРСИ.....	69

Навчальне видання

ДУБОВИЙ Олександр Миколайович
КАЗИМИРЕНКО Юлія Олексіївна
ЛЕБЕДЄВА Наталія Юріївна
БОБРОВ Максим Миколайович

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
виконання практичних робіт з дисципліни
«СПЕЦІАЛЬНІ ПИТАННЯ
ІНЖЕНЕРІЇ КОМПОЗИЦІЙНИХ
ТА ПОРОШКОВИХ МАТЕРІАЛІВ,
ПОКРИТТІВ»

Комп'ютерне верстання *В. В. Москаленко*
Коректор *О. Є. Вакула*

Формат 60х84/16. Ум. друк. арк. 4,2. Тираж 100 прим. Вид. № 11. Зам. № 0906-11.
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 № 6402 від 19.09.2018 р.