



# ІНЖЕНЕРІЯ ПОВЕРХНІ

*Методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт  
здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти  
спеціальності «Матеріалознавство»*

Хмельницький національний університет

# ІНЖЕНЕРІЯ ПОВЕРХНІ

*Методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт  
здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти  
спеціальності 132 «Матеріалознавство»*

*Затверджено на засіданні кафедри  
трибології, автомобілів та матеріалознавства.  
Протокол № 6 від 09.02.2023*

Хмельницький 2023

Інженерія поверхні : методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 132 «Матеріалознавство» / О. В. Диха, В. А. Гончар, К. Е. Голенко. Хмельницький, ХНУ, 2023. 47 с.

Укладачі: Диха О. В., д-р техн. наук, проф. ;  
Гончар В. А., канд. техн. наук, доц. ;  
Голенко К. Е., канд. техн. наук, викл.

Відповідальний за випуск: Диха О. В., д-р техн. наук, проф.

Випусковий редактор: Яремчук В. С.

Технічне редагування і верстка: Карпанасюк В. П.

Макетування здійснено редакційно-видавничим відділом Хмельницького національного університету (м. Хмельницький, вул. Інститутська, 7/1). Підп. 24.03.2023. Зам. № 27е/23, електронне видання, 2023.

© ХНУ, 2023

## Вступ

---

Методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Інженерія поверхні», призначені для здобувачів (студентів) другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 132 «Матеріалознавство». Дисципліна є обов'язковою складовою освітньо-професійної програми з підготовки здобувачів освітнього ступеня магістра.

На початковому етапі розроблення нових технологічних процесів виготовлення виробів з покриттям, технологічну схему утворення на них поверхневих шарів з визначеними експлуатаційними властивостями можна представити як перелік та послідовність дій, що містять етапи попереднього аналізу умов роботи виробу, вибору методу інженерії поверхні, який буде застосований, вибору матеріалу поверхневого шару та розроблення окремих складових технологічного процесу формування цього шару. Наявність (відсутність), послідовність та призначення окремих операцій у технологічному процесі залежить від методу інженерії поверхні, який був застосований.

**Мета дисципліни** – формування теоретичних знань і практичних навичок з використання сучасних технологій нанесення функціональних покриттів на деталях і конструкціях з метою підвищення довговічності виробів при їх експлуатації.

**Завданнями дисципліни:** надати студентам знання і уміння аналізувати умови роботи об'єкту модифікації; обґрунтовано вибирати технологічні способи відновлення або підвищення зносостійкості поверхневого шару; обґрунтовувати і вибирати ефективні методи контролю якості поверхні.

В процесі вивчення дисципліни і виконання лабораторного практикуму студенти поглиблюють і розширюють здатності до:

– абстрактного мислення, аналізу та синтезу при вирішенні виробничих завдань;

- застосування теоретичних знань у практичних ситуаціях, зокрема, з метою збільшення строку роботи деталей машин;
  - збереження навколишнього середовища, застосовуючи екологічно чисті технології;
  - виявлення та розв'язування проблем у галузі матеріалознавства;
  - планування та проведення досліджень у сфері матеріалознавства в лабораторних та виробничих умовах з використанням сучасних методів і технологій;
  - розроблення нових методів і методик дослідження поверхонь, використовуючи методології наукового дослідження та особливості проблеми, що вирішується;
  - оцінювання та забезпечення якості виконуваних робіт;
  - вміння зрозуміло і недвозначно доносити власні знання, висновки та аргументацію з питань інженерії поверхонь і догичних проблем до фахівців і нефаківців, зокрема до здобувачів вищої освіти;
  - обґрунтовано здійснювати вибір технологій виготовлення, оброблення, випробування матеріалів і виробів для конкретних умов експлуатації;
  - застосування системного підходу для розв'язання прикладних задач виготовлення, оброблення, експлуатації та утилізації матеріалів і виробів.
- Навчальна дисципліна забезпечує формування програмних результатів навчання, що сприятимуть успішній професійній діяльності, зокрема уміння:
- застосовувати принципи системного аналізу, причинно-наслідкових зв'язків між значущими факторами та науковими і технічними рішеннями в контексті існуючих теорій;
  - виявляти, формулювати і вирішувати матеріалознавчі проблеми і задачі;
  - використовувати наукові навички для успішного проведення наукових досліджень у галузі інженерії;
  - формулювати та розв'язувати науково-технічні задачі при розробленні, виготовленні, випробуванні, сертифікації, утилізації матеріалів, створювати та застосувати ефективні технології виготовлення виробів;
  - планувати і виконувати експериментальні дослідження, обирати відповідні обладнання та методики, здійснювати статистичну обробку і статистичний аналіз результатів експериментів, обґрунтовувати висновки;
  - обґрунтовано призначати та контролювати показники якості матеріалів та виробів;
  - проектувати нові матеріали, розробляти, досліджувати та використовувати фізичні та математичні моделі матеріалів та процесів;
  - ефективно використовувати на практиці теоретичні концепції менеджменту та ділового адміністрування;
  - розв'язувати прикладні задачі виготовлення, оброблення, експлуатації та утилізації матеріалів і виробів; розробляти комплексний

дизайн нових матеріалів і виробів на їх основі з урахуванням експлуатаційних властивостей та умов використання;

– аналізувати основні види відмов деталей автомобілів, ідентифікувати їх причини.

У методичних рекомендаціях наведені загальні поради щодо виконання, оформлення та захисту лабораторних робіт та питання для самоконтролю. Роботи мають дослідницький характер і виконуються за індивідуальними варіантами. У кожній з них стисло викладені основні теоретичні відомості, послідовність та варіанти завдань для виконання роботи.

Перед виконанням роботи студент має ознайомитися зі змістом та порядком її виконання, усвідомити мету та завдання, засвоїти правила техніки безпеки при виконанні робіт в лабораторії, пройти перевірку рівня підготовленості до виконання роботи і отримати допуск. Роботи оформляються в зошиті та передаються викладачеві при захисті.

### **В.1. Критерії оцінювання**

Оцінювання лабораторних робіт здійснюється за чотирибальною інституційною шкалою «*відмінно*», «*добре*», «*задовільно*», «*незадовільно*».

Оцінка «*відмінно*» виставляється студенту, який повністю виконав поставлені завдання, дає грамотні і логічні відповіді на питання при захисті роботи (як в усній, так і у письмовій формі), якісно оформив роботу. При цьому студент не вагається при видозміні запитання, вміє робити детальні та узагальнюючі висновки. При відповіді допустив дві–три несуттєві похибки.

Оцінку «*добре*» отримує студент, який орієнтується у вивченому матеріалі; свідомо використовує теоретичні знання для вирішення практичних задач; виклад відповіді грамотний, але у змісті і формі відповіді можуть мати місце окремі неточності, нечіткі формулювання закономірностей тощо. Відповідь студента має будуватися на основі самостійного мислення. Студент у відповіді допустив дві–три несуттєві помилки.

Оцінку «*задовільно*» заслуговує студент, який недостатньо володіє знаннями основного програмного матеріалу, необхідному для подальшого навчання та успішної практичної діяльності за професією, не справляється з виконанням практичних завдань, передбачених програмою. Як правило, відповідь студента будується на рівні репродуктивного мислення, студент має слабкі теоретичні знання з дисципліни, допускає неточності і суттєві помилки у відповіді, вагається при відповіді на видозмінене запитання. Разом з тим набув навичок, необхідних для виконання нескладних практичних завдань, які відповідають мінімальним критеріям оцінювання і володіє знаннями, що дозволяють йому під керівництвом викладача усунути неточності у відповіді.

Оцінка «*незадовільно*» виставляється студенту, у якого розрізнені, безсистемні знання, не вміє виділяти головне і другорядне, допускає помилки

у визначеннях понять, перекручує їх зміст, хаотично і невпевнено викладає матеріал, не може використовувати знання при вирішенні практичних завдань. Як правило, оцінка «незадовільно» виставляється студенту, який не може продовжити навчання без додаткової роботи з вивчення дисципліни.

Студент захищає лабораторну роботу перед викладачем на наступному після виконання роботи занятті.

### *Лабораторна робота 1.*

## **Побудова структури та механізму створення покриття**

**Мета:** на основі теоретичних знань, сформувати практичні навички визначення моделі і механізму створення покриття залежно від конструктивних особливостей деталі, умов роботи та структури композиційних матеріалів.

**Завдання:** на основі заданої деталі, за її призначенням з урахуванням умов експлуатації, виду зношення, способу відновлення або зміцнення вибрати матеріал і обґрунтувати спосіб отримання покриття (табл. 1.1).

**Таблиця 1.1 – Варіанти індивідуальних завдань**

Найменування деталі	Матеріал	Вид зношення	Спосіб відновлення (зміцнення)
1	2	3	4
1. Кріплення фундаментної рами	СЧ2П	Фреттінг – корозія на глибину до 0,05–0,6 мм	Плазмове напилення
2. Втулка циліндра суднового дизеля	СЧ25	Стирання «дзеркала» на 0,3–0,5 мм; кавітаційна ерозія водоохолоджуваних поверхонь, раковини глибиною до 0,5–2,0 мм; польова ерозія посадочних місць	Плазмове або газополуменеве напилення на повітрі посадочних місць; плазмове напилення водоохолоджуваних поверхонь. Хромування «дзеркала» втулки
3. Палець поршня	Сталь 20Х (у парі з бронзою)	Стирання до 0,08–0,1 мм, окремі риси глибиною до 0,2 мм	Напилення самофлюсуючими матеріалами з оплавленням. Електролітичне хромування
4. Колінчастий вал	Сталь 45 (у парі з Б83 і АСМ)	Биття загартованих шатунних шийок 0,5–1,0 мм. Риски, забоїни, корозія, зношення до 0,2–0,4 мм (для шийок без гартування)	Напилення шийок валів
5. Розподільний вал	Сталь 20Х (у парі з штовхачем з ШХ50)	Стирання кулачків до 0,4 мм; втомне викрашування на глибину до 1мм	Напилення аргоно-азотною плазмою; газоплазмове напилення

	і втулки з БрО6Ц6С3		
6. Кулачковий вал паливного насоса	Сталь 12ХНЗА (у парі з роликком на ШХ15 і втулкою з ЛС59-1)	Втомний знос поверхні кулачка і цапфи до 0,5–0,6мм	Газополуменеve напилювання поверхні цапфи; електродугове наплавлення в середовищі аргону або плазмове наплавлення кулачка

**Продовження таблиці 1.2**

1	2	3	4
7. Корпус водяного насоса	Бронза 03Ц7С5Н1 (у парі з сталним робочим колесом)	Стирання бічної і торцевої поверхні камери на глибину до 0,6–1,5мм	Наплавлення або напилювання бічної поверхні
8. Лопаті суднових гребних гвинтів діаметром 2800–3200 мм	Сталь 25л 20ХГНДІ латунь бронза	Кавітаційна ерозія завглибшки до 58 мм на загальній площі до 0,06 м <sup>2</sup>	Плазмове напилювання при відновленні зон ерозії. Плазмове напилювання або наплавлення при відновленні лопатей
9. Лопатка турбіни	Жаростійкі сталі	Зношення ребра лопатки	Електронно-променеve випаровування
10. Свердла, фрези, мітчики	Р6М5	Зношення ріжучої поверхні	Методом конденсації іонним бомбардуванням
11. Різці для металообробки	T15K6, T5K10	Зношення ріжучої поверхні	
12. Хімічна апаратура	Сталь 10	Корозія	Плазмове напилювання
13. Елементи електроізолятора	Ст. 3	Електричний пробій та ерозія	
14. Метало-конструкції	Ст. 3	Атмосферна корозія	Електродугове напилювання
15. Зміцнення матриці штампа	5ХВС	Зношення робочої поверхні	Детонаційне напилювання

Визначити механізм створення композиційного покриття, накреслити його структуру та модель утворення.

### **Теоретичні відомості та методичні рекомендації**

Об'єм і поверхню будь-якої деталі варто завжди розглядати як єдину систему. Головною вимогою до захищеної поверхні є те, що вона повинна забезпечувати істотно кращий захист деталі в агресивному середовищі, чим вихідна поверхня, або основа. Система повинна бути не чутливою до умов роботи незалежно від того, або створюється захисне покриття шляхом модифікації самої поверхні деталі, чи нанесенням на основу моно- або

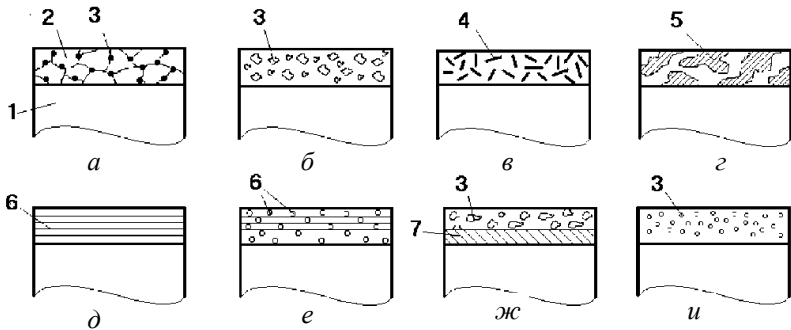


багатошарового покриття з іншого матеріалу. Конкретна комбінація певної основи з визначеним покриттям називається системою покриття. В це поняття включається також випадок модифікації поверхні матеріалу, хоча тут точнішою була б назва «поверхнево-модифікована система».

Процес розроблення конструкції деталі з покриттям, проєктування технологічного процесу виготовлення або відновлення такої деталі, а також процес створення самого покриття певної структури і властивостей повинні бути взаємозалежні. При цьому визначальне значення для рівня працездатності складного покриття має характер зв'язків між окремими його компонентами, а також між покриттям і основою деталі. У будь-якому випадку перед нанесенням покриття проводиться оброблення поверхні деталі одним з відомих способів.

### Загальні аспекти вибору матеріалу і способу створення покриття

Вибір матеріалу і способу створення покриття визначається такими основними факторами: конструкцією деталі; видом вихідних матеріалів основи і покриття, матриці і наповнювача композиційного покриття (КП); можливістю введення наповнювача в матрицю КП, створення міцного зв'язку між компонентами покриття, одержання необхідного розподілу наповнювача в матриці; сполучення процесів відновлення (виготовлення) деталі й одержання покриття; економічною доцільністю. Схематичне зображення КП з різними структурами та наповнювачами показано на рис 1.1 [1].



**Рис. 1.1 – Типові структури композиційних покриттів:**

- a* – дисперсно-зміцнене КП; *б* – КП із дисперсними частинками;
- в* – КП із дискретними волокнами; *г* – КП каркасної структури з взаємопроникними компонентами;
- д* – КП з безпервними односпрямованими волокнами;
- е* – КП з безпервними волокнами різної орієнтації; *ж* – шарувате КП;
- и* – КП з структурою, що змінюється за товщиною;
- 1* – основа деталі; *2* – матриця; *3* – дисперсні частинки; *4* – дискретні волокна;
- 5* – взаємопроникні компоненти; *6* – безпервні волокна; *7* – проміжний шар покриття

За призначенням і застосуванням захисні покриття поділяють на зносостійкі, антифрикційні, фрикційні, корозійностійкі, спеціальні та ін.

Ознака віднесення покриттів до тієї або іншої групи за призначенням є умовною, тому що покриття, як правило, багатофункціональні, тобто одне і теж КП може мати комплекс властивостей, що обумовлюють можливість його різноманітного застосування.

До конструкторсько-технологічних аспектів вибору матеріалу і способу створення покриття належать: розміри і форма основи; матеріал основи; особливості виготовлення нових композитних виробів; відновлення зношених деталей і вузлів.

Розміри деталей і конструкцій, на яких створюються покриття, вимірюються від часток мікрона до декількох кілометрів. Що стосується розмірів створюваних на поверхні покриттів, то вони характеризуються коефіцієнтом покритості  $\rho$ , рівним відношенню площі покриття  $S_n$  до всієї площі поверхні виробу  $S_b$ , тобто  $\rho = S_n/S_b$ . Значення  $\rho$  коливається від 0 до 1.

За формою деталі залежно від співвідношення розмірів можуть бути: об'ємними, плоскими, лінійними.

За складністю форми поверхні, на яких створюється покриття, поділяються на елементарні, ускладнені, складені і складної конфігурації (рис. 1.2).

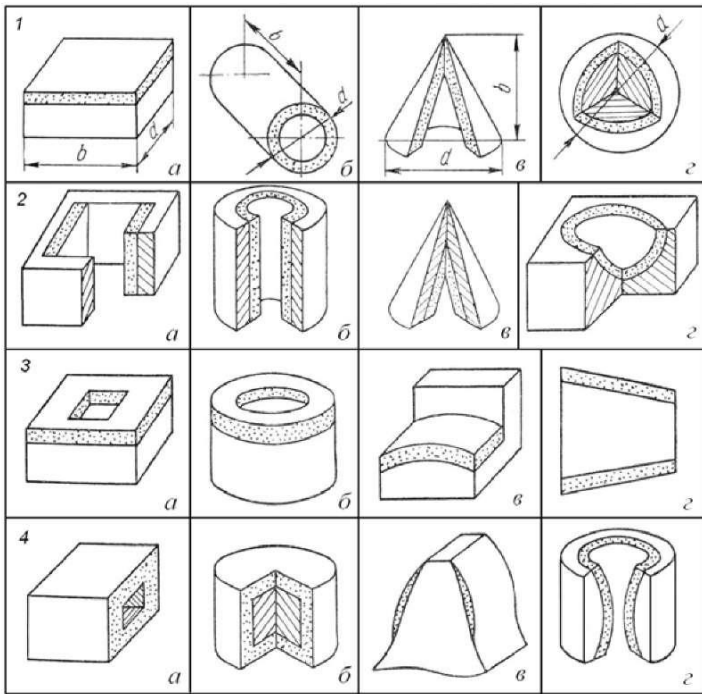


Рис. 1.2 – Класифікація форм поверхні, що покривається

До елементарних відносяться плоскі 1, а, циліндричні 1, б, конічні 1, в і кулясті 1, г поверхні. Елементарні поверхні у свою чергу поділяються на зовнішні 1 і внутрішні 2. До ускладнених належать поверхні, що мають незначне відхилення від елементарної поверхні 3, в, г або з розривами в елементарній поверхні 3, а, б. Складені поверхні мають дві або більше елементарні поверхні 4, а, б. До поверхонь складної форми відносяться гіперболічні, параболічні і т.п. 4, в, а також ті, які не описуються якою-небудь закономірністю 4, г.

Матеріал основи впливає на вибір способу створення покриття. У свою чергу матеріал покриття і спосіб його створення впливають на вибір матеріалу основи. Як вихідний матеріал основи використовують метал, кераміку, пластмасу, графіт, тканини і композиційні матеріали.

Нанесення покриття істотно змінює умови роботи матеріалу основи. Покриття, приймаючи на себе частину функцій виробу (зносостійкість, контактну міцність, корозійну стійкість тощо), знижує вимоги до властивостей матеріалу основи. Внаслідок цього основа може бути виготовлена з менш дефіцитного і більш дешевого матеріалу.

Якість покриттів характеризується сукупністю показників: міцністю зчеплення покриття з основою  $\sigma_{зч}$ , величиною залишкових напружень і хімічною взаємодією вихідних матеріалів.

### Моделі і технології створення композиційних матеріалів (КМ)

Існують чотири основні моделі створення КМ і декілька їхніх різновидів (рис. 1.3, табл. 1.2).

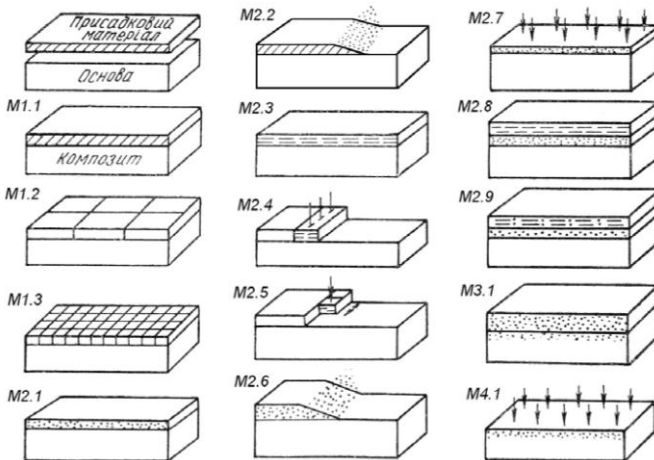


Рис. 1.3 – Різновиди моделей утворення покриттів

Створення КМ, відповідно до моделі М1, здійснюється за рахунок з'єднання, присадкового матеріалу у виді шару товщиною 0,05–20 мм і більш, з поверхнею основи. Енергія використовується тільки для утворення зв'язку між вихідними компонентами. Механізм з'єднань вихідних компонентів залежить від виду і параметрів технології нанесення покриття. При холодному зварюванні, зварюванні вибухом і т.п. зв'язок утворюється за рахунок схоплювання; при дифузійному, ультразвуковому, роторному, тертям і т.п. – за рахунок схоплювання та дифузії; при приварюванні та припаюванні за рахунок кристалізації рідкої фази на твердих поверхнях, що з'єднуються. Всі операції М1 легко автоматизуються і виконуються за короткий проміжок часу. Тому технологія М1 є високопродуктивною.

**Таблиця 1.2 – Механізм утворення покриття і з'єднання його з основою**

Модель	Матеріал присадки	Механізм утворення покриття	Спосіб отримання покриття
M1.1	Оболонка: плоска, циліндрична, сферична складної форми	Пресування, спікання лиття, механічна обробка, обробка тиском і т.п.	Плакування, армування, напрусування, наклеювання, облицювання та ін.
M1.2	Складові оболонки: пластини, кільця (півкільця), сегменти, пластини складної форми	Створення складових аналогічно оболонці. Механізм скріплення складових по торцях аналогічний зв'язку покриття з основою	
M1.3		Різновид – відсутність зв'язку між складовими	
M2.1	Порошок	Спікання	Металювання, емалювання, пластмасування, напилення, металювання
M2.2	Тверді, твердо-рідкі частки	Схоплювання, спікання припаювання	
M2.3	Рідина: розплави, розчини, рідко-твердий шлікер	Кристалізація, рідко-фазове спікання	Напаювання, заморожування, напикання, фарбування, заливка
M2.4			Електрошлакове наплавлення, напайка, заморожування, фарбування
M2.5			Наплавлення, напаювання, фарбування
M2.6			Наплавлення, напилення, фарбування
M2.7	Пари, гази	Кристалізація	Осадження в парогазовій фазі

M2.8	Розчин	Електрокристалізація	Електроосадження, хімічне осадження
M2.9	Розчин, емульсія	Електрокристалізація із закріпленням другої фази	КЕП, електрофорез
M3.1	Газ, розчин, порошок	Просочення, дифузія	ПХО, ПХТО, ПФХО і т.д.
M4.1	–	Зміна структури	ПТО, ПФО, ПФТО. ПМО і т.д.

Модель технології M2 передбачає активацію матеріалу присадки і поверхневого шару основи, до стану при якому вони вже довільно, внаслідок прагнення системи до мінімуму вільної енергії, створюють покриття і зв'язок його з основою.

Існують наступні різновиди M2:

– **M2.1** – матеріал присадки у виді дрібнодисперсного порошку сполучають з поверхнею, нагрівають до температури 0,6–0,9  $T_{пл}$  і витримують протягом 0,2–2 години в захисній атмосфері. У результаті відбувається спікання порошку і припикання його до основи з утворенням покриття. Спікання відбувається у твердому стані або з присутністю рідкої фази. Всі операції M2.1 автоматизуються, устаткування працює стабільно з високою гарантією якості. Енерговитрати M2.1 вище енерговитрат при M1, тому що крім «енергії зв'язку» необхідно затратити «енергію стану» – нагрівання до температури спікання і витримка при даній температурі впродовж певного часу;

– **M2.2** – технологія, при якій активація матеріалу присадки здійснюється нагріванням, диспергацією і розгоном до швидкостей 50–500 м/с. При зіткненні частинок з поверхнею створюється покриття і зв'язок його з основою. Нагрівання ведеться різними джерелами (газове полум'я, електрична дуга, СВЧ і т.п.), дисоціація і розгін – стислим повітрям, газом або вибухом;

– **M2.3, M2.4, M2.5** – технології, при яких матеріалу присадки активують нагріванням або розплавленням до рідкого стану і сполучають з поверхнею основи. При цьому, якщо роблять одночасно активацію матеріалу поверхневого шару основи до рідкого стану, відбувається наплавлення, при сполученні рідини з твердою основою – напаявання. Різниця M2.3, M2.4 і M2.5 складається в площі нанесення рідини на поверхню основи: M2.3 характеризується одночасним сполученням рідини з усією поверхнею, що покривається, (наморожування, напаявання, фарбування зануренням і т.п.), M2.4 – нанесенням рідини по визначеній частині поверхні, що покривається, (наплавлення стрічковим електродом, багатоелектродне, електрошлакове наплавлення, фарбування валками і т. п.); M2.5 – нанесенням рідини на поверхню, що покривається, в «точці» (ручне, автоматичне наплавлення, фарбування щіткою і т.п.). M2.3 має високу ступінь автоматизації і продуктивності. Зі збільшенням номера моделі ступінь автоматизації і продуктивність знижуються. Характерна особливість M2.3, M2.4 і M2.5 – високі

залишкові напруження, зниження яких можливе попереднім нагріванням основи і застосуванням рідко-твердих лікерів;

– **M2.6** – технологія, при якій матеріалу присадки в вигляді диспергованої рідини розганяється й ударно з'єднується з поверхнею, що покривається. Сполучення рідких частинок з рідкою поверхнею основи відповідає наплавленню, із твердою – напилюванню. Нанесення рідких частинок розчину на тверду поверхню, що покривається відповідає фарбуванню;

– **M2.7** – технологія, при якій матеріалу присадки диспергується до атомно-молекулярного стану, розганяється й осаджується на поверхні у вигляді компактного покриття. Активація здійснюється нагріванням до  $T > T_{вин}$  і розгоном у розрідженій атмосфері;

– **M2.8** – технологія, при якій активація матеріалу присадки здійснюється за рахунок дисоціації рідини до атомно-молекулярного стану і придання заряду; створення покриття відбувається за рахунок електрокристалізації при осадженні (розрядці);

– **M2.9** – відрізняється від M2.8 тим, що в електролітичному розчині присутні в зваженому стані дисперсні частинки, що захоплюються зарядженими потоками або, маючи власний заряд, направляються до поверхні, що покривається, під дією електричного поля, де й осаджуються при розрядці (електрофорез);

– **M3.1** – технологія, при якій покриття створюється за рахунок хімічної обробки поверхневого шару основи;

– **M4.1** – технологія, при якій покриття утворюється за рахунок обробки поверхневого шару основи енергетичними полями (механічними, термічними, електромагнітними, радіаційними і т.п.).

При розробці кераміко-металічних або металокерамічних покриттів кожний з основних класів матеріалів, застосовуваних як матриця композиційного покриття (КП), має як переваги, так і недоліки.

Металеві матриці забезпечують високу міцність, тепло- і електропровідність КП, розмірну стабільність деталей, але відрізняються високою щільністю, недостатніми зносо- і хімічною стійкістю. Полімерні матриці при відносно низькій міцності і теплостійкості характеризуються більш високою хімічною стійкістю і низькою щільністю. Термореактивні полімери перевершують термопластичні за характеристиками міцності, але гірше переробляються при нанесенні покриттів. Керамічні матриці відрізняються високою термостійкістю, міцністю і твердістю, але покриття з них дуже крихкі, процеси їхньої переробки дуже енергоємні, а деталі мають високу вартість.

### Контрольні питання

1. Які покриття називають композиційними?
2. Назвати основні типові структури КП.

3. Назвати основні методи формування КП.
4. Як впливає пористість на працездатність покриттів?
5. Назвати основні чинники від яких залежить адгезійна та когезійна міцність покриттів.
6. При яких умовах спостерігається підвищена зносостійкість плазмових покриттів при абразивному зношуванні?
7. Назвати основні етапи проектування деталей з КП.

*Література:* [1, с. 20–30; 2, с. 15–45; 3; 5, с. 123–127]

**Лабораторна робота 2.**  
**Вибір складу, методів отримання**  
**та технології нанесення функціональних**  
**покриттів**

**Мета:** вибирати на основі знань щодо умов експлуатації, складу та методів отримання композиційних покриттів шляхом напилення, конструкції конкретної деталі тип і технологію отримання КП.

**Завдання:** за індивідуальним завданням (табл. 2.1), виходячи з форми, розмірів деталі та умов експлуатації обрати і обґрунтувати матеріал та визначити спосіб створення покриття.

**Таблиця 2.2 – Варіанти індивідуальних завдань**

Виріб	Розмір поверхні, що покривається, мм	Умова експлуатації
1. Ніж гільйотини	32×1200	Високі ударні і вдавлювальні навантаження
2. Гальмівні колодки	60×100, 80×218	Тертя ковзанням, абразивне зношення
3. Дріт	$d = 2, l = M^*$	Корозія
4. Вали прокатні	$d = 110, l = 320$	Тертя коченням, абразивне зношення
5. Сопло ракет	$M^*$	Висока температура, корозія, ерозія
6. Шліци		Ударні навантаження, вдавлювання
7. Підшипник	$d = 40, d = 600$	Тертя зі змазкою
8. Днище поршня	–	Корозійне та ерозійне зношення
8. Лопатки газових 9. турбін	60×100, 100×300	Висока температура, корозійне та ерозійне зношення.
10. Зуб колеса	$d = 56 - 1600$	Тертя ковзанням без мастила, ударні навантаження, абразивне зношення
11. Ємкості (всередині)	–	Корозійне зношення
12. Труба	$d = 180, l = M^*$	Корозійне і абразивне незначне зношення
13. Пуансон	$d = 60 - 100$	Малоциклове механічне навантаження, ударні навантаження
14. Втулка насоса	$d = 60 - 240$	Корозійне зношення
15. Кульовий палець	$r = 42$	Тертя ковзанням

**Примітка.**  $M^*$  – великі розміри



Для заданих умов експлуатації записати відповідне маркування згідно з таблицею А.1, що наведена у додатку.

### Теоретичні відомості та методичні рекомендації

Створення покриття простого (однокомпонентного) або складного (багатокомпонентного, композиційного, багатошарового) базується на основі сполучення в об'ємі покриття матеріалів різних класів (метал, кераміка, полімер), що мають різні вихідні властивості. Природа вихідних компонентів, їхній фазовий стан, співвідношення, стан границі розділу фаз і створення відповідної мікро- та макроструктури визначають властивості КП, і обумовлюють застосування КП для тих або інших цілей.

Будь-яка деталь має зовнішню і внутрішню структуру. **Зовнішня структура** визначається видами і кількістю функціональних частин та поверхонь деталі. Розробляючи конструкцію деталі, конструктор, насамперед, створює у своїй уяві зовнішній вигляд, який можна назвати геометричним конструктивним видом. **Внутрішня структура** характеризується комплексом властивостей матеріалу, з якого виготовлена певна деталь і визначається в межах зовнішньої структури.

У процесі оброблення заготовки змінюються форма і розміри деталі, тобто змінюється зовнішня структура. З використанням, наприклад, металургійних або термічних процесів змінюється внутрішня структура деталі. При нанесенні на поверхню деталі покриття одночасно змінюється як зовнішня структура (розміри), так і внутрішня (склад покриття, геометрія розташування компонентів, параметри кристалічних ґрат тощо).

Процес створення КП складається з трьох основних взаємозалежних етапів: розробка технології нанесення покриття; проектування та конструювання покриття і виробництво деталі; випробування (експлуатація) покриттів або відновленої деталі.

Проектування самого КП містить вибір матеріалів основи і компонентів КП, визначення структурних характеристик КП (складу, об'ємного вмісту, схеми армування і т.п.). проектні вихідні дані охоплюють, насамперед, експлуатаційні і конструктивні вимоги до покриття і деталі в цілому: умови експлуатації майбутньої деталі, допустимі навантаження, механічні, фізичні, хімічні й інші характеристики матеріалу, що визначають працездатність деталі, геометричні і конструктивні параметри.

Умови експлуатації є основним чинником, що обумовлює вибір матеріалу присадки і способу нанесення. У таблиці 2.2 наведені основні види зовнішньої дії на виріб: середовище, температура і навантаження.

**Таблиця 2.2 – Види та параметри зовнішньої дії**

Середовище, С	Ум. позн.	Температура, Т	Ум. позн.	Значення інтервалу, С°	
				від	до
1	2	3	4	5	6
Газова	Г	Висококріогенна	Кв	-273	-200

Рідка	Ж	Кріогенна	Кг	-200	-80
Тверда	Т	Негативна	От	-80	-40

**Продовження таблиці 2.2**

1	2	3	4	5	6	
Газо-рідка	Гж	Зовнішня	Н	-40	+40	
Газо-тверда	Гт	Кімнатна	К	+18	+22	
Рідко-тверда	Жт	Тропічна	Тр	+40	+100	
Газо-рідко-тверда	Гжт	Підвищена	П	+100	+300	
<i>Хімічна активність</i>		Високотехнічна	Ср	300	800	
		Висока	В	800	1200	
Інертна	И	Дуже висока	Во	1200	1800	
Відновна	В	Надвисока	Вс	1800	4000	
Атмосферна	О	<i>Характер температурного поля</i>		$T(xy2) = T1$ $T(xy2)^{T1}$ $Txy2(1;)^{соп8I}$		
Агресивна:	А					
– слабо;	Ас					
– підвищено;	Ап					
– високо	Ав	Рівномірне	Р			
		Нерівномірне	Нр			
		Змінне	Пр			
		Вплив – В				
<i>Механічне навантаження</i>		Характерне		<i>Абсолютні параметри</i>		
Статичне	Х	Тертя		Тиски середовища і напруження: $P = 10^{-13} - 10^{12}$ МПа		
Рівномірне	Хр	Ковзання:	Ск			
Нерівномірне	Хн	– з мастилом;	СкА			
Циклічне	Ц	– без мастила	СкБ			
Малоциклове	Цм	Кочення	Кч			
Середньочастотне	Цс	Абразивний знос		Температури		
Високочастотне	Цв	Гідроабразивний		$T = 273 - 4000$ °С		
<i>Вид навантаження</i>		Корозія	Ко	<i>Відносні параметри</i>		
Розтягування	Ра	Ерозія	Ер			
Стискування	Сж	Пітинг	Пт			
Кручення	Кр	<i>Енергетичне поле</i>				
Вигин	Из		Електричне			ЕП
Удар	Уд		Магнітне			МП
Зріз	Сз	Гравітаційне	ГП			Слабке Нз
Втискування	Вд	Радіаційне	РП			Середнє Ср
Складний	Ж	Біомікробне	БП			Високе Вс

Кожен вид зовнішньої дії визначається характером і параметрами: середовище – станом, хімічною активністю і тиском; температура – характером температурного поля і значенням; навантаження – характером розподілення, різновидом і значенням (абсолютне або відносне). Окрім цього, на матеріали виробів можуть впливати енергетичні поля: електричне, гравітаційне, радіаційне і біомікробне.

Різновиди кожного виду зовнішньої дії позначаються буквою, а її абсолютне або відносне значення – цифрою. Маркування зовнішніх умов

основане на літеро-числових позначеннях: наприклад, окислювальне газове середовище в 1 атм позначається 0 г; вулична температура середньої смуги країни – Тн або  $T \pm 35$  °С, змінний нагрів до 800 °С позначається Т800П; малоциклове навантаження розтягнення з зусиллям 70 МПа – ЦМР70, тертя ковзанням з мастилом під тиском 10 МПа – СкА10; дія радіаційних променів, що створює поглинання дози в 0,7 бер – РП 0,7 і так далі.

Маркування всіх видів зовнішньої дії позначається послідовним описом кожного через риску. Наприклад, умови роботи робочих деталей ротаційно-кувальної машини описуються Ог– $T \pm 35P$ –СкА (7,5; 0,5) і т.д.

Для деталей, що мають декілька (*n*) робочих поверхонь, що визначають надійність і довговічність деталі (вузла), запис складається з *n* одиночних записів, де номер запису відповідає номеру поверхні. Наприклад, якщо деталь машини має чотири робочі поверхні, з них дві з однаковими умовами роботи, то умови роботи записуються:

1) Ог–Тг50–ЦВ, Уд5; 2) Ог–Т350–ЦВ, Уд; 3, 4) Ог–Т350–М50–СкБ.

Введення маркування умов роботи деталей в області матеріалу покриття дає можливість наносити покриття з максимальною стійкістю. Ця методика маркування умов зовнішньої дії необхідна практично для всіх фахівців промислового виробництва (конструкторів, технологів, будівельників, ремонтників), оскільки найближчим часом 85–90 % деталей виготовлятиметься композитними, тобто з покриттями.

Стандартизація за допомогою маркування зовнішніх умов роботи деталей і розробка для стандартизованих умов рекомендацій по тертю, жаростійкості, біостійкості, міцності і так далі дозволяє спростити і поліпшити якість проєктування. Останнє забезпечить підвищення надійності та довговічності роботи деталей і вузлів, що дасть значний економічний ефект.

Властивості, які повинні мати матеріали покриттів, дуже широкі як за номенклатурою, так і за кількісним значенням. Необхідно створювати матеріали для покриттів, які разом з високими і специфічними властивостями мають високу технологічність нанесення і сумісність з матеріалом основи.

Як покриття, використовують практично всі елементи таблиці Менделєєва і дуже велику кількість їх з'єднань. Нижче дані умовні позначення різних груп матеріалів, які мають однорідні специфічні властивості. Ці позначення використовуються при наданні рекомендацій з вибору матеріалу і способу створення покриття (додаток А, табл. А.1).

Матеріали поділяються на чисті елементи (ЧЕ) і хімічні сполуки (ХС). Чисті елементи позначаються символами, прийнятими в таблиці Менделєєва. Вони поділяються у свою чергу на метали (Ме) і неметали. Крім цього, окремі елементи, маючи різні структури, одержали різне позначення; наприклад вуглець існує у виді графіту (Гр) і алмазу (Сал).

Для матеріалу покриття найбільший практичний інтерес представляють наступні матеріали: Сп – сплави і псевдосплави (сталь, сормайт і т.п.); хімічні сполуки – карбіди (МеС), оксиди (МеО), бориди

(MeB), силіциди, нітриди і т.п. Композиційні матеріали (КМ): МКМ – металічні композиційні матеріали, ПКМ – полімерні композиційні матеріали, ККМ – керамічні композиційні матеріали; кермети (К), емалі (Ем), припої (Пр), КК, К, КВ, КМ ...– кермети на основі карбіду, оксиду, бориду, нітриду і т.п.; ГК – гранульований композиційний матеріал із гранул (0,15 – 2,5 мм), ДЗ – дисперсно зміцнені матеріали, СТС – спечені тверді сплави (ВК, ТК, ТНМ); тугоплавкі матеріали (ТМ); надтверді (СТМ) – алмаз, ельбор, гексаніт і т.п., кераміка (Кер), пластмаса (Пл).

Найбільше застосування для нанесення покриттів знаходять сплави на основі Fe, Ni, Co, W, Cu і т.п. Маркування цих сплавів, прийняте міжнародним інститутом зварювання приведені в додатку А (табл. А.2).

Вибір матеріалу для покриттів робиться за наступними критеріями: 1) функціональній працездатності в умовах експлуатації КМ (довговічність); 2) впливу матеріалу покриття на міцність КМ (надійність); 3) хімічній і фізичній сумісності вихідних матеріалів в умовах експлуатації; 4) міцністю зчеплення з основою; 5) дефіцитністю і вартістю.

Одна з поширених форм поверхні деталей – плоска. Найбільш раціональною технологією створення плоских покриттів на деталях малих і середніх розмірів є плакування. Плоскі оболонки з максимальними функціональними властивостями товщиною 0,05–8,0 мм і більше з'єднуються з основою холодним зварюванням (тиском, вибухом, ультразвуком, тертям), дифузійним зварюванням, припаюванням, склеюванням і іншими способами. Як приклад нанесення на плоску поверхню малих розмірів високотносостійкого покриття можна привести технологію плакування головки пуансона розміром 30×30 мм. Пластину з ВК10М товщиною 3,5 мм припаюють з використанням СВЧ або приварюють на установці дифузійного зварювання. Подальша обробка – шліфування алмазним кругом.

Поверхню значних розмірів покривають (облицьовують) зносостійкими, жаростійкими, кислотостійкими та іншими плитами. При відносно невисоких експлуатаційних умовах застосовують напилювання і фарбування. Мости, ферми та інші металеві споруди покривають напилюванням з подальшим фарбуванням.

Нанесення покриттів на листову сталь виконують осадженням або напилюванням. У останньому випадку слід виконувати нагрів в захисній атмосфері та вальцювання. Наносити тонкі тугоплавкі, бар'єрні, захисні та інші покриття слід напилюванням, а декоративні – осадженням.

Деталі циліндричної форми мають зовнішню або внутрішню робочі поверхні. Значна частина з них працює на тертя. Нанесення композитних покриттів на основі пористих тредосплавних гранул (АПН) на шийки колінчастих розподільчих і багатьох інших валів слід робити металюванням.

Металювання з використанням шихти типу АПН також рекомендується і для нанесення на циліндричні робочі поверхні великих розмірів, що працюють в умовах тертя з мастилом (термомеханічне або з просоченням).

На циліндричні поверхні, що працюють в умовах сухого тертя або абразивного спрацювання, наносяться покриття з високозносостійкого матеріалу С, D, F, P, KM, STC, STM.

Млини, змішувачі, барабани, труби і інші подібні пристрої з внутрішнім діаметром 300 – 5000 мм і більше повинні виготовлятися плакованими. Плити із зносостійкого матеріалу закріплюються паянням, склеюванням, клеємеханічним та іншими способами. При виборі матеріалу слід враховувати не лише його зносостійкість, але і можливість забруднення оброблюваного матеріалу продуктами спрацювання, вагу, пластичність і так далі.

Покриття на дріт наносять осадженням – гальванічним, з парової або рідкої фаз (розплаву).

Покриття на внутрішню поверхню труб слід наносити емалюванням, металюванням і т. д., а також осадженням. Нанесення сирого шару (шлікеру) і припикання (нагрів СВЧ) здійснюються при обертанні труби довкола своєї осі. Таке ж обертання необхідне і при осадженні. При значному збільшенні діаметру труби (600 мм і більше) для нанесення сирого шару можна використовувати напилювання.

Спосіб створення покриттів на внутрішніх поверхнях ємкості (цистерни, баки і т.п.) залежить від її розмірів. Нанесення покриттів на ємкість великих розмірів ( $D > 2$  м) можна здійснити напилюванням, емалюванням, металюванням, плакуванням, фарбуванням і осадженням. Нагрів при припиканні, металюванні і т.д. як правило місцевий (променевий, СВЧ, пальниками і т.п.), захист зони нагрівання від окислення – локальний або загальний. У останньому випадку вся ємкість заповнюється інертним газом, а нагрів проводиться з зовнішнього боку. Оскільки багато ємкостей виготовляють з біметалу або з листів з покриттями, покриття потрібні лише в місцях зварювання або в місцях, де вони пошкоджені.

Покриття на деталях малих і середніх розмірів з конусною або сферичною поверхнями можуть створюватися плакуванням, осадженням і термомеханічною обробкою. Для поверхонь великих розмірів застосовуються способи, які вказані у випадку покриттів на ємкостях великих розмірів.

Для жаростійких покриттів потрібна тугоплавкість, хімічна інертність, компактність, механічна міцність як самого шару, так і його зв'язку з основою, фізична сумісність і т. д. Покриття з жаростійкими властивостями можна створити плакуванням і емалюванням або металюванням. У ряді випадків застосовується осадження, напилювання і термомеханічна обробка. Проте при цьому необхідно пам'ятати, що осадження обмежене хімічним складом і створює шари малої товщини з відносно невисокою міцністю зв'язку з основою; напилюванням утворює пористі шари з низького міцність зчеплення його з основою; термохімічна обробка дає шари сплаву на основі матеріалу основи, що в більшості випадків не забезпечує максимальну жаростійкість.

## Контрольні питання

1. Сполучення яких властивостей обумовлюють застосування КП для тих або інших цілей?
2. Які структури має будь-яка деталь, дати коротке пояснення кожної?
3. З яких етапів складається процес створення деталі з КП?
4. Які основні види зовнішньої дії на виріб ви знаєте?
5. За якими критеріям виконується вибір матеріалу для покриття?
6. Назвати основні вимоги до жаростійких покриттів?

*Література:* [3, с. 90–150; 5, с. 61–102; 7, с. 123–127]

**Лабораторна робота 3.**  
**Дослідження механічної та фізико-хімічної**  
**взаємодії**  
**компонентів основи та покриття**

**Мета:** сформувати практичні навички з оцінювання термодинамічної та механічної сумісності матеріалів матриці і покриття.

**Завдання 1:** розрахувати ізобарно-ізотермічний потенціал можливих реакцій при газотермічному напилюванні компонентів, згідно з варіантом завдань (табл. 3.1).

**Таблиця 3.1 – Варіанти індивідуальних даних**

№ з/п	Рівняння реакції	Температура в контактi $T_{к2}$ , °C	
1	$2Al + Cr_2O_3 = Al_2O_3 + 2Cr$	500	1000
2	$3Zr + 2Fe_2O_3 = 3ZrO_2 + 4Fe$	500	1000
3	$2Fe + TiO_2 = 2FeO + Ti$	500	1000
4	$2Zr + 2Al_2O_3 = 3ZrO_2 + 4Al$	500	1000
5	$2Al + Fe_2O_3 = Al_2O_3 + 2Fe$	500	1000
6	$2Cr + Fe_2O_3 = Cr_2O_3 + 2Fe$	500	1000
7	$3Fe + Al_2O_3 = 3FeO + 2Al$	500	1000
8	$4Fe + 3V_2O_5 = 2Fe_2O_3 + 3V_2O_3$	500	1000
9	$3Fe + Cr_2O_3 = 3FeO + 2Cr$	500	1000
10	$3Ti + 2Cr_2O_3 = 3TiO_2 + 4Cr$	500	1000
11	$Fe + Fe_2O_3 = 3FeO$	500	1000
12	$3Cu + Al_2O_3 = 3CuO + 2Al$	500	1000
13	$2Fe + ZrO_2 = 2FeO + Zr$	500	1000
14	$2Fe + SiO_2 = 2FeO + Si$	500	1000
15	$Fe_2O_3 + 2Al = 2Fe + Al_2O_3$	500	1000

**Завдання 2:** 1) визначити температуру нагрівання ремонтної втулки щоб її можна було з кільцевим зазором 0,5 мм встановити на вал діаметром  $d_1$ , а також визначити тангенційне зусилля, що виникає після охолодження втулки до 20 °C. Значення площі поперечного перетину  $S$ , внутрішнього діаметра втулки  $d$  і діаметр вала  $d_1$  обрати з таблиці 3.2 за варіантом;

**Таблиця 3.2 – Варіанти індивідуальних даних**

№ з/п	$S$ , мм <sup>2</sup>	$d$ , мм	$d_1$ , мм	$h$ , мм	$h_1$ , мм	$T$ , °C
1	1050	1000	1001	1,7	0,32	160
2	1010	760	761	2,8	0,7	215
3	1350	1100	1101	2,2	0,46	280
4	820	570	571	3	0,65	220
5	1170	950	951	2,9	0,52	214

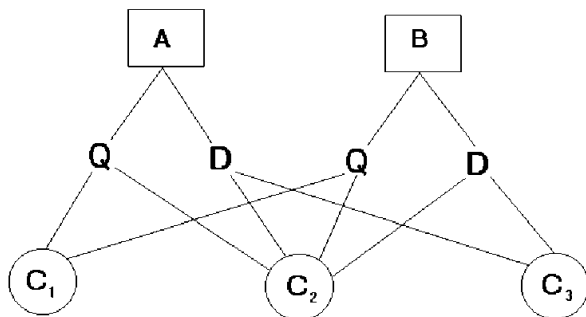
6	900	650	651	3,2	0,42	180
<b>Продовження таблиці 3.2</b>						
№ з/п	$S$ , мм <sup>2</sup>	$d$ , мм	$d_1$ , мм	$h$ , мм	$h_1$ , мм	$T$ , °С
7	980	730	731	3	0,35	178
8	1350	1100	1101	2,4	0,38	220
9	1500	1250	1251	2,1	0,57	165
10	1280	1125	1126	1,8	0,3	150
11	1800	1550	1051	3,1	0,43	301
12	1200	1101	1102	3,4	0,6	280
13	1720	1450	1451	3,8	0,61	230
14	1680	1430	1431	3,6	0,53	284
15	1890	1560	1561	1,5	0,5	176

2) визначити напруження в сталевому листі товщиною  $h$ , що покритий з обох боків склоподібною емаллю товщиною  $h_1$  мм. Якщо технологічна операція склування емалі проводиться при температурі 500 °С.

### Теоретичні відомості та методичні рекомендації

Вибір оптимального складу і структури є найважливішим етапом проєкування композиційного покриття (КП), тобто виникає задача створення «керованих» покриттів. Основними питаннями даного етапу є вибір компонентів покриття та їх оптимального співвідношення, визначення геометричних параметрів і порядку розташування компонентів в КП, а також сумісності компонентів. Зазначені питання повинні бути взаємозалежні з технологією нанесення КП.

Композиційне покриття може успадкувати від вихідних складових сполучення корисних властивостей і недоліків компонентів, або тільки корисні властивості, або одні недоліки (рис. 3.1).



**Рис. 3.1 – Схема сполучення властивостей компонентів композиційного покриття:**  
*A* і *B* – компоненти; *Q* – корисні властивості;



$D$  – недоліки компонентів ;  $C_1, C_2, C_3$  – варіанти матеріалу покриття

При розробці і виробництві КП на поверхні деталі повинні бути отримані матеріали, що мають кращі властивості в порівнянні з властивостями окремих компонентів або їх сумішей. Такий неадитивний ефект можна порівняти зі співвідношенням  $A + B = C$ , де  $C$  не є алгебраїчною сумою  $A$  і  $B$ .

Кожний з основних класів матеріалів, що застосовуються в якості матриці КП, має як переваги, так і недоліки. Порівняльну якісну характеристику матеріалів матриці наведено в таблиці 3.3.

**Таблиця 3.3 – Порівняльна якісна характеристика матеріалів матриці КП**

Матриця	Матеріал матриці	Властивість матриці										
		Щільність	Міцність	Термостійкість	Теплопровідність	Електропровідність	Хімічна стійкість		Коефіцієнт тертя	Зносостійкість	Технологічні властивості	Вартість
							В розчинах кислот	В лугах				
Металева	Мідь,	В	Н	Н	В	В	Н	Н	С	Н	С	С
	Алюміній	Н	Н	Н	В	В	Н	Н	С	Н	С	С
	Вольфрам	В	С	В	С	В	В	С	В	В	В	В
	Титан	В	В	С	С	В	Н	В	В	В	В	В
Полімерна	Поліолефіни	Н	Н	Н	Н	–	С	В	Н	Н	В	Н
	Поліаміди	Н	С	Н	Н	–	Н	С	Н	С	В	С
	Епоксидні композиції	Н	В	Н	Н	–	С	Н	С	Н	С	С
	Кремній органічні з'єднання	Н	С	С	Н	Н	С	С	В	Н	С	В
Керамічна і мінеральна	Фторопласт	С	Н	С	Н	–	В	В	Н	В	С	В
	Кераміка	С	В	В	Н	–	В	С	С	В	С	В
	Скло	С	С	С	Н	–	В	В	В	Н	Н	Н
	Вуглець	С	С	Н	Н	В	В	В	Н	Н	Н	С

**Позначення:** Н – низьке значення; С – середнє; В – високе

При виборі матеріалів, що складають КП, необхідно враховувати не тільки їх вихідні властивості, але і можливу зміну цих властивостей у процесі нанесення покриття і подальшої експлуатації.

В результаті механічної, фізичної і хімічної взаємодії компонентів КП, що знаходяться в різних агрегатних станах, формуються фази КП і границі їх розподілу. Зона (поверхня) фаз визначає більшість

експлуатаційних характеристик КП: міцність, деформованість, зносостійкість, корозійну стійкість, тепло- і електропровідність.

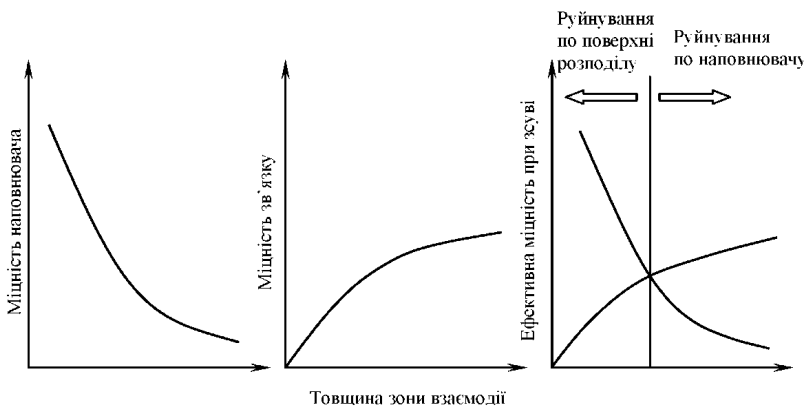
Розрізняють два основних етапи протікання реакцій взаємодії в КП: 1) при нанесенні покриття; 2) при експлуатації в сформованому покритті.

Міжфазова взаємодія компонентів КП залежить від сумісності їх матеріалів. **Сумісність матеріалів** – властивість різнорідних компонентів КП утворювати міцне нероз'ємне з'єднання, що стабільно виконує необхідні функції покриття в часі в заданих умовах експлуатації.

Як видно з визначення, сумісність матеріалів у КП, з одного боку, є міцнісною, структурною і технологічною характеристикою покриття, з іншого боку – характеризує надійність КП.

Вирішення проблеми сумісності компонентів КП передбачає розв'язання двох суперечливих задач: забезпечення високої адгезії між компонентами і неприпустимості розвитку інтенсивної взаємодії на границі фаз, що може привести до взаємного розчинення компонентів, виникненню крихких проміжних фаз і в результаті до втрати міцності КП.

Для рішення даних задач необхідно, щоб взаємодія відбувалася в момент формування КП, а в умовах наступної експлуатації, звичайно при більш низьких температурах, вона повинна або припинитися, або, різко сповільнюватися. Існує оптимальна міцність контактної взаємодії компонентів КП. Конкуруючі ефекти впливу реакції, що відбувається на поверхні розділу, на міцність КП ілюструє рис. 3.2.



**Рис. 3.2 – Вплив товщини зони взаємодії компонентів на міцність композиційного покриття**

Таким чином, необхідна розробка принципів і методів керування (регулювання) стану поверхні для посилення або гальмування виникаючих зв'язків.

Основним джерелом інформації про сумісність матеріалів у конкретних умовах є експеримент. Разом з тим первинна інформація про

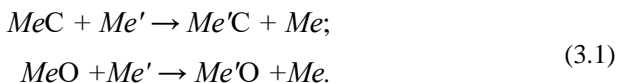
принципову можливість взаємодії компонентів у КП може бути отримана з діаграм стану систем матеріалів (якщо такі маються), термодинамічних розрахунків, аналізу кінетики взаємодії і розрахунку термомеханічної сумісності.

Розрізняють термодинамічну, кінетичну і механічну сумісності компонентів у КП.

**Термодинамічна сумісність** – властивість матриці і армуючих елементів знаходитися в стані термодинамічної рівноваги при різних значеннях температури як при нанесенні КП, так і при експлуатації.

Термодинамічно несумісні складові КП у визначених умовах (температура, тиск, тривалість взаємодії) нанесення покриття можуть бути кінетично сумісні і працювати досить надійно в конструкції деталі.

При взаємодії металів з карбідами і оксидами можливі наступні реакції:

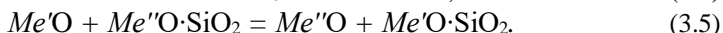
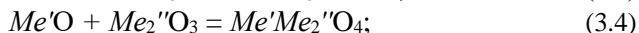
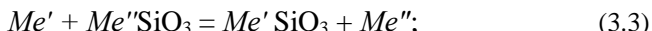


Для взаємодії кераміки з металами характерне в основному наявність трьох схем:

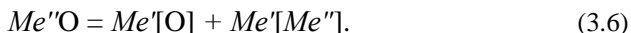
1. Пряма взаємодія відповідно рівнянню:



2. Пряма взаємодія оксидів та інших окисних з'єднань в кераміці з металами та їх оксидами, наприклад по реакціям:



3. Взаємодія за рахунок утворення твердих розчинів компонентів кераміки з деякими металами за схемою:



Загальною передумовою для протікання хімічної реакції при даній температурі  $T$  є негативне значення зміни термодинамічного потенціалу Гібса.

Очевидно, що при  $AG_0 > 0$  хімічна взаємодія неможлива, а при  $AG_0 < 0$  – можлива.

Виходячи з умови меншої спорідненості до кисню, найбільш вигідні метали, оксиди яких мають максимальне значення  $AG_0$  (мінімальне за абсолютною величиною).

**Кінетична сумісність** – властивість компонентів знаходитися в стані метастабільної (щодо стійкої) рівноваги, контрольованої такими факторами, як адсорбція, дифузія, хімічні реакції і т.п.

**Механічна сумісність** – властивість складових КП, які мають різну пружність і пластичність, коефіцієнти теплового розширення, досягати відповідності зазначених характеристик у припустимих межах.

При механічній сумісності компонентів формуються сприятливі умови розподілу внутрішніх напружень КП термічного і механічного походження і зниження їх рівня, спостерігається раціональне співвідношення між деформаційним зміцненням матриці і здатністю її до релаксації напруг.

Умова механічної сумісності припускає можливість спільної пластичної деформації компонентів КП при його нанесенні і експлуатації – деформаційну сумісність.

Величиною сумісності можна керувати, змінюючи склад компонентів, їх поверхневі властивості, технологічні режими нанесення КП.

Так, виходячи з умов абразивного спрацювання до структури зносостійкого КП висувають наступні вимоги: твердість частинок зміцнюючої фази повинна бути вище твердості абразиву; відстані між частинками зміцнюючої фази повинні бути менше розміру частинок абразиву; когезійний зв'язок між компонентами КП повинен бути високий.

Пружна деформація є оберненою деформацією, тобто вихідні розміри зразка відновлюються після зняття прикладених зовнішніх навантажень. У цьому полягає принципова відмінність пружної деформації від пластичної. У більшості матеріалів пружна деформація лінійно залежить від прикладеного навантаження, особливо при малих значеннях. Звичайно припускають, що пружна деформація виникає миттєво, у момент прикладення зовнішньої сили.

Основний закон пружної деформації – це лінійна залежність між силою  $P$  і деформацією, що визначається відомим законом Гука:  $P \cong ES \frac{\Delta l}{l}$ , тобто:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \quad (3.7)$$

де  $l$  – вихідна довжина зразка;  $S$  – площа поперечного перерізу зразка;  $\sigma$  – напруження при розтягненні;  $\varepsilon$  – деформація;  $E$  – модуль пружності (Юнга).

Модуль пружності  $E$  є мірою твердості. Тому, що сила пов'язана з напруженням, а зміна відстані – з деформацією, то модуль пружності даного матеріалу може бути знайдений за нахилом кривої, яка виражає залежність діючої сили від відстані.

Значення модуля пружності безпосередньо зв'язані з енергією міжатомних зв'язків.

При подовженні зразка до його розриву зменшується його товщина. Відношення відносної зміни товщини до відносної зміни довжини називається **коефіцієнтом Пуассона**:

$$\nu = \left( \frac{\Delta d/d}{\Delta l/l} \right). \quad (3.8)$$

Пружні деформації зсуву  $\gamma$  виникають під дією напруження зсуву (дотичного напруження)  $\tau$ . Відношення цього напруження до деформації називається модулем зсуву:

$$G = \tau/\gamma. \quad (3.9)$$

Як видно з цього рівняння, модуль зсуву залежить тільки від властивостей зразка і не залежить ні від розмірів його, ні від форми. Модуль зсуву є величиною розмірною і вимірюється в МПа (ГПа). Деформацію зсуву можна визначити як тангенс кута зсуву  $\alpha$ , а саме:

$$\gamma = \operatorname{tg} \alpha = \frac{x}{y}. \quad (3.10)$$

Модуль зсуву зв'язаний з модулем Юнга за допомогою коефіцієнта Пуассона:

$$G = \frac{E}{2} (1 + \nu). \quad (3.11)$$

Тому що коефіцієнт Пуассона завжди менше 0,5 і звичайно складає 0,3, то модуль зсуву, як правило, дорівнює 35–40 % модуля Юнга  $E$ .

Пружний розтяг твердих тіл відповідає рівномірному збільшенню відстані між атомами і, отже, безпосередньо залежить від характеру і величини сил, що діють між атомами, тобто енергії кристалічних ґраток.

Значення модуля пружності двофазової системи в принципі дорівнює середньому значенню модуля пружності окремих фаз. Якщо при цьому коефіцієнти Пуассона в обох фазах рівні, то загальний модуль пружності можна розрахувати за рівнянням:

$$E = V_1 E_1 + V_2 E_2, \quad (3.12)$$

де  $V_1$  і  $V_2$  – відносні об'ємні частки фаз.

Граничним випадком при введенні в матеріал другої фази з низьким модулем пружності є наявність пор, модуль пружності яких практично дорівнює нулю. Величину модуля пружності матеріалу з пористістю до 50 % можна визначити за допомогою співвідношення Маккензі. Якщо коефіцієнт Пуассона твердого матеріалу дорівнює приблизно 0,3, величина модуля пружності залежить від пористості  $P$ :

$$E = E_0 (1 - 1,9P + 0,9P^2). \quad (3.13)$$

Надійність і довговічність КМ визначаються не стільки властивостями покриття, скільки властивостями усього виробу, тобто основи з покриттям.

Прогнозування властивостей КП здійснюють з урахуванням відповідних характеристик матеріалів і речовин, що входять до складу композита.

Якщо деяку фізичну характеристику КП позначити через  $Y$  і покласти, що існують перемінні  $X_1, X_2, \dots, X_n$ , то в загальному випадку можна записати як  $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$ . Увівши допущення про лінійну адитивність,

зазначену фізичну величину представимо у вигляді  $Y = C_1X_1 + C_2X_2 + \dots + C_nX_n$ , де  $X_1, X_2, \dots, X_n$  об'ємні частки вихідних матеріалів;  $C_1, C_2, \dots, C_n$  – фізичні величини цих матеріалів.

Властивість лінійної адитивності (правило сумішей) часто використовують при визначенні маси, модуля пружності, границі міцності, відносної зносостійкості й інших параметрів КП.

Наприклад, модуль пружності КП:

$$E_k = E_m (1 - V_n) + E_n \cdot V_n, \quad (3.14)$$

де  $E_m$  і  $E_n$  – модулі пружності матеріалів матриці і наповнювача;  $V_n$  – об'ємна частка наповнювача в КП.

Коефіцієнти термічного розширення  $\alpha_k$ , теплопровідності –  $\lambda_k$  і електропровідності  $\delta_k$  КП можна розрахувати за допомогою рівнянь:

$$\begin{aligned} \alpha_k &= \alpha_m V_m + \alpha_n V_n; \\ \lambda_k &= \lambda_m V_m + \lambda_n V_n; \\ \delta_k &= \delta_m V_m + \delta_n V_n. \end{aligned} \quad (3.15)$$

Однак, у реальності, характеристики КП обумовлені не тільки вихідними властивостями компонентів і їхнім об'ємним вмістом, але і властивостями перехідного шару матриця – наповнювач, тобто міцністю зв'язку фаз КП. Міцність КП:

$$\sigma_k = \sigma_m V_m + \sigma_n V_n + \sigma_{п.ш.} V_{п.ш.} \quad (3.16)$$

де  $\sigma_m, \sigma_n, \sigma_{п.ш.}$  – міцність матеріалу матриці, наповнювача і перехідного шару;  $V_{п.ш.}$  – об'ємний вміст перехідного шару.

При розгляді механічних властивостей матеріалів з покриттями необхідно враховувати можливі механізми виникнення і поширення тріщин.

Матеріал наплавленого (напиленого) покриття має щодо матеріалу основи звичайно низьку пластичність і високі залишкові напруження, внаслідок цього при навантажуванні він руйнується раніше матеріалу основи. Тріщина, яка утворилася при руйнуванні, стає концентратором, що приводить до руйнування основи при значно менших навантаженнях, чим без покриття. Виходячи з цього, міцність на розрив і втомна міцність наплавлених і напилених зразків нижче відповідних значень матеріалу основи.

### **Приклад 1**

Ремонтна втулка із сталі 60 з площею поперечного перерізу 1300 мм<sup>2</sup> при 20 °С має внутрішній діаметр 1050 мм:

а) визначити, яким повинен бути діаметр вала при установці на нього втулки нагрітої до 200 °С з кільцевим зазором 0,5 мм.

б) визначити тангенціальне зусилля  $F$ , що виникає після охолодження втулки до 20 °С.

**Розв'язання.** 1. Відомо, що у сталі коефіцієнт термічного розширення  $\alpha_3 = 11 \cdot 10^{-6}$  град $^{-1}$ . Визначимо внутрішній діаметр втулки при 200 °C за:

$$d_m = d_{20}(1 + \alpha\Delta T);$$

$$d_m = 1050(1 + 11 \cdot 10^{-6} \cdot 180) = 1052 \text{ мм.}$$

З врахуванням кільцевого зазору отримаємо діаметр вала.

$$d_e = 1052 - 2 \cdot 0,5 = 1051 \text{ мм.}$$

Отже, діаметр вала повинен бути 1051 мм.

2. З закону Гука маємо:  $\sigma = \varepsilon E = \left( \frac{d_m - d_{20}}{d_{20}} \right) E = F/S$ .

Звідки  $F = \left( \frac{d_T - d_{20}}{d_{20}} \right) ES$ .

Після підстановки числових значень, отримуємо:

$$F = \left( \frac{1051 - 1050}{1050} \right) \cdot 21000 \cdot 1300 = 26000 \text{ кгс.}$$

### **Приклад 2.**

Залізний лист товщиною 2,5 мм, покритий по обидва боки склоподібною емаллю товщиною 0,5 мм. Заключна технологічна операція проводиться вище температури склування, рівної 500 °C. Модуль пружності склоподібної емалі складає  $E_e = 7000$  кгс/мм $^2$ , а коефіцієнт термічного розширення  $\alpha = 8 \cdot 10^{-8}$  град $^{-1}$ . Які напруження в емалі  $\sigma_e$  при 20 °C?

**Розв'язання.** Так як відносне подовження  $\Delta l/l$  є сумою термічного розширення, пластичної і пружної деформації, у цьому випадку  $(\Delta l/l)_e = (\Delta l/l)_3$ , стає справедливим співвідношення:  $\alpha_e \Delta T + \sigma_e/E_e = \alpha_3 \Delta T + \sigma_3/E_3$ .

Враховуючи, що  $S_3 = 2,5S_0$  та  $P_3 = -P_e$ , отримуємо  $\sigma_e = -2,5\sigma_3$ .

Далі визначаємо  $\sigma_e$ :  $\sigma_e = \frac{\Delta T (\alpha_3 - \alpha_e)}{1/E_e + 1/2,5 \cdot E_3}$ .

$$\sigma_e = \frac{(20 - 500)(11 \cdot 10^{-6} - 8 \cdot 10^{-6})}{(1/7000 + 1/2,5 \cdot 21000)} = -11,2 \text{ кгс/мм}^2.$$

Отже в емалевих покриттях виникають напруження стискання.

### **Контрольні питання**

1. Які елементи частіше використовуються в якості матеріалів матриці, дати їх характеристику?

2. Назвати способи забезпечення сумісності компонентів у КП.
3. Дати характеристики способам сумісності компонентів у КП.
4. Як можна керувати величиною сумісності?
5. Що є основним джерелом інформації про сумісність матеріалів у конкретних умовах?
6. Назвіть основні види теплового розширення твердих тіл.
7. При визначенні яких характеристик використовують властивості лінійної адитивності (правило сумішей)?

*Література:* [5, с. 156–211; 6, с. 22–102; 7, с. 201–308]

#### *Лабораторна робота 4.*

### **Дослідження термодинамічних процесів при газотермічному напилюванні**

**Мета:** сформувати практичні навички визначення температури частинок при контактуванні з основою і відсоткове відношення частинок різної температури при формуванні композиційного покриття.

**Завдання:** при відстані напилювання –  $l$ , і оптимальному режимі нанесення тривалість формування покриття до досягнення рівноважної температури  $T_1$  складала  $t$ , вага осадженого покриття  $G_1$ , потужність нагрівача, що витрачається для нагрівання мідної пластини до температури  $T_1$ ,  $W$ .

Для цього режиму напилювання втрати нанесеного матеріалу складала  $K$ . Як матеріал покриття вибрано стабілізований двоокис цирконію.

1. Визначити відсотковий вміст частинок  $B$ , що потрапили на мідну пластину в розплавленому стані.

Данні за варіантом наведені у таблиці 4.1.

**Таблиця 4.1 – Варіанти індивідуальних завдань**

№ з/п	$l$ , мм	$T_1$ , °C	$t$ , с	$G_1$ , г	$W$ , Вт	$K$ , %	$H_2$ , кал/моль
1	60	270	140	6,28	160	60	20800
2	80	255	190	8,1	170	62	20800
3	75	210	280	9,8	150	56	20800
4	55	295	187	8,28	156	50	20800
5	68	170	173	5,96	187	70	20800
6	40	190	152	7,7	176	49	20800
7	65	183	136	5,67	154	55	20800
8	86	138	210	6,1	155	70	20800
9	95	150	245	8	165	63	20800
10	78	235	220	5,1	148	70	20800
11	83	198	205	6,91	165	58	20800
12	75	196	181	7,2	171	53	20800
13	53	132	168	5,21	148	57	20800
14	58	215	148	5,12	173	62	20800
15	75	212	142	4,21	160	64	20800



2. Зробити порівняльний аналіз отриманих результатів з результатами, що приведені в прикладах практичного заняття.

### Теоретичні відомості і методичні рекомендації

Суттєвий інтерес при вивченні проблеми нанесення жаростійких покриттів методами газотермічного напилювання викликає визначення ступеня нагрівання диспергуючих частинок і оброблюваної поверхні в процесі нанесення і формування покриттів. Середня температура частинок при нанесенні покриттів в момент їх зіткнення з основою може бути оцінена кількістю теплоти, перенесеного частинками при формуванні покриття відповідної маси. Для цієї мети застосовується спеціальний калориметр, за допомогою якого встановлюється баланс між кількістю тепла, що передається частинками зразку в процесі напилювання і тією кількістю тепла, що виділяється нагрівачем калориметра при нагріванні цього ж зразка до відповідної температури.

На попередньо очищену і зважену мідну пластину напилюється покриття доти, поки не досягається, при заданих режимах, гранично висока постійна температура нагрівання  $T_1$ . При цьому підведення теплоти, що передається матеріалом і газоповітряним потоком, стає рівним втратам теплоти пластиною за рахунок теплопровідності і радіації. Температура пластинки, вимірюється за допомогою термопари підключеної до гальванометра, тривалість процесу нанесення покриття фіксується секундоміром. При цьому вважається, що різниця температур основи і покриття незначна.

Після охолодження мідної пластинки з нанесеним покриттям включають нагрівач калориметра і нагрівають пластинку до температури  $T_1$ . Потужність нагрівача  $W$ , регулюється за допомогою автотрансформатора.

Після повторного охолодження, мідну пластину з покриттям зважують для визначення ваги осадженого матеріалу  $G_1$ , г. Враховуючи коефіцієнт втрат матеріалу, що напилюється  $K$ , загальна вага частинок, що закріпились на поверхні мідної основи дорівнює:

$$G = \frac{100G_1}{K}. \quad (4.1)$$

Вважаємо, що ті частинки, що не закріпились на мідній пластині після удару об її поверхню, були віднесені газоповітряним струменем. На мідну пластинку за одну секунду потрапляє  $q$  молей (моль/с):

$$q = \frac{G}{Mt}, \quad (4.2)$$

де  $M$  – молекулярна маса.

Кількість теплоти  $Q$ , кал/с, переданого частинками мідній пластині за одну секунду, визначається як:

$$Q = 0,239W, \quad (4.3)$$

де  $W$  – потужність нагрівача, Вт.

Кількість теплоти  $H$ , кал/моль, переданого мідній пластині за тих самих умов одним моєм наплювального матеріалу, становить:

$$H = \frac{Q}{q}. \quad (4.4)$$

Таку задачу можна розв'язати, використовуючи значення молярної теплоємності і теплоти кристалізації.

При формуванні покриття на зразку виділяється кількість тепла:

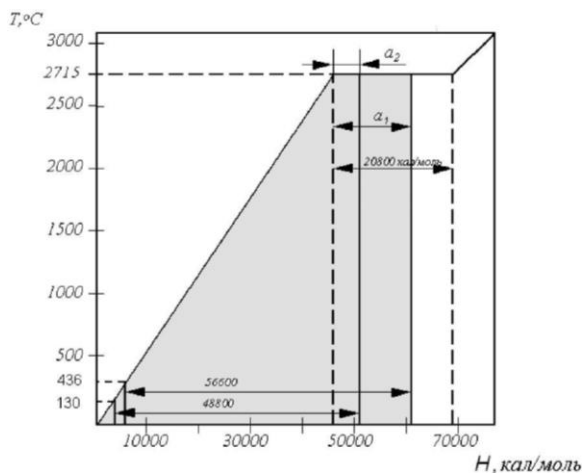
$$H_1 = \int_{T_1}^{T_2} c_p dT, \quad (4.5)$$

де  $T_2$  – температура частинок у момент їх зіткнення з мідною пластинкою;  $T_1$  – рівноважна температура нагрівання мідної пластинки в процесі нанесення покриття;  $c_p$  – значення молярної теплоємності.

Визначимо кількість теплоти  $H_2$  при температурі  $T_2$ , що дорівнює температурі плавлення  $T_{пл}$  наплювального матеріалу, та порівняємо з кількістю теплоти  $H_1$ . Далі обчислимо відсоткове співвідношення частинок, що знаходяться в різному тепловому стані (у т.ч. розплавленому), з умови:

$$H_1 + H_2 \leq H. \quad (4.6)$$

Тепловий баланс частинок, що знаходяться у різному стані, показано графічно, на рис. 4.1.



**Рис. 4.1 – Тепловий баланс охолодження частинок  $\text{ZrO}_2$  при формуванні покриття**

За цим рисунком визначаємо відсотковий вміст  $B$  частинок, які потрапили на основу при температурі, що дорівнює температурі плавлення:

$$B = \frac{a}{H_2} \cdot 100. \quad (4.7)$$

Чим більше частинок потрапляє на оброблювальну поверхню в розплавленому стані, тим більшу щільність і міцність зчеплення буде мати сформоване покриття з основою. Температура поверхні металу залежить від маси деталі, на яку наноситься покриття, значень теплоємності та коефіцієнта теплопровідності як металу, так і покриття, а також від умов напилювання.

### **Приклад 1**

При відстані між соплом і основою – 50 мм, і оптимальному режимі нанесення, тривалість формування покриття до досягнення рівноважної температури  $T_1 = 436$  °С складала  $t = 165$  °С, вага осажденного покриття  $G_1 = 6,62$  г, потужність нагрівача, що витрачається для нагрівання мідної пластини до температури  $T_1$ ,  $W = 154$  Вт.

Для цього режиму напилювання втрати нанесеного матеріалу складали 50 %. Як матеріал покриття виберемо стабілізований двоокис цирконію, як один з найбільш тугоплавких матеріалів.

Визначити відсотковий вміст частинок  $B$ , які потрапили на пластинку з температурою, що дорівнює температурі плавлення двоокису цирконію.

З огляду на це, загальна вага частинок, що потрапили на поверхню при напилюванні дорівнює:

$$G = \frac{100G_1}{K} = \frac{6,62}{0,5} = 13,2 \text{ г.}$$

Вважаємо, що ті частинки, які не змогли закріпитися на поверхні після удару віддали відповідну кількість теплоти мідній пластині і були віднесені газоповітряним струменем, охолодженими до кімнатної температури.

Визначимо кількість  $q$  молів двоокису цирконію, що потрапило на мідну пластинку за одну секунду:

$$q = \frac{G}{Mt} = \frac{13,2}{123,22 \cdot 165} = 0,000652 \text{ моль/с.}$$

Кількість тепла, переданого частинками двоокису цирконію мідній пластині за одну секунду:

$$Q = 0,239 \cdot W = 0,239 \cdot 154 = 36,8 \text{ кал/с.}$$

Кількість тепла, переданого мідній пластині за тими умовами одним молям нанесеного матеріалу, складає:

$$H = \frac{Q}{q} = \frac{36,8}{0,000652} = 56600 \text{ кал/моль.}$$

Кількість теплоти при температурі  $T_2$ , що дорівнює температурі плавлення нанесеного матеріалу (для двоокису цирконію  $T_{пл} = 2715 \text{ }^\circ\text{C}$ )  $H_2 = 20800 \text{ кал/моль}$  [3].

Кількість тепла, що виділяється на зразку під час формування покриття, приймаючи значення молярної теплосмостності  $ZrO_2$  рівним  $17,915 \text{ Дж/(моль}\cdot\text{K)}$ :  $H_1 = 44100 \text{ кал/моль}$  [3].

Тоді:

$$H_1 + H_2 \geq H, \text{ тобто } 44100 + 20800 > 56600 \text{ кал/моль.}$$

З цього випливає висновок, що у цьому випадку не всі частинки нанесеного матеріалу потрапили на пластинку в розплавленому стані.

### **Приклад 2**

При напилюванні відстань між соплом і поверхнею, що покривається дорівнює  $90 \text{ мм}$ ,  $G_1 = 7,8 \text{ г}$ ;  $t = 276,2 \text{ с}$ ;  $K = 70 \%$ ;  $T_1 = 130 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $W = 156 \text{ Вт}$ .

Згідно з розрахунками отримано:

$$\begin{array}{ll} G = 26,0 \text{ г}; & H = 48800 \text{ кал/моль}; \\ q = 0,000764 \text{ моль/с}; & H_2 = 20800 \text{ кал/моль}; \\ Q = 37,3 \text{ кал/с}; & H_1 = 46310 \text{ кал/моль}. \end{array}$$

За графіком (див. рис. 4.1) можна визначити відсотковий вміст частинок  $B$ , що потрапили на пластинку з температурою, що дорівнює

температурі плавлення двоокису цирконію, тобто 2715 °С. Для відстані між соплом і поверхнею, в 50 мм:

$$- B_1 = \frac{a_1}{H_2} \cdot 100 = 60,2 \%, \text{ для відстані в } 90 \text{ мм};$$

$$- B_2 = \frac{a_2}{H_2} \cdot 100 = 13,2 \%.$$

Таким чином, зі збільшенням відстані напилювання, кількість частинок, що потрапили на поверхню, які мають температуру плавлення нанесеного матеріалу, різко зменшується. У випадку нанесення покриття з досить близької відстані основна маса частинок, потрапляла на поверхню, в розплавленому стані. Ця закономірність повинна спостерігатися при одержанні покриттів розглянутим способом з інших матеріалів.

### Контрольні питання

1. Як впливає теплоємність матеріалу покриття та основи на контактну температуру?
2. Охарактеризуйте вплив відстані напилювання на контактну температуру?
3. Як впливає дистанція напилювання на відсоткове співвідношення розплавлених частинок, що потрапили на поверхню?
4. Як пов'язати фізичні властивості матеріалу напилювання, з процесами формування і отриманою структурою покриття?

*Література:* [3, с. 302–395; 5, с. 300–352; 7, с. 20–38]

## *Лабораторна робота 5.*

### Дослідження процесу нагрівання частинок в плазмовому струмені

---

**Мета:** освоєння методики встановлення впливу конвективного і променистого нагрівання частинки порошку в струмені низькотемпературної плазми і оцінювання часу нагрівання частинки до температури плавлення при плазмовому напилюванні.

**Завдання.** Визначити час нагрівання заданого порошку в струмені аргонної плазми до температури плавлення та зниження температури плазмового потоку за рахунок віддачі теплоти частинкам порошку. Вихідні дані приведені в таблиці 5.1 за варіантом.

**Таблиця 5.1 – Варіанти індивідуальних завдань**

№ з/п	Тип порошку	$\omega_p$ , г/с	$\omega_g$ , г/с	$T_0$ , К	$\lambda_p$ , Вт/м К
1	W	1,2	1,96	330	110
2	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,83	1,78	320	8
3	NbC	1,77	1,91	310	30
4	ZrO <sub>2</sub>	1,25	1,63	315	2
5	Ti	1,2	1,5	305	15
6	Fe	1,36	1,42	316	45
7	Ni	2,1	1,76	310	65
8	Mo	1,25	1,54	310	120
9	Al	0,94	1,6	325	240
10	Cu	0,86	1,52	314	340
11	Ag	0,67	1,67	323	365
12	ZrO <sub>2</sub>	2,15	1,87	310	2
13	Fe	0,85	1,61	301	45
14	Mo	1,49	1,34	308	120
15	Cu	1,32	1,61	323	340

Діаметр частинок порошку  $2R_0 = 60$  мкм, температура плазмового струменя в місці введення порошку  $T_{g0} = 10000$  К, теплоємність аргону при даній температурі  $c_g = 1,72$  кДж/кг К. Теплофізичні дані порошку приведені в додатку А (табл. А.5).

#### Теоретичні відомості та методичні рекомендації

Якість напиленого покриття в значній мірі залежить від умов нагрівання і плавлення частинок порошку. Добре проплавлені і перегріті частинки забезпечують отримання щільніших покриттів з міцним зчепленням з основою.

Для покращення процесу нагрівання і плавлення розплавлених частинок, зазвичай прагнуть збільшити потужність дуги, тобто підвищити температуру плазмового струменя. Проте це не завжди може привести до бажаного результату, оскільки на процес нагрівання частинок крім температури газу впливає його теплоємність, а також співвідношення витрат газу і порошку. Правильний підбір складу плазмоутворюючого газу (наприклад, суміш одноатомного і багатоатомного газу) у ряді випадків може забезпечити стабільніше пропалвлення частинок порошку навіть при менших температурах плазмового струменя.

Для оцінки ролі конвективного і променевого нагрівання частинки порошку при русі, в струмені низькотемпературної плазми, приймають для сферичної частинки критерій  $Nu = \alpha d_0 / \lambda_g = 2$ , що відповідає мінімальному значенню критерію  $Re = V d_0 / \nu_g$ , де  $\lambda_g$ ,  $\nu_g$  – коефіцієнти теплопровідності та кінематична в'язкість газу. У цьому випадку критерій Біо можна представити у вигляді  $Bi = \alpha R_0 / \lambda_p = \lambda_g / \lambda_p$ , де  $\alpha$  – коефіцієнт теплообміну,  $R_0$  – радіус частинки порошку,  $\lambda_p$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу частинки в твердому або рідкому стані (в разі плавлення частинки). Якщо розглядати процес нагрівання частинки до початку плавлення, то слід брати середньоінтегральне значення  $\lambda_p$  у інтервалі від початкової температури частинки  $T_0$  до температури плавлення  $T_{пл}$ . При лінійній залежності коефіцієнта теплопровідності від температури можна брати значення  $\lambda_p$  при середній температурі  $T_p = 0,5(T_0 + T_{пл})$ . При розгляді процесу плавлення частинки необхідно використовувати значення коефіцієнта теплопровідності в рідкому стані. Слід мати на увазі, що коефіцієнт теплопровідності при переході з твердого стану в рідкий сильно змінюється. Наприклад, для більшості металів він знижується в півтора – два рази [7].

Нагрівання частинки з врахуванням конвективного і променевого теплообміну в разі  $Bi \ll 1$  можна описати наступним диференціальним рівнянням:

$$m_p c_p \frac{dT}{dt} = \alpha F (T_g - T) - \sigma F (T^4 - T_g^4), \quad (5.1)$$

де  $m_p = \pi d_0^3 \rho_p / 6$  – маса частинки;  $d_0 = 2R_0$  – діаметр сферичної частинки;  $\rho_p$  та  $c_p$  – густина та теплоємність матеріалу частинки;  $F = \pi d_0^2$  – площа поверхні частинки;  $\sigma$  – приведений коефіцієнт випромінювання.

Якщо вважати плазмовий струмінь прозорим для теплового випромінювання, то як  $T_g$  слід брати температуру стінок каналу сопла або оточу його середовища.

Слід зазначити, що під час переходу матеріалу частинки з твердого стану в рідке теплоємність і густина змінюються не значно. Наприклад, для більшості металів теплоємність при плавленні змінюється всього на 1–5 %.

Для запису рівняння (5.1) в критеріальній формі (у безрозмірному вигляді) як масштабну температуру доцільно взяти температуру плавлення матеріалу частинки  $T_{пл}$ . В критеріальній формі рівняння (5.1) має наступний вигляд:

$$\frac{1}{3} \frac{d\theta}{d\tau} = Bi(\theta_g - \theta) - S_k(\theta^4 - \theta_g^4), \quad (5.2)$$

де  $\theta = T/T_{пл}$  – відносна (безрозмірна), температура частинки;  $\tau = a_p t / R_0^2$  – критерій Фур'є;  $S_k = \sigma R_0 T_{пл}^3 / \lambda_p$  – критерій Старка;  $\theta_g = T_g / T_{пл}$ ,  $\theta_s = T_s / T_{пл}$ . Середні значення теплофізичних властивостей ряду матеріалів, а також значення критеріїв Фур'є, Старка, Стефана і Біо приведено в додатку А (табл. А.5–А.9. Рівняння (5.2) після розділення змінних і при умові  $\theta_g = \text{const}$  запишеться як:

$$-3Sk d\tau = \frac{d\theta}{\theta^4 + b\theta - \beta}, \quad (5.3)$$

де  $\beta = \theta_g^4 + b\theta_g$ ,  $b = Bi/Sk$ .

При русі частинки в початковій ділянці плазмового струменя після виходу з сопла співвідношення величин, що входять в знаменник праворуч частини рівняння (5.3), таке, що  $\beta > \theta^4 + b\theta$ . В цьому випадку відбувається нагрівання частинки, причому, швидкість нагрівання плавно знижується у міру зростання температури частинки  $\theta$ . У початковому періоді переважає конвективне нагрівання частинки, а частка променевого теплообміну невелика.

Із зростанням температури частинки та із зменшенням температури плазмового струменя зростає роль променевого теплообміну. Гранична температура нагрівання частинки відповідає умові  $\beta > \theta^4 + b\theta$ .

На великій відстані від зрізу сопла плазмотрона відбувається значне зниження температури плазмового струменя, особливо за рахунок змішування плазмового струменя з холодним газом (наприклад, повітрям в разі неконтрольованої атмосфери). У тому випадку, коли температура струменя і розплавленої частинки близькі один до одного, відбуватиметься охолодження частинки за рахунок радіаційного вихолодження в доквіллі і може початися процес кристалізації частинки. Це явище використовується при сфероїдизації частинок. Математично це відповідає значенню  $\beta < \theta^4 + b\theta$ .

Застосування як плазмоутворюючих багатоатомних газів (наприклад, аміаку, водяної пари, метану та ін.) сприяє зниженню теплових втрат розплавлених частинок за рахунок випромінювання, оскільки ці гази після їх рекомбінації в молекули в області температур 2000–4000 К мають поглинаючі і випромінюючі здібності, що перешкоджає радіаційному вихолодженню частинок.

Таким чином, на значній відстані від зрізу сопла плазмотрона, тобто при підльоті розплавленої або сильно нагрітої частинки до основи, починає грати значну роль теплообмін випромінюванням, і слід користуватися



загальними рішеннями, що враховують променевий теплообмін. Це відноситься також до випадку нагрівання частинки в плазмовому струмені, які рухаються всередині графітової насадки.

Для даної маси газу  $m_g$ , що доводиться на частинку з масою  $m_p$ , диференціальне рівняння балансу теплоти можна представити в наступному вигляді:

$$m_g c_g dT_g = -\alpha F (T_g - T) dt, \quad (5.4)$$

або

$$\frac{m_p c_p}{KK_c} \frac{dT_g}{dt} = -\alpha F (T_g - T), \quad (5.5)$$

де  $K = m_p/m_g$  – коефіцієнт двофазності потоку;  $K_c = c_p/m_g$  – коефіцієнт теплоємності потоку.

У критеріальній формі рівняння (5.5) приймає вигляд:

$$\frac{d\theta_g}{d\tau} = -3KK_c Bi (\theta_g - \theta). \quad (5.6)$$

Систему рівнянь (5.2) і (5.6) слід вирішувати сумісно, з врахуванням наступної початкової умови: в початковий момент часу ( $\tau = 0$ ) температури частинки і плазмового струменя дорівнюють відповідно  $\theta_0$  і  $\theta_{g0}$ .

Після диференціювання рівняння (5.6) має вигляд:

$$\frac{d^2\theta_g}{d\tau^2} = -3KK_c Bi \left( \frac{d\theta_g}{d\tau} - \frac{d\theta}{d\tau} \right). \quad (5.7)$$

Отримане рівняння з врахуванням (5.3) і (5.6) можна записати в наступному вигляді, якщо виразити  $d\theta/d\tau$  і  $\theta$  через  $d\theta_g/d\tau$  і  $\theta_g$ .

$$\frac{d^2\theta_g}{d\tau^2} + 3Bi(1 + KK_c) \frac{d\theta_g}{d\tau} - 9KK_c Bi Sk \theta_g^4 = 0. \quad (5.8)$$

Як другу початкову умову для цього рівняння слід використати (5.6), записане для нульового моменту часу.

Вирішуючи рівняння (5.8) з врахуванням початкових умов, у випадку  $\theta_g \leq 1$  знаходимо закон зміни температури плазмового струменя:

$$\theta_g = \theta_{g0} - \frac{KK_c}{1 + KK_c} (\theta_{g0} - \theta_0) [1 - \exp(-a_0\tau)], \quad (5.9)$$

де  $a_0 = 3Bi(1 + KK_c)$ .

Використовуючи знайдений закон зміни  $\theta_g$  з рівняння (5.6) можна знайти закон нагрівання частинки з врахуванням теплообміну випроміненням

$$\theta = \frac{1}{1 + KK_c} \left[ \theta_{g0} + KK_c \theta_0 - (\theta_{g0} - \theta_0) \exp(-a_0 \tau) \right]. \quad (5.10)$$

Момент часу  $\tau$ , що відповідає досягненню величини  $\theta = 1$ , тобто досягненню температури плавлення, розраховується за формулою (5.10), яка при  $\theta = 1$  перетворюється в трансцендентне рівняння відносно величини  $\tau_1$ :

$$\tau_1 = \frac{1}{3Bi(1 + KK_c)} \ln \left| 1 - (1 + KK_c) \frac{1 - \theta_0}{\theta_{g0} - \theta_0} \right|. \quad (5.11)$$

Аналізуючи цей вираз, можна зробити висновок, що для зменшення часу нагрівання частинок порошку до температури плавлення доцільно:

- 1) використовувати гази з високою теплоємністю або температурну зону, де він має максимальну теплоємність;
- 2) використовувати гази з високою теплопровідністю або температурну зону, де він має максимальну теплопровідність.

Таким чином, основним завданням оптимального управління процесом плазмового напилювання є підтримка температури плазмового струменя в місці введення порошку на тому рівні, який відповідає максимальній теплоємності і теплопровідності газу.

### **Приклад 1**

Визначити час нагрівання порошку вольфраму в струмені аргонної плазми до температури плавлення та зниження температури плазмового потоку за рахунок віддачі теплоти частинкам порошку. Вихідні дані: діаметр частинок порошку  $2R_0 = 60$  мкм, витрата порошку  $\omega_p = 0,85$  г/с, початкова температура порошку  $T_0 = 300$ К, сумарні витрати аргону (плазмоутворюючого і транспортуючого)  $\omega_g = 1,7$  г/с, середня температура плазмового струменя в місці введення порошку  $T_{g0} = 10000$  К, теплоємність аргону при цій температурі  $c_g = 1,72$  кДж/кг К. Теплофізичні дані вольфраму приведені в додатку А (табл. А.5).

Визначимо коефіцієнт двофазності потоку і його теплоємність:

$$K = \omega_p / \omega_g = 0,85 / 1,7 = 0,5; \quad K_c = c_p / c_g = 0,17 / 1,72 = 0,0988.$$

Відносні початкові температури газового потоку і частинки:

$$\theta_{g0} = \frac{T_{g0}}{T_{пл}} = \frac{10000}{3663} = 2,73, \quad \theta_0 = \frac{T_0}{T_{пл}} = \frac{300}{3663} = 0,082.$$

Величина критерію Біо:

$$Bi = \frac{\lambda_g}{\lambda_p} = \frac{0,42}{110} = 0,0038.$$

При цій величині критерію Біо температурний перепад по перетину практично дорівнює нулю і розрахунок нагрівання частинок вольфраму можна вести як для термічно-тонкого тіла.

Час нагрівання частинки до температури плавлення без врахування випромінювання розраховуємо за формулою (5.11):

$$\begin{aligned} \tau_1 &= \frac{1}{3 \cdot 0,0038(1 + 0,5 \cdot 0,0988)} \ln \left| 1 - (1 + 0,5 \cdot 0,0988) \frac{1 - 0,082}{2,73 - 0,082} \right| = \\ &= -83,58 \ln 0,636 = 37,83. \end{aligned}$$

За допомогою таблиці (додаток А, табл. А.6) знаходимо, що критерій Фур'є  $\tau_1 = 37,83$  для частинок вольфраму діаметром  $2R_0 = 60$  мкм відповідає  $t_1 = 1 \cdot 10^{-3}$  с.

Зниження температури плазмового струменя за рахунок віддачі теплоти частинкам порошку вольфраму, визначається за формулою (5.9), в якій слід покласти  $\tau = \tau_1$ :

$$\theta_{g1} = 2,73 - \frac{0,0494}{1,0494} (2,73 - 0,082) \left[ 1 - e^{-0,4524} \right] = 2,684.$$

Таким чином, за рахунок віддачі теплоти частинкам, що нагріваються, температура плазмового струменя знизилась всього на 1,7 % і склала, таким чином,  $T_{g1} = 2,684 \cdot T_{nl} = 9833$  К. При такому невеликому зниженні температури плазмового струменя можна нехтувати зміною теплоємності аргонної плазми від температури.

### **Приклад 2**

Визначити час нагрівання порошку оксиду алюмінію до температури плавлення в струмені аргонної плазми та зниження температури плазмового потоку за рахунок віддачі теплоти частинкам порошку. Діаметр частинок  $2R_0 = 60$  мкм, витрата порошку  $\omega_p = 1,7$  г/с. Параметри плазмового струменя взято з прикладу 1.

У цьому випадку:

$$\begin{aligned} K &= \frac{\omega_p}{\omega_g} = \frac{1,7}{1,7} = 1; & K_c &= \frac{c_p}{c_g} = \frac{0,125}{1,72} = 0,727; \\ \theta_{g0} &= \frac{T_{g0}}{T_{nl}} = \frac{10000}{3663} = 2,73; & \theta_0 &= \frac{T_0}{T_{nl}} = \frac{300}{3663} = 0,082. \end{aligned}$$

$$\text{Критерій Біо: } Bi = \frac{\lambda_g}{\lambda_p} = \frac{0,42}{8} = 0,0525.$$

Критерій Фур'є при нагріві частинки до температури плавлення:

$$\tau_1 = \frac{1}{3 \cdot 0,0525(1 + 1 \cdot 0,727)} \ln \left| 1 - (1 + 0,727) \frac{1 - 0,129}{4,32 - 0,129} \right| = 1,638.$$

За допомогою таблиці (додаток А, табл. А.6) знаходимо, що для частинки оксиду алюмінію діаметром 60 мкм дана величина критерію Фур'є відповідає часу  $t_1 = 0,0861 \cdot 10^{-3}$  с.

Зниження температури плазмового струменя за рахунок віддачі теплоти частинкам, що нагріваються:

$$\theta_{g1} = 4,32 - \frac{0,727}{1,727} (4,32 - 0,129) [1 - e^{-0,445}] = 3,685.$$

Зниження температури складає 17,5 %, тобто кінцева температура плазмового струменя складе 8541 К. На такому інтервалі зниження температури зміна теплоємності аргону дорівнює:

$$\frac{c_g(1000K)}{c_g(8500K)} = \frac{1,72}{0,8} = 2,15.$$

В цьому випадку розрахунок необхідно робити з врахуванням залежності теплоємності аргону від температури.

### Контрольні питання

1. Які чинники впливають на процес нагрівання частинки?
2. Що доцільно використовувати для зменшення часу нагрівання частинок порошку до температури плавлення?
3. Яке основне завдання оптимального управління процесом плазмового напилювання?

*Література:* [3, с. 412–502; 6, с. 30–39; 7, с. 152–220]

## Література

---

### *Основна*

1. Методи поверхневого зміцнення у процесі виготовлення деталей машин : навч. посіб. / А. Г. Фесенкота [та ін.]. – Дніпропетровськ : РВВ ДНУ, 2015. – 103 с.
2. Ющенко К. А. Інженерія поверхні : підручник / К. А. Ющенко, Ю. С. Борисов, В. Д. Кузнецов, В. М. Корж. – Київ : Наукова думка, 2007. – 558 с.
3. Кіндрічук М. В. Трибологія : підручник / М. В. Кіндрічук, В. А. Лабунець, М. І. Пашечко, Є. В. Корбут. – Київ : НАУ, 2009. – 392 с.
4. Харламов Ю. О. Фізика, хімія та механіка поверхні твердого тіла : навч. посіб. / Ю. О. Харламов, М. А. Будаг'янц. – Луганськ : Вид-во СУДУ, 2000. – 624 с.
5. Каплун В. Г. Іонне азотування в безводневих середовищах : монографія / В. Г. Каплун. – Хмельницький : ХНУ, 2015. – 315 с.
6. Харламов Ю. С. Газотермічні покриття з порошкових матеріалів: довідник / Ю. С. Харламов, Ю. А. Харламов, С. Л. Сидоренко, Е. Н. Ардатовська. – Київ : Наукова думка, 1987. – 544 с.
7. Азаренков Н. А. Наноматеріали, нанопокриття, нанотехнології : навч. посіб. / Н. А. Азаренков, В. М. Береснев, А. Д. Погребняк. – Харків : ХНУ ім. В.Н. Каразіна, 2009. – 209 с.

### *Додаткова*

8. Копилов В. І. Поверхневі фізико-хімічні процеси : метод. вказівки / В. І. Копилов, І. В. Смирнов. – Київ : ВПП «Політехніка», 2005. – 56 с.
9. Максимович Г. Г. Фізико-хімічні процеси при плазмовому напиленні і руйнування матеріалів з покриттями : підручник / Г. Г. Максимович, В. Ф. Шатинський, В. І. Копилов. – Київ : Наукова думка, 1983. – 264 с.
10. Хасуй А. Техніка напилення / А. Хасуй ; пер. з японської. Машинобудування, 1975. – 288 с.
11. Равделя А. А. Короткий довідник фізико-хімічних величин / А. А. Равделя і А. М. Понамаревой. – Львів : Хімія, 1983. – 232 с.

## Додаток А

**Таблиця А.1 – Матеріали і спосіб створення покриттів залежно від зовнішніх умов**

Зовнішня умова	Рекомендований матеріал	Спосіб створення покриття
<b><i>Корозійно-жаростійкі покриття</i></b>		
Ог-ТН (Тп)-Кр Ож-ТН (Тп)-Кр Ог-ТН-Кр, Ра, Ср Ог-ТН-Кр, Ро, Вс Сг-ТП-Кр, ЖНз Ог-ТС-Кр, ЖНз Ог-ТВо-Кр, ЖНз Ог-ТВс-Кр, ЖНз Ас-ТП-Кр, ЖНз АП-ТП-Кр, ЖНз Ас-ТС-Кр, ЖНз Ап-ТС-Кр, ЖНз Ав-ТС-Кр, ЖНз Ас-ТВ-Кр, ЖНз Ав-ТВ-Кр, ЖНз Ас-ТВо-Кр, ЖНз Ап-ТВо-Кр, ЖНз	МЕ, Пл, ЕМ А, В, Д, Пл Д, F Н, F Е, QВ, До К, КМ., Гр К, КМ., ТМ, Гр Д, F, К, КМ. Д, F, К, КМ. F, К F, К К К ТМ, К, Гр ТМ, К	M2.1, 2.2, 2.7, 2.8, 3.1    M1.1, 2.1, 2.6, 3.1   M1.1, 2.1, 2.3, 2.6, 2.8, 3.1   M1.1, 2.1, 2.6  M1.1, 2.1, 2.2, 2.3, 2.6  M1.2, 2.1, 2.3, 2.6, 2.8 3.1, 4.1
<b><i>Триботехнічні покриття</i></b>		
Ог-ТН-СкА, Нз Ог-ТН-СкА Ср ОГ-ТН-СкА, Вс Ог-ТН-СкБ, Нз Ог-ТН-СкБ, Ср Ог-ТН-СкБ, Вс Ог-ТН-Аб, Нз Ог-ТН-Аб, Уд, Нз Ог-ТН-Аб, Уд, Ср Ог-ТН-га, Нз Ог-ТН-га, Ср Ог-ТН-га, Вс Ог-ТС-СкА, Нз Ог-ТС-СкБ, Ср Ог-ТВ-СкБ, Нз Ог-ТВ-СкБ, Ср Ог-ТВ-СкБ, Вс Ас, г (жт) -ТН-СкБ, Ср Ав, г(жт)-ТН-СкБ,Ср Ас, г(жт)-ТП-СкБ,Ср	Би, Бр, Пл, Гр Бр, G, F, Qa Сч, G, P, K Сч, В, Н, G Сч, F, P, K Сч, F, P, K, C G, F, C В, С, К G, F, P Е, G, Qa, Пл G, Q, F, Пл F, G, P, СТС Сч, QВ, P, K P, СТС, K Гр, СТС, K Гр, СТС, K, ТМ Гр, СТС, K, ТМ Пл, G F Пл, Д, N Сч, G, N, F	M1.1, 2.1, 2.3, 2.6, 2.8, 3.1, 4.1   M1.1, 2.1, 2.3, 2.6, 2.8, 3.1, 4.1          M1, 2.1, 2.3, 2.6, 3.1      M1.1, 2.1, 2.2, 2.6  M1.1, 2.1, 2.3, 2.6, 3.1
Ап, г(жт)-ТП-СкБ,Ср Ав, г(жт)-ТП-СкБ,Ср	G, Д, N, F G, Д, N, F	M1.1, 2.1, 2.3, 2.6, 3.1

**Продовження таблиці А.1**

Зовнішня умова	Рекомендований матеріал	Спосіб створення покриття
Ас, г(жт)-ТС-СкБ,Ср Лп, г(жт)-ТС-СкБ,Ср	F, P P, СТС	M1.1, 2.1, 2.2, 2.3, 3.1
<b>Міцні та жароміцні покриття</b>		
Ог-ТН-Хр, Ж Нз ОГ-ТН-ХР, Ж Ср Ог-ТН-Хр, Ж Вс Ог-ТН-Цм, Же Нз Ог-ТН-Цм, Ж Ср Ог-ТН-Цм, Ж Вс Ог-ТП-Хр, Ж Ср Ог-ТС-Хр, Ж Ср Ог-ТВ-Хр, Ж Ср Ог-ТВо-Хр, Ж Ср Ог-ТП-Цс, Ж Ср Ог-ТС-Цс, Ер Ср Ог-ТВ-Цс, Ж Ср Ас (ж, т) -ТН-Хр, ЕрСр Ап-ТН-Хр, Ж Ср Ас-ТН-Цс, Ж Ср Ас-ТС-Хр, Ж Ср Ас-ТВ-Хр, Ж Ср Ас-ТВо-Хр, Ж Ср Ас-ТП-Цс, Ж Ср Ас-ТВо-Хр, Ж Ср Ас-ТП-Цс, Ж Ср Ас-ТС-Цс, Ж Ср Ас-ТП-Цс, Ж Ср Ас-ТС-Цс, Ж Ср Ас-ТВ-Цс, Ж Ср	А, В, Д, Пл, Ме В, Д, Пл, Ме Д, F —«— —«— —«— F, H K, ХС, КМ K, T, M K, ХС, КМ F, N F, N, K K, ТМ H, Оа, Пл, Ме H, Оа, ПЛ, Ме —«— K, ТМ K, ТМ K, ТМ H, Пл, ЕМ До, ТМ H, Пл, ЕМ K, ТМ H, Пл, ЕМ K, ТМ K, ТМ	M2.1,2,3,2. 5,2.6, 3.1, 4.1   M2.1,2,3,2.5, 2.6,3,1,4.1   M 1.1, 2.1, 2.3,2.5,2.6,3. 1      M2.1, 2.3, 2.6, 3.1  M1,1, 2.1, 2.3, 2.6  M2.1, 2.3 2,6, 3.1, 4.1 M2.1, 2.3, 2.6, 3.1 M2.1, 2.3, 2.6 M2.1, 2.3, 2.5, 2.6 M2.1, 2.3, 2.5, 2.6 M2.1, 2.3, 2.5, 2.6 M2.1, 2.3, 2.5, 2.6
<b>Бар'єрні та активуючі покриття</b>		
ОГ-ТН - герметизуючі ОГ-ТН - дезактивуючі ТН- дифузійні Ог-ТП- дифбар'єрні Ог-ТВ- дифбар'єрні Ог-ТВо- дифбар'єрні	Рв, Бр, Оа, Пл Рв, W, Пл, ХС Рв, Бр, Ni Ме, ХС Ме, ХС ХС	M2.3, 2.6, 2.7, 2.8, 3.1   M2.1, 2.3, 2.6, 2.7, 2.8, 3.1
<b>Різні покриття</b>		
Ог-ТН- тверді Ог-ТН- теплопровідні Ог-ТН- теплостійкі ОГ-ТН - перетворюючі Ог - ТН - ерозійностійкі ОГ-ТН-ПР ОГ-ТН -ПЕМ ОГ-ТН-ПБ	В, G, F, P, СТС Ag, Си K, КМ., Кер хс, ч^ F, P, ТС, K Рв, Мо, Т Пл, Магнітний матеріал Пл, ХС	M1.1,2,1,2,3,2,6,3,1, 4.1 M1.1, 2.1, 2.3, 2.6, 2,7, 2,8 M1.1, 2.1, 2.3, 2.6, 2,9 M1.1, 2.1, 2,2, 2,7, 2,8 M1.1, 2.1, 2.3 M 1.1, 2.1, 2,3, 2,7, 2,8, 3.1 M1.1, 2.1, 2.8 M1.1, 2.1, 2,2, 2,3, 2,6,2,7, 2,8

**Таблиця А.2 – Класифікація сплавів, використовуваних при створенні покриттів**

Тип сплаву	Умовні позначення	Вміст елемента %									Орієнтовна твердість ЖС
		C	Mn	Cr	Ni	W	V	Mo	Co	Інші	
Низьколеговані сталі C < 0,4	A	0,4	1-8	0-3	0-3	-	-	0,1	-	-	40
Низьколеговані сталі C > 0,4	B	0,4	0,5-3	0-5	0-3	-	-	0-1	-	-	60
Аустенітні високо-марганцевисті	C	0,5-1,2	11-16	0-1	0-3	-	-	0-1	-	-	50
Аустенітні хромо-нікелеві	Д	0,3	1-8	13-30	5-25	-	-	-	-	0-1	40
Хромисті сталі	Е	0,2-2,0	0,3-1,5	5-30	0-5	1,5	0-1	0-1	-	0-1,5	45
Швидкорізальні	F	0,6-1,5	0,5	4-6	-	5-1,8	0-3	0-10	0-15	-	62
Високохромисті чавуни	G	1,5-5	0-6	25-35	0-4	0-5	0-1	0,3	0-5	1,5	-
Хромо-вольфрамові сталі	H	0,2-0,5	1,0	1-5	0-5	1-10	0,15-1,5	0,4	-	-	45
Кобальтові сплави	N	0,7-3,0	0,4	25-33	0-3	3-25	-	0-3	30-70	6	-
Нікелеві сплави	Q	1,0	-	8-18	65-85	-	-	-	0-5	2-5	55
Карбідні сплави зернисті та спечені	P	3	2,0	-	-	45	-	-	-	-	67



**Таблиця А.3 – Термодинамічні властивості речовин [8]**

Речовина	$\Delta H_f^0, 298,$ кДж/моль	$S^0_{298},$ Дж/(мольК)	$C_p^0, 298,$ Дж/(мольК)	Коефіцієнт рівняння $C_p = a + bT + cT^2$ Дж/(мольК)			Темпера- турний інтервал, К
				a	$b \cdot 10^3$	$c \cdot 10^{-5}$	
Al	0	28,33	24,35	2067	12,38	–	273–932
Cr		23,64	23,35	24,43	9,87	–3,68	298–2000
Fe		27,15	24,98	17,24	24,77	–	298–900
Ti		30,63	2502	21,10	10,54		298–1155
Cu		33,14	24,43	22,64	6,28		298–1357
Zr		38,99	25,44	21,97	11,63		298–1135
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		–1675,69	50,92	79,04	114,55		12,89
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	–1140,56	81,17	104,52	119,37	9,20	–15,65	298–1800
CuO	–162,00	42,63	42,30	43,83	16,77	–5,88	298–1359
FeO	–264,85	60,75	49,92	50,80	8,61	–3,31	298–1650
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	–822,16	87,45	103,76	97,47	72,13	–12,89	298–1000
SiO <sub>2</sub>	–903,46	46,86	44,35	56,02	15,41	–14,44	298–2000
TiO <sub>2</sub>	–933,03	49,92	55,21	75,04	0,00	–17,63	298–2000
ZrO <sub>2</sub>	–1097,46	50,36	56,05	69,62	7,53	–14,06	298–1480
V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	–1219,87	98,39	103,9	122,8	19,93	–22,69	298–1800
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	–1553,3	113,05	137,4	194,85	16,33	–55,35	298–943

**Таблиця А.4 – Фізико-механічні властивості деяких матеріалів**

Матеріал	Параметр		
	Коефіцієнт термічного розширення в $10^6, \text{град}^{-1}$	Модуль Юнга, $E \cdot 10^{-7}, \text{Па}$	Коефіцієнт Пуассона, $\nu$
X18H9T	16,60	20500	0,28
Fe	12,90	20650	0,28
Ni	18,00	8050	0,28
Mo	5,70	6980	0,35
W	4,30	11000	0,26
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,6	35200	0,33
ZrO <sub>2</sub>	7,2	14120	0,29
SiO <sub>2</sub>	4,3	8500	0,17
Сталь 30	12,1	19200	0,28

**Таблиця А.5 – Теплофізичні властивості матеріалів  
в інтервалі від 300 К до температури плавлення [9]**

Теплофізична властивість	Матеріал										
	NbC	ZrO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ti	Fe	Ni	W	Mo	Al	Cu	Ag
$T_{пл}, \text{К}$	3753	2973	2318	1943	1808	1723	3663	2873	933	1356	1233
$\rho_p, \text{кг/м}^3$	7700	5600	3750	4500	7860	8900	19250	10200	2700	8900	10490
$c_p, \text{Дж/кг К}$	520	750	1250	620	650	540	170	350	1000	400	270
$\lambda_p, \text{Вт/м К}$	30	2	8	15	45	65	110	120	240	340	365
$\alpha_p \cdot 10^5, \text{м}^2/\text{с}$	0,749	0,06	0,171	0,538	0,88	1,3	3,36	3,5	8,5	9	13,5

**Таблиця А.6 – Критерій Фур'є матеріалів для діаметру частинки 60 мкм**

Час $t$ , с	Назва матеріалу										
	NbC	ZrO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ti	Fe	Ni	W	Mo	Al	Cu	Ag
$1 \cdot 10^{-5}$	0,083	0,00666	0,019	0,06	0,0977	0,145	0,373	0,389	0,945	1,0	1,5
$1 \cdot 10^{-4}$	0,83	0,0666	0,19	0,6	0,977	1,45	3,73	3,89	9,45	10	15
$1 \cdot 10^{-3}$	8,3	0,666	1,9	6,0	9,77	14,5	37,3	38,9	94,5	100	150
$1 \cdot 10^{-2}$	83	6,66	19	60	97,7	144,5	373	389	945	1000	1500

**Таблиця А.7 – Критерій Старка  $Sk$  і Стефана  $S$  деяких матеріалів**

Параметр	Назва матеріалу								
	ZrO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe	Ni	W	Mo	Al	Cu	Ag
$c_p$ , кДж/кг	1,25	1,48	0,78	0,59	0,202	0,47	1,19	0,49	0,295
$L$ , кДж/кг	706	1069	277	305	185	210	393	213	104
$S$	0,19	0,3116	0,196	0,3	0,25	0,155	0,354	0,32	0,286
$Sk$	$1,56 \cdot 10^{-2}$	$1,85 \cdot 10^{-3}$	$1,79 \cdot 10^{-4}$	$2,68 \cdot 10^{-5}$	$1,9 \cdot 10^{-4}$	$6,7 \cdot 10^{-5}$	$5,75 \cdot 10^{-7}$	$6,2 \cdot 10^{-6}$	$8,7 \cdot 10^{-7}$

*Примітка.* Розрахунок проводиться для частинки діаметром 60 мкм. Значення теплоємності бралися при температурі плавлення.

**Таблиця А.8 – Значення параметра  $b = Vi/Sk$  для окремих матеріалів**

Плазموутворюючий газ	Назва матеріалу									
	NbC	ZrO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	W	Mo	Fe	Cu	Ni	Ag	Al
Ar	6,68	13,4	28,6	20	52,3	52,6	198	243	1300	3050
He	36,6	73,5	156	110	285	286	1086	1322	7246	16700
N <sub>2</sub>	41,6	83,3	175	124	322	323	1226	1494	8196	18800
NH <sub>3</sub>	127	256	540	384	1000	1000	3773	4600	25157	58100
H <sub>2</sub>	208	416	909	625	1612	1618	6134	7692	40980	94300

**Таблиця А.9 – Критерій  $Vi$  окремих матеріалів в різних плазموутворюючих газах**

Плазموутворюючий газ	Ar	He	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	NH <sub>3</sub>
T <sub>g</sub> , К	10 <sup>4</sup>	10 <sup>4</sup>	4500–5500	3400–4100	3300–4000
ZrO <sub>2</sub>	0,21	1,15	1,3	6,5	4
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,0525	0,288	0,325	1,62	1
Ti	0,028	0,153	0,173	0,866	0,53
NbC	0,014	0,076	0,086	0,43	0,266
Fe	0,0098	0,051	0,0577	0,289	0,178
Ni	0,00646	0,0354	0,04	0,2	0,123
W	0,00382	0,0209	0,0236	0,118	0,0727
Mo	0,0035	0,0191	0,0216	0,108	0,066
Al	0,00175	0,009с	0,0109	0,054	0,0334
Cu	0,00123	0,0068	0,00765	0,038	0,0236
Ag	0,00115	0,0063	0,00715	0,0356	0,022

## Зміст

---

<b>Вступ</b> .....	3
<i><b>Лабораторна робота 1</b></i> Побудова структури та механізму створення покриття.....	6
<i><b>Лабораторна робота 2</b></i> Вибір складу, методів отримання та технології нанесення функціональних покриттів.....	14
<i><b>Лабораторна робота 3</b></i> Дослідження механічної та фізико-хімічної взаємодії компонентів основи та покриття .....	20
<i><b>Лабораторна робота 4</b></i> Дослідження термодинамічних процесів при газотермічному напилюванні .....	29
<i><b>Лабораторна робота 5</b></i> Дослідження процесу нагрівання частинок в плазмовому струмені .....	34
<b>Література</b> .....	41
<b>Додаток А</b> .....	42