

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання практичних занять з курсу

«Інженерія поверхні»

для студентів спеціальності 131. «Прикладна механіка»

денної і заочної форми навчання

Затверджено

на засіданні кафедри зварювання

Протокол № 12 від 30.06.2023

Харків
НТУ "ХПІ"
2023

Методичні вказівки до виконання практичних занять з курсу «Інженерія поверхні» для студентів спеціальності 131. «Прикладна механіка» денної і заочної форми навчання / уклад.: С. О. Лузан. – Харків : НТУ «ХП», 2023. – 46 с.

Укладач: С. О. Лузан

Рецензент Б.В. Сітніков

Кафедра зварювання

Зміст

Вступ	4
Практичне заняття № 1	
Методи визначення твердості металів і сплавів.....	5
Практичне заняття № 2	
Визначення моделі і механізму створення покриття.....	13
Практичне заняття № 3	
Оцінка взаємодії компонентів при формуванні композиційних покриттів.....	21
Практичне заняття № 4	
Визначення температури частинок при формуванні газотермічного покриття.....	30
Практичне заняття № 5	
Визначення фізико-механічних характеристик вакуумно-конденсаційних покриттів.....	35
Практичне заняття № 6	
Вимірювання міцності зчеплення покриття з основою.....	40
Практичне заняття № 7	
Визначення міцності матеріалу покриття.....	44

Вступ

Інженерія поверхні (surface engineering) відноситься до одного з нових напрямів в науці і технології, яке включає традиційні і інноваційні процеси нанесення захисних покриттів, модифікації поверхні деталей для отримання спеціальних властивостей, відмінних від основного матеріалу.

Метою викладання навчальної дисципліни «Інженерія поверхні» є – навчити магістрів застосовувати на практиці комплексний підхід при виборі найбільш раціонального способу відновлення або зміцнення деталей машин.

Дані методичні вказівки присвячені для надання методичної допомоги при виконанні практичних занять, рекомендованих програмою дисципліни "Інженерія поверхні".

Розраховані для студентів, які навчаються за спеціальністю 131. «Прикладна механіка».

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ №1 МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ТВЕРДОСТІ МЕТАЛІВ І СПЛАВІВ

Мета заняття

1. Освоїти методи вимірювання твердості металів і сплавів.
2. Вивчити пристрій твердомірів.
3. Визначити взаємозв'язок між твердістю і показниками міцності.

Загальні положення і вказівки до виконання теми

Твердість – це здатність матеріалу чинити опір проникненню в нього більш твердого тіла, званого індентором.

Це найбільш простий і оперативний метод контролю якості матеріалу виробу за механічними властивостями.

Класифікація методів оцінки твердості:

а) за діапазоном:

- макротвердість (навантаження 2Н – 30 000Н);
- мікротвердість (навантаження менше 2Н, глибина відбитка більше 0,2мкм)
- нанотвердість (глибина відбитка менше 0,2 мкм).

б) за механізмом навантаження:

- статичні методи;
- динамічні методи;
- кінетична твердість.

Індентором може служити:

- твердосплавний (сталевий загартований) кулька;
- алмазний конус;
- алмазна піраміда.

В даний час найбільш широко використовуються наступні статичні методи визначення твердості:

- твердосплавний (сталевий загартований) кулька;
- алмазний конус;
- алмазна піраміда.

Метод Брінелля заснований на вдавліванні в випробовуваний матеріал твердосплавного кульки діаметром 1; 2.5; 5; 10 мм при зусиллі від 15,6 до 3000 кГс

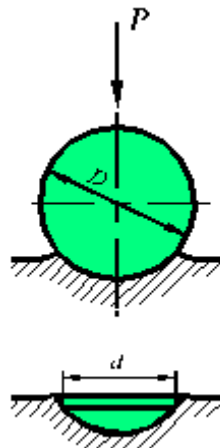


Рисунок 1 – Схема випробувань на твердість за методом Брінелля

Величина твердості по Брінеллю визначається як відношення зусилля вдавнення P до площі поверхні лунки F

$$HB = \frac{P}{F}$$

Розмірність числа твердості по Брінеллю – кгс / мм² або МПа.

Висловивши глибину відбитка h через діаметр кульки D і відбитка d і підставивши її значення в формулу для обчислення площі поверхні кульового відбитку F , Тримаються за Брінеллю

$$HB = \frac{2P}{\pi D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

Однак зазвичай твердість по Брінеллю на підраховують за формулою, а, знаючи діаметр лунки d , знаходять по перекладним таблицями.

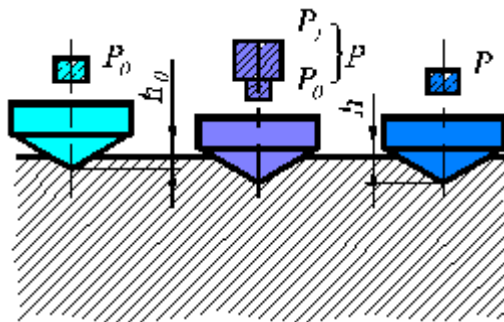
Найбільш поширеним приладом для випробування на твердість цим способом є автоматичний важільний прес, який отримав назву твердоміра Брінелля.

Величину навантаження і діаметр кульки вибирають в залежності від властивостей матеріалу і товщини випробуваного зразка. Регламентується також час витримки металу під навантаженням: 10, 30 або 60 с (найчастіше 30 с).

Для сталі в пластичному стані між твердістю HB і тимчасовим опором σ_B встановлена наступна залежність:

$$\sigma_B = 0,33 HB$$

Недолік даного методу в тому, що при вимірюванні дуже твердих тіл, кулька починає деформуватися. Тому способом Брінелля відчують метали з твердістю не більше 6500 HB [МПа] або 650 HB [кгс / мм²].



Таблиця 1 – Результати вимірювання твердості по Бринеллю

Номер виміру	Навантаження Р, кгс	Діаметр кульки D, мм	Діаметр лунки d, мм	Твердість HB	
				кгс/мм ²	МПа
1					
2					
3					
Середнє значення					

Метод Роквелла є універсальним, він застосовується для м'яких і твердих матеріалів. Для м'яких матеріалів в якості індентора використовують загартований сталеву кульку діаметром 1,58 мм, для твердих – алмазний конус з кутом при вершині 120°.

Цим методом можна також визначити твердість дуже тонких зміцнених шарів. Відбитки від конуса або кульки дуже малі, і тому можливі випробування готових деталей без їх псування. Твердість визначають по глибині відбитка h. Число твердості є безрозмірною величиною і вказується відразу на шкалі приладу.

Для отримання довше достовірних результатів випробування повторюють тричі і за число твердості приймають середнє арифметичне з трьох значень.

На індикаторі приладу є дві шкали – (А, С) і В.

Таблиця 2 – Умови визначення твердості по Роквеллу

Шкала	Позначення	Индентор	Навантаження Р, кгс
А	HRA	Алмазний конус	60
В	HRB	Сталева кулька	100
С	HRC	Алмазний конус	150

Найбільш часто використовують шкали В і С. Шкала А служить в основному для вимірювання твердості тонкого шару (наприклад після азотування, ціанування).

Для порівняння значень твердості, отриманих при вимірюванні за різними шкалами, їх за допомогою таблиці переводять в НВ.

Таблиця 3 – Результати вимірювання по Роквеллу

Номер замера	Твердість HRB	Твердість НВ	
		кгс/мм ²	МПа
1			
2			
3			
Середнє значення			

Таблиця 3 – Результати вимірювання по Роквеллу

Метод Віккерса заснований на вдавлюванні в випробуваний зразок алмазної піраміди при навантаженні 5 – 100 кгс. Потім вимірюються дві діагоналі утворився відбитка, що має форму ромба. За середнім значенням діагоналей за допомогою перекладних таблиць або за формулою визначають твердість

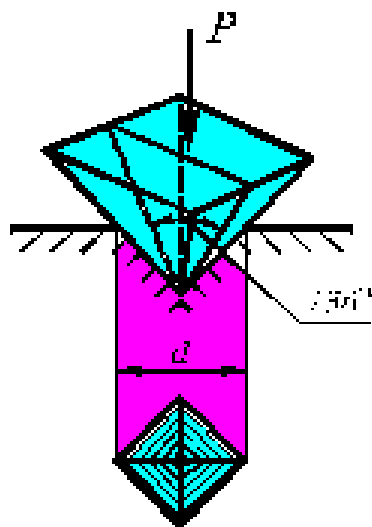


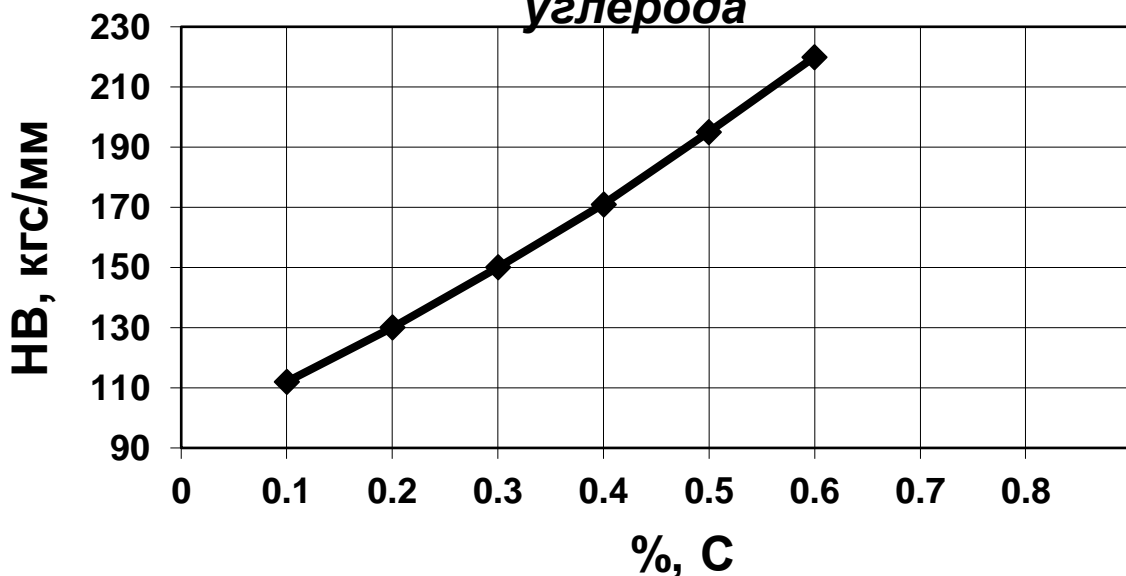
Рисунок 3 – Схема випробування на твердість по Віккерсу

Номер замера	Навантаження Р, кгс	Діагональ відбитка, мм	Діагональ отпечатка, мм	твердість HV	
				кгс/мм ²	МПа
1					
2					
3					
Середнє значення					

Числа твердості по Віккерсу і Брінелю мають однакову розмірність (кгс / мм² або МПа) і для матеріалів до HV 450 кгс / мм² практично збігаються. Разом з тим, вимірювання пірамідою дають більш точні значення для матеріалів з високою твердістю, ніж вимірювання кулькою або конусом.

Твердість залежить від хімічного складу і структури сплаву. Так, наприклад, зі збільшенням вмісту вуглецю твердість отожженої сталі зростає в пропорційній залежності. Знаючи вміст вуглецю в сталі, можна, користуючись графіком, визначити її твердість, і навпаки.

Зависимость твердости отожженной стали от содержания углерода



Вплив вуглецю в сталі на твердість НВ і тимчасовий опір руйнуванню σ_b
Значення твердості не є постійною величиною для даного матеріалу. Воно залежить від умов випробування. Характер такої залежності визначається формою індентора.

При використанні сферичного індентора чим більше навантаження, тим вище твердість.

Номер образця	Твердість НВ, кгс / мм ²	Зміст вуглецю, %	Межа міцності σ_b , МПа
1			
2			
3			

Значення твердості не є постійною величиною для даного матеріалу. Воно залежить від умов випробування. Характер такої залежності визначається формою індентора.

При використанні сферичного індентора (мал 4, а) чим більше навантаження, тим вище твердість.

Для гострих індентора (конус, піраміда) – зі збільшенням навантаження твердість знижується (рис. 4, б).

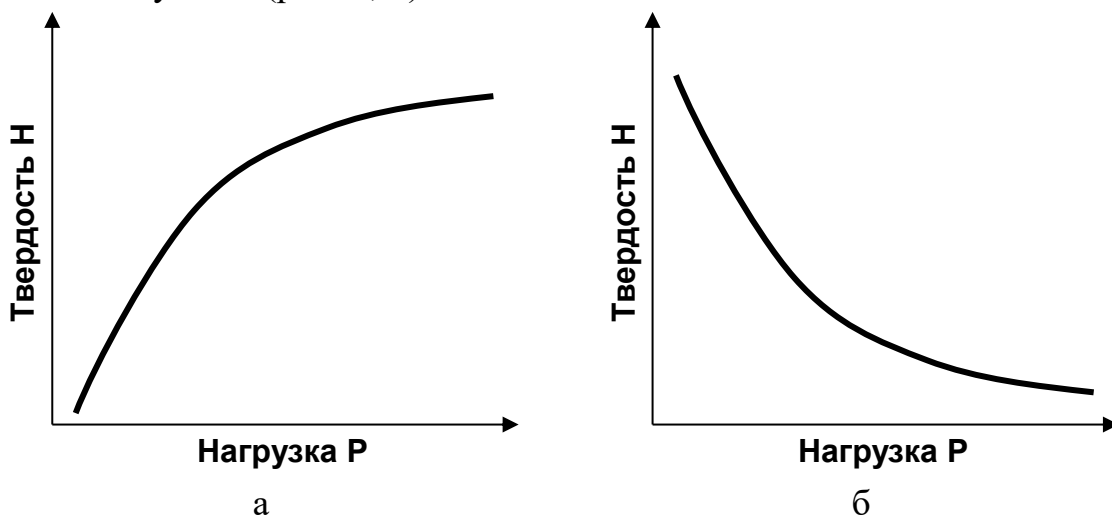


Рисунок 4 – Залежності твердості від навантаження при використанні сферичного (а) і гострих (а) індентором

Динамічні методи оцінки твердості матеріалів.

Динамічний метод оцінки твердості (непрямий) покладено в основу портативних твердомірів.

Переваги таких твердомірів: низька вартість, компактність, мобільність, автоматичний перерахунок і видача значення твердості, автономність (не вимагає наявності електромереж), від індентора залишається слабозаметний відбиток.

Недоліки - наявність похибки (через непрямого методу вимірювання), калібрування проводиться для певного матеріалу.

Динамічні твердомери засновані на принципі вимірювання відносини швидкості індентора при падінні і відскоку від поверхні, що перевіряється виробу (рис. 5).



Рисунок 5 - Динамічний твердомер

Ультразвуковий портативний твердомер – це сталевий стрижень з алмазної пірамідкою на кінці, який являє собою акустичний резонатор вбудованого автогенератора ультразвукової частоти (рис. 6). Під час впровадження піраміди в досліджуване виріб під дією необхідної сили каліброваної пружини, відбувається визначення значення власної частоти резонатора, яке визначається твердістю матеріалу.



Рисунок 6 – Ультразвуковий портативний твердомер

Контрольні питання

1. Що таке твердість?
2. Які існують методи визначення твердості?
3. Суть методу вимірювання твердості по Брінеллю.
4. Від чого заздрості вибір навантаження і діаметр кульки?
5. Залежність між твердістю і тимчасовим опором для пластичних матеріалів.
6. У чому недолік методу Брінелля?
7. Суть методу вимірювання твердості по Роквеллу, для яких матеріалів цей метод застосовується?
8. Суть методу Віккерса, його використання?
9. Як позначаються величини твердості

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 2

ВИЗНАЧЕННЯ МОДЕЛІ І МЕХАНІЗМУ СТВОРЕННЯ ПОКРИТТЯ

Мета заняття: на основі знань щодо класифікації, форми поверхні типових структур композиційних покриттів та конструкції конкретної деталі визначити модель і механізм створення покриття.

Теоретичні положення

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 даної основи з визначеним покриттям називається системою покриття. В це поняття включається також випадок модифікації поверхні матеріалу, хоча тут точніше була б назва «поверхнево – модифікована система».

Питання розробки конструкції деталі з покриттям, проектування технологічного процесу виготовлення або відновлення такої деталі, а також питання 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 компонентами покриття, а також між покриттям і основою деталі. У будь-якому випадку перед нанесенням покриття проводиться обробка поверхні деталі одним з відомих способів.

Загальні аспекти вибору матеріалу і способу створення покриття

Вибір матеріалу і способу створення покриття визначається наступними 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].

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 умовним, 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.

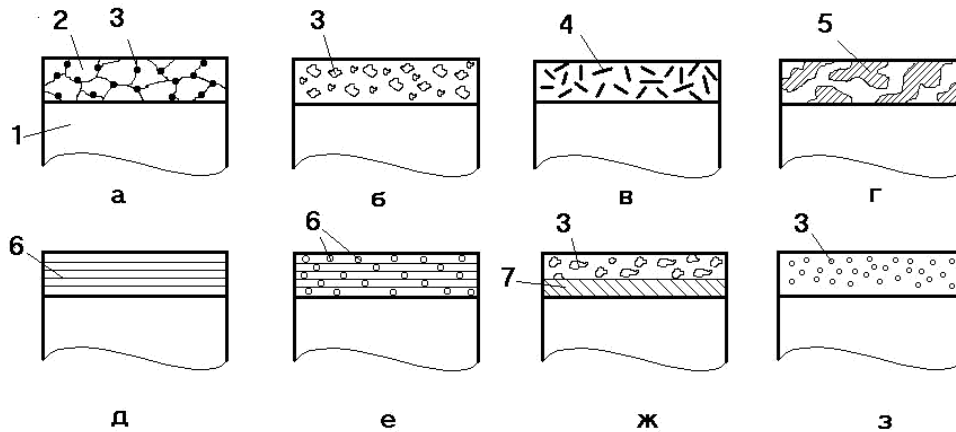


Рисунок 1 – Типові структури композиційних покриттів:

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

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 ρ , рівним відношенню площі покриття $S_{\text{п}}$ до всієї площі поверхні виробу $S_{\text{в}}$, тобто $\rho = S_{\text{п}} / S_{\text{в}}$. Значення ρ коливається від 0 до 1.

За формою деталі в залежності 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). 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 і ін.), знижує вимоги до властивостей матеріалу

основи. Внаслідок цього основа може бути виготовлена з менш дефіцитного і більш дешевого матеріалу.

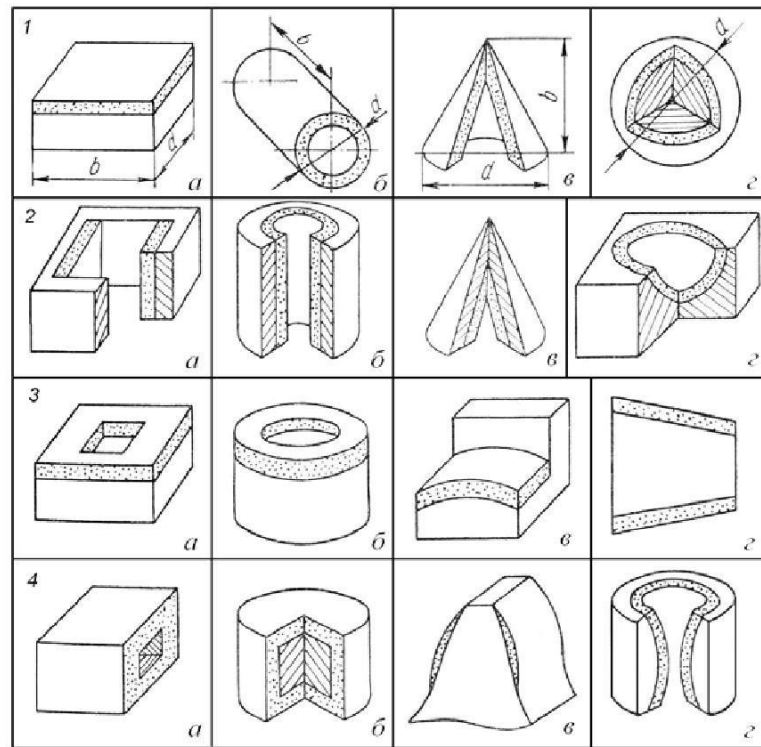
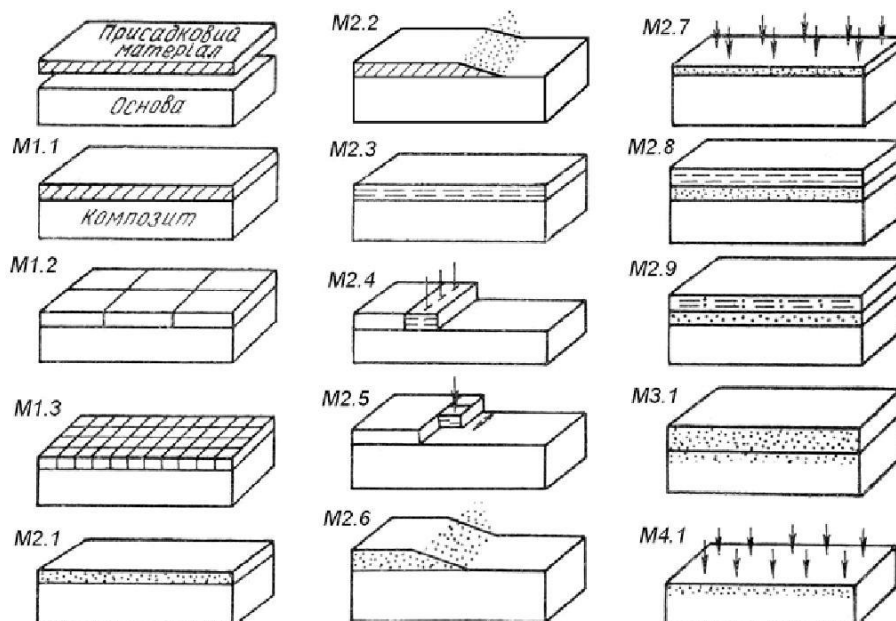


Рисунок 2 – Класифікація форм поверхні, що покривається

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. 3, табл. 1).



Риснок 3 – Різновиди моделей утворення покриттів

Таблиця 1 – Механізм утворення покриття і з'єднання його з основою

Модель	Присадковий матеріал	Механізм утворення покриття	Спосіб отримання покриття
1	2	3	4
M1.1	Оболонка: плоска, циліндрична, сферична складної форми	Пресування, спікання лиття, механічна обробка, обробка тиском і т.п.	Плакування, армування, напрусування, наклеювання, облицювання і 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, напорожування, напикання, фарбування, заливка
M2.4	— « —	— « —	Електрошлакове наплавлення, напайка, напорожування, фарбування
M2.5	— « —	— « —	Наплавлення, напаювання, фарбування
M2.6	Рідина, рідко – тверді частинки	— « —	Наплавлення, напилювання, 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 так далі
M4.1	—	Зміна структури	ПТО, ПФО, ПФТ.О. ПМО і так далі

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 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.

Модель **технології М2** передбачає активацію присадкового матеріалу і поверхневого шару основи до стану, при якому вони вже доволно, внаслідок прагнення системи до мінімуму вільної енергії, створюють покриття і зв'язок його з основою.

Існують наступні різновиди М2:

М2.1 – присадковий матеріал 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 М2.1 автоматизуються, устаткування працює стабільно з високою гарантією якості. Енерговитрати М2.1 вище енерговитрат при М1, тому що крім «енергії зв'язку» необхідно затратити «енергію стану» – нагрівання до температури спікання і витримка при даній температурі впродовж певного часу.

М2.2 – технологія, при якій активація присадкового матеріалу 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.

М2.3, М2.4, М2.5 – технології, при яких присадковий матеріал 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 – напаювання. Різниця М2.3, М2.4 і М2.5 складається в площі нанесення рідини на поверхню основи: М2.3 характеризується одночасним сполученням рідини з усією поверхнею, що покривається, (наморожування, напаювання, фарбування зануренням і т.п.), М2.4 – нанесенням рідини по визначеній частині поверхні, що покривається, (наплавлення стрічковим електродом, багатоелектродне, електрошлакове наплавлення, фарбування валками і т. п.); М2.5 – нанесенням рідини на поверхнею, що покривається, в «точці» (ручне, автоматичне наплавлення, фарбування щіткою і т.п.). М2.3 має найбільший ступінь автоматизації і продуктивність. Зі збільшенням номера моделі ступінь автоматизації і продуктивність знижуються. Характерна особливість М2.3, М2.4 і М2.5 – високі залишкові напруження, зниження яких можливе попереднім нагріванням основи і застосуванням рідко – твердих шлікерів.

М2.6 – технологія, при якій присадковий матеріал 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.

М2.7 – технологія, при якій присадковий матеріал диспергується до атомно – молекулярного стану, розганяється й осаджується на поверхні в вигляді компактного покриття. Активація здійснюється нагріванням до $T > T_{\text{вип}}$ і розгоном у розрідженій атмосфері.

М2.8 – технологія, при якій активація присадкового матеріалу здійснюється за рахунок дисоціації рідини до атомно – молекулярного стану і придання заряду; створення покриття відбувається за рахунок електрокристалізації при осадженні (розрядці).

М2.9 – відрізняється від М2.8 тим, що в електролітичному розчині присутні в зваженому стані дисперсні частинки, що захоплюються зарядженими (КЕП) або, маючи власний заряд, направляються до поверхні, що покривається, під дією електричного поля, де й осаджуються при розрядці (електрофорез).

М3.1 – технологія, при якій покриття створюється за рахунок хімічної обробки поверхневого шару основи.

М4.1 – 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 метало – керамічних покриттів кожний з основних класів матеріалів, застосовуваних як матриця 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.

Завдання до виконання практичної роботи

На основі заданої деталі за її призначенням з урахуванням умов експлуатації, виду зношення, способу відновлення або зміцнення (табл. 2) вибрати матеріал і обґрунтувати спосіб отримання покриття. Визначити механізм створення композиційного покриття, накреслити структуру композиційного покриття, що буде отримане, та модель його утворення.

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.

Таблиця 2 – Варіанти індивідуальних завдань

№	Найменування деталей	Матеріал	Вид зношення	Спосіб відновлення (зміцнення)
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 завглибшки до 0,2 мм.	Напилення самофлюсуючими матеріалами з оплавленням. Електролітичне хромування
4	Колінчастий вал	Сталь 45 (у парі з Б-83 і АСМ)	Биття загартованих шатунних шийок 0,5-1,0 мм. Риски, забоїни, корозія, зношення до 0,2-0,4 мм (для незагартованих шийок)	Напилення шийок валів
5	Розподільний вал	Сталь 20Х (у парі з штовхачем з Ш 50 і втулки з БрО6Ц6С3)	Стирання кулачків до 0,4 мм; втомне викрашування на глибину до 1мм	Напилення аргоно - азотною плазмою; газоплазмове напилення
6	Кулачковий вал паливного насоса	Сталь 12ХН3А (у парі з роликом на ШХ15 і втулкою з ЛС59-1)	Втомний знос поверхні кулачка і цапфи: до 0,5-0,6 мм	Газополуменеве напилення поверхні цапфи; електродугове наплавлення в середовищі аргону або плазмове наплавлення кулачка
7	Корпус водяного насоса	Бронза 03Ц7С5Н1 (у парі зі стальним робочим колесом)	Стирання бічної і торцевої поверхні камери на глибину до 0,6-1,5мм	Наплавлення або напилення бічної поверхні

8	Лопасті суднових гребних гвинтів діаметром 2800-3200 мм	Сталь 25Л 20ХГНДЛ латунь бронза	Кавітаційна ерозія завглибшки до 5-8 мм на загальній площі до 0,06 м ²	Плазмове напилення при відновленні зон ерозії. Плазмове напилення або наплавлення при спрощенні нових лопатей.
9	Лопатка турбіни	Жаростійкі сталі	Зношення ребра лопатки	Електронно - променеве випаровування.
10	Свердла, фрези, мітчики	Р6М5	Зношення ріжучої поверхні	Методом КІБ
11	Різці для металообробки	T15K6, T5K10	Зношення ріжучої поверхні	Методом КІБ
12	Хімічна апаратура	Сталь 10	Корозія	Плазмове напилення
13	Елементи електроізолятора	Ст. 3	Електричний пробій та ерозія	Плазмове напилення
14	Металоконструкції	Ст. 3	Атмосферна корозія	Електродугове напилення
15	Зміцнення матриці штампа	5ХВС	Зношення робочої поверхні	Детонаційне напилення

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 3 ОЦІНКА ВЗАЄМОДІЇ КОМПОНЕНТІВ ПРИ ФОРМУВАННІ КОМПОЗИЦІЙНИХ ПОКРИТТІВ

Мета заняття: оцінити термодинамічну та механічну сумісність матеріалів матриці і покриття.

Теоретичні положення

Вибір оптимального складу і структури є найважливішим етапом проектування 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).

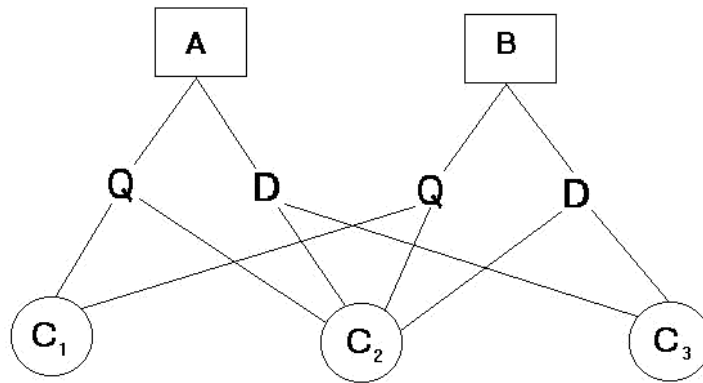


Рисунок 3.1 – Схема сполучення властивостей компонентів композиційного покриття: A і B – компоненти; Q – корисні властивості; D – недоліки компонентів; C_1 , C_2 , C_3 – варіанти матеріалу покриття.

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 3.1.

Таблиця 3.1 – Порівняльна якісна характеристика матеріалів матриці КП

Матриця	Матеріал матриці	Властивості матриці										
		Щільність	Міцність	Термостійкість	Теплопровідність	Електропро- відність	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
	Фторопласт	С	Н	С	Н	–	В	В	Н	В	С	В
Керамічна і мінеральна	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: перший при нанесенні покриття; другий 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.

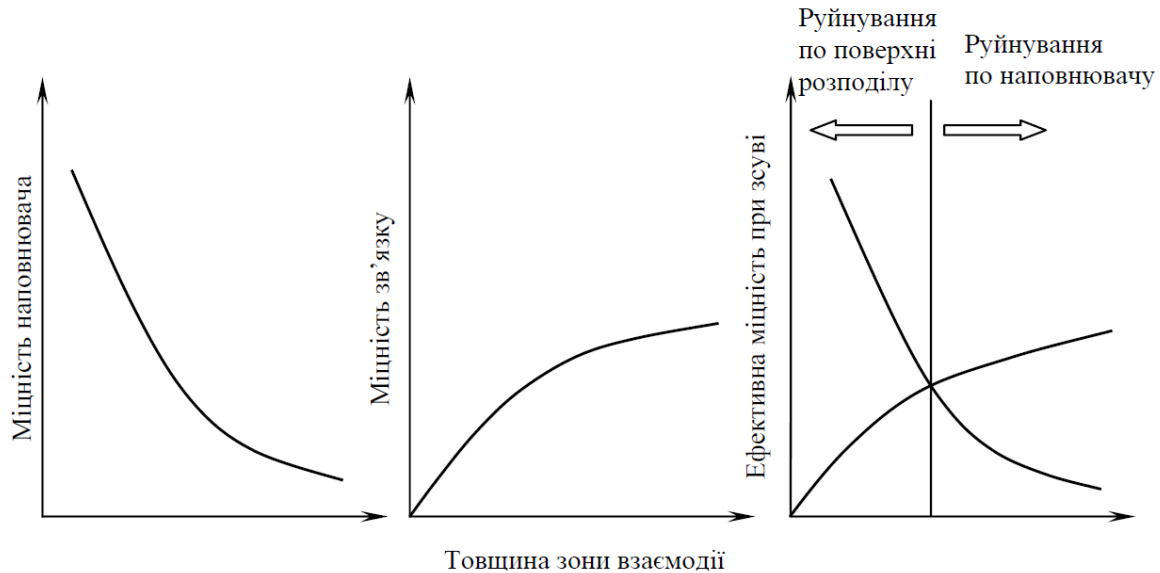


Рисунок 3.2 – Вплив товщини зони взаємодії компонентів на міцність композиційного покриття

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

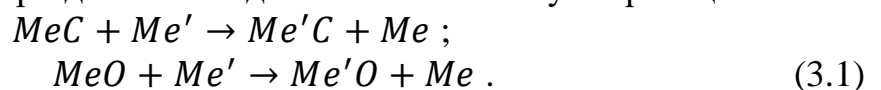
Основним джерелом інформації про сумісність матеріалів у конкретних умовах є експеримент. Разом з тим первинна інформація про принципову можливість взаємодії компонентів у КП може бути отримана з діаграм стану систем матеріалів (якщо такі маютьсся), термодинамічних розрахунків, аналізу кінетики взаємодії 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:

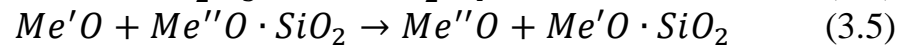
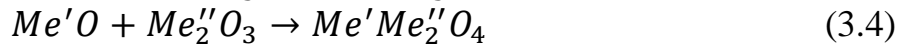
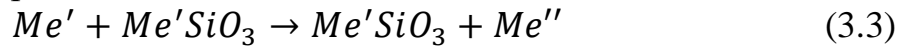


Для взаємодії кераміки з металами характерне в основному наявність трьох схем:

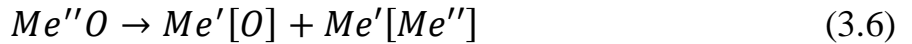
1. Пряма взаємодія відповідно рівнянню:



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



Взаємодія за рахунок утворення твердих розчинів компонентів кераміки з деякими металами по схемі:



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

Очевидно, що при $\Delta G_0 > 0$ хімічна взаємодія неможлива, а при $\Delta G_0 \leq 0$ – можлива.

Виходячи з умови меншої спорідненості до кисню, найбільш вигідні метали, оксиди яких мають максимальне значення G_0 (мінімальне по абсолютній величині).

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 спрацьовування 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 являє собою обернену деформацію, 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 ϵ , що визначається відомим законом Гука: $P = ES \frac{\Delta l}{l}$, тобто

$$\sigma = E\epsilon \quad (3.7)$$

де l – вихідна довжина зразка; S – площа поперечного перерізу зразка; σ –

напруження при розтягненні; ε – 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 γ виникають під дією напруження зсуву (дотичного напруження) τ . 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 α , а саме:

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

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

$$G = E/2(1 + \nu) \quad (3.11)$$

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

$$Y = f(X_1, X_2 \dots X_n)$$

Увівши допущення про лінійну адитивність, зазначену фізичну величину представимо у вигляді

$$Y = C_1 X_1 + C_2 X_2 + \dots + C_n X_n,$$

де X_1, X_2, \dots, X_n являють собою 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

$$E_K = E_M(1 - V_H) + E_H \cdot V_H \quad (3.14)$$

де E_M і E_H – модулі пружності матеріалів матриці і наповнювача; V_H — об'ємна частка наповнювача в КП.

Коефіцієнти термічного розширення (α_K), теплопровідності – (λ_K) і електропровідності (δ_K) КП можна розрахувати за допомогою рівнянь

$$\begin{aligned} \alpha_K &= \alpha_M V_M + \alpha_H V_H; \\ \lambda_K &= \lambda_M V_M + \lambda_H V_H \\ \delta_K &= \delta_M V_M + \delta_H V_H \end{aligned} \quad (3.15)$$

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

$$\sigma_K = \sigma_M V_M + \sigma_H V_H + \sigma_{п.ш.} V_{п.ш.} \quad (3.16)$$

де σ_M σ_H $\sigma_{п.ш.}$ – 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 мм² при 20 °С має внутрішній діаметр 1050 мм:

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

б) Визначити тангенційне зусилля F , що виникає після охолодження втулки до 20 °С.

Розв'язання:

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

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

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

З врахуванням кільцевого зазору отримаємо діаметр валу:

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

Отже, діаметр валу повинен бути 1051 мм

б) З закону Гука маємо

$$\sigma = \varepsilon E = \left(\frac{d_T - d_{20}}{d_{20}} \right) E = F/S$$

Звідки

$$F = \left(\frac{d_B - d_{20}}{d_{20}} \right) ES$$

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 скловання, рівної 500 °C. Модуль пружності склоподібної емалі складає $E_e = 7000$ кгс / мм², а коефіцієнт термічного розширення $\alpha = 8 \cdot 10^{-8}$ град⁻¹. Які напруження в емалі σ_e при 20 °C?

Розв'язання:

Так як відносне подовження $\Delta l/l$ являє собою суму термічного розширення, пластичної і пружної деформації, і в даному випадку $(\Delta l/l)_e = (\Delta l/l)_z$, стає справедливим співвідношення:

$$\alpha_e \Delta T + \frac{\sigma_e}{E_e} = \alpha_z \Delta T + \sigma_z / E_z$$

Враховуючи, що $S_z = 2,5 S_0$ та $P_z = -P_e$, отримуємо $\sigma_e = -2,5 \sigma_z$.

Далі визначаємо σ_e :

$$\sigma_B = \frac{\Delta T (\alpha_z - \alpha_B)}{1/E_B + 1/2,5 \cdot E_z}$$

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

Таким чином в емалевих покриттях виникають напруження стискання.

Завдання до виконання практичної роботи

Завдання 1

Розрахувати ізобарно – ізотермічний потенціал можливих реакцій при газотермічному напиленні компонентів, згідно з варіантом завдань (див. табл.3.2).

Таблиця 3.2 – Варіанти індивідуальних завдань

№	Рівняння реакції	Температура в контакті, T_k , °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 нагріву 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 діаметру втулки d і діаметр валу d_1 обрати з табл. 3.3 згідно варіанту.

2) Визначити напруження в залізному листі товщиною h , що покритий по обидва боки склоподібною емаллю товщиною h_1 мм. Якщо технологічна операція скловання емалі проводиться при температурі 500 °C.

Варіанти завдань приведені в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Варіанти індивідуальних завдань

№	$S, \text{мм}^2$	$d, \text{мм}$	$d_1, \text{мм}$	$h, \text{мм}$	$h_1, \text{мм}$	$T, \text{°C}$
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
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

Контрольні питання

8. Які елементи частіше використовуються в якості матеріалів матриці, дати їх характеристику?
9. Назвати способи забезпечення сумісності компонентів у КП.
10. Дати характеристики способам сумісності компонентів у КП.
11. Як можна керувати величиною сумісності?
12. Що є основним джерелом інформації про сумісність матеріалів у конкретних умовах?
13. Назвіть основні види теплового розширення твердих тіл.
14. При визначенні яких характеристик використовують властивості лінійної адитивності (правило сумішей)?

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 4 ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ЧАСТИНОК ПРИ ФОРМУВАННІ ГАЗОТЕРМІЧНОГО ПОКРИТТЯ

Мета заняття: визначити температуру частинок при контактуванні з основою і відсоткове відношення частинок різної температури при формуванні композиційного покриття.

ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ

Суттєвий інтерес при вивченні проблеми нанесення жаростійких покриттів методами газотермічного напилювання викликає визначення ступеня нагріву 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 тепла, 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 напилення 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 нагріву T_1 . При цьому підведення тепла, що передається матеріалом і газоповітряним потоком, стає рівним втратам тепла пластиною за рахунок теплопровідності і радіації. Температура пластинки, вимірюється за допомогою термометри 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 закріпилися 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 тепла Q , кал/с, переданого частинками мідній пластині за одну секунду, визначається як:

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

де W – потужність нагрівача, Вт.

Кількість тепла H , кал/моль, переданого мідній пластині за тих самих умов одним моєм напилюваного 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 тепла H_2 при температурі T_2 , що дорівнює температурі плавлення $T_{пл}$, напилюваного матеріалу, та порівняємо з кількістю тепла H_1 . Далі обчислимо процентне співвідношення частинок, що знаходяться в різному тепловому стані (у тому числі 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. За цим рисунком визначаємо процентний 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 напилення.

Приклад 1.

При відстані між соплом і основою, рівному 50 мм, і оптимальному режимі нанесення тривалість формування покриття до досягнення рівноважної температури $T_1 = 436^\circ\text{C}$ складала $t = 165$ с., вага осадженого покриття

$G_1=6,62$ г, потужність нагрівача, що витрачається для нагрівання мідної пластини до температури T_1 , $W = 154$ Вт.

Для даного режиму напилювання втрати нанесеного матеріалу склали 50%. В якості матеріалу покриття виберемо стабілізований двоокис цирконію, як один з найбільш тугоплавких матеріалів.

Визначити процентний 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 напиленні дорівнює:

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

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

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

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

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

Кількість тепла, що виділяється на зразку під час формування покриття, приймаючи значення молярної теплоємності ZrO_2 рівним $17,915$ Дж/(моль·К): $H_1=44100$ кал/моль.

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

З чого випливає висновок, що в даному випадку не всі частинки нанесеного матеріалу потрапили на пластинку в розплавленому стані.

Приклад 2.

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

Згідно з розрахунками отримано:

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

За графіком (рис.4.1) можна визначити процентний вміст частинок В, що потрапили на пластинку з температурою, що дорівнює температурі плавлення двоокису цирконію, тобто 2715°C . Для відстані між соплом і поверхнею,

в 50мм:
$$B_1 = \frac{a_1}{H_2} = 60,2\%$$

для відстані в 90 мм:
$$B_2 = \frac{a_2}{H_2} = 13,2\%$$

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.

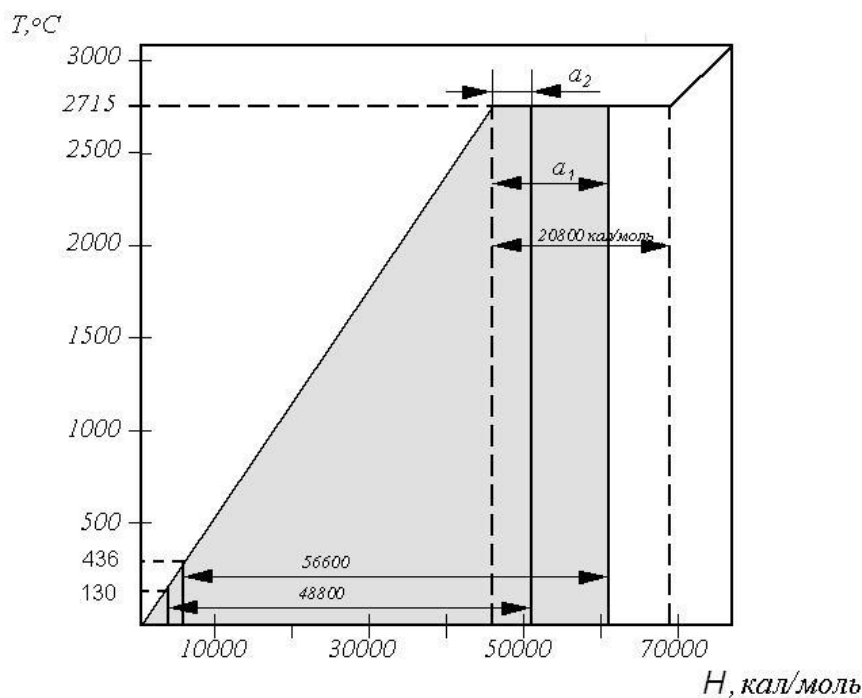


Рисунок 4.1 – Тепловий баланс охолодження частинок ZrO_2 при формуванні покриття.

Завдання до виконання практичної роботи

При відстані напилення, рівної 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 даного режиму напилювання втрати нанесеного матеріалу склали K . В якості матеріалу покриття вибрано стабілізований двоокис цирконію.

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

Данні згідно варіанту приведені в табл. 4.1.

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

Таблиця 4.1 – Варіанти індивідуальних завдань

№	l , мм	T_l , °C	t , с	G_l , 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

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 напилення на процентне співвідношення розплавлених частинок, що потрапили на поверхню?

4. Як пов'язати фізичні властивості матеріалу, що напилюється, з процесами формування і отриманою структурою покриття?

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 5

ВИЗНАЧЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВАКУУМНО-КОНДЕНСАЦІЙНИХ ПОКРИТТІВ

Мета заняття: набуття практичних навиків, щодо визначення основних фізико-механічних характеристик вакуумно-конденсаційних покриттів.

ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ

Характеристики зносостійких покриттів (ЗП), що відрізняються за фізико-механічними ознаками, можна поділити на дві групи:

1. Структурні параметри;
2. Механічні властивості.

До структурних параметрів відносяться:

а) Період кристалічної решітки a , нм;

б) Вектор Бюргера b , нм – міра викривлення кристалічної решітки матеріалу навколо дислокацій, він виступає характеристикою дислокації, визначає її енергію, рухомість, тощо;

в) Напівширина рентгенівської лінії β , град, збільшення якої свідчить про викривлення кристалічної решітки;

г) Параметр текстури J_{111}/J_{200} , що показує, яка частка кристалів в ЗП має переважну орієнтацію в кристалографічній площині;

д) Залишкові напруження 1-го роду σ_0 , Па – напруження, що виникають в ЗП в процесі конденсації в наслідок відмінності коефіцієнтів термічного розширення і перепадів температур при конденсації (теплова складова), взаємодії кристалів ЗП з основою і між собою (структурна складова), тощо. Залишкові напруження можуть бути як стискаючими, так і розтягуючими.

Дослідження структурних параметрів ЗП проводять методами рентгенодифрактометрії. Механічні властивості визначають як експериментальним, так і розрахунковим шляхом. До перших відносяться:

1. Мікротвердість H_μ , ГПа визначають методом індентування алмазною пірамідкою з квадратною основою (піраміда Віккерса) або з ромбічною основою (піраміда Кнупа) на мікротвердометрі (ПМТ-3). Глибина занурення індентора при цьому складає 1 – 1,5 мкм (при рекомендованих значеннях навантаження). Мікротвердість за Віккерсом визначають за формулою:

$$H_\mu = 1,854 \frac{P}{d^2} \quad (5.1)$$

де P – нормальне навантаження, прикладене до алмазного наконечника;
 d – середнє арифметичне значення довжин обох діагоналей квадратного відбитка.

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

2. Коефіцієнт відшарування K_0 використовують для визначення міцності зчеплення ЗП з основою. При визначенні коефіцієнта K_0 використовують метод алмазного індентування на твердометрі (ТК-2М) зразків з ЗП.

Коефіцієнт K_0 розраховують за формулою:

$$K_0 = \frac{S_0}{S_z} \quad (5.2)$$

де S_0 – площа відшарування навколо лунки від індентора; S_z – площа занурення індентора.

3. Коефіцієнт тріщиностійкості $K_{тр}$ використовують для визначення тріщиностійкості ЗП також шляхом алмазного індентування. Коефіцієнт $K_{тр}$ визначають за формулою:

$$K_{тр} = \frac{S_v}{S_{pv}} \quad (5.3)$$

де S_v – площа відшарування (руйнування покриття); S_{pv} – площа «потенційно можливого відшарування» (площа багатокутника, що проведена по вершинам радіальних тріщин з вирахуванням площі занурення індентора).

4. Модуль Юнга E , ГПа – константа, що дорівнює відношенню напруження розтягу і відносного видовження зразка. При дослідженнях ЗП використовують методику, що базується на алмазному індентування ЗП пірамідою Кнупа, при цьому модуль Юнга розраховують за формулою:

$$E = \frac{H_\mu \alpha}{\frac{b_1}{d_1} - \frac{b}{d}} \quad (5.4)$$

де H_μ – мікротвердість за Кнупом, ГПа; α – безрозмірний коефіцієнт ($\alpha = 0,45$); b_1, b – мала діагональ відбитка піраміди Кнупа відповідно на свинцевому зразку і на зразку, що досліджується; d_1, d – велика діагональ відбитка.

Ряд механічних властивостей ЗП можна визначити лише розрахунковим шляхом, тому що на даний час відсутня методика їх експериментального визначення.

1. Модуль зсуву G , ГПа – співвідношення дотичного напруження під час скручування зразка до деформації зсуву, визначають за формулою:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (5.5)$$

де ν – коефіцієнт Пуассона (для ЗП приймають 0,3).

2. Границя текучості σ_T , ГПа – напруження, при якому починає розвиватись пластична деформація. Для нанокристалічних матеріалів, якими є ЗП, визначають за формулою:

$$\sigma_T = \frac{H_\mu}{3} \quad (5.6)$$

3. Тріщиностійкість ЗП визначають за енергетичним та силовим критеріями, до яких відносяться відповідно поверхнева енергія γ і критичний коефіцієнт інтенсивності напружень K_{IC} :

$$\gamma = \frac{Gb}{8} \quad (5.7)$$

де b – вектор Бюргера, нм $b = a/\sqrt{2}$, (a – період кристалічної решітки матеріалу ЗП, нм).

$$K_{1C} = \sqrt{\frac{2E\gamma}{1-\nu^2}} \quad (5.8)$$

Для спрощення визначення коефіцієнта K_{1C} незалежно від значення коефіцієнта Пуасона (у випадку плоского напруженого стану) допускається заміна $K_{1C} = K_C$, де

$$K_C = \sqrt{2E\gamma} \quad (5.9)$$

Як видно з приведених формул, для розрахунку властивостей ЗП необхідні експериментальні дані по періоду кристалічної решітки і мікротвердості. Регресійні залежності періоду кристалічної решітки і мікротвердості, представлені в табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Регресійні залежності мікротвердості і періоду кристалічної решітки покриттів

ЗП	Рівняння	Коефіцієнт кореляції
TiN	$H_\mu = 3,526 \cdot 10^{-5} \cdot x^2 - 5,7 \cdot 10^{-2} \cdot x + 43,541$	0,972
	$a = -6,25 \cdot 10^{-11} \cdot x^3 + 7,569 \cdot 10^{-8} \cdot x^2 - 2,994 \cdot 10^{-3} \cdot x + 0,428$	0,998
TiZrN	$H_\mu = -0,44 \cdot 10^{-7} \cdot x^5 + 8,452 \cdot 10^{-6} \cdot x^4 - 5,643 \cdot 10^{-4} \cdot x^3 + 1,491 \cdot 10^{-2} \cdot x^2 + 6,756 \cdot 10^{-2} \cdot x + 30,998$	0,999
	$a = 4,875 \cdot 10^{-6} \cdot x^2 + 1,275 \cdot 10^{-4} \cdot x + 0,423$ (тільки в інтервалі 0 – 40 % Zr)	1,0
TiMoN	$H_\mu = 3,246 \cdot 10^{-3} \cdot x^3 - 1,356 \cdot 10^{-2} \cdot x^2 + 1,116 \cdot x + 25,284$	0,996
	$a = 8,813 \cdot 10^{-9} \cdot x^3 - 2,726 \cdot 10^{-6} \cdot x^2 + 1,491 \cdot 10^{-4} \cdot x + 0,423$	0,996

Вплив технологічних параметрів процесу нанесення і складу покриття на фізико - механічні властивості

Вплив температури конденсації T_K . Температура конденсації істотно впливає на властивості ЗП (табл. 5.2). Так, зниження величини T_K приводить до збільшення дефектності ЗП і підвищенню його механічних властивостей, що виражається в зниженні значень періоду кристалічної решітки, підвищенні твердості, залишковою стискаючого напруження (σ_0), отже, зносостійкості ЗП.

В той же час при зниженні температури T_K відбувається зменшення міцності зчеплення ЗП з основою (зростання коефіцієнта K_0). З точки зору здобуття найбільшої тріщиностійкості ЗП оптимальними є значення $T_K = 450 - 500$ °С.

Таблиця 5.2 – Вплив температури конденсації на структурні і механічні властивості

Температура конденсації T_K , °С	Структурні властивості		Механічні властивості	
	a, нм	$\sigma_0 \cdot 10^9$, Па	H_μ , ГПа	K_0
350	0,4250	-420	27,0	2,4
450	0,4250	-150	25,2	1,5
550	0,4249	-100	23,2	1,1
650	0,4242	+220	21,2	1,1

Вплив вмісту легуючого елементу. При легуванні ЗП простого складу (наприклад TiN) хімічними елементами (Zr, Mo, Cr, Fe, Al, Si та інш.) утворюються одно- і двофазні системи (наприклад, TiAlN і TiAlSiN – однофазні системи, TiZrN, TiMoN – двофазні). При цьому спостерігаються зміни періоду кристалічної решітки, які свідчать про наявність в ній залишкових пружних деформацій. Останнє підтверджується підвищеними залишковими стискаючими напруженнями в порівнянні з TiN (табл. 5.3).

Таблиця 5.3 – Параметри структури і механічні властивості покриттів

ЗП	a, нм	$\sigma_0 \cdot 10^9$, Па	H_μ , ГПа
TiN	0,4247	+190	26,0
TiZrN	0,4274	-500	41,5
TiFeN	0,4235	-750	31,4
TiAlN	0,4224	-840	40,0

Зміна складу ЗП відбивається на його мікротвердості і коефіцієнті відшарування, при цьому дані залежності носять екстремальний характер (рис. 5.1).

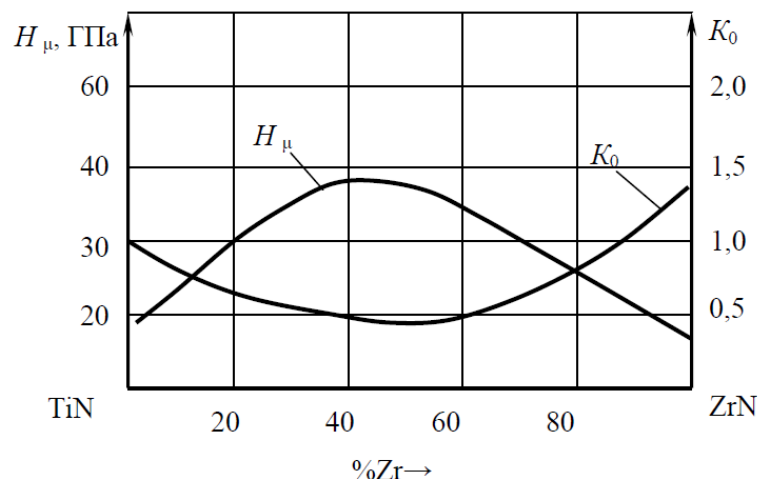


Рисунок 5.1 – Вплив складу покриття TiZrN на мікротвердість (H_μ), коефіцієнт відшарування (K_0)

В цілому для ЗП складного складу характерні підвищені структурні і механічні властивості в порівнянні з простими ЗП. При цьому найбільшу працездатність мають деталі з покриттям, для якого характерні одночасно висока мікротвердість і низький коефіцієнт відшарування (рис. 5.1).

Завдання до виконання практичної роботи

Згідно з варіантом індивідуального завдання (табл. 5.4) провести розрахунок мікротвердості (див. табл. 6.1), модуля зсуву (див. формулу 6.5) та коефіцієнта

тріщиностійкості покриття (див. формулу 5.9), орієнтовно прийняти модуль Юнга для TiN рівним 390 ГПа, TiZrN – 317 ГПа, TiMoN – 286 ГПа.

Таблиця 5.4 – Варіанти індивідуальних завдань

№ вар	ЗП	Вміст легуючого елементу, %		
1	TiZrN	10	20	29
2		20	30	39
3		25	32	35
4		30	35	40
5		35	40	44
6	TiMoN	10	20	31
7		20	31	39
8		25	36	45
9		30	38	47
10		39	46	50
11	TiN	10	22	30
12		20	29	40
13		30	39	47
14		35	43	50
15		45	50	56

Контрольні запитання

5. Які основні фізико – механічні параметри вакуумно-конденсаційних покриттів?
6. Які існують методи визначення мікротвердості покриття?
7. Як визначається коефіцієнт відшарування?
8. Як визначається коефіцієнт тріщиностійкості?
9. Охарактеризуйте вплив температура конденсації на властивості ЗП?
10. Які спостерігаються зміни структури та властивостей ЗП при легуванні?

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 6

ВИМІРЮВАННЯ МІЦНОСТІ ЗЧЕПЛЕННЯ ПОКРИТТЯ З ОСНОВОЮ

Мета заняття: навчитися вимірювати міцність зчеплення покриття з основою методом відриву конусного штифта

ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ

Міцність зчеплення покриття з основою є однією з основних характеристик якості покриття, яка в більшості випадків засвідчує його працездатність.

Широко розповсюджені якісні методи визначення міцності зчеплення: перегин листового зразка з покриттям до появи першої тріщини, випробування на удар із заданим зусиллям і т. ін.

Відомі і кількісні методи визначення міцності зчеплення покриття з основою. Найбільш поширеними з них є: клейовий метод і метод відриву штифта. На сьогодні не існує надійної методики визначення міцності зчеплення покриття з основою. Клейовий метод є стандартизованим, але має суттєві недоліки: кращі клеї мають міцність не вище 20...50 МПа на розрив, тому не дозволяють дослідити високоякісні покриття з високою міцністю зчеплення з основою. Крім того, розрахована за цією методикою міцність залежить від діаметра зразка, від ступеня проникнення клею в середину покриття та ін.

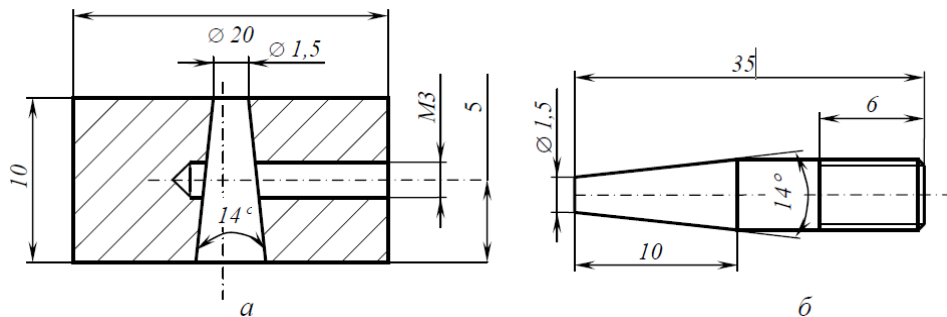


Рисунок 6.1 – Зразок для вимірювання міцності зчеплення покриття з основою:
a – оправка; *б* – штифт

Метод відриву штифта позбавлений багатьох перелічених недоліків, але має інші, не менш суттєві:

- складність виготовлення і підгонки зразків;
- вплив контактної взаємодії елементів основи на точність вимірювання;
- можливість випробувань лише на спеціальних зразках;
- похибки вимірювань, які пов'язані з використанням збірної основи.

На рис. 6.1 зображений зразок, який використовується для визначення міцності зчеплення покриття з основою методом відриву конусного штифта.

Зразок складається з оправки і штифта, який закріплений гвинтом М3.

Пристосування виготовляють таким чином, щоб торець штифта був в одній площині з поверхнею оправки.

Визначення міцності зчеплення проводять на розривних машинах, або на спеціальних приладах, які дозволяють прикладати потрібні навантаження з контрольованою швидкістю їх зміни в часі.

Найбільш зручними є універсальні машини типу 1253У-2-1 і 1253У-2-2. Вони призначені для статичних випробувань зразків на розтягування, стискування, вигіб та інші види механічних випробувань у широких межах випробувальних навантажень від 1,96 до 19620 Н (від 0,2 до 2000 кгс), швидкості деформування від 0,2 до 100 мм/хв і температур від 50 до 1200 °С в тому числі негативних від -5 до -150 °С (від 223 до 123 К). Але якщо потрібно провести вимірювання тільки в нормальних умовах, можна скористатися більш простими і дешевими нестандартними приладами. Наприклад, схема якого показана на рис. 6.2.

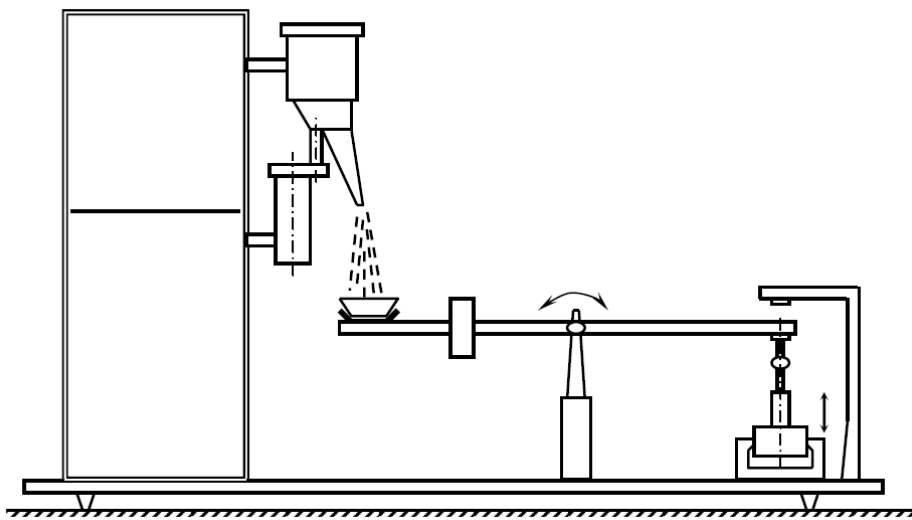


Рисунок 6.2 – Схема приладу для вимірювання міцності зчеплення покриття з основою:

1 – дозатор порошкового матеріалу; 2 – знімна ємність;
3 – важіль; 4 – шарнірне пристосування; 5 – стіл

Прилад складається із столу 5, на якому встановлюється і закріплюється зразок, важеля 3, який одним кінцем закріплюється через спеціальне шарнірне пристосування 4 на штифті зразка.

На другому кінці важеля встановлена змінна ємність 2, в яку із заданою швидкістю насипається порошковий матеріал із живильника-дозатора 1. Після досягнення маси порошкового матеріалу відомої величини, відбувається відрив штифта від покриття. При цьому важіль піднімається уверх, натискає на мікровимикач, який вмикає привід живильника. Якщо відомі плечі важеля і маса порошку у ємності, можна підрахувати зусилля P , яке діяло на штифт:

$$\sigma = \frac{P}{F}, \text{ кг/мм}^2 \quad (6.1)$$

де F – площа поверхні торця штифта, мм², або:

$$\sigma = \frac{4P}{\pi d^2}, \text{ кг/мм}^2 \quad (6.2)$$

де d – діаметр штифта, мм.

Необхідне обладнання, прилади і матеріали

1. Штифтові зразки для напилення.
2. Газополуменева (плазмова) установка для напилення покриттів.
3. Аналітичні терези.
4. Прилад для вимірювання міцності зчеплення покриття з основою.
5. Порошковий матеріал для напилення.
6. Мікроскоп.

Порядок виконання роботи

1. На абразивно-струменевій установці провести підготовку поверхні зразків до напилення покриття.
 2. Розібрати зразки, промити спиртом, знову зібрати, зафіксувати штифти гвинтом.
 3. Запустити газополуменеку (плазмову) установку, вивести на режим, напилити зразки. Товщина покриття повинна становити 0,4...0,5 мм.
 4. Після охолодження зразків зняти гвинти, які фіксують штифти.
 5. Встановити напилений зразок на стіл приладу для вимірювання міцності зчеплення покриття з основою і закріпити його на столі прижимом.
 6. Врівноважити важіль за допомогою додаткового рухомого елемента при закріпленому з одного кінця шарнірному пристосуванні, а з другого – встановленої на важелі порожньої ємності.
 7. Закріпити шарнірне пристосування на штифті зразка.
 8. Включити привід живильника-дозатора, встановивши потрібну швидкість навантаження.
 9. Після вимкнення приводу, зняти ємність з порошковим матеріалом і зважити її на терезах. Результат занести до табл. 6.1.
 10. Повернути порошок до бункера живильника-дозатора і продовжити випробування для всіх зразків.
 12. Результати занести до табл. 6.1.
 13. Вимірювання провести для трьох зразків для кожного режиму або матеріалу.
- За дійсне значення міцності зчеплення покриття з основою приймаємо середнє значення із трьох вимірювань

Таблиця 7.1. Результати вимірювань та розрахунків

№ зразка	Діаметр Штифта, мм	Навантаження, Н	σ , Н/мм ²	$\sigma_{\text{сер}}$, Н/мм ²	Примітки

Вимоги до звіту по роботі

1. Привести мету роботи.
2. Дати короткий опис обладнання, яке використовувалось у роботі.
3. Описати порядок виконання роботи.
4. Привести в таблиці значення міцності зчеплення, підраховане за формулою (6.2) і середнє значення із трьох вимірювань.
5. Висновки по роботі.

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 7 ВИЗНАЧЕННЯ МІЦНОСТІ МАТЕРІАЛУ ПОКРИТТЯ

Мета заняття: навчитися вимірювати міцність матеріалу покриття, що отримане в умовах плазмового чи газополуменевого напилення

ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ

Формування покриття при плазмовому чи газополуменовому напиленні проходить шляхом поступового утворення шару матеріалу із окремих частинок.

Структура багат шарового напиленого покриття більш складна порівняно із компактним матеріалом. Напилений матеріал складається із структурних елементів – зерен, частинок, кульок, що обумовлює існування двох типів границь: між окремими деформованими частинками або між шарами покриття і між покриттям і основою. Границі, у свою чергу, характеризуються складною електронною і кристалічною структурою. Контактні процеси при ударі, деформуванні, твердінні, охолодженні частинок обумовлюють структуру і властивості покриттів, впливають на їх фізичико-механічні та теплофізичні параметри.

Однією із головних фізико-механічних характеристик матеріалу покриття є його міцність на розтяг. Границя міцності покриттів завжди значно нижча за границю міцності компактного матеріалу, тому що ця міцність обумовлена міцністю взаємодії між частинками, а не міцністю окремих частинок. Це обумовлює відмінність таких констант, як: критерій опору пружної деформації, модуль Юнга і коефіцієнт Пуассона. Ці фізичні характеристики необхідно знати для розрахунків інших важливих характеристик покриттів, наприклад, значень залишкових напружень, міцності зчеплення покриття з основою, впливу покриття на міцнісні властивості композиційного матеріалу “основа – покриття”.

Границю міцності різних металевих і неметалевих покриттів оцінюють на трубчастих зразках рис. 7.1. Покриття 1 наноситься на циліндричну поверхню двох зразків 2 і 3, які, за допомогою спеціальної оправки 5, щільно притиснуті у процесі напилення один до одного по границі контакту 4. Після напилення, покриття, за можливістю, шліфують, замірюють товщину h у районі ймовірного руйнування б – місця стиснення оправок-зразків, звільнюють від оправки і встановлюють на установку для випробування на розтяг.

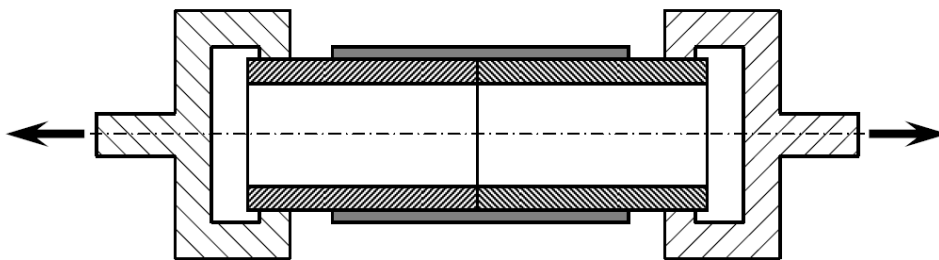


Рисунок 7.1 – Пристрій для оцінки міцності матеріалу напилених покриттів:
1 – покриття; 2, 3 – зразки; 4 – границя контакту; 5 – оправка;
б – місце руйнування

Міцність когезійних зв'язків оцінюють за формулою

$$\sigma_k = \frac{P_b^k}{F_n} \quad (7.1)$$

де P_b^k – максимальне зусилля, що вимірюється при випробуванні на розтяг, Н;
 $(F_n = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2))$ – площа перерізу покриття, мм²; d, D – діаметри перерізу зразків без покриття і з покриттям відповідно.

Необхідне обладнання, прилади і матеріали

1. Зразки – оправки.
2. Установка плазмового, газополуменевого напилення.
3. Випробувальна установка на розтяг.
4. Матеріал для напилення.
5. Мікрометр.

Порядок виконання роботи

1. Зібрати трубчасті оправки-зразки.
2. Замірити діаметр зразків d і занести значення у табл. 7.1.
3. На абразивно-струменевій установці провести підготовку поверхні зразків для напилення.
4. На установці для напилення нанести покриття.
5. Зашліфувати поверхню, яка напилена.
6. Замірити діаметр зразків з покриттям D і значення занести до табл. 7.1.
7. Звільнити зразки від оправки 5 і встановити їх на установку для випробування на розтяг.
8. Розірвати зразок у зборі з покриттям, визначити максимальне зусилля P_b^k , результат занести до табл. 7.1.
9. Зробити розрахунки міцності матеріалу покриття згідно з формулою 7.1, результати розрахунків занести у таблицю.
10. Вимірювання провести для трьох зразків для різних режимів напилення і для різних матеріалів.

Таблиця 7.1 – Результати вимірювань і розрахунків

№ зразка	Матеріал покриття	Режим напилення	d, мм	D, мм	F_n , мм ²	P_b^k , Н	σ_k , МПа

Вимоги до звіту по роботі

1. Привести мету роботи.
2. Дати короткий опис обладнання, що використовувалось у роботі.
3. Описати порядок виконання роботи.
4. Привести у таблиці значення, що вимірюються і розраховуються.
5. Дати висновки по роботі.

Контрольні запитання

1. Чим відрізняються міцність зчеплення покриття з основою і міцність матеріалу покриття?
2. Чим обумовлена міцність матеріалу покриття?
3. Які прилади використовуються для визначення міцності?
4. Які фізико-механічні характеристики визначаються при випробуванні матеріалів на розтяг?