



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ ІВАНА ПУЛЮЯ

ФАКУЛЬТЕТ ІНЖЕНЕРІЇ МАШИН, СПОРУД І ТЕХНОЛОГІЙ

КАФЕДРА ТЕХНОЛОГІЇ І ОБЛАДНАННЯ ЗВАРЮВАЛЬНОГО  
ВИРОБНИЦТВА

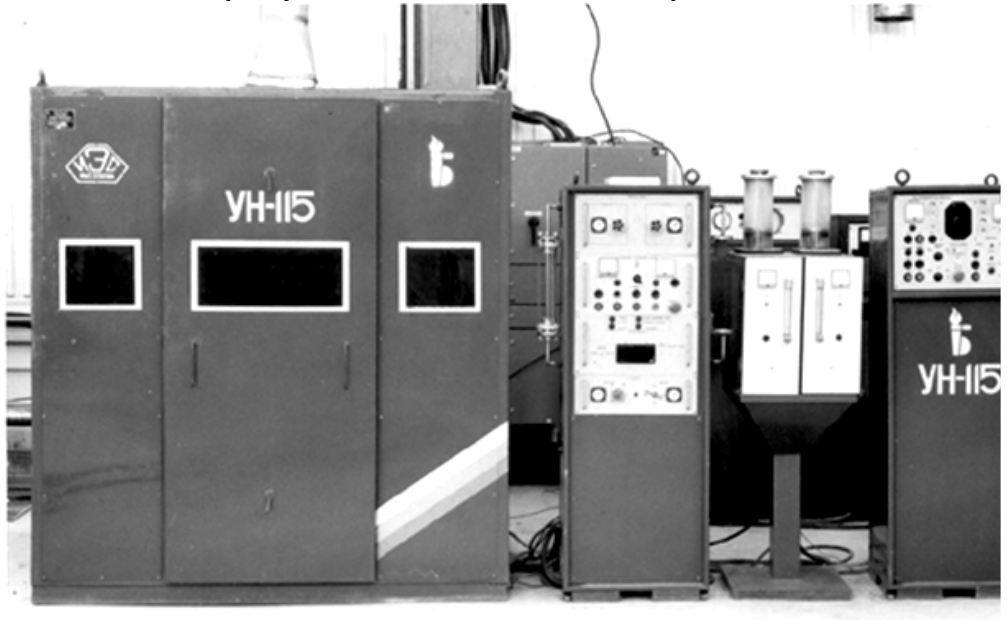
## МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до практичних робіт

з дисципліни:

**«НАПЛАВЛЕННЯ ТА НАПИЛЕННЯ»**  
**РОЗДІЛ «НАПИЛЕННЯ»**

для студентів денної та заочної форми навчання для підготовки  
фахівців освітньо-кваліфікаційного рівня «Бакалавр»  
напряму підготовки 6.050504 «Зварювання»



ТЕРНОПІЛЬ  
2017

**УДК 621.79**  
**ББК 30.61**

**М54**

Укладачі:

докт. техн. наук, професор Пулька Ч.В.  
докт. техн. наук, професор Смирнов І.В.  
асистент Сенчишин В.С.

Рецензент:

докт. техн. наук, професор Барановський В.М.

Розглянуто й затверджено на засіданні кафедри технології і обладнання зварювального виробництва. Протокол №7 від 22.02.2017р.

Затверджено та рекомендовано до друку на засіданні методичної комісії ФМТ ТНТУ імені Івана Пулюя. Протокол №6 від 06.03.2017 р.

**М54**

Методичні вказівки до практичних робіт з дисципліни «Наплавлення та напилення». Розділ «Напилення» / Ч.В. Пулька, І.В. Смирнов, В.С. Сенчишин. – Тернопіль.: ТНТУ імені Івана Пулюя, 2017. –63 с.

Методичні вказівки розроблено відповідно до навчального плану та робочої програми з дисципліни «Наплавлення та напилення» для підготовки фахівців освітньо-кваліфікаційного рівня «Бакалавр» напряму підготовки 6.050504 «Зварювання».

**УДК 621.791**  
**ББК 30.61**

© Ч.В. Пулька, І.В. Смирнов, В.С. Сенчишин., 2017  
© ТНТУ імені Івана Пулюя, 2017

## ЗМІСТ

<b>Вступ</b> .....	4
<b>Практичне заняття №1</b> «Обґрунтування типу та технології нанесення композиційного покриття».....	5
<b>Практичне заняття №2</b> «Визначення теплового балансу охолодження частинок при газотермічному напиленні».....	16
<b>Практичне заняття №3</b> «Визначення температурних залишкових напружень у покриттях при газотермічному напиленні» .....	24
<b>Практичне заняття №4</b> «Фізико- механічні властивості зносостійких вакуумно-конденсаційних покриттів» .....	33
<b>Практичне заняття №5</b> «Оцінка умов нагріву частинки порошку в плазмовому струмені».	41
<b>Практичне заняття №6</b> «Оцінка процесу нагріву частинок порошку з урахуванням залежності теплоємності газу від температури» .....	52
<b>Література</b> .....	57
<b>Додаток</b> .....	58

## ВСТУП

Для сучасних умов розвитку економіки характерна орієнтація на наукоємне високотехнологічне виробництво, високий рівень якості продукції, конкурентоспроможність. Серед пріоритетних напрямків розвитку науки і техніки визначено новий технологічний напрямок – методи керування властивостями поверхні - інженерія поверхні.

Мета цього технологічного напрямку – виробництво виробів з подовженим терміном експлуатації шляхом створення спеціальних властивостей на поверхні матеріалу. Основний матеріал деталі вибирається за критеріями експлуатаційної міцності. Керування властивостями здійснюється двома шляхами : модифікацією поверхні і нанесенням покриття. В першому випадку зміни властивостей відбуваються за рахунок зміцнення структури поверхневих шарів деталі його легуванням, в другому – на поверхні формується шар з іншими, відмінними від основного матеріалу, властивостями. Для нанесення функціональних покриттів за останній час інтенсивний розвиток отримали методи газотермічного і вакуумноконденсаційного (метод PVD) нанесення покриття.

При вивченні дисципліни «Наплавлення та напилення» студенти повинні засвоїти наукові основи і практичні навички самостійної діяльності в галузі розробки технології нанесення покриття різного призначення та раціонального вибору матеріалів для реалізації цих процесів.

Програма курсу укладена у відповідності з вимогами освітньо - кваліфікаційної характеристики та освітньо-професійної програми галузевого стандарту вищої освіти України.

## ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ №1

### ОБҐРУНТУВАННЯ ТИПУ ТА ТЕХНОЛОГІЇ НАНЕСЕННЯ КОМПОЗИЦІЙНОГО ПОКРИТТЯ

**Мета заняття:** навчити вибирати на основі знань щодо умов експлуатації, складу та методів отримання композиційних покриттів шляхом напилювання, конструкції конкретної деталі тип і технологію отримання композиційного покриття (КП).

### ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Створення покриття простого (однокомпонентного) або складного (багатокомпонентного, композиційного, багат шарового) базується на основі з'єднання в об'ємі покриття матеріалів різних класів (метал, кераміка, полімер), що мають різні вихідні властивості. Природа вихідних компонентів, їхній фазовий стан, співвідношення, стан межі 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 (матеріалів), з якого виготовлена дана деталь і визначається в межах зовнішньої структури.

У процесі обробки 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 кристалічної решітки і т.п.).

Процес створення КП складається з трьох основних взаємозалежних етапів: розробка технології нанесення покриття; проектування покриття, проектування, конструювання 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 присадкового матеріалу і способу нанесення. У таблиці 1 наведені основні види зовнішньої дії на виріб: середовище, температура і навантаження.

Таблиця 1 - Види і параметри зовнішньої дії

Середовище – С	Ум. позн.	Температура —Т	Ум. позн.	Значення інтервалу, С°	
				від	до
Газова	Г	Висококріогенна	Кв	—273	—200
Рідка	Ж	Кріогенна	Кг	—200	—80
Тверда	Т	Негативна	От	—80	—40
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 Висока	Ср В	300 800	800 1200
Інертна	И	Дуже висока	Во	1200	1800
Відновна	В	Надвисока	Вс	1800	4000
Атмосферна	О	<i>Характер температурного поля</i>	Р Нр Пр	Т(хyz)=Т <sub>1</sub> Т(хyz)≠Т <sub>1</sub> Тхyz(t)≠const	
Агресивна:	А				
слабо	Ас				
підвищено	Ап				
високо	Ав	Рівномірне Нерівномірне Змінне			
		<i>Вплив – В</i>			
<i>Механічне навантаження</i>		<i>Характерне</i>		<i>Абсолютні параметри</i>	
Статичне	Х	Тертя:	Ск СкА СкБ Кч	Тиски середовища і напруження: Р=10 <sup>-15</sup> —10 <sup>12</sup> МПа	
Рівномірне	Хр	Ковзання			
Нерівномірне	Хн	з мастилом			
Циклічне	Ц	без мастила			
Малоциклове	Цм	Кочення			
Середньочастотне	Цс	Абразивний знос		Температури Т=273–4000°С	
Високочастотне	Цв	Гідроабразивний			
<i>Вид навантаження</i>		Корозія	Ко	<i>Відносні параметри</i> Слабке Нз Середнє Ср Високе Вс	
Розтягування	Ра	Ерозія	Ер		
Стискування	Сж	Пітинг	Пт		
Кручення	Кр	<i>Енергетичне поле</i>	ЕП		
Вигин	Из	Електричне	МП		
Удар	Уд	Магнітне	ГП		
Зріз	Сз	Гравітаційне	РП		
Втискування	Вд	Радіаційне	БП		
Складний	Ж	Біомікробне			



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 ґрунтується на літеро-числових позначеннях: наприклад, окислювальне газове середовище в 1 атм позначається 0 г; вулична температура середньої смуги країни —  $T_n$  або  $T \pm 35^\circ\text{C}$ , змінний нагрів до  $800^\circ\text{C}$  позначається  $T800П$ ; 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 ротаційнокувальної машини описуються Ог- $T \pm 35P$ -СКА (7,5; 0,5) і так далі.

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. Дана 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 проектування. Останнє забезпечить підвищення надійності і довговічності роботи деталей і вузлів, що дасть значний економічний ефект.

Властивості, які повинні мати матеріали покриттів, дуже широкі як по номенклатурі, так і по кількісному значенню. 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 по вибору матеріалу і способу створення покриття (див. додаток табл. 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 (MeC), оксиди (MeO), 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, борида, 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 табл. 2.

Вибір матеріалу для покриттів здійснюють 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 30x30 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 напилення і фарбування. Мости, ферми і інші металеві споруди покривають напиленням з подальшим фарбуванням.

Нанесення покриттів на листову сталь виконують осадженням або напиленням. У останньому випадку слід виконувати нагрів в захисній атмосфері і вальцювання.

Наносити тонкі тугоплавкі, бар'єрні, захисні і інші покриття слід напиленням, 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 тврдосплавних гранул (АПН) на шийки колінчастих розподільчастих і багатьох інших валів слід робити металюванням.

Металювання з використанням шихти типа 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, Р, КМ, СТС, СТМ.

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 і 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 дрiт наносять осадженням – гальванічним, з парової фази або рідкої фази (розплаву).

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

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 напиленням, емалюванням, металюванням, плакуванням, фарбуванням і осадженням. Нагрів при припіканні, металюванні і т. д. як правило місцевий (променевий, СВЧ, пальниками і т.п.), захист зони нагріву 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 потрібне 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 максимальними жаростійкими властивостями можна створити плакуванням і емалюванням або металюванням. У ряді випадків застосовується осадження, напилення 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; напилення утворює пористі шари з низькою міцністю зчеплення його з основою; термохімічна

обробка дає шари сплаву на основі матеріалу основи, що в більшості випадків не забезпечує максимальну жаростійкість.

### **Завдання до виконання практичної роботи**

Згідно з індивідуальним завданням (див табл. 2), виходячи з форми, розмірів деталі і умов експлуатації вибрати та обґрунтувати матеріал і визначити спосіб створення покриття.

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

Теоретичний матеріал для практичної роботи наведено в лекції № 3, 4.

### **КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ**

1. З'єднання 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 критеріями здійснюється вибір матеріалу для покриття?
6. Назвати основні вимоги до жаростійких покриттів?

Таблиця 2 - Варіанти індивідуальних завдань

№	Виріб	Розміри поверхні, що покривається, мм	Умови експлуатації
1	Ніж гільйотини	32x1200	Високі ударні і вдавлювальні навантаження
2	Гальмівні колодки	60x100, 80x218	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	$M$	Ударні навантаження, вдавлювання
7	Підшипник	$d = 40, d = 600$	Тертя зі змазкою
8	Днище поршня		Корозійне та ерозійне зношення
9	Лопатки газових турбін	60x100, 100x300	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

$M$  – великі розміри



## ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ №2

### ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОВОГО БАЛАНСУ ОХОЛОДЖЕННЯ ЧАСТИНОК ПРИ ГАЗОТЕРМІЧНОМУ НАПИЛЕННІ

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

### ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

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 терморпарі 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 напилується  $K$ , загальна вага частинок, що закріпились на поверхні мідної основи дорівнює:

$$G = \frac{100 \cdot G_1}{K} \quad (1)$$

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):

$$q = \frac{G}{Mt} \quad (2)$$

де  $M$  – молекулярна маса.

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

$$Q = 0.239 \cdot W, \quad (3)$$

де  $W$  – потужність нагрівача, Вт.

Кількість тепла  $H$ , кал/моль, переданого мідній пластині за тих самих умов одним молем напилуваного матеріалу, становить:

$$H = \frac{Q}{q} \quad (4)$$

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

При формуванні покриття на зразку виділяється кількість тепла:

$$H_1 = \int_{T_1}^{T_2} c_p dT, \quad (5)$$

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:

$$H_1 + H_2 \leq H \quad (6)$$

Тепловий баланс частинок, що знаходяться у різному стані, показано графічно, на рис. 1. За цим рисунком визначаємо процентний вміст  $B$  частинок, які потрапили на основу при температурі, що дорівнює температурі плавлення:

$$B = \frac{a}{H_2} \cdot 100, \quad (7)$$

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 вибираємо стабілізований двоокис цирконію, як один з найбільш тугоплавких матеріалів.

Визначаємо процентний вміст частинок  $G$ , 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.

Визначаємо кількість  $q$  молей 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 молем 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 [3].

Кількість тепла, що виділяється на зразку під час формування покриття, приймаючи значення молярної теплоємності  $\text{ZrO}_2$  рівним 17,915 Дж/(моль·К):

$$H_1 = 44100 \text{ кал./моль [3].}$$

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:

$$G = 26.0 \text{ г;}$$

$$H = 48800 \text{ кал/моль;}$$

$$q = 0,000764 \text{ моль/с};$$

$$H_2 = 20800 \text{ кал/моль};$$

$$Q = 37.3 \text{ кал/с};$$

$$H_1 = 46310 \text{ кал/моль}.$$

За графіком (рис. 1) можна визначити процентний вміст частинок В, що потрапили на пластинку з температурою, що дорівнює температурі плавлення двоокису цирконію, тобто  $2715^\circ\text{C}$ . Для відстані між соплом і поверхнею,

в 50 мм: 
$$B_1 = \frac{a_1}{H_2} = 60.2\%,$$

для відстані в 90 мм: 
$$B_2 = \frac{a_2}{H_2} = 13.2\%,$$

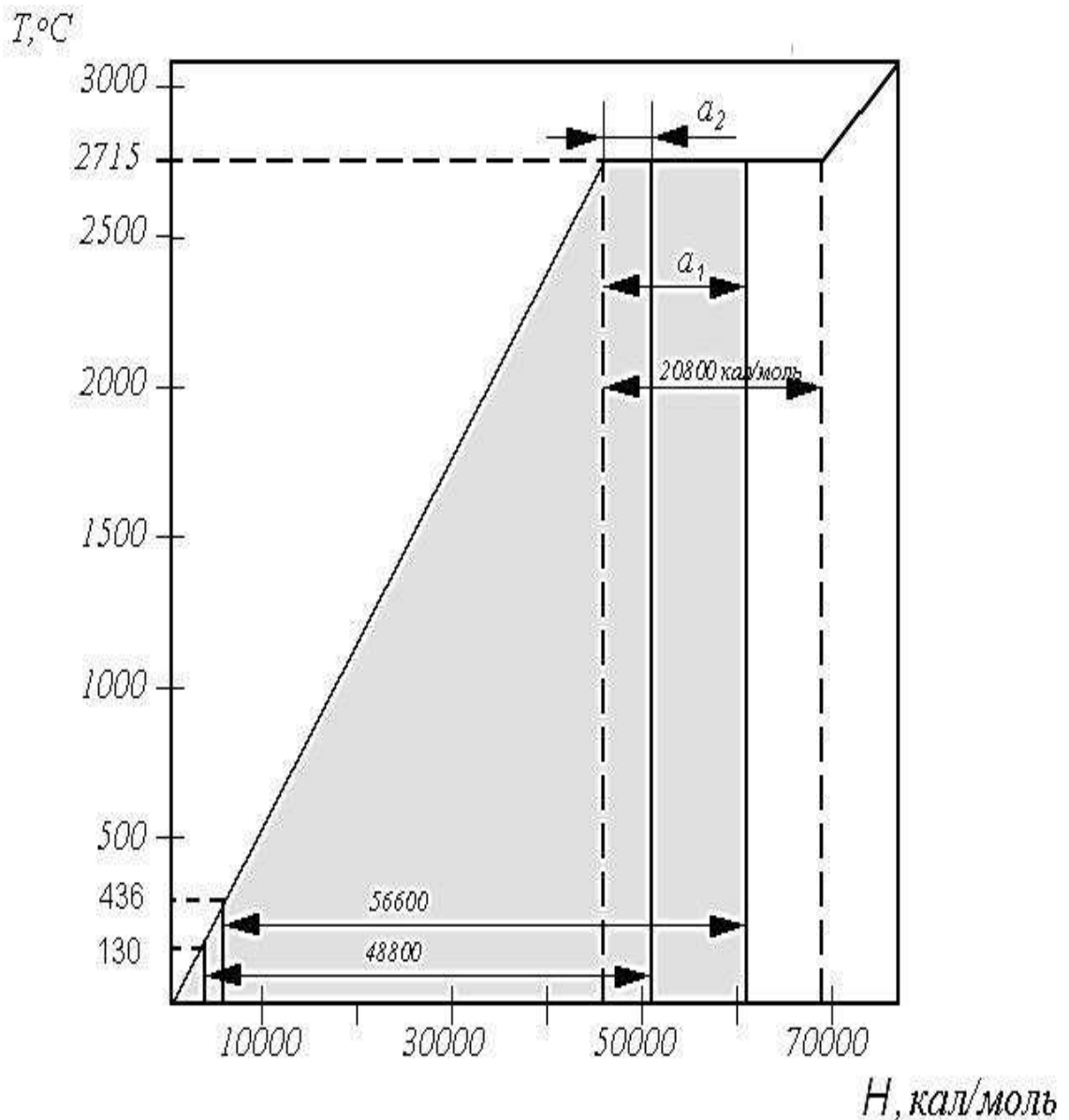


Рис.1 - Тепловий баланс охолодження частинок  $ZrO_2$  при формуванні покриття.

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.

### **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 складали  $K$ . В якості матеріалу покриття вибрано стабілізований двоокис цирконію.

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

Дані згідно варіанту приведені в табл. 1.

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

Теоретичний матеріал для практичної роботи наведено в лекції № 12,20.

Таблиця 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 ЗАПИТАННЯ

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 №3**

### **ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ У ПОКРИТТЯХ ПРИ ГАЗОТЕРМІЧНОМУ НАПИЛЕННІ**

**Мета заняття:** за результатами експерименту засвоїти методики теоретичного розрахунку залишкових напружень, що виникають у процесі газотермічного напилення.

#### **ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ**

В умовах газотермічного напилення при переході від покриття до основного матеріалу виникає стрибок (градієнт) властивостей, обумовлений особливостями технології нанесення, що в подальшому впливає на поведінку матеріалу, який захищається покриттям.

Покриття впливає на процеси зміцнення або знеміцнення в силу свого структурного стану і складу. Впливає як покриття в цілому, так і його окремі елементи, що безпосередньо контактують з поверхнею твердого тіла. Ступінь контакту, а, відповідно і міцність зчеплення, також мають істотне значення.

Сказане в однаковій мірі відноситься і до поверхневого перехідного шару в основному матеріалі, який може бути легований атомами покриття в процесі додаткового дифузійного відпалу.

Для певних композицій і в конкретних умовах випробувань вплив окремих факторів на фізико–механічні властивості матеріалів буде залежати від діапазону діючих температур, напружень, виду агресивного середовища.

У процесі формування газотермічного покриття частинки, нагріті до високої температури, поступово нашаровуються на поверхню основи або на інші, вже охолоджені частинки. Охолодження основи і частинок є нерівномірним, що обумовлює також їх нерівномірне стискування. В результаті цього в напиленому покритті виникають залишкові напруження стиснення або розтягнення. Ці напруження, в свою чергу, в окремих випадках можуть привести до деформації основи.

Неоднорідні пластичні деформації і зміни напруженого стану при фазових перетвореннях, дифузія і хімічні реакції, теж мають місце при нанесенні газотермічного покриття, і також є причиною виникнення в системі “покриття – основа” залишкових температурних і концентраційних напружень.

Температурні залишкові напруження є наслідком термічних умов напилення і різниці в термічних властивостях матеріалів основи і покриття. При охолодженні у сформованій композиційній системі виникає складне поле залишкових напружень, що залежить від нерівномірності розподілу матеріалу в високотемпературному струмені і нерівномірності нагрівання основи. Крім того, на нього впливають особливості форми і розміри поверхні, що захищається.

Висока швидкість протікання процесів у контактній зоні при формуванні покриття не дозволяє цілком релаксувати напруженням, що виникають, при охолодженні матеріалу. В результаті при нормальній температурі в напиленому покритті виникають залишкові напруження стиснення або розтягнення. Температурні залишкові напруження можуть виникнути також у процесі експлуатації виробів з покриттям.

Велике значення має також вплив перехідної зони, що формується між напиленим шаром і основою в результаті дифузії. Цей процес супроводжується фазовими переходженнями з утворенням фаз вкорінення і інтерметалідних сполук. Так виникають концентраційні залишкові напруження, як результат різниці в питомих об'ємах матеріалу покриття й основного матеріалу, коефіцієнти термічного розширення яких відрізняються.

В умовах газотермічного (плазмового) напилення теоретичні розрахунки і експериментальні дослідження відносяться, в основному, до температурних залишкових напружень, які обумовлені градієнтом температур частинок в момент їх потраплянням на поверхню основи і після охолодження, коефіцієнтами термічного розширення покриття і основи, нерівномірністю розподілу температур по перерізу покриття. Впливають також змінні фактори: підготовка поверхні основи перед напиленням, товщина покриття, геометричні розміри поверхні, що обробляється, умови охолодження.

Таким чином, формування газотермічного покриття, а також контактної зони, що включає безпосередньо міжфазову зону і приповерхневі шари основи, супроводжується виникненням відповідного напруженого стану, що сприяє зниженню характеристик міцності покриттів, їх розтріскуванню, відшаровуванню, а також впливає на подальшу поведінку всієї системи в цілому. Зростання напружень у контакті обумовлює розтріскування покриття або проміжного шару, де і починається розвиток головної тріщини, що може привести до руйнування.

**Аналітичні рішення для розрахунку залишкових напружень**

Для розрахунків напружень використовується теорія термопружності з відповідними припущеннями. Припускається, що матеріали покриття й основи ізотропні і відповідають закону Гука, модуль нормальної пружності  $E$  та лінійний коефіцієнт температурного розширення  $\beta$  не залежать від температури. Розглядається сталий температурний режим, тобто система вважається охолодженою від максимальної температури, наприклад, середньої  $T_{\text{сер}}$  до кінцевої, наприклад, кімнатної  $T_0$ . Температура у цьому випадку змінюється на величину [4]:

$$\Delta T = -(T_{\text{сер}} - T_0) \quad (1)$$

Напруження в покритті, нанесеному на плоску жорстко закріплену основу  $\sigma_{\text{п}}$ , виражаються рівнянням:

$$\sigma_{\text{п}} = \frac{(\beta_{\text{п}} - \beta_0)}{1 - \frac{\nu_{\text{п}}}{E_{\text{п}}} + \frac{1 - \nu_0}{E_0} \cdot \frac{h_{\text{п}}}{h_0}} \quad (2)$$

Напруження в основному металі  $\sigma_0$  мають зворотний знак і пов'язані з напруженнями в покритті співвідношенням:

$$\sigma_0 = -\sigma_{\text{п}} \frac{h_{\text{п}}}{h_0} \quad (5.3)$$

В рівняннях (2), (3)  $E$ ,  $\nu$ ,  $\beta$ ,  $h$  – модуль Юнга, коефіцієнт Пуассона, коефіцієнт температурного розширення, товщина з відповідним індексом “п” – для покриття і “о” – для основного металу.

Вираз для максимальних залишкових напружень безпосередньо в зоні контакту має вигляд:

$$\sigma_K = \frac{\beta_0 E_0 \Delta T}{1 - \nu_0} \cdot \frac{(\beta_{II} / \beta_0 - 1)}{1 + \frac{1}{4} \cdot \frac{1 - \nu_{II}}{1 - \nu_0} \cdot \frac{E_0 h_0}{E_{II} h_{II}}} \quad (4)$$

За аналогією можна одержати вираз для залишкових напружень у поверхневих шарах, що прилягають до межі розділу, і по перерізу композиції у випадку нанесення покриття на циліндричну поверхню. Рівняння для залишкових напружень на межі контакту “циліндричне тіло–покриття”, що виникають внаслідок охолодження системи на температуру  $\Delta T$ , мають наступний вигляд. Для компонентів напружень, спрямованих по радіусу циліндричного тіла діаметром  $2R$ , і приймаючи, що  $\nu_{II} \approx \nu_0 \approx \nu$ , маємо:

$$\sigma_K = \frac{(\beta_{II} / \beta_0 - 1) \cdot E_0 \beta_0 \Delta T}{1 - 2\nu + (1 - \nu) E_0 R / 2 E_{II} h_{II}} \quad (5)$$

Для компонентів напружень у зоні контакту, спрямованих уздовж осі циліндра, маємо:

- для незакріплених поверхонь

$$\sigma'_{zz} = \frac{2(\beta_{II} / \beta_0 - 1) \cdot E_0 \nu \beta_0 \Delta T}{1 - 2\nu + (1 - \nu) E_0 R / 2 E_{II} h_{II}} \quad (6)$$

– для закріплених поверхонь

$$\sigma'_{zz} = \frac{2(\beta_{II} / \beta_0 - 1) \cdot E_0 \nu \beta_0 \Delta T}{1 - 2\nu + (1 - \nu) E_0 R / 2 E_{II} h_{II}} - E_0 \beta_0 \Delta T \quad (7)$$

Приведені рівняння свідчать, що по мірі зміни товщини покриття напруження в контакті або збільшуються, або зменшуються і, отже, міцність зв'язку його з основою змінюється. Залежно від модуля пружності і коефіцієнта лінійного розширення матеріалу покриття напруження можуть змінювати знак. Епюри напружень, що можуть

мати місце у покриттях, напилених на плоску або циліндричну основу, схематично зображені на рис. 1.

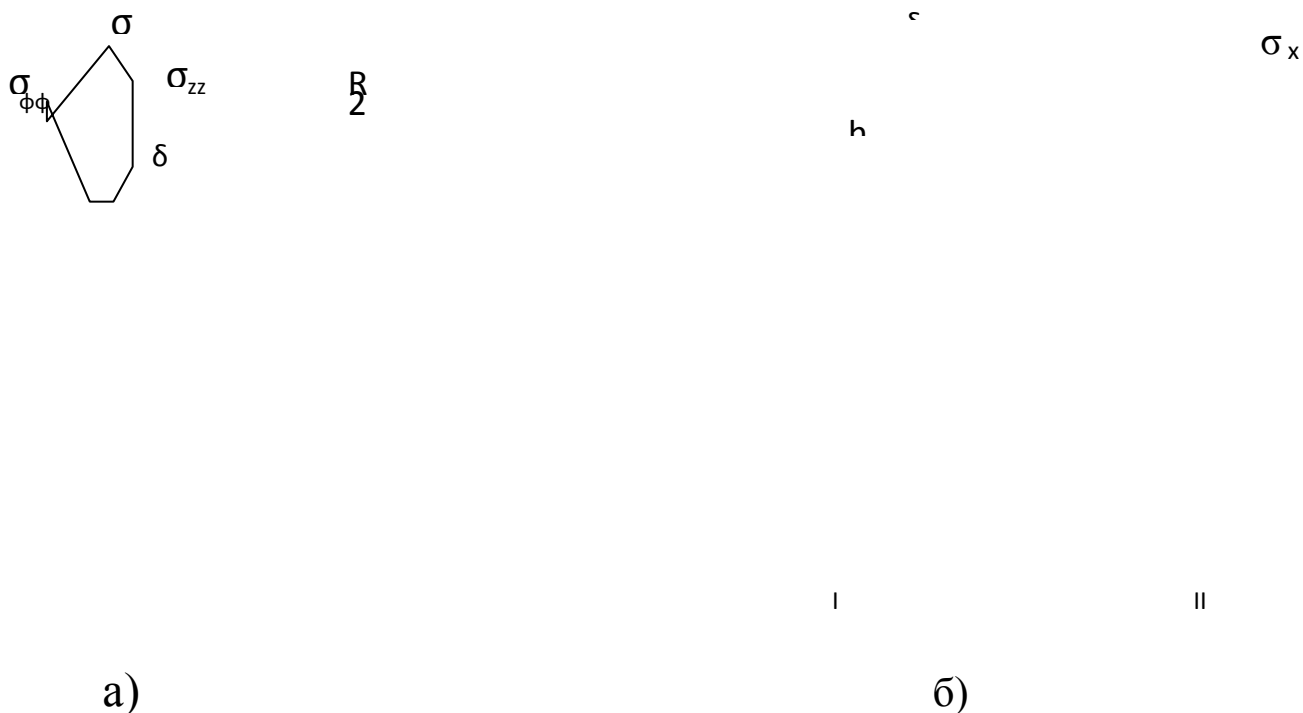


Рис. 1 - Епюри напружень у системі “ покриття – циліндричне тіло ” (а) і “ покриття – плоске тіло ” (б); знак “+” – напруження розтягу, знак “-” – напруження стиснення

Якщо в процесі напилення змінюються фізико–механічні характеристики перехідної зони через формування в ній нових фаз, то, крім температурних залишкових напружень, виникають концентраційні, накладення яких визначає загальний напружений стан композицій. Виведені вище залежності дозволяють зробити аналітичний розрахунок залишкових напружень на межі покриття з циліндричним і плоским тілами. При цьому значення залишкових напружень, отримані як аналітично, так і в процесі вимірів, залежать від технології напилення. Технологія обумовлює насамперед тепловий режим у системі, а також структуру та склад покриттів і міжфазової зони. У той же час, фізичні характеристики матеріалу

покриття, що використані для розрахунку, можуть істотно відрізнятися від аналогічних характеристик компактних матеріалів [5].

### Перевірка результатів експерименту, щодо залишкових напружень покриттів

Залишкові напруження можна знаходити експериментально. Для плоскої пластини з покриттям, нанесеним з одного боку, напруження визначаються за величиною прогину, що виникає в умовах незакріпленої пластини під дією різниці напружень по перерізу композиції. Згинатися пластина буде або у бік покриття, або в протилежну сторону, залежно від співвідношення температурних коефіцієнтів лінійного розширення матеріалів, що взаємодіють.

У деформованій під дією залишкових напружень пластині, вимірюється радіус кривизни або величина прогину, а потім визначається величина залишкових напружень у покритті. Схема визначення залишкових напружень подана на рис. 2.

Для розрахунку напружень за експериментально знайденою величиною прогину пластини з покриттям використовується вираз:

$$\sigma = \left( \frac{h_0^3 E_0 + h_{II}^3 E_{II}}{6r h_0 (h_0 + h_{II})} + \frac{E_0 (h_0^3 E_0 + h_{II}^3 E_{II})}{12r^2 (h_0 E_0 + h_{II} E_{II})} + \frac{E_0 E_{II} h_{II} (h_0 + h_{II})}{2r (h_0 E_0 + h_{II} E_{II})} \right) \cdot \frac{1}{1 - \nu^2} \quad (8)$$

де  $r$  – радіус кривизни пластини з покриттям, знайдений по її довжині  $L$  і величині прогину  $H$ , як:

$$H = R \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{L^2}{4r^2}} \right) \quad (9)$$

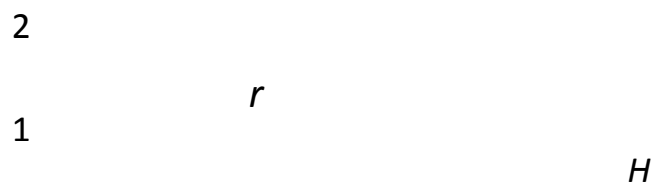


Рис. 2 - Визначення величини залишкових напружень у системі “плоска основа – покриття”: 1 – основа; 2 – покриття

### **Завдання до виконання практичної роботи**

За формулами 1 – 7 розрахувати залишкові напруження, що виникають в системі «основа – покриття» при охолодженні на температуру  $\Delta T$  для плоскої та циліндричної основи з різною товщиною покриття (0.06, 0.08, 0.1, 0.12, 0.14 мм). За отриманими даними побудувати графічні залежності залишкових напружень  $\sigma$  від товщини покриття  $h_{\text{п}}$  використовуючи математичні комп’ютерні програми (MathCAD, MatLAB, Mathematica та інш.). За допомогою формули 8 визначити можливий радіус прогину пластини для вибраної системи. Дані брати згідно з індивідуальним варіантом завдань з табл. 1.

Теоретичний матеріал для практичної роботи наведено в лекції № 8.



Таблиця 1 - Варіанти індивідуальних завдань

№	Система «основа– покриття»	$h_0$ , мм	R, мм	$T_c$ , К	$T_0$ , К
1	Fe – Ni	2	15	653	293
2	Fe – Mo	3	12	686	293
3	Fe – W	2,5	14	723	293
4	Fe – Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,2	16	659	293
5	Fe – ZrO <sub>2</sub>	3,2	13	643	293
6	Fe – SiO <sub>2</sub>	3	14	656	293
7	X18H9T – Ni	4	11	633	293
8	X18H9T – Mo	3,4	12	656	293
9	X18H9T – W	1,5	17	686	293
10	X18H9T – Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,4	14	673	293
11	X18H9T – ZrO <sub>2</sub>	3,2	13	669	293
12	X18H9T – SiO <sub>2</sub>	3,4	12,4	639	293
13	Сталь 30 – Ni	2	10	673	293
14	Сталь 30 – Mo	3	12	573	293
15	Сталь 30 – W	3,5	13	483	293

### КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Які причини виникнення залишкових напружень?
2. Які основні залишкові напруження при газотермічному напиленні?
3. Зміною яких факторів і параметрів напилення можна керувати температурними залишковими напруженнями?

4. Що визначає загальний напружений стан композиції?
5. Які фізичні параметри матеріалів покриттів і основи суттєво впливають на точність визначення напружень, чому?

## **ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ №4**

### **ФІЗИКО – МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗНОСОСТІЙКИХ ВАКУУМНО – КОНДЕНСАЦІЙНИХ ПОКРИТТІВ**

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

### **ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ**

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  $\beta$ , 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  $\sigma_0$ , 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 рентгено-дифрактометрії. Механічні властивості визначають як експериментальним, так і розрахунковим шляхом. До перших відносяться:

1. Мікротвердість  $H_\mu$ , 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:

$$H_\mu = 1.854 \frac{P}{d^2} \quad (1)$$

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

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:

$$K_0 = \frac{S_0}{S_z}, \quad (2)$$

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

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

$$K_{TP} = \frac{S_v}{S_{pv}}, \quad (3)$$

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:

$$E = \frac{H_\mu \alpha}{\frac{b_1}{d_1} - \frac{b}{d}} \quad (4)$$

де  $H_\mu$  – мікротвердість за Кнупом, ГПа;  $\alpha$  – 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:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (5)$$

де  $\nu$  – коефіцієнт Пуассона (для ЗП приймають 0,3).

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

$$\sigma_T = \frac{H_\mu}{3} \quad (6)$$

3. Тріщиностійкість ЗП визначають за енергетичним та силовим критеріями, до яких відносяться відповідно поверхнева енергія  $\gamma$  і критичний коефіцієнт інтенсивності напружень  $K_{1C}$ :

$$\gamma = \frac{Gb}{8} \quad (7)$$

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

$$K_{1C} = \sqrt{\frac{2E\gamma}{1-\nu^2}} \quad (8)$$

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

$$K_C = \sqrt{2E\gamma} \quad (9)$$

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. 1 [6].

Таблиця 1 - Регресійні залежності мікротвердості і періоду кристалічної решітки покриттів [6] .

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
	$a = -6,25 \cdot 10^{-11} \cdot x^3 + 7,569 \cdot 10^{-8} \cdot x^2 - 2,994 \cdot 10^{-5} \cdot x + 0,428$	0,998
TiZrN	$H_\mu = -044 \cdot 10^{-7} \cdot x^5 + 8,452 \cdot 10^{-6} \cdot x^4 - 5,643 \cdot 10^{-4} \cdot x^3 + 1,491 \cdot 10^{-2} x^2 + 6,756 \cdot 10 \cdot x + 30,998$	0,999
	$a = 4,875 \cdot 10^{-6} x^2 + 1,275 \cdot 10^{-4} x + 0,423$ (тільки в інтервалі 0 – 40 % Zr)	1,0
TiMoN	$H_\mu = 3,246 \cdot 10^{-5} \cdot x^3 - 1,356 \cdot 10^{-2} \cdot x^2 + 1,116 \cdot x + 25,284$	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. 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 ( $\sigma_0$ ), 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 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	$H_\mu$ , 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. 3).

Таблиця 3 - Параметри структури і механічні властивості покриттів

ЗП	a, нм	$\sigma_0 \cdot 10^9$ , Па	$H_\mu$ , 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. 1).

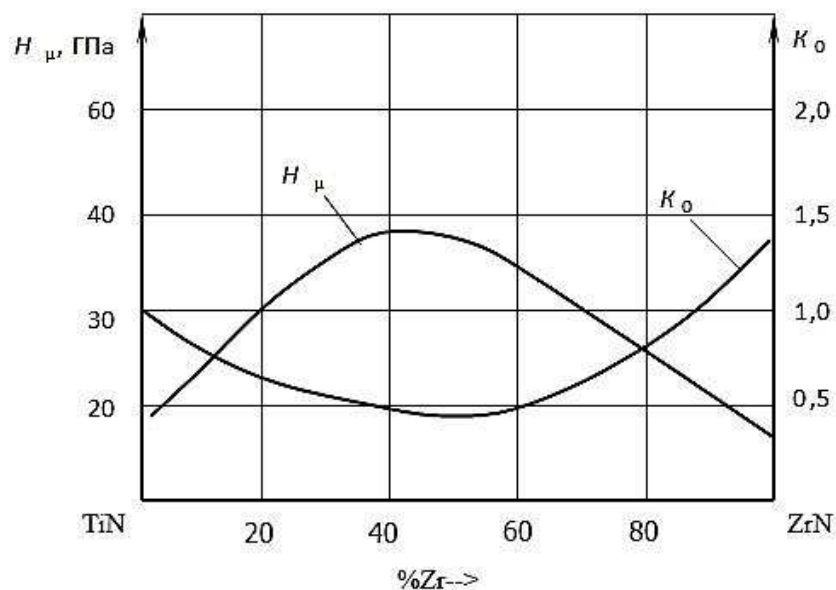


Рис. 1 - Вплив складу покриття TiZrN на мікротвердість ( $H_{\mu}$ ), коефіцієнт відшарування ( $K_0$ )

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. 1).

### **Завдання до виконання практичної роботи**

Згідно з варіантом індивідуального завдання (табл. 4) провести розрахунок мікротвердості (див. табл. 1), модуля зсуву (див. формулу



5) та коефіцієнта тріщиностійкості покриття (див. формулу 9), орієнтовно прийняти модуль Юнга для TiN рівним 390 ГПа, TiZrN – 317 ГПа, TiMoN – 286 ГПа.

Теоретичний матеріал для практичної роботи наведено в лекції № 6,7.

Таблиця 4 - Варіанти індивідуальних завдань

№ вар	ЗП	Вміст легуючого елемента, %		
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

1. Які основні фізико – механічні параметри вакуумно-конденсаційних покриттів?
2. Які існують методи визначення мікротвердості покриття?
3. Як визначається коефіцієнт відшарування?

4. Як визначається коефіцієнт тріщиностійкості?
5. Охарактеризуйте вплив температури конденсації на властивості ЗП?
6. Які спостерігаються зміни структури та властивостей ЗП при легуванні?

## ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ № 5

### ОЦІНКА УМОВ НАГРІВУ ЧАСТИНКИ ПОРОШКУ В ПЛАЗМОВОМУ СТРУМЕНІ

**Мета заняття:** встановити вплив конвективного і променистого нагріву частинки порошку в струмені низькотемпературної плазми і оцінити час нагріву частинки до температури плавлення при плазмовому напилюванні.

### ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Якість напиленого покриття в значний 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 нагріву 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 нагріву 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 проплавлення частинок порошку навіть при менших температурах плазмового струменя.

Для оцінки ролі конвективного і променевого нагріву 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  $Re=Vd_0/v_g$ , де  $\lambda_g$ ,  $v_g$  – коефіцієнти теплопровідності та кінематична в'язкість газу. В даному 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 нагріву частинки до початку плавлення, то слід брати середньоінтегральне значення  $\lambda_p$  у інтервалі від початкової температури частинки  $T_o$  до температури плавлення  $T_{пл}$ . При лінійній залежності коефіцієнта теплопровідності від температури можна брати значення  $\lambda_p$  при середній температурі  $T_p=0,5(T_o+T_{пл})$ . 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].

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

$$m_p c_p \frac{dT}{dt} = \alpha F (T_g - T) - \sigma F (T^4 - T_B^4), \quad (1)$$

де  $m_p = \pi d_0^3 \rho_p / 6$  – маса частинки;  $d_0 = 2R_0$  – діаметр сферичної частинки;  $\rho_p$  – густина матеріалу частинки;  $c_p$  – 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 оточуючого 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 (1) в критеріальній формі (у безрозмірному вигляді) в якості масштабної температури доцільно взяти температуру плавлення матеріалу частинки  $T_{пл}$ . В критеріальній формі рівняння (1) має наступний вид:

$$\frac{1}{3} \frac{d\theta}{d\tau} = Bi(\theta_g - \theta) - S_K(\theta^4 - \theta_B^4), \quad (2)$$

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;  $\theta_g = T_g / T_{пл}$ ,  $\theta_B = T_B / T_{пл}$ . Середні значення теплофізичних властивостей ряду матеріалів, а також значення критеріїв Фур'є, Старка, Стефана і Біо приведено в додатку таблиці 5 – 9. Рівняння (2) після розділення змінних і при умові  $\theta_g = const$  запишеться як:

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

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

При русі частинки в початковій ділянці плазмового струменя після виходу з сопла співвідношення величин, що входять в знаменник правої частини рівняння (3), таке, що  $\beta > \theta^4 + b\theta$ . В цьому випадку відбувається нагрів частинки, причому, швидкість нагріву

плавно знижується у міру зростання температури частинки  $\theta$ . У початковому періоді переважає конвективний нагрів частинки, а доля променевого теплообміну невелика.

Із зростанням температури частинки і із зменшенням температури плазмового струменя зростає роль променевого теплообміну. Гранична температура нагріву 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 довкілля 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 2000–4000K 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 відігравати значну роль теплообмін випромінюванням, і слід користуватися загальними рішеннями, що враховують

променевий теплообмін. Це відноситься також до випадку нагріву 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 тепла можна представити в наступному вигляді:

$$m_g c_g dT_g = -\alpha F (T_g - T) dt \quad (4)$$

або

$$\frac{m_p c_p}{KK_c} \frac{dT_g}{dt} = -\alpha F (T_g - T) \quad (5)$$

де  $K = m_p/m_g$  – коефіцієнт двофазності потоку;

$K_c = c_p/c_g$  – коефіцієнт теплоємності потоку

У критеріальній формі рівняння (5) приймає вигляд

$$\frac{d\theta_g}{d\tau} = -3KK_c Bi (\theta_g - \theta) \quad (6)$$

Систему рівнянь (2) і (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 (6) має вигляд

$$\frac{d^2\theta_g}{d\tau^2} = -3KK_c Bi \left( \frac{d\theta_g}{d\tau} - \frac{d\theta}{d\tau} \right) \quad (7)$$

Отримане рівняння з врахуванням (3) і (6) можна записати в наступному виді, якщо виразити  $d\theta/d\tau$  і  $\theta$  через  $d\theta_g/d\tau$  і  $\theta_g$

$$\frac{d^2\theta_g}{d\tau^2} + 3Bi(1 + KK_c) \frac{d\theta_g}{d\tau} - 9KK_c Bi S_K \theta_B^4 = 0 \quad (8)$$

В якості другої початкової умови для цього рівняння слід використати (6), записане для нульового моменту часу:

Вирішуючи рівняння (8) з врахуванням початкових умов, у випадку  $\theta_g \leq 1$  знаходимо закон зміни температури плазмового струменя:

$$\theta_g = \theta_{g0} - \frac{KK_C}{1 + KK_C} (\theta_{g0} - \theta_0) [1 - \exp(-a_0\tau)] \quad (9)$$

де  $a_0 = 3Bi(1 + KK_C)$ .

Використовуючи знайдений закон зміни  $\theta_g$  з рівняння (6) можна знайти закон нагріву частинки з врахуванням теплообміну випроміненням

$$\theta = \frac{1}{1 + KK_C} \left[ \theta_{g0} + KK_C \theta_0 - (\theta_{g0} - \theta_0) \exp(-a_0\tau) \right] \quad (10)$$

Момент часу  $\tau$ , що відповідає досягненню величини  $\theta=1$ , тобто досягненню температури плавлення, розраховується за формулою (10), яка при  $\theta=1$  перетворюється в трансцендентне рівняння відносно величини  $\tau_1$ :

$$\tau_1 = \frac{1}{3Bi(1 + KK_C)} \ln \left| 1 - (1 + KK_C) \frac{1 - \theta_0}{\theta_{g0} - \theta_0} \right| \quad (11)$$

Аналізуючи цей вираз, можна зробити висновок, що для зменшення часу нагріву 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 напилення є підтримка температури



плазмового струменя в місці введення порошку на тому рівні, який відповідає максимальній теплоємності і теплопровідності газу.

### **Приклад 1.**

Визначити час нагріву порошку вольфраму в струмені аргонової плазми до температури плавлення та зниження температури плазмового потоку за рахунок віддачі тепла 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 даній температурі  $c_g = 1,72$  кДж/кг К. Теплофізичні дані вольфраму приведені в додатку табл. 5.

Визначимо коефіцієнт двофазності потоку і коефіцієнт теплоємності потоку:  $K = \omega_p / \omega_g = 0.85 / 8.7 = 0.5$ ;

$$K_c = c_p / c_g = 0.17 / 8.72 = 0.0988$$

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 даній величині критерію Біо температурний перепад по перетину практично дорівнює нулю і розрахунок нагріву частинок вольфраму можна вести як для термічно тонкого тіла.

Час нагріву частинки до температури плавлення без врахування випромінювання розраховуємо за формулою (11):

$$\tau_1 = -\frac{1}{3 \cdot 0.0038(1 + 0.5 \cdot 0.0988)} \ln \left| 1 - (1 + 0.5 \cdot 0.0988) \frac{1 - 0.082}{2.73 - 0.083} \right| =$$

$$= -83.58 \ln 0.636 = 37.83$$

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

Зниження температури плазмового струменя за рахунок віддачі тепла частинкам порошку вольфраму, визначається за формулою (9), в якій слід покласти  $\tau = \tau_1$ ;

$$\theta_{g1} = 2.73 - \frac{0.0494}{1.0494} (2.73 - 0.082) [1 - e^{-0.4524}] = 2.684$$

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

### **Приклад 2.**

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

$$K = \frac{\omega_p}{\omega_g} = \frac{1.7}{1.7} = 1; \quad K_C = \frac{c_p}{c_g} = \frac{0.125}{1.72} = 0.727$$

$$\theta_{g0} = \frac{T_{g0}}{T_{nl}} = \frac{10000}{3663} = 2.73; \quad \theta_0 = \frac{T_0}{T_{nl}} = \frac{300}{3663} = 0.082$$

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 (див. додаток табл. 6) знаходимо, що для частинки оксиду алюмінію діаметром 60 мкм дана величина критерію Фур'є відповідає часу  $t_I = 0,861 \cdot 10^{-3}$  с

Зниження температури плазмового струменя за рахунок віддачі тепла 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 8541К. 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.

## Завдання до виконання практичної роботи

Визначити час нагріву заданого порошку в струмені аргонної плазми до температури плавлення та зниження температури плазмового потоку за рахунок віддачі тепла частинкам порошку. Вихідні дані приведені в таблиці 1 згідно варіанту. 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 табл. 5.

Теоретичний матеріал для практичної роботи наведено в лекції № 20.

Таблиця 1 - Варіанти індивідуальних завдань

№	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

## **КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ**

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

## ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ №6

### ОЦІНКА ПРОЦЕСУ НАГРІВУ ЧАСТИНОК ПОРОШКУ З УРАХУВАННЯМ ЗАЛЕЖНОСТІ ТЕПЛОЄМНОСТІ ГАЗУ ВІД ТЕМПЕРАТУРИ

**Мета заняття:** визначити час необхідний на розплавлення частинки порошку в плазмовому струмені з урахуванням залежності теплоємності газу від температури і встановити причини його зміни.

#### ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Як наведено в попередніх практичних роботах, температура плазмового струменя знижується за рахунок віддачі тепла частинкам порошку і інжекції холодного газу повітря, якщо напilenня проводиться в неконтрольованій атмосфері. Із зміною температури змінюються і теплофізичні властивості плазми. Найбільше змінюється теплоємність, так наприклад, в інтервалі температур 9000–11000 К теплоємність плазми аргону змінюється в три рази, в інтервалі 11000–13500 К — в 2,84 разів. Таким чином при проведенні розрахунків необхідно враховувати залежність теплоємності плазмового струменя від температури, інакше результати можуть бути невірними.

На невеликих температурних інтервалах з достатньою точністю залежність теплоємності газу від температури можна апроксимувати лінійною функцією:

$$c_g = A + BT_g \quad (1)$$

Тоді для даної маси газу  $m_g$  диференціальне рівняння балансу тепла можна записати в наступному вигляді:

$$m_g (A + BT_g) d\theta_g = -\alpha F (T_g - T) dt, \quad (2)$$

де  $T_g, \theta_g, \alpha, F$  – дивись практичне заняття №5.

Масу газу  $m_g$ , що припадає на масу частинки  $m_p = 1/6\pi d_0^3 \rho_p$ , можна виразити через коефіцієнт двохфазності потоку  $K = m_p/m_g$ .

Після відповідної підстановки диференціальне рівняння (2) можна записати як:

$$\frac{\pi d_0^3 \rho_p}{6K} (A + BT_g) d\theta_g = -\alpha F (T_g - T) dt, \quad (3)$$

В критеріальній формі рівняння (3) буде мати наступний вигляд:

$$(\alpha + \beta\theta_g) d\theta_g = -3Bi(\theta_g - \theta) d\tau \quad (4)$$

де  $\alpha = A/Kc_p, \beta = BT_{nl}/Kc_p$ .

Диференціальне рівняння нагріву частинки запишеться в вигляді

$$d\theta = 3Bi(\theta_g - \theta) d\tau \quad (5)$$

На основі рівнянь (4) і (5) складається диференціальне рівняння, що зв'язує температуру плазмового струменя з температурою частинки, що нагрівається:

$$d\theta = -(\alpha + \beta\theta_g) d\theta_g \quad (6)$$

Після інтегрування рівняння (6) від початкових значень температур плазми  $\theta_{g0}$  і частинки  $\theta_0$  до поточних температур  $\theta_g$  і  $\theta$ , отримаємо:

$$\theta - \theta_0 = \alpha(\theta_{g0} - \theta_g) + \frac{1}{2}\beta(\theta_{g0}^2 - \theta_g^2) \quad (7)$$

З рівняння (7) можна виразити поточну температуру частинки  $\theta$  через поточну температуру плазмового струменя  $\theta_g$ :

$$\theta = -\frac{1}{2}\beta(\theta_g^2 + \frac{2a}{\beta}\theta_g - \Phi), \quad (8)$$

$$\text{де } \Phi = \theta_{g0}^2 + \frac{2a}{\beta}\theta_{g0} + \frac{2}{\beta}\theta_0.$$

Використовуючи співвідношення (7) в диференціальному рівнянні (5) і після розділення змінних отримуємо:

$$-\frac{3}{2}Bid\tau = \frac{(\frac{a}{\beta} + \theta_g)d\theta_g}{R_1} \quad (9)$$

$$\text{де } R_1 = \theta_g^2 - b_1\theta_g + a, \quad a_1 = -\Phi, \quad b_1 = -\frac{2}{\beta}(1 + a).$$

Розв'язок диференціального рівняння (8) з врахуванням початкових умов і після математичних перетворень має вигляд:

$$\exp(-3Bi\tau) = \frac{\beta}{2} \cdot \frac{\theta_g^2 - b_1\theta_g + a_1}{\theta_{g0} - \theta_0} \quad (10)$$

Для отримання рівняння для визначення температури плазмового струменя, із співвідношення (9) виразимо  $\theta_g$  через температуру частинки:

$$\theta_g = -\frac{a}{\beta} + \sqrt{\frac{a^2}{\beta^2} + \Phi - \frac{2\theta}{\beta}} \quad (11)$$

### **Приклад 1.**

Для плазмового струменя аргону в інтервалі температур 9000–11000 К залежність теплоємності від температури можна апроксимувати лінійною функцією вигляду (1), прийнявши  $A=-7,95$ ;  $B=0,9816 \cdot 10^{-3}$ . Проведемо розрахунок процесів нагріву сферичних



частинок  $Al_2O_3$  діаметром 60 мкм для даного випадку коефіцієнт двофазності потоку  $K=1$  і  $Nu=2$ . Початкова температура плазмового струменя  $T_{g0}=11000$  К, порошку –  $T_0=300$ К.

Результати розрахунків приведені в табл. 1.

Таблиця 1 - Результати розрахунку процесу нагріву частинок  $Al_2O_3$  діаметром 60 мкм

Параметри	$a$	$\beta$	$\theta_{g0}$	$\theta_0$	$Bi$	$\Phi$	$b_1$	$\theta_{g1}$	$\tau_1$	$t_1$
$Al_2O_3$	-6,36	1,82	4,745	0,129	0,0525	-10,5	5,89	4,275	2,18	$1,147 \cdot 10^{-3}$

Для розрахунку кінцевої температури плазмового струменя  $\theta_{g1}$  і часу нагріву  $\tau_1$  використовувалися формули (10) і (11). При розрахунку критерію Біо значення коефіцієнту теплопровідності аргону приймалося рівним  $\lambda_g = 0,42$  Вт/(м град).

В даному прикладі час нагріву частинок порошку оксиду алюмінію склав  $1,07 \cdot 10^{-3}$  с, що на 24 % більше розрахованого часу нагріву  $t_1=0,861 \cdot 10^{-3}$  с, отриманого в прикладі 2 практичного заняття №5, хоча початкова температура аргонної плазми приймалася 10000 К. Це свідчить про те, що розрахунок часу нагріву без врахування залежності теплоємності газу від температури може привести до значних похибок.

### **Завдання до виконання практичної роботи**

Провести розрахунок часу нагріву сферичних частинок порошку діаметром 60 мкм, згідно варіанту, до температури плавлення для випадку коефіцієнта двофазності потоку  $K=1$ ,  $Nu=2$  і температури частинки  $\theta = 1$ .

Теплофізичні дані порошку приведені в додатку табл. 5. Дані до індивідуальних завдань приведені в таблиці 2.

Теоретичний матеріал для практичної роботи наведено в лекції №22, 23.

Таблиця 2 - Числові данні до індивідуальних завдань

№	Тип порошку	$\lambda_g$ , Вт/м К	$T_0$ , К	$T_{g0}$ , К	A	B
1	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,42	305	11000	-7,85	0,9618·10 <sup>-3</sup>
2	Fe	0,42	308	11000	-7,85	0,9618·10 <sup>-3</sup>
3	ZrO <sub>2</sub>	0,42	310	11000	-7,85	0,9618·10 <sup>-3</sup>
4	W	0,42	312	11000	-7,85	0,9618·10 <sup>-3</sup>
5	NbC	0,42	318	11000	-7,85	0,9618·10 <sup>-3</sup>
6	Ti	0,42	306	11000	-7,85	0,9618·10 <sup>-3</sup>
7	Ni	0,42	310	11000	-7,85	0,9618·10 <sup>-3</sup>
8	Mo	0,42	318	11000	-7,85	0,9618·10 <sup>-3</sup>
9	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,6	308	13500	-21,5	2,23·10 <sup>-3</sup>
10	Fe	0,6	323	13500	-21,5	2,23·10 <sup>-3</sup>
11	NbC	0,6	311	13500	-21,5	2,23·10 <sup>-3</sup>
12	ZrO <sub>2</sub>	0,6	322	13500	-21,5	2,23·10 <sup>-3</sup>
13	Ti	0,6	319	13500	-21,5	2,23·10 <sup>-3</sup>
14	Ni	0,6	317	13500	-21,5	2,23·10 <sup>-3</sup>
15	Mo	0,6	327	13500	-21,5	2,23·10 <sup>-3</sup>

## ЛІТЕРАТУРА

1. Аппен А.А. Температууроустойчивые неорганические покрытия.– Л.: Химия, 1967.– 239 с.
2. Поверхневі фізико-хімічні процеси: Методичні вказівки до практичних занять для студ. «Зварювання» /Уклад.: В.І. Копилов, І.В. Смирнов. – К.: ВПІ «Політехніка», 2005. – 56 с.
3. Самсонов Г.В., Борисова А.Л., Жидкова Т.Г. и др.. Физико – химические свойства окислов. Справочник. Изд-во «Металлургия», 1978. 472 с.
4. Максимович Г.Г., Шатинский В.Ф., Копылов В.И. Физико– химические процессы при плазменном напылении и разрушении материалов с покрытиями.– Киев: Наук.думка, 1983.– 264 с.
5. Хасуи А., Моригаки О. Наплавка и напыление/ Пер. с японского – М.: Машиностроение, 1985. – 240с.
6. Верещака, А. С. Режущие инструменты с износостойкими покрытиями / А. С. Верещака, И. П. Третьяков. – М.: Машиностроение, 1986. – 192 с.
7. Иванов Е.М. Инженерный расчет теплофизических процессов при плазменном напылении. Изд–во Саратов. Ун-та, 1983, с.140.
8. Газотермические покрытия из порошковых материалов: Справочник / Ю.С.Харламов, Ю.А.Харламов, С.Л.Сидоренко, Е.Н.Ардатовская . – К: Наукова думка, 1987. – 544 с.
9. Краткий справочник физико – химических величин. Изд. 8-е, перераб./Под. ред. А.А. Равделя и А.М. Понамаревой. – Л.: Химия, 1983. – 232 с.
10. В.М. Корж, В.Д. Кузнецов, Ю.С. Борисов, К.А. Ющенко. Нанесення покриття. Навчальний посібник. К.: Видавництво Арістей, - 2005. -204с.

## **ДОДАТОК**

Таблиця 1- Рекомендовані матеріали і спосіб створення покриттів в залежності від зовнішніх умов

Зовнішні умови	Матеріал, що рекомендується	Спосіб створення покриттів
<b>Корозійно - жаростійкі покриття</b>		
Ог-ТН (Тп) -Кр	МЕ, Пл, ЕМ	М2.1, 2.2, 2.7, 2.8, 3.1
Ож-ТН (Тп) -Кр	—«—	—«— —«—
Ог-ТН-Кр, Ра, Ср Ог-ТН-Кр, Ро, Вс	А, В, Д, Пл Д, F	—«— —«— —«— —«—
Сг-ТП-Кр, ЖНз	Н, F	—«— —«—
Ог-ТС-Кр, ЖНз	Е, QВ, До	М1.1, 2.1, 2.6, 3.1
Ог-ТВо-Кр, ЖНз	К, КМ., Гр	—«— —«—
Ог-ТВс-Кр, ЖНз	К, КМ., ТМ, Гр Д, F, К,	—«— —«—
Ас-ТП-Кр, ЖНз	КМ.	М1.1, 2.1, 2.3,2.6,2.8,3.1
Ап-ТП-Кр,ЖНз	Д, F, К, КМ.	—«— —«—
Ас-ТС-Кр, ЖНз	F, К	—«— —«—
Ап-ТС-Кр, ЖНз	F, К	М1.1, 2.1, 2.6
Ав-ТС-Кр, ЖНз Ас-ТВ-Кр, ЖНз	К К	—«— —«— М1.1, 2.1, 2.2, 2.3, 2.6
Ав-ТВ-Кр, ЖНз	К	—«— —«—
Ас-ТВо-Кр, ЖНз	ТМ, К, Гр	М1.2, 2.1, 2.3, 2.6, 2.8 3.1, 4.1
Ап-ТВо-Кр, ЖНз	ТМ, К	—«— —«—
<b>Триботехнічні</b>		
Ог=ТН=СкА, Нз	Би, Бр, Пл, Гр	М1.1, 2.1, 2,3, 2.6, 2.8, 3.1, 4.1
Ог-ТН-СКА Ср	Бр, G, F, Qa	—«— —«—
ОГ-ТН-СКА, Вс	Сч, G, P, К	—«— —«—
Ог-ТН-СкБ, Нз	Сч, В, Н, G	М1.1, 2.1, 2,3, 2.6, 2.8, 3.1, 4.1
Ог-ТН-СкБ, Ср	Сч, F, P, К Сч, F, P,	—«— —«—
Ог-ТН-СкБ, Вс	К, С	—«— —«—
Ог-ТН-Аб, Нз	G, F, С	—«— —«—
Ог-ТН-Аб, Уд, Нз	В, С, К	—«— —«—
Ог-ТН-Аб, Уд, Ср	G, F, P	М1, 2.1, 2,3, 2.6, 3.1
Ог-ТН-га, Нз	Е, G, Qa, Пл	—«— —«—
Ог-ТН-га, Ср	G, Q, F, Пл	—«— —«—
Ог-ТН-га, Вс	F, G, P, СТС	—«— —«—
Ог-ТС-СкА, Нз	Сч, QВ, P, К	—«— —«—
Ог-ТС-СкБ, Ср	P, СТС, К	—«— —«—
Ог-ТВ-СкБ, Нз	Гр, СТС, К	М1.1, 2.1, 2.2, 2.6
Ог-ТВ-СкБ, Ср	Гр, СТС, К, ТМ	—«— —«—
Ог-ТВ-СкБ, Вс	Гр, СТС, К, ТМ	—«— —«—
Ас, г (жт) -ТН-СкБ, Ср	Пл, G F	М1.1, 2.1, 2.3, 2.6, 3.1
Ав, г(жт)-ТН-СкБ,Ср	Пл, Д, N	—«— —«—
Ас, г(жт)-ТП-СкБ,Ср	Сч, G, N, F	М1.1, 2.1, 2.3, 2.6, 3.1
Ап, г(жт)-ТП-СкБ,Ср	G, Д, N, F	—«— —«—
Ав, г(жт)-ТП-СкБ,Ср	G, Д, N, F	—«— —«—
Ас, г(жт)-ТС-СкБ,Ср	F, P	М1.1, 2.1, 2.2, 2.3, 3.1
Лп, г (жт) -ТС-СкБ.Ср	P, СТС	—«— —«—

продовження таблиці 1.

Міцні і жароміцні покриття		
Ог-ТН-Хр, Ж Нз	А, В, Д, Пл, Ме	М2.1,2.3,2. 5,2.6, 3.1, 4.1
Ог-ТН-Хр, Ж Ср	В, Д, Пл, Ме	—«— —«—
Ог-ТН-Хр, Ж Вс	Д, F	—«— —«—
Ог-ТН-Цм, Же Нз	—«—	М2.1,2.3,2.5, 2.6,3.1,4.1
Ог-ТН-Цм, Ж Ср	—«—	—«— —«—
Ог-ТН-Цм, Ж Вс	—«—	—«— —«—
Ог-ТП-Хр, Ж Ср	F, Н	—«— —«—
Ог-ТС-Хр, Ж Ср	К, ХС, КМ	М 1.1, 2.1, 2.3,2.5,2.6,3. 1
Ог-ТВ-Хр, Ж Ср	К, Т, М	—«— —«—
Ог-ТВо-Хр, Ж Ср	К, ХС, КМ	—«— —«—
Ог-ТП-Цс, Ж Ср	F, N	М2.1, 2.3, 2.6, 3.1
Ог-ТС-Цс, Ер Ср	F, N, К	—«— —«—
Ог-ТВ-Цс, Ж Ср	К, ТМ	—«— —«—
Ас (ж, т) -ТН-Хр, ЕрСр	Н, Qa, Пл, Ме	М1,1, 2.1, 2.3, 2.6
Ап-ТН-Хр, Ж Ср	Н, Qa, ПЛ, Ме	—«— —«—
Ас-ТН-Цс, Ж Ср	—«—	М2.1, 2.3 2,6, 3.1, 4.1
Ас-ТС-Хр, Ж Ср	К, ТМ	М2.1, 2.3, 2.6, 3.1
Ас-ТВ-Хр, Ж Ср	К, ТМ	М2.1, 2.3, 2.6
Ас-ТВо-Хр, Ж Ср	К, ТМ	—«— —«—
Ас-ТП-Цс, Ж Ср	Н, Пл, ЕМ	М2.1, 2.3, 2.5, 2.6
Ас-ТВо-Хр, Ж Ср	До, ТМ	—«— —«—
Ас-ТП-Цс, Ж Ср	Н, Пл, ЕМ	М2.1, 2.3, 2.5, 2.6
Ас-ТС-Цс, Ж Ср	К, ТМ	—«— —«—
Ас-ТП-Цс, Ж Ср	Н, Пл, ЕМ	М2.1, 2.3, 2.5, 2.6
Ас-ТС-Цс, Ж Ср	К, ТМ	—«— —«—
Ас-ТВ-Цс, Ж Ср	К, ТМ	—«— —«—
Бар'єрні і активуючі		
ОГ-ТН – герметизуючі	Рв, Бр, Qa, Пл	М2.3, 2.6, 2.7, 2.8, 3.1
ОГ-ТН – дезактивуючі	Рв, W, Пл, ХС	М2.1, 2.3, 2.6, 2.7, 2.8, 3.1
ТН- дифузійні	Рв, Бр, Ni Ме, ХС	—«— —«—
Ог-ТП- дифбар'єрні	Ме, ХС	—«— —«—
Ог-ТВ- дифбар'єрні	ХС	—«— —«—
Ог-ТВо- дифбар'єрні		—«— —«—
Різні		
Ог-ТН- тверді	В, G, F, P, СТС	М1.1,2.1,2.3,2.6,3.1, 4.1
Ог-ТН- теплопровідні	Ag, Cu	М1.1, 2.1, 2.3, 2.6, 2,7, 2.8
Ог-ТН- теплостійкі	К, КМ., Кер	М1.1, 2.1, 2.3, 2.6, 2,9
ОГ-ТН – перетворюючі	ХС, ЧЭ	М1.1, 2.1, 2,2, 2.7, 2.8
Ог - ТН – ерозійностійкі	F, P, ТС, К	М1.1, 2.1, 2.3
ОГ-ТН-ПР	Рв, Мо, Т	М 1.1, 2.1, 2,3, 2.7, 2.8, 3.1
ОГ-ТН -ПЕМ	Пл, Магнітний матеріал Пл, ХС	М1.1, 2.1, 2.8
ОГ-ТН-ПБ		М1.1, 2.1, 2,2, 2.3, 2.6,2.7, 2.8

Таблиця 2 - Класифікація сплавів, які використовуються при створенні покриттів

Тип сплаву	по умЗН овач ні ен ня	Вміст елементів %									Приблиз на твердість HRC
		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 високомарганцови сті	C	0,5—1,2	11 — 16	0—1	0—3	—	—	0-1	—	—	50
Аустенітні хромонікелеві	Д	0,3	1-8	13—30	5-25	—	—	—	—	0-1	40
Хромисті сталі	E	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 1,5	
Хромовольфрамові 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 2-5	55
Карбідні сплави зернисті і спечені	P	3	2,0	—	—	45	—	—	—	—	67

Таблиця 3 - Термодинамічні властивості речовин, що входять до реакції [8]

Речовина	$\Delta H_f^\circ, 298,$ кДж/моль	$S^\circ_{298},$ Дж/(моль·К)	$C_p^\circ, 298,$ Дж/(моль·К)	Коефіцієнти рівняння $C_p = a + bT + cT^2$ Дж/(моль·К)			Температурний інтервал, К
				a	$b \cdot 10^3$	$c \cdot 10^{-5}$	
Al	0	28,33	24,35	2067	12,38	—	273–932
Cr	0	23,64	23,35	24,43	9,87	-3,68	298–2000
Fe	0	27,15	24,98	17,24	24,77	—	298–900
Ti	0	30,63	2502	21,10	10,54	—	298–1155
Cu	0	33,14	24,43	22,64	6,28	—	298–1357
Zr	0	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	-34,31	298–1800
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 4 - Фізико – механічні властивості деяких матеріалів

Матеріал	Параметри		
	Коефіцієнт термічного розширення $\beta \cdot 10^6$ , град <sup>-1</sup>	Модулю Юнга, $E \cdot 10^{-7}$ , 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 5 - Теплофізичні властивості матеріалів в інтервалі від 300К до температури плавлення [9]

Теплофізичні властивості	Матеріал										
	NbC	ZrO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ti	Fe	Ni	W	Mo	Al	Cu	Ag
$T_{пл}, K$	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 6 - Критерій Фур'є ряду матеріалів для діаметру частинки 60 мкм

Час, $t, \text{с}$	Матеріал										
	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 7 - Критерій Старка  $Sk$  і Стефана  $S$  деяких матеріалів

Параметри	Матеріал								
	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 8 - Значення параметра  $b=Bi/Sk$  для ряду матеріалів

Плазмоутворюючий газ	Матеріал									
	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 9 - Критерій  $Bi$  ряду матеріалів в різних плазмоутворюючих газах

Плазмоутворюючий газ	Ar	He	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	NH <sub>3</sub>
$T_g$ , К	$10^4$	$10^4$	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	0,28 9	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	0,009c	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