

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**АЕРОКОСМІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ**  
**КАФЕДРА ПІДТРИМАННЯ ЛЬОТНОЇ ПРИДАТНОСТІ ПОВІТРЯНИХ**  
**СУДЕН**

**ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ**

Завідувач кафедри

канд. техн. наук, доц.

\_\_\_\_\_ О.В. Попов

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 р.

# **КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)

ЗДОБУВАЧА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА

ЗА ОСВІТНЬО-ПРОФЕСІЙНОЮ ПРОГРАМОЮ

«ТЕХНІЧНЕ ОБСЛУГОВУВАННЯ ТА РЕМОНТ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН І АВІАДВИГУНІВ»

**Тема: Розробка композиційних покриттів для відновлення  
високоточних пар тертя**

**Виконав:** \_\_\_\_\_ **О.А. Назаренко**

**Керівник: канд.техн. наук, доц.** \_\_\_\_\_ **А.М. Хімко**

**Консультанти з окремих розділів пояснювальної записки:**

**охорона праці: канд. техн. наук, доц.** \_\_\_\_\_ **О.М. Гунченко**

**охорона навколишнього середовища:**  
**канд. техн. наук, доц.** \_\_\_\_\_ **Є.О. Бовсуновський**

**Нормоконтролер** \_\_\_\_\_

**Київ 2021**

# НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Аерокосмічний факультет (заочна форма навчання)

Кафедра підтримання льотної придатності повітряних суден

Освітній ступінь «Магістр»

Спеціальність 272 «Авіаційний транспорт»

Освітньо-професійна програма «Технічне обслуговування та ремонт повітряних суден і авіадвигунів»

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри

канд. техн. наук, доц.

\_\_\_\_\_ О.В. Попов

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 р.

## ЗАВДАННЯ

на виконання кваліфікаційної роботи

**НАЗАРЕНКО ОЛЕКСІЯ АНАТОЛІЙОВИЧА**

1. Тема роботи: «Розробка композиційних покриттів для відновлення високоточних пар тертя» затверджено наказом ректора від 11.10.2021 року № 2197/ст.

2. Строк виконання роботи: з 25.10.2021 р. по 31.12.2021 р.

3. Вихідні дані до роботи: статистичні данні пошкодзованості плунжерних пар гідравлічної та паливної систем повітряних суден.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки: аналіз використання прецензійних пар в машинобудуванні; пошкодження плунжерних пар в авіації; технологія нанесення плазмових покриттів для відновлення деталей авіаційної техніки; аналіз охорони праці та навколишнього середовища при роботі з газотермічними методами відновлення деталей.

5. Перелік графічного матеріалу: аналіз пошкодзованості плунжерних пар в авіації; газотермічні методи відновлення деталей; порошки для відновлення прецензійних пар тертя; методика проведення експерименту та результати досліджень.

Графічний (ілюстративний) матеріал виконано з використанням Microsoft Office Excel, Power Point та представлено у вигляді презентацій.

## 6. Календарний план-графік

Завдання	Строк виконання	Відмітка про виконання
Видача завдання на дипломне магістерське досліджування	25.10.21 – 30.10.21	
Пошук матеріалу до кваліфікаційної магістерської роботи	01.11.21 – 02.11.21	
Аналіз технологічного процесу і обладнання виконання роботи	03.11.21 – 06.11.21	
Забезпечення охорони праці при виконання дослідження	07.11.21 – 10.11.21	
Дослідження зносостійкості газотермічних покриттів при випробуванні на зносостійкість	11.11.21 – 17.11.21	
Обробка результатів дослідження	18.11.21 – 25.11.21	
Оформлення кваліфікаційної магістерської роботи:	26.11.21 – 09.12.21	
Охорона праці та навколишнього середовища	10.12.21 – 11.12.21	
Основні висновки та рекомендації	12.12.21 – 15.12.21	

## 7. Консультанти з окремих розділів

Розділ	Консультант (посада, П.І.Б)	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Охорона праці	Канд. техн. наук, доцент Гунченко О.М.		
Охорона навколишнього середовища	Канд. техн. наук, доцент Бовсуновський Є.О.		

8. Дата видачі завдання: « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2021 року.

Керівник кваліфікаційної роботи \_\_\_\_\_ Хімко А.М.

Завдання прийняв до виконання \_\_\_\_\_ Назаренко О.А.

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи «Розробка композиційних покриттів для відновлення високоточних пар тертя»

127 сторінок, 26 рисунків, 9 таблиць, 63 використаних джерел, 3 додатки

Об'єкт дослідження – зносостійке композиційне покриття.

Мета роботи – підвищення експлуатаційної надійності та довговічності золотникових та плунжерних пар, шляхом плазмового напилювання порошкового композиційного матеріалу на основі карбонітрида титану.

Метод дослідження – електронна мікроскопія, мікрорентгеноспектральний аналіз, металографія.

Розроблено зносостійкий порошковий композиційний матеріал для плазмового напилювання на основі карбонітрида титану. Встановлено основні фізико-механічні та експлуатаційні показники, особливості трибологічної поведінки спроектованого композиційного матеріалу.

Визначені технологічні особливості плазмового нанесення покриттів.

Випробування розробленого матеріалу проводилися за стандартними методиками.

**ПРЕЦИЗІЙНІ ПАРИ, ЗНОСОСТІЙКІСТЬ, ПЛАЗМОВЕ НАПИЛЮВАННЯ, КАРБОНІТРИД ТИТАНУ, НАДІЙНІСТЬ, МІКРОТВЕРДІСТЬ, ТВЕРДІ СПЛАВИ, КОМПОЗИТНИЙ МАТЕРІАЛ, СТРУКТУРА МАТЕРІАЛУ.**

## ЗМІСТ

<b>ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....</b>	<b>7</b>
<b>ВСТУП.....</b>	<b>8</b>
<b>РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ТА ДОВГОВІЧНОСТІ РОБОТИ ПРЕЦИЗІЙНИХ ПАР.....</b>	<b>13</b>
1.1 Конструктивні особливості прецизійних пар .....	13
1.2 Технологічні особливості виготовлення прецизійних пар.....	15
1.3 Вплив робочих рідин на роботу прецизійних пар .....	20
1.4 Основні види несправностей золотникових і плунжерних пар.....	20
1.5 Методи підвищення надійності та довговічності золотникових і плунжерних пар.....	24
1.5.1 Конструктивні методи.....	24
1.5.2 Технологічні методи.....	25
1.6 Способи газотермічного нанесення покриттів.....	26
1.7 Композиційні порошкові матеріали для плазмового напилювання покриттів.....	34
Висновки до розділу 1.....	43
<b>РОЗДІЛ 2. ТЕХНОЛОГІЯ НАНЕСЕННЯ ПОКРИТТІВ ПЛАЗМОВИМ МЕТОДОМ.....</b>	<b>44</b>
2.1 Подача порошку в плазмовий струмінь.....	44
2.2 Процеси руху і нагрівання часток у потоці плазми.....	46
2.3 Формування плазмового покриття.....	50
2.4 Обладнання для плазмового напилювання композиційних порошкових матеріалів.....	55
Висновки до розділу 2.....	60
<b>РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА КОМПОЗИЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ НА ОСНОВІ КАРБОНІТРИДА ТИТАНУ .....</b>	<b>61</b>
3.1 Контактна взаємодія карбонітрида титану з металевими розплавами...	61
3.2 Дослідження особливостей мікроструктури і вивчення властивостей розробленого композиційного матеріалу.....	67

3.3 Структура та властивості плазмових покриттів системи TiCN - (Fe - Cr).....	80
Висновки до розділу 3.....	91
<b>РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ.....</b>	<b>93</b>
4.1 Небезпечні і шкідливі виробничі фактори при випробуванні зносостійкості титанових сплавів в умовах тертя ковзання .....	93
4.2 Профілактика небезпечних і шкідливих виробничих факторів при випробуванні зносостійкості титанових сплавів .....	94
4.3 Розрахунок механічної вентиляції при випробуванні зносостійкості титанових сплавів .....	98
4.4 Пожежна й вибухова безпека в цеху випробуванні зносостійкості титанових сплавів.....	100
4.5 Інструкція з охорони праці при випробуванні зносостійкості титанових сплавів в умовах тертя ковзання.....	102
Висновки до розділу 4.....	105
<b>РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА .....</b>	<b>106</b>
5.1 Забруднення атмосферного повітря повітряними суднами .....	106
5.2 Розрахунок емісії авіаційного двигуна .....	112
Висновки до розділу 5.....	117
<b>ОСНОВНІ ВИСНОВКИ З РОБОТИ .....</b>	<b>118</b>
<b>СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>	<b>122</b>

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ**

АМГ – авіаційне масло гідравлічне

ДЖ – джерело живлення

ЗДЖ – захист джерела живлення

КВД – керування ввімкненням джерела

КМ – композиційний матеріал

КН – композиційний матеріал на основі нікелю

КНТ – карбоніт титану

КПЖ – керування порошковим живильником

НМ – напилюваний матеріал

ПЖ – порошковий живильник

ППЖ – привод порошкового живильника

РС – регулятор сили струму

ТЗ – термозахист

УВН – управління ввімкненням напруги

УПУ – установка плазмового напилення

## ВСТУП

Дослідження надійності технічних об'єктів складається із двох основних аспектів:

- з'ясування фізичної сутності відмов і несправностей і встановлення основних факторів, що визначають їхнє виникнення;
- розробки математичного методу кількісної оцінки ймовірності безвідмовної роботи.

Однак, якщо математичні аспекти теорії надійності одержали найширший розвиток, то вивчення фізико-хімічних і механічних процесів, які визначають виникнення відмов у машинах і приладах, відстає від вимог, що виникають у зв'язку з розробкою методів дослідження надійності сучасної техніки. Особливо гостро це відставання відчувається стосовно до механічних систем машин і механізмів. Це пояснюється особливою складністю фізико-хімічних процесів, що відбуваються у вузлах машин у результаті одночасної дії численних взаємозалежних факторів, що часто не піддаються теоретичному урахуванню. Тому виникає необхідність проведення експериментальних досліджень, пов'язаних з використанням складного, дорогого обладнання та великою витратою часу.

В останні роки одержали розвиток дослідження надійності та довговічності типових елементів і вузлів, що широко застосовуються у механічних системах сучасних машин (підшипники кочення, шарнірно-болтові з'єднання, зубчасті передачі, опори ковзання високошвидкісних вузлів та ін.). В основу цих досліджень покладене вивчення фізичної сутності робочих процесів, характер протікання яких визначає ймовірність виникнення відмов.

Очевидно, проведення таких досліджень доцільно, оскільки надійність і довговічність типових вузлів часто визначає надійність і довговічність машин, у яких вони застосовуються. Крім того, результати подібних досліджень представляють цінний матеріал для розвитку методів математичного моделювання робочих процесів машин з метою



прогнозування їхньої надійності. До типових вузлів належать також прецизійні золотникові і плунжерні пари.

Паливні і гідравлічні агрегати сучасних зразків авіаційної наземної техніки мають велику кількість різних по конструкції та призначенню золотникових і плунжерних пар, які застосовуються для автоматичного регулювання подачі палива і оливи у двигуни, для підтримки або зміни по заданій програмі тиску в паливних і гідравлічних системах, для регулювання продуктивності насосів і керування гідравлічними силовими агрегатами. Плунжерні пари використовуються в якості насосних і силових елементів у різного роду насосах і гідромоторах.

Особливості конструкції, технології виготовлення, умов роботи та характеру зношування при експлуатації роблять необхідним розгляд прецизійних золотникових і плунжерних пар як самостійного виду деталей машин.

Вивчення впливу різних конструктивно-технологічних та експлуатаційних факторів на надійність і довговічність цих пар почалося порівняно недавно. Дотепер ці питання в науковій і технічній літературі не знайшли належного висвітлення. Є лише окремі статті в періодичній пресі і незначні розділи в книгах по гідравліці з викладом окремих питань.

Необхідною умовою надійної роботи золотникових і плунжерних пар, а отже, і відповідних паливних і гідравлічних агрегатів є висока стабільність сил тертя в зазначених парах. Довговічність агрегатів часто визначається зносостійкістю деталей золотникових і плунжерних пар. Тому в основу вивчення надійності та довговічності зазначених пар було покладене дослідження факторів, що визначають рівень тертя і зносостійкість відповідних деталей.

Після аналізу методів підвищення надійності та довговічності роботи прецизійних пар можна зробити висновок, що на сьогоднішній день немає єдиного ефективного вирішення даної проблеми. Тому питання розробки захисних покриттів для надання робочим поверхням деталей високих

міцнісних, антифрикційних та протизадирних властивостей є досить актуальним і вимагає використання передових досягнень науково-технічного прогресу в області створення новітніх матеріалів та покриттів.

Метою даної роботи є підвищення експлуатаційної надійності та довговічності золотникових та плунжерних пар, шляхом плазмового напилювання нового порошкового композиційного матеріалу на основі карбонітрида титану (TiCN).

Для реалізації нанесення композиційного порошку був обраний плазмовий метод так як він на сьогодні є одним із найбільш пріоритетних промислово розвинених методів газотермічного напилювання.

Головним критерієм застосовності матеріалу як покриття є можливість перевodu його часток у розплавлений або високо пластичний стан і наступна деформація їх при зустрічі з підкладкою. Високі температури (5000 - 55000 K) в поєднанні з можливістю широкого регулювання складу струменя (інертного, відновного, окислювального) і швидкості його витікання забезпечують велику розмаїтість матеріалів, що напилюються плазменним методом - від самих тугоплавких металів, оксидів, карбідів і т.д. до пластмас.

Малий термічний вплив на напилювану основу (звичайно 80 - 150 °C) дозволяє виключити небажані структурні перетворення в ній, уникнути деформації виробу, створює можливість нанесення покриття на основу з найрізноманітніших матеріалів (металів, кераміки, бетону, дерева, картону та ін.).

Продуктивність плазмового напилення - десятки кілограмів у годину. Товщина нанесених покриттів - від десятків мікрометрів до декількох міліметрів. Напилювання може проводитися як на обмежені ділянки виробів, так і на більші поверхні, практично без обмеження розмірів.

Ці переваги обумовлюють високу універсальність плазмового напилювання, що дозволяє наносити покриття із широким спектром призначень – зносостійких, корозійностійких, теплозахисних,

електроізоляційних та інших, а також для відновлення розмірів зношених деталей.

Розвиток газотермічних методів нанесення покриттів (електродугового, газополум'яного, плазмового, детонаційного) засновано на створенні високопродуктивного автоматизованого устаткування та прогресивних технологічних процесів. Однак на сучасному етапі особливу актуальність здобуває створення нових порошкових матеріалів, що забезпечують комплекс захисних покриттів при експлуатації вузлів і деталей, а також відновлення зношених поверхонь. Сучасна технологія та обладнання для газотермічного напилювання найчастіше не дають можливості одержувати високоякісні покриття напилюванням сумішей порошоків, що мають різні температуру плавлення, щільність і т.д. Тому останнім часом почав розвиватися новий напрямок - газотермічного напилювання композиційних порошоків, що представляють собою не механічні суміші, а інтегровані комплекси вихідних компонентів у кожній порошковій частці.

Перспективність карбонітрида титану для наплавлення, а також як зносостійкої складової композиційних матеріалів підтверджується тим, що він має високу термодинамічну стабільність із однієї сторони і більш високу пластичність в порівнянні з карбідом титану з іншої. Основним завданням було розробити наукові принципи створення нових композиційних матеріалів на основі карбонітрида титану, що володіють високим рівнем властивостей, з металевою зв'язкою, що складається з недорогих і недефіцитних компонентів.

Існуючі композиційні матеріали на основі карбонітрида титану КНТ-16 і КНТ-30 є перспективними. Однак вони вимагають доробки, тому, що до складу наведених матеріалів входять дефіцитні та дорогі нікель і молібден. Крім того, дифузія молібдену в  $TiCN$  приводить до часткової втрати міцності твердих сплавів, а, отже, до зниження їх фізико-механічних та експлуатаційних властивостей.

Ґрунтуючись на результатах змочування і міжфазної взаємодії для одержання нового композиційного матеріалу була обрана система TiCN - (Fe - Cr). Металевою зв'язкою у цьому композиті є сплав на основі заліза з добавкою 5-15 % хрому. Як показано в розділі 3 сплави Fe - Cr утворюють на поверхні карбонітрида титану близькі до нульових контактні кути, перехідна зона являє собою гетерофазну структуру, що складається із зерен TiCN, між якими рівномірно розподілена фаза на основі Fe - Cr. У результаті взаємодії в даній системі утворюються взаємні обмежені тверді розчини.

Результати досліджень наведені в даній роботі свідчать про високий рівень фізико - механічних і експлуатаційних властивостей розроблених композиційних матеріалів і доцільності їхнього широкого застосування. Для порівняння представлені властивості стандартних твердих сплавів. За рівнем мікромеханічних властивостей розроблені матеріали близькі до вольфрамівмісних твердих сплавів і перевищують безвольфрамові тверді сплави.

# РОЗДІЛ 1

## АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ТА ДОВГОВІЧНОСТІ РОБОТИ ПРЕЦИЗІЙНИХ ПАР

### 1.1 Конструктивні особливості прецизійних пар

Паливні системи сучасних двигунів і гідравлічні системи різного роду силових приводів машин складаються зі складних агрегатів. Це, насамперед, виготовлені з високою точністю паливні та гідравлічні насоси, які при мінімально можливих габаритах завдяки швидкохідності здатні мати високу продуктивність і створювати великий тиск палива або робочої рідини. Так сучасні роторні насоси експлуатуються при числі обертів, що доходить до 5000 у хвилину, а іноді й при значно більш високих швидкостях. Тиск рідини, що здатні створювати такі насоси, досягає  $300 \text{ кг/см}^2$ . У паливних системах сучасних двигунів внутрішнього згоряння крім насосів, що створюють необхідний тиск палива на вході в циліндри або камери згоряння, застосовуються ще спеціальні пристрої або цілі агрегати, що регулюють режим роботи двигуна [1].

Розвиваючи великі потужності при досить високій економічності, двигуни мають потребу в чіткому і точному регулюванні подачі палива. Це ж потрібно і для збереження високої надійності, тому що надійність залежить від температурного режиму роботи двигуна, а підтримка температури в припустимих межах забезпечується регулюванням подачі палива.

Регулювання подачі палива - процес дуже складний і вимагає спеціальної автоматичної апаратури, що включає в себе ряд клапанів і пристроїв, що регулюють або підтримують у відповідних порожнинах тиск, перепад тиску або витрату палива.

У гідравлічних агрегатах крім регуляторів продуктивності насосів для підтримки заданих рівнів тиску є спеціальні розподільні пристрої, за допомогою яких здійснюється керування гідроприводами.



Рисунок 1.1 – Плунжери насосу високого тиску дизелів.

При цьому як у насосах, так і у регуляторах та розподільниках найбільш відповідальні функції найчастіше виконуються прецизійними золотниковими або плунжерними парами рисунок 1.1.

Основними вимогами, що пред'являються до золотникових і плунжерних пар, є - висока стабільність малих по величині сил тертя між деталями та гарна герметичність, тобто наявність мінімальних, що не збільшуються в процесі роботи вище припустимої межі, втрат палива або робочої рідини через зазори між золотником (плунжером) і гільзою.

Вимога малих зусиль тертя в золотникових регулюючих пристроях визначається необхідністю забезпечити високі властивості чутливих елементів, що стежать за зміною тиску або перепаду тиску у відповідних порожнинах агрегату.

Функції чутливого елемента звичайно виконує золотник, який знаходиться під впливом тиску рідини та пружини. Найменші зміни тиску палива або робочої рідини повинні приводити до переміщень золотника відносно гільзи і змін витрати рідини через відповідні канали, пов'язані із золотниковою парою. У міру збільшення сил тертя між золотником і гільзою

мінімальне значення приросту тиску, на яке реагує золотник, зростає, отже, робочі властивості чутливого елемента погіршуються: знижується чутливість регулятора до регульованого параметра, підвищується статична помилка системи регулювання.

Незважаючи на різноманіття конструктивних форм і функціональних особливостей золотникових регулюючих пристроїв паливних і гідравлічних агрегатів, вимога стабільності тертя є загальною і визначає надійність роботи їх у процесі експлуатації.

Необхідність високої герметичності зазорів золотникових пар впливає з сутності виконуваних ними функцій розподільників потоку рідини, що проходить через вікна гільзи і дроселюються в процесі роботи пасками золотника. Звичайно, що зі збільшенням втрат рідини через зазори якість регулювання, здійснюваного золотниковим пристроєм, знижується.

Необхідний ступінь герметичності в золотникових і плунжерних парах досягається виготовленням їх з гарантованими малими зазорами, через які протікання рідини утруднене.

Такий спосіб герметизації рухомого з'єднання називається щілинним ущільненням, тому що між деталями створюється своєрідна щілина, що представляє на шляху потоку рідини великий гідравлічний опір. Ступінь такого ущільнення залежить від величини зазору, ширини щілини, утвореної сполученими поверхнями, і діаметрального розміру золотника або плунжера [1].

## **1.2 Технологічні особливості виготовлення прецизійних пар**

Експлуатаційна надійність і довговічність прецизійних золотникових і плунжерних пар визначається зносостійкістю та особливо протизадірною стійкістю деталей, що істотно залежать від властивостей матеріалу і якості обробки поверхонь тертя. При цьому під якістю обробки слід розуміти точність виготовлення деталей (точне витримування макрогеометрії), забезпечення необхідної шорсткості (мікрогеометрії) і однорідності по

механічних властивостях робочих поверхонь деталей. Вибір матеріалу і виду технологічної обробки в комплексі з умовами навантаження, мащення і відносних переміщень визначають інтенсивність зношування та імовірність тимчасового зависання або заклинювання деталей.

Як правило, деталі золотникових пар виготовляються з легованої сталі, що має високу твердість. Найчастіше застосовується хромиста сталь, що у результаті термообробки одержує високу твердість ( $HRC \geq 56$ ). Звичайно це сталі аустенітного або мартенситного класу із вмістом карбідів хрому, так як хром, створюючи з'єднання із залізом і з вуглецем, розподіляється між твердим розчином і карбідами. Хромисті сталі, крім високої твердості, володіють і підвищеною корозійною стійкістю, що має важливе значення для деталей, що працюють у паливному середовищі, що не виключає наявності вологи. Деталі прецизійних пар виготовляються із хромонікелевої сталі марки 12ХНЗА або хромонікельвольфрамкової сталі марки 18НХВА.

Термічна обробка деталей із хромистої сталі складається із загартування й наступного низького відпуску. Часто застосовується цементация або азотування поверхонь сталевих деталей золотникових пар.

Результати цементации оцінюють глибиною та ступенем цементации. Глибиною цементации умовно називають відстань від поверхні вглиб до появи в структурі перших зерен фериту. Для деталей золотникових пар ця глибина може становити 0,5 – 1,0 мм. Ступінь цементации характеризує середній вміст вуглецю в поверхневому шарі. Звичайно цементация проводиться до ступеня 1,2 % С.

Структура, що утворюється безпосередньо після цементации, не відповідає вимогам, що пред'являються до твердості поверхневого шару деталей. Крім того, через високу температуру та велику тривалість процесу цементации структура виходить грубозернистою.

Для досягнення необхідної твердості цементованого шару і його стійкості проти викришування в експлуатації, а також для одержання необхідних властивостей серцевини, деталі після цементации піддаються



обов'язковій термічній обробці. Термічна обробка має на меті подрібнити зерно, знищити сітку цементиту, одержати в поверхневому шарі тверду основу дрібногочастого мартенситу, а в ядрі – в'язку та міцну структуру дрібнозернистого фериту із сорбітом. При цьому твердість поверхнього шару становить HRC 60 - 65, а серцевини HRC 25-41 [2].

При азотуванні в структурі сталі утворюються з'єднання металу з азотом – нітриди, що володіють високою твердістю та теплостійкістю.

Спеціальні сталі для азотування одержали назву нітраллоїв. До них належать широко застосовувана сталь 38ХМЮА. Перед азотуванням деталі із цієї сталі піддають термічній обробці на сорбіт шляхом загартування в маслі з температури приблизно 940 °С и наступного високого відпуску до 640 °С. Структура сорбіт забезпечує високу в'язкість і достатню міцність серцевини. Потім після механічної обробки деталі піддають азотуванню в спеціальних печах. Звичайно деталі азотують на глибину 0,1 – 0,5 мм. Вміст азоту в поверхневому шарі доходить до 12 %. Твердість азотованої поверхні дуже висока й досягає HV 1200 кг/мм<sup>2</sup>. Через високу теплостійкість нітридів ця твердість практично мало змінюється при нагріванні деталей до 600 °С. Слід зазначити, що температура азотування становить 500-520 °С.

Перевагою азотування є відсутність жолоблення деталей, що пояснюється порівняно низькою температурою ведення процесу, і можливість застосування деталей у конструкціях без наступної термічної обробки, яка є обов'язковою після цементації.

При цементації можна одержати більш глибокий, але менш твердий, ніж при азотуванні, шар, стійкий до температури не вище 200 °С, тому що при більш високій температурі мартенсит переходить у троостит або сорбіт і твердість знижується [2].

Деталі плунжерних пар (плунжер і гільза) насосів високого тиску, призначених для подачі палива в циліндри двигунів із запаленням від стиску, виготовляються також зі сталі. При цьому звичайно застосовується легована інструментальна сталь марки ХВГ, якій присутня після термообробки

(загартування при 800 – 830 °С у маслі і відпуск при 170 - 200 °С) твердість HRC 50 - 62, або високовольфрамова швидкорізальна сталь P18, що має ще більш високу твердість HRC 62 - 64. До термічної обробки швидкорізальної сталі входить загартування з температури 1270 – 1290 °С і наступний відпуск при 540 – 560 °С. Дуже висока температура загартування необхідна для переходу у твердий розчин можливо більшої кількості карбідів з метою насичення елементами мартенситу, що збільшує теплостійкість металу.

Мікроструктура термічно оброблюваної сталі P18 складається з дрібногочатого мартенситу та структурно вільних карбідів. Обробка сталі холодом, що полягає в охолодженні загартованої сталі до температури 80 – 100 °С, приводить до перетворення залишкового аустеніту в мартенсит і підвищення твердості [2].

Деталі насосних елементів роторних плунжерних і поршневих насосів виготовляються із бронзи та сталі. Якщо плунжер (поршень) сталевий, то ротор або гільзу ротора роблять із бронзи й, навпаки, при бронзових плунжерах гільзу роблять сталевими. Крім того, у бронзових плунжерів торцеву сферичну поверхню, що третяся по шайбі (обойму) упорного підшипника, роблять сталевією. При цьому використовується сталь марки ХВГ і бронза, звичайно, берилієва.

Берилієва бронза являє собою сплав міді з 2 - 2,5 % берилія. Берилій дуже сильно впливає на механічні характеристики бронзи, надаючи їй високу міцність, твердість і пружні властивості. Розчинність берилія в міді при звичайній температурі становить менше 0,2 %, однак при нагріванні значно зростає. Використовуючи змінну розчинність, можна досягти значного зміцнення бронзи при термічній обробці. Бронза піддається загартуванню у воді з температури 780 °С и наступному старінню при 300 °С. Після такої термічної обробки твердість бронзи становить HV 375 кг/мм<sup>2</sup>.

Крім того, зазначена бронза має гарну корозійну стійкість [2].

При відновленні сталевих деталей золотникових розподільних пристроїв і плунжерних пар в умовах ремонту паливних і гідравлічних агрегатів застосовується хромування з наступним доведенням.

Хромування є одним з найпоширеніших гальваностегічних процесів, добре вивчених та освоєних у промисловості. Зносостійкість хромового покриття вище, ніж, наприклад, сталі ХВГ. Товщина хромового покриття звичайно не перевищує 0,005 мм.

У процесі виробництва золотникових і плунжерних пар домагаються не тільки високої точності виготовлення деталей, але й необхідної якості їхньої поверхні. Висока точність насамперед необхідна для забезпечення гідравлічного ущільнення зазорів між деталями й виключення більших невірноважених гідростатичних сил, які можуть виникнути при протіканні рідини по зазорах. Якість поверхні визначається мікрогеометрією та станом поверхневого шару і дуже впливає на тертя та зносостійкість.

При механічній обробці сталевих деталей золотникових і плунжерних пар, як правило, проводиться шліфування і наступне доведення робочих поверхонь [1].

Якість сталевий шліфованої поверхні визначається геометричними характеристиками (мікрорельєфом і хвилястістю), структурою поверхневого шару і залишкових напруг. У результаті шліфування можуть відбуватися структурні та фазові зміни в матеріалі поверхневого шару. Основною причиною цих змін є тепло, що виділяється при шліфуванні. Зменшення кількості тепла при шліфуванні та усунення небажаних структурних і фазових змін поверхонь, що шліфують, може бути досягнуто правильним вибором шліфувального круга, призначенням раціонального режиму шліфування, застосуванням мастильно-охолоджувального середовища.

Способом, що підвищує точність та якість деталей прецизійних пар, є доведення їхніх поверхонь абразивними та алмазними порошками й пастами. У результаті доведення удаляється дефектний шар металу зі слідами

локальних прижогів і грубими ризиками, які можуть утворюватися в процесі шліфування [3, 4].

### **1.3 Вплив робочих рідин на роботу прецизійних пар**

На довговічність і надійність прецизійних пар тертя сильно впливає робоча рідина, яка одночасно є і змащувальною речовиною. Тому при дослідженні антифрикційних властивостей і зносостійкості деталей золотникових і плунжерних пар необхідно враховувати фізико-хімічні та інші властивості палив і робочих рідин, у середовищі яких ці деталі працюють.

Залежно від умов роботи прецизійних пар на їхню надійність і довговічність впливають відповідні властивості палив і гідравлічних рідин. В одних умовах роботи важливе значення має здатність рідкого середовища до фізико-хімічної взаємодії з поверхнею матеріалу деталей, а в інших – в'язкість і ступінь забруднення рідини механічними частками. Тому до властивостей палив і робочих рідин, що впливають на надійність і довговічність золотникових плунжерних пар, варто віднести: в'язкість, поверхневу активність, механічну й хімічну стійкість, забруднення механічними домішками, насиченість газами та ін. До палив і робочих рідин, які широко застосовуються у сучасних машинах, агрегати яких оснащені прецизійними золотниковими і плунжерними парами, належать: реактивне паливо, олива АМГ-10, турбінна олива та інші, близькі до них по властивостям рідини [5].

### **1.4 Основні види несправностей золотникових і плунжерних пар**

Всі несправності в роботі золотникових і плунжерних пар гідравлічних і паливних агрегатів можна розділити на два основних види:

- 1) викликані підвищенням тертя в парах;
- 2) пов'язані зі зміною форми та розмірів деталей у результаті їхнього зношування.

Підвищення тертя в золотникових і плунжерних парах має раптовий характер і призводить до тимчасового зависання або заклинювання золотника (плунжера) у гільзі (гнізді ротора).

У розподільних пристроях підвищене тертя спричиняє запізнювання або відмову в роботі гідроприводу. У гідроприводах, які широко застосовуються у транспортних, будівельних та інших машинах, порушення стабільності тертя в золотниковій парі викликає несправну роботу відповідної системи керування. Замість плавного переміщення штока гідроциліндра і пов'язаного з ним керованого органа машини може відбуватися ускладнення керування, що викликає ривки в переміщеннях штока.

У деяких випадках підвищення тертя в золотниковому регулюючому пристрої може бути настільки значним, що приводить до заклинювання ручки керування.

Підвищення тертя в золотниковій парі, що підтримує постійний перепад тиску палива, приводить до порушення нормального режиму роботи двигуна. У випадку заклинювання зазначеної пари відбувається вимикання двигуна [1].

Як видно з наведених прикладів, підвищення тертя в золотникових і плунжерних парах супроводжується відмовами та виходом з ладу агрегатів. Ці відмови носять, як правило, раптовий характер, що може створювати небезпечні ситуації при виникненні їх на транспортних машинах, особливо в авіаційній техніці. Крім того, раптовість відмов ускладнює вживання необхідних заходів до їхнього попередження через труднощі прогнозування. Зношування деталей золотникових і плунжерних пар викликає порушення їхньої внутрішньої герметичності або підвищення в порівнянні з розрахунковим витрати рідини через зазори. Це може привести до ряду несправностей агрегатів і системи в цілому.

Зношування деталей плунжерних пар паливних і гідравлічних насосів зменшує продуктивність, найбільше значення створюваного тиску і знижує коефіцієнт корисної дії. Відбувається це внаслідок зростаючого перетікання

рідини через зазори в парах з порожнини високого в порожнину низького тиску. По тій же причині зменшується подача палива плунжерними насосами в циліндри дизелів з безпосереднім упорскуванням, що знижує їхню потужність [6].

Найпоширенішою причиною підвищення тертя, що викликає заклинювання та вихід з ладу деталей золотникових регулюючих пристроїв, є схоплювання поверхонь тертя [1].

Схоплювання являє собою утворення металевих зв'язків, і ,отже, міцних з'єднань сполучених поверхонь на ділянках їхнього безпосереднього контакту. При цьому відбувається своєрідне зварювання металевих поверхонь на окремих ділянках зіткнення (схоплювання однакових металів супроводжується об'єднанням їхніх кристалічних ґрат) [7, 8].

Для руйнування металевих зв'язків, що утворилися, потрібні тангенціальні зусилля, необхідні, принаймні, для подолання опору зрізу матеріалу менш міцної зі сполучених деталей на площі схоплювання. Однак при схоплюванні неминує відбувається пластична деформація поверхневих шарів металів і внаслідок цього їхнє зміцнення. Тому руйнування металевих зв'язків, що відбуває по менш міцному місцю вузла схоплювання, як правило, супроводжується вирином часток металу з однієї деталі й налипанням їх на поверхню сполученої. Налиплі частки, що мають більшу твердість, ніж матеріал сполученої деталі, при відносних переміщеннях деталі дряпають її поверхню, що також створює додатковий опір зсуву поверхонь, що схопилися. Якщо розміри налиплих часток по висоті перевищують величину зазору в парі тертя, то при відносному переміщенні деталей ці частки створюють розклинюючу дію, яка супроводжується також підвищенням зусиль зрушення [9].

Все це приводить при схоплюванні деталей до значного підвищення тертя та ушкодженню сполучених поверхонь (рисунок 1.2).

Зовнішніми ознаками схоплювання є наявність задирів, грубих подряпин на поверхнях деталей і перенос матеріалу однієї деталі на поверхню іншої.

Фретинг являє собою корозійно-абразивний процес руйнування сполучених металевих поверхонь деталей, підданих вібрації. Початковим актом руйнування поверхонь може явитися мікросхоплювання.

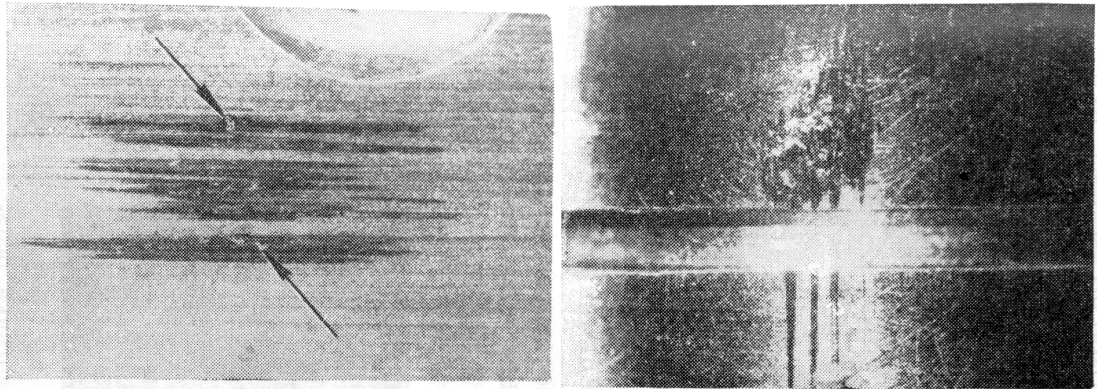


Рисунок 1.2 – Робоча поверхня прецизійних пар зі слідами схоплювання

На далі продукти руйнування металу, що схоплюються в зоні контакту, при відносних переміщеннях поверхонь роблять на них абразивний вплив. При цьому утворюються ушкодження у вигляді язвин із шорсткуватим, покритим щільним шаром окислів поверхнею (рисунок 1.3).

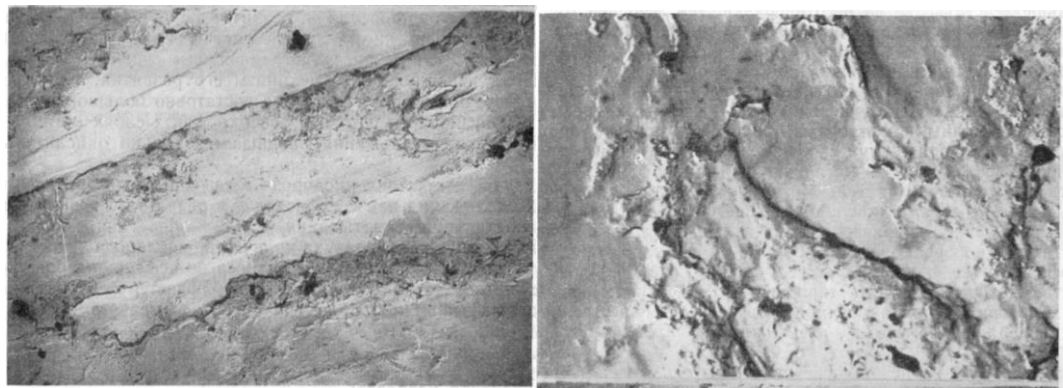


Рисунок 1.3 – Абразивний знос робочої поверхні плунжера

Погіршення чистоти поверхні та місцеве нагромадження продуктів зношування може привести до заїдання деталей прецизійних пар,

переміщення яких у процесі роботи здійснюється під впливом невеликих осьових зусиль [1].

## **1.5 Методи підвищення надійності та довговічності золотникових і плунжерних пар**

### **1.5.1 Конструктивні методи**

Основними шляхами підвищення надійності елементів машин є раціональне конструювання деталей, застосування нових більш стійких матеріалів, поліпшення технології виробництва, здійснення контролю на всіх стадіях виробництва і, нарешті, удосконалювання умов і способів експлуатації та своєчасне проведення ремонту.

Основними напрямками, у яких варто проводити роботи з удосконалювання конструкції золотникових пар з метою підвищення їхньої надійності з умови запобігання схоплювання, є:

1) виключення вібраційного характеру відносних поздовжніх переміщень деталей. Однак це неможливо, якщо вібраційні переміщення пов'язані з виконанням регулюючих функцій золотникових пар;

2) вибір режиму роботи золотникового регулюючого пристрою, при якому золотник переміщується відносно гільзи з амплітудою, що перевищує довжину площі контакту деталей у напрямку руху;

3) здійснення примусового обертання золотника або гільзи;

4) створення на поверхні деталей (або однієї з них) у місцях їхнього дотику макро- або мікрорельєфу, що забезпечують здійснення фактичного контакту деталей на ділянках, довжина яких у напрямку руху не перевищувала б амплітуди переміщення золотника;

5) зменшення питомого тиску на ділянках контакту деталей [10].



### 1.5.2 Технологічні методи

Ефективним способом підвищення опору деталей золотникових регулюючих пристроїв захопленню є застосування для їхнього виготовлення високо твердих металів та інтерметалідних сплавів. Однак для обробки, особливо при доводочних операціях, деталей із зазначених матеріалів потрібне застосування більш досконалих технологічних прийомів та інструментів, зокрема, використання алмазів. Наприклад, застосування звичайних доводочних паст не дозволяє одержати необхідну чистоту поверхні золотників, виготовлених зі сплавів, які містять бериліди, що в експлуатації приводить до інтенсивного зношування сполученої поверхні гільзи. Застосування доводочної пасти, що містить алмазний пилю, дозволяє істотно підвищити чистоту поверхні таких деталей шляхом видалення мікроступів високо твердих берилідів.

Важливою умовою надійності деталей прецизійних пар є висока точність їхнього виготовлення. Так, при виготовленні плунжерних пар дизельної паливної апаратури повинні бути у відповідності із твердими технічними вимогами точно витримані їхні розміри, зазори й чистота поверхні, тому що це визначає рівномірність подачі палива в циліндри двигуна. Зазначеними вимогами передбачається точність геометричних форм сполучених поверхонь плунжера й гільзи в межах 0,2 - 1,0 мкм, точність діаметральних розмірів у межах 0,01 - 0,02 мм, діаметральний зазор готових пар у межах 1 - 3 мкм, шорсткість поверхонь тертя повинна відповідати 11 – 12-му класу чистоти [4].

Найпоширенішою причиною зношування та зниження довговічності деталей золотникових пар є гідроерозійне руйнування поверхні золотників і гільз. Основним напрямком у підвищенні ерозійної стійкості металевих деталей є поверхневе зміцнення. Із цією метою рекомендується поверхневе загартування з індукційним нагріванням деталей струмами високої частоти і термодифузійна обробка азотом, хромом, алюмінієм, бором та іншими елементами [11].

Однак підвищення зносостійкості та надійності прецизійних пар тертя в результаті підвищення твердості матеріалу деталей або застосування високо твердих покриттів є не єдиним технологічним методом.

Істотно поліпшити умови змащення поверхонь деталей у зоні контакту можна, застосовуючи для виготовлення деталей золотникових пар пористі матеріали, створювані на основі методів порошкової металургії.

Пористі матеріали дозволяють зберігати масло на поверхні тертя, навіть якщо навколишнє рідке середовище не в змозі проникнути в зону контакту.

Відбувається як би «саозмащення» поверхонь тертя у результаті подачі оливи із просоченого нею пористого матеріалу завдяки капілярним явищам [12].

З вище сказанного випливає, що на теперішній час немає єдиного ефективного методу забезпечення надійної та безвідмовної роботи прецизійних пар, надання робочим поверхням деталей необхідних міцнісних, антифрикційних, протизадирних та інших показників. Тому питання залишається відкритим і необхідно використовувати передові досягнення науково-технічного прогресу в області створення нових захисних матеріалів.

### **1.6 Способи газотермічного нанесення покриттів**

На сьогодні до найбільш пріоритетних напрямків в області захисних покриттів, відносяться методи газотермічного напилювання і вакуумного нанесення. До групи промислово розвинених методів газотермічного напилювання відносять електродугове, газополум'яне, плазмове та детонаційне напилювання. Всі вони об'єднані єдиним принципом формування покриття з окремих часток, нагрітих і прискорених за допомогою високотемпературного газового струменя. Структура покриттів, отриманих цими методами, слоїста, утворена дискретними частками з більш-менш яскраво вираженими границями розділу [13].

Головним критерієм застосовності матеріалу як покриття є можливість переведу його часток у розплавлений або високо пластичний стан і наступна деформація їх при зустрічі з підкладкою. Високі температури в поєднанні з можливістю широкого регулювання складу струменя (інертного, відновного, окислювального) і швидкості його витікання забезпечують велику розмаїтість матеріалів, що напилюються газотермічними методами - від самих тугоплавких металів, оксидів, карбідів і т.д. до пластмас.

Малий термічний вплив на напилювану основу (звичайно 80 - 150 °С) дозволяє виключити небажані структурні перетворення в ній, уникнути деформації виробу, створює можливість нанесення покриття на основу з найрізноманітніших матеріалів (металів, кераміки, бетону, дерева, картону та ін.).

Продуктивність детонаційного напилювання – кілограми, газополум'яного та плазмового - десятки, електродугової металізації - до сотні кілограмів у годину. Товщина газотермічних покриттів - від десятків мікрометрів до декількох міліметрів. Напилювання може проводитися як на обмежені ділянки виробів, так і на більші поверхні, практично без обмеження розмірів.

Ці переваги обумовлюють високу універсальність газотермічного напилювання, що дозволяє наносити покриття із широким спектром призначень – зносостійких, корозійностійких, теплозахисних, електроізоляційних та інших, а також для відновлення розмірів зношених деталей.

Практичний досвід застосування газотермічних покриттів, накопичений за останні 20 - 30 років у різних галузях промисловості, показує, що таким шляхом можна, як правило, в 2-5 разів зменшити знос деталей машин, що експлуатуються у самих різних умовах, а також ефективно відновлювати зношені деталі.

У цей час високого рівня досягли дослідження в області газотермічного нанесення покриттів, накопичений великий досвід

практичного застосування цієї технології у різних областях техніки (від металургії і будівництва до космічної техніки, електроніки та медицини) [13].

Сутність процесів газотермічного нанесення покриттів полягає в утворенні спрямованого потоку дисперсних часток напилюваного матеріалу, що забезпечує перенос їх на поверхню оброблюваного виробу при оптимальних для формування слою покриття значеннях температури та швидкості.

Єдиної класифікації способів газотермічного напилювання немає. Існує докладна класифікація, запропонована Е. Кречмаром [14]. Роблять спроби розробки більш досконалих класифікацій [15-17], наприклад по енергетичній ознаці (або за формою напилюваного матеріалу), оскільки принципова сутність багатьох різновидів газотермічного нанесення покриттів визначається видом використовуюваного джерела енергії (рисунок 1.4).

У газополум'яних процесах нанесення покриттів використовується тепло, що виділяється при згорянні горючих газів (ацетилену, пропан-бутану, водню, метану, природного газу та ін.) у суміші з киснем або стисненим повітрям (рисунок 1.5). Залежно від того, були або не були перемішані горючий газ та окислювач до подачі в зону горіння, розрізняють попередньо перемішане і дифузійне полум'я. По характеру газового потоку в зоні горіння полум'я буває ламінарним або турбулентним [18].

Газ при витіканні в необмежений простір, заповнений повітрям або іншим газом, утворить вільний затоплений струмінь, що називається факелом. Периферійні ділянки струменя втягують у рух повітря або інший газ із навколишнього середовища. У міру збільшення маси, що рухається, і зниження її швидкості розріз струменя безупинно збільшується і весь струмінь здобуває форму конуса, що розширюється. Кут розкриття струменя приблизно дорівнює  $25^\circ$ .

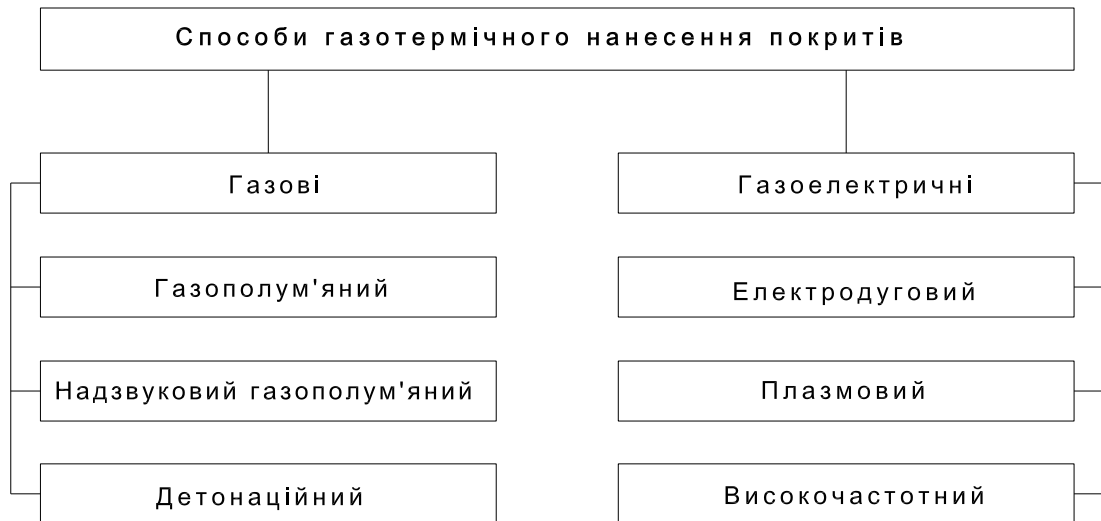
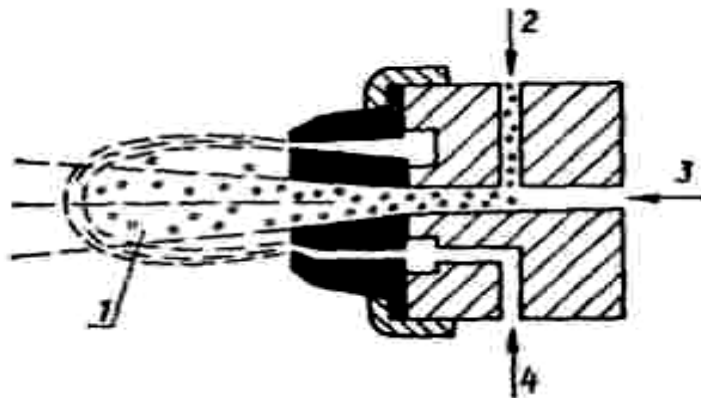


Рисунок 1.4 – Класифікація процесів газотермічного нанесення покриттів

Температура продуктів згоряння горючих газів при використанні як окислювача кисню досягає 2000 - 3000 °С. Найвищий питомий тепловий потік має ацетилено-кисневе полум'я, тому воно є найпоширенішим [16, 17].

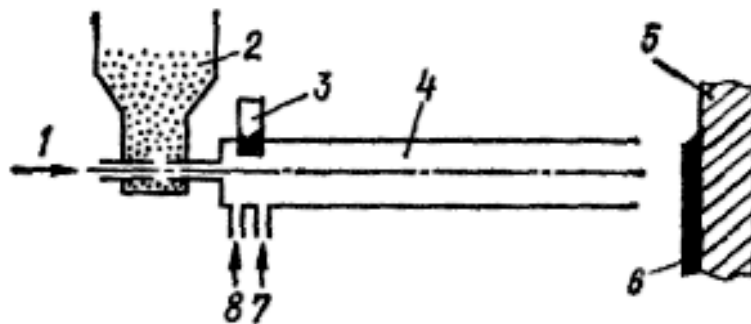
В останні роки для нагрівання і прискорення напилюваних часток усе ширше застосовують імпульсні джерела енергії, зокрема енергію вибуху. Імпульсні методи обробки матеріалів характеризуються більшими енергетичними можливостями, простотою та економічністю.



1 – газове полум'я; 2 – подача порошку; 3 – подача стиснутого повітря;  
4 – горюча суміш газів

Рисунок 1.5 – Схема процесу газополум'яного нанесення покриттів з порошкових матеріалів

Технологічні пристрої імпульсної дії мають високі питомі потужності, відрізняються значним спрощенням перетворення енергії в корисну роботу. Найбільш широко застосовується напилювання покриттів за допомогою енергії вибуху газових сумішей - детонаційне [19, 20, 21, 22]. Детонаційно-газове покриття успішно використовується для зміцнення навантажених поверхонь деталей, виготовлених з різноманітних матеріалів. Вони відрізняються високими фізико-механічними та експлуатаційними властивостями (міцністю, щільністю, зносостійкістю та ін.).



- 1 – підвід газу для порошку; 2 – бункер з порошком напилюючого матеріалу і дозуючим приладом; 3 – свічка запалення; 4 – ствол;  
5 – оброблюваний виріб; 6 – напилене покриття; 7 – підвід горючої суміші;  
8 – підвід флегматизуючого газу (азоту)

Рисунок 1.6 – Принципова схема пристрою для детонаційно-газового напилювання покриттів

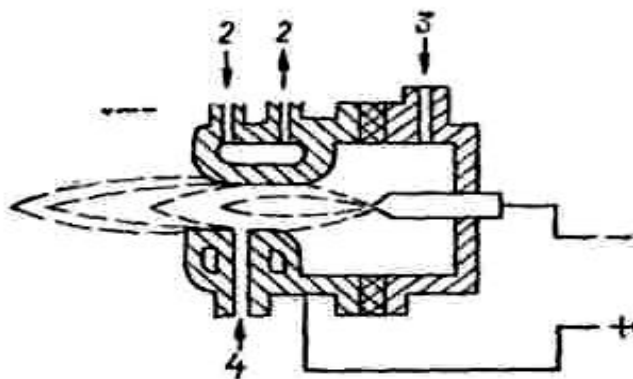
Детонаційно-газове напилювання є циклічним процесом. Пристрій для напилювання (рисунок 1.6) представляє собою канал круглого або прямокутного перетину, закритий з одного кінця, з механізмами для періодичної подачі суміші газів і порошку напилюваного матеріалу і зосередженим джерелом для періодичного запалення горючої суміші у закритого торця каналу.

Застосування газових сумішей, що детонують, різного складу дозволяє регулювати параметри детонації в досить широких межах. Використовуючи навіть один горючий газ, наприклад ацетилен, за допомогою різних домішок

можна одержувати різні параметри детонації. Для ацетилено-кисневих сумішей швидкість детонації може перевищувати  $3000 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ , а температура у фронті детонаційної хвилі досягає  $3300 \text{ }^\circ\text{C}$  [23, 24].

За допомогою детонаційно-газового методу напилювання можна регулювати ступінь нагрівання та швидкість напилюваних часток порошку ( $600 - 1000 \text{ мс}^{-1}$ ), а при певних режимах напилювання - досягти і розплавлення часток порошку з тугоплавких матеріалів. Однак цей метод має обмежені потенційні можливості по нагріванню часток напилюваного матеріалу в порівнянні із плазмовим методом.

При плазмово-дуговому нанесенні покриттів з порошків (рисунок 1.7) плавлення вихідного матеріалу відбувається в плазмовому струмені, температура якого становить  $5000 - 55000 \text{ К}$ . Дуговий плазменний струмінь одержують шляхом вдмухуванням плазмоутворюючого газу в електричну дугу, яка утворюється між двома електродами. Плазмовий струмінь являє собою потік речовини, що складає з електронів, іонів і нейтральних атомів плазмоутворюючого газу. У якості таких газів застосовують аргон, азот, водень, аміак, водяну пару, повітря, гелій й інші газы, а також їхні суміші. Частки вихідного порошку, потрапляючи в плазменний струмінь, розплавляються та переносяться на поверхню оброблюваного виробу [13].



- 1 – плазменний струмінь; 2 – підвід і злив води; 3 – плазмоутворюючий газ;  
4 – подача порошку

Рисунок 1.7 – Схема процесу плазмово-дугового нанесення покриттів з порошків

Застосовуючи плазму – високо ентальпійне і високо температурне джерело нагрівання - можна наносити покриття практично із всіх тугоплавких матеріалів, які в плазмовому струмені не сублімують і не мають інтенсивного розкладання.

Одним зі способів, що дозволяють підвищити якість газотермічних покриттів, особливо з металів і матеріалів, що піддаються розкладанню, окислюванню, азотуванню, є плазмове нанесення покриттів у камері з контрольованим за складом і тиском середовищем [25]. Для цих цілей застосовують також захисні соплові насадки, що створюють закритий простір між розпилювачем і виробом, заповнений плазмоутворюючим або захисним газом.

Більш досконалим є плазмове нанесення покриттів в динамічному вакуумі. Витікання плазмового струменя відбувається у вакуумну камеру, з якої безупинно відкачується робочі гази, причому швидкість струменя перевищує швидкість звуку в 2-3 рази, швидкість часток напилюваного матеріалу збільшується до  $800 \text{ мс}^{-1}$ . Отримують більш щільні, ніж звичайно, покриття, що характеризуються міцним зчепленням з основним матеріалом деталі.

Перевагами способу є:

1) можливість одержання покриттів з більшості матеріалів, що плавляться без розкладання, без обмеження по температурі плавлення;

2) можливість використання для утворення струменя дугової плазми газів різного роду: інертних (аргону, гелію), відновних (водню) і окисних (повітря, азоту), також аміаку, природного газу, водяної пари, що в поєднанні із застосуванням камер із захисним середовищем (вакуумом) або захисних насадок дозволяє регулювати властивості середовища, у якій нагріваються і рухаються частки порошку;

3) можливість гнучкого регулювання електричного і газового режимів роботи плазматрона, у тому числі в процесі нанесення покриття, що дозволяє управляти енергетичними характеристиками напилюваних часток та умовами



формування покриття;

4) досить висока продуктивність процесу: 3 - 20 кг•год<sup>-1</sup> для плазматронів з електричною потужністю 30 - 40 кВт і 50 - 80 кг•год<sup>-1</sup> для плазматронів потужністю 150 - 200 кВт;

5) досить високий коефіцієнт використання порошку (0,5 - 0,7), що залежить в основному від виду напилюваного матеріалу.

Недоліками плазмово-дугового способу нанесення покриттів у відкритій атмосфері є:

1) низька для ряду умов експлуатації міцність зчеплення покриттів з підкладкою (10 - 50 МПа при випробуваннях на нормальний відрив);

2) висока пористість одержуваних покриттів (2 - 10 %), що перешкоджає їхньому застосуванню в корозійних середовищах без додаткової обробки;

3) невисокий коефіцієнт корисного використання енергії плазмового струменя на нагрівання порошку (2 - 8 %);

4) високий рівень шуму (до 130 дБ) і випромінювання;

5) відносно висока вартість устаткування і його стаціонарність.

Розвиток технології плазмового напилювання в динамічному вакуумі дозволяє досягти міцності зчеплення 70 - 80 МПа, знизити пористість плазмових покриттів до 0,5 - 1 % [13].

Установка для плазмово-дугового нанесення покриттів включає: плазматрон; джерело живлення постійного струму; пульт керування з контрольно-вимірювальними та регулюючими приладами, обладнання для запалювання дуги; порошковий живильник (або систему подачі дроту); систему газопостачання та водяного охолодження; систему автоматичного блокування у випадку аварійних ситуацій (падіння тиску води, плазмоутворюючого газу, коротке замикання і т.п.).

Процес здійснюється під дією змінного високочастотного поля індуктора. Найбільш широко застосовуються в промисловості дугові плазматрони постійного струму - плазматрони прямої або непрямої дії, що

працюють в інертних, нейтральних і кисневмісних середовищах. У плазматроні прямої дії електрична дуга виникає між електродом і оброблюваним виробом, а в плазматроні непрямої дії - між електродом і соплом. По способу подачі плазмоутворюючого газу розрізняють плазматрони з тангенціальною та аксіальною подачами. Залежно від умов експлуатації дугові плазматрони можуть працювати на змінному та постійному струмі, в останньому випадку - у режимі прямої (мінус джерела живлення на електроді плазматрона) або зворотної (плюс джерела на електроді плазматрона) полярності. При плазменному напилюванні покриттів з порошків застосовують плазматрони непрямої дії.

### **1.7 Композиційні порошкові матеріали для плазмового напилювання покриттів**

Однією з істотних особливостей газотермічного напилювання порошків є можливість керування складом, структурою і відповідно властивостями покриттів за рахунок застосування різних порошкових композицій із широким інтервалом співвідношення компонентів, у якості яких можуть виступати метали, сплави, оксиди, карбіди, бориди, нітриди, сульфідні, графіти (алмаз), тверді змащення і т.д.

Застосування для цих цілей механічних сумішей має ряд істотних недоліків, головним з яких є сегрегація компонентів при змішуванні, транспортуванні їхньої суміші з дозуючих пристроїв у струмінь, а також у процесі самого напилювання. Сегрегація приводить до нерівномірності формування структури, пористості, зниженню міцності, і в ряді випадків експлуатаційних характеристик покриттів. Крім того, при напилюванні механічних сумішей відбувається окислювання деяких компонентів. Наявність у суміші порошків з різним гранулометричним складом, формою, щільністю, теплопровідністю, температурою плавлення приводить до нерівномірності нагрівання окремих часток у польоті, прискорення, затвердіння, кристалізації і в остаточному підсумку не сприяє досягненню

позитивних результатів. У зв'язку із цим і почали розвиватися методи виготовлення порошків, що забезпечують наявність у кожній частці комплексу всіх вихідних компонентів. При цьому всі частки порошку мають однакові масу, хімічний склад, щільність, теплопровідність і т.д. Для досягнення цього застосовувані способи дають можливість одержувати порошки плакованої та конгломератної будови [30]. У літературі поширені кілька термінів для визначення композиційних матеріалів: плаковані порошки, екзотермічно реагуємі порошки (для інтерметалідних композицій з екзотермічним ефектом при їхній взаємодії), композитні порошки, агломеровані порошки (для порошків, одержаних спіканням, прокаткою, дробленням або перемішуванням зі зв'язкою і наступним сушінням при перемішуванні або розпиленні) і т.д.

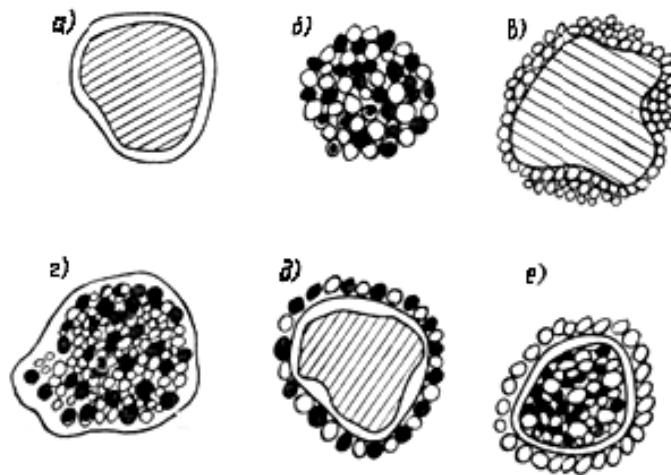
Терміни «плакований порошок», «конгломерований порошок» є двома окремими випадками загальної назви «композиційний матеріал», що повинен задовольняти наступним вимогам [31]:

- 1) виготовлятися людиною;
- 2) являти собою сполучення хоча б двох хімічно різнорідних матеріалів із чіткою границею розділу між компонентами;
- 3) утворювати цей матеріал сполученням компонентів;
- 4) характеризуватися властивостями, якими не може володіти ніякий з компонентів, взятий окремо.

Таким чином, композиційний порошковий матеріал - це порошок складного складу, у якого кожна гранулометрична самостійна частка складається з макрообсягів декількох компонентів, що відрізняються за хімічним складом, і ідентична по якісному складу всім іншим часткам. В обсязі цього визначення композиційний порошок відрізняється від порошків сплаву з дисперснозміцненого матеріалу (по розміру об'єму компонентів) і механічної суміші різних порошкових матеріалів (по характеру складу). Не слід також підмінювати зазначений термін терміном «порошкова

композиція», яким у його точному змісті визначають компактний композиційний матеріал, отриманий з порошкових матеріалів.

Композиційні порошки можуть бути класифіковані на основі наступних принципів: по конструкції частки (будові, морфології); способу одержання; характеру взаємодії компонентів при нагріванні ті призначенню покриття.



а – формування, б – конгломерування, в - гетеродисперсні конгломератні частки, г – е - плакування

Рисунок 1.8 – Конструкція композиційних порошків.

Конструкції часток композиційного порошку обумовлені способом їхнього одержання і розділяються на дві групи: плаковані та конгломеровані частки. Крім того, можна розглядати частку, отриману із застосуванням двох зазначених способів (рисунок 1.8).

При плакуванні вихідної частки (ядра) на її поверхні формуються один або кілька шарів інших матеріалів (рисунок 1.8, а). Конгломеруванням можна досягти більшої розмаїтості в будові часток (рисунок 1.8, б, в). При використанні вихідних порошків із частками однакових розмірів (відношення діаметрів  $1/3$ ) утворяться гомодисперсні конгломератні частки (рисунок 1.8, б). Якщо одна частка служить ядром, на поверхні якого

розміщені дрібнодисперсні частки інших компонентів, то формуються гетеродисперсні конгломератні частки (рисунок 1.8, в). Комбінації двох основних типів часток (плакованих і конгломератних) дозволяють одержувати порошки змішаного типу (рисунок 1.8, г-е). Причому ті самі компоненти можуть бути присутнім як у вигляді плакуючої оболонки, так і у складі конгломератів. Число одержуваних часток для трикомпонентної системи 34 і для двохкомпонентної - 7.

Залежно від характеру взаємодії компонентів при їхньому нагріванні порошки можна розділити на дві більші групи : термонеітральні і екзотермічно реагуючі. В останніх при нагріванні протікають хімічні реакції, обумовлені взаємодією компонентів, з утворенням покриттів, склад яких різко відрізняється від вихідного. У термонеітральних композиціях також можлива взаємодія в результаті плавлення компонентів (особливо, у системі метал-металоподібне з'єднання). В окрему групу варто виділити порошки на основі оксидів, при плавленні інтенсивно дисоціюючих і утворюючих нові з'єднання з компонентами порошку. Найбільш відомі композиційні порошки для газотермічного напилювання наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Класифікація композиційних порошків для газотермічного напилювання.

Інтерметалічні	Керамічні	Метал-тугоплавке з'єднання (кермети)	Метал-тверде мастило	Інші
Al-Ni Ti-Ni Al-Co Si-Co NiCr-Al Mo-Ni	SiO <sub>2</sub> – Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> TiO <sub>2</sub> – Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	WC – Co WC – Ni TiC-WC-Co	Графіт – Ni CaF <sub>2</sub> – Ni MoS <sub>2</sub> - CuSn	Алмаз – Ni Алмаз – Cu

З таблиці випливає, що серед всіх плакованих порошків переважають порошки, плаковані нікелем (кобальтом), а порошки з нанесеним на їхню

поверхню алюмінієм є найпоширенішими серед порошків конгломератного типу.

Проблема підвищення зносостійкості шляхом використання композиційних матеріалів і захисних покриттів з них останнім часом стає усе актуальніше.

Розгляд найбільш вивчених процесів при терті [35] показує, що наявність деяких оксидів в адгезійній зоні двох контактуючих поверхонь (або в мастилі) забезпечує високі антифрикційні характеристики.

Адсорбційно-окисно-відбудовні процеси в зоні тертя, обумовлені локальним підвищенням температур контактуючих зон, забезпечують оборотність процесів дисоціації (відновлення), адсорбування кисню і окислювання (при відсутності повної десорбції).

Стосовно до покриттів з композиційних порошків слід однозначно зазначити тільки декілька факторів, що забезпечують підвищення зносостійкості пар тертя у режимі граничного та сухого тертя: одержання покриттів з оптимальною гетерогенністю, максимальною когезією, мінімальною дисперсністю продуктів тертя при забезпеченні масловсмоктування за рахунок пор і аморфізованих зон в оксидних і металевих компонентах.

Поряд із застосуванням аморфних антифрикційних структур, у композиційному порошку та покриттях можливе введення твердих змащень, легкоплавких антифрикційних компонентів, які в сукупності з основною структурою забезпечують раціональне сполучення міцнісних і антифрикційних характеристик покриттів. Крім того, на триботехнічні характеристики впливають організація процесу формування покриття, режими та технологічні прийоми газотермічного напилювання композиційних порошків, керування та оптимізація яких можлива методами математичного планування.

Потрібно також ще раз відзначити, що вивчення поверхні тертя при наявності аморфізованих і метастабільних структур дозволяє управляти їх

кількісним і якісним складом і дає можливість розробити композиційні порошки та технологію напилювання покриттів, що забезпечують високі триботехнічні характеристики в різних областях застосування.

Як показує аналіз застосування композиційних порошків для напилювання зносостійких покриттів, у різних умовах тертя та зношування, покриття мають високі триботехнічні характеристики, що дає можливість широко застосовувати процеси газотермічного напилювання композиційних порошків на різні деталі та вузли тертя.

Тертя та зношування композиційних покриттів визначаються комплексом властивостей основної матриці і включень (зносостійких, антифрикційних). Ці властивості характеризуються не тільки складом, але й умовами взаємодії компонентів при напилюванні, змочуваністю, взаємодією із зовнішнім середовищем і іншими факторами, від яких багато в чому залежить конструкція часток.

Для підвищення зносостійкості в основному використовуються порошки плакованих карбідів вольфраму, хрому, титана, оксидів алюмінію, хрому, титана і т.д. у композиції з металевими зв'язками. Карбідохромовий композиційний порошок ( $\text{Cr}_3\text{C}_2$  - 25 % NiCr), отриманий методом спікання суміші зі спиртом при 1200 °C з наступним розмелом, напилений плазменним способом і випробуваний при температурах 20 - 1000 °C на тертя і зношування. До температур 400 °C процес зношування лімітується когезійною міцністю, ослабленням зв'язків і мікрівикришуванням карбідів з розвитком абразивного тертя. При високих температурах (600 - 1000 °C) тертя протікає по оксидних плівках (Ni,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CrO}_3$ , NiCrO<sub>4</sub>), а абразивні процеси подавлені. Цим обумовлена температурна залежність коефіцієнта тертя: при 200 °C коефіцієнт тертя дорівнює 0,4 - 0,45, при 600 - 1000 °C - 0,28 - 0,3. Покриття із системи  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  - NiCr, отриманої спіканням, як і покриття із плакованого нікелем карбїду хрому, виявляються працездатними в умовах високих температур (до 900 - 1000 °C) [33].

В аналогічних умовах (при сухому терті і високих температурах), за даними А.Г. Цидулко, виявляються також працездатними покриття з порошку карбіду титана, плакованого нікелем. Ці покриття мають високу міцність і щільність, що дозволило (при наявності оплавлених карбідних включень) їх використати при сухому терті в парі зі сталлю ШХ15. Випробуваннями на машині моделі СМЦ-2 встановлено, що зі збільшенням масового вмісту нікелю (25, 35 та 50 %) зношування покриття зменшується (на 9,85, 2,47 і 2,16 мг/ч відповідно) за рахунок підвищення когезії карбідних часток у металевій матриці [32].

Порівняння зносостійкості покриттів з композиційних плакованих порошків  $Al_2O_3$  - Ni з іншими покриттями показало високу ефективність перших. Результати дослідження зносостійкості зразків з покриттями  $Al_2O_3$  - Ni в умовах сухого тертя при швидкості 1 м/с, навантаженні 0,25 МПа і загальному шляху тертя 47,1 км представлені в таблиця 1.2 [34].

Таблиця 1.2 – Зносостійкість плазових покриттів з композиційних порошків  $Al_2O_3$  - Ni в умовах сухого тертя.

Покриття	Знос, м	Розрахунковий об'ємний знос, $см^3$	Відносна зносостійкість
Сталь 40X (55 HRC) без покриття	0,15	0,019	1
$Al_2O_3$	0,071	0,019	1
$Al_2O_3$ —36 % Ni	0,032	0,007	2,7
$Al_2O_3$ - 48 % Ni	0,033	0,006	3,2
ПГ-СРЗ (оплавлено)	0,032	0,3045	4,2

Більше ефективним покриття стає, якщо напиляти композиційний порошок  $Al_2O_3$  –  $TiO_2$  (рутил). Особливістю покриттів з таких композиційних



порошків є знижена мікрошорсткість поверхні, що позитивно відбивається на трибологічних характеристиках.

Застосування композиційних порошків системи  $Al_2O_3 - TiO_2$  при алмазному вигладжуванні покриття і одержанні гомогенної структури з низькою шорсткістю є досить ефективним засобом підвищення зносостійкості при невисоких ударних і циклічних навантаженнях (як при сухому терті, так і при рідинному) [29].

Аналіз особливостей процесу напилювання композиційних порошків, вивчення структури і властивостей покриттів з композиційних порошків свідчать про можливість спрямованого створення композиційних порошків для газотермічного напилювання покриттів різного практичного призначення із заздалегідь заданим комплексом характеристик.

При створенні порошку необхідна оцінка вимог, пропонованих до покриття, і аналіз умов його експлуатації на конкретній деталі. З одного боку, потрібні оцінка конструкції і технології виготовлення деталі з покриттям, з'ясування можливості і необхідності використання покриття того або іншого призначення, а з іншого боку - з'ясування умов експлуатації. Звідси випливає необхідність одержання покриттів із заданою конструкцією і комплексом властивостей, що задовольняють умовам експлуатації.

При конструюванні порошку варто однозначно вибрати основний матеріал композиції, що несе експлуатаційні навантаження, і додатковий (один або декілька), що забезпечує при напилюванні досягнення комплексу необхідних характеристик покриття. Основні металеві добавки, що використовуються в композиційних порошках, мають кілька призначень, що задовольняють основним вимогам, показаним у таблиці 1.3.

Після конструювання і виготовлення порошку видаються технологічні рекомендації з температурно-часових умов його нагрівання, прискорення, кристалізації (охолодження) на підкладці, а також іншим факторам процесу напилювання, що забезпечує оптимальний стан частки при формуванні покриття. Остаточна конструкція частки визначається після оцінки

властивостей покриттів і у результаті експлуатації деталі в реальних умовах. Аналіз процесів напилювання, а також фізико-механічних і експлуатаційних характеристик покриттів дає можливість оцінити в порівняльних умовах якість композиційних покриттів зі звичайних і композиційних порошків [29].

Таблиця 1.3 – Властивості металевих добавок композиційних порошків

Вид добавки	Призначення добавки						Основні методи введення добавок	
	Захист ядра	Матриця покриття	Синтез зносостійких фаз	Антифрикційні властивості	Пластифікація покриттів	Збільшення середньої густини	Плакування	Конгломерування
Al	x				x		x	x
Co	x	x			x		x	x
Cr			x				x	x
Cu		x		x			x	x
Mo				x	x	x		x
Ni	x	x	x				x	
Ti			x					x
Fe		x	x	x	x		x	x

## Висновки до розділу 1

З вище сказанного випливає, що на теперішній час немає єдиного ефективного методу забезпечення надійної та безвідмовної роботи прецизійних пар, надання робочим поверхням деталей необхідних міцнісних, антифрикційних, протизадирних та інших показників.

Одним із ефективних способів підвищення зносостійкості є нанесення захисних покриттів плазово-дуговим методом. Завдяки великому діапазону температур (5000 - 55000 К) можна напилювати покриття з різних матеріалів від пластмас до тугоплавких з'єднань. Причому термічний вплив на основу дуже не високий (до 500 К), що запобігає зміні геометричних розмірів та хімічних перетворень у матеріалі підкладки. На сьогоднішній день перспективним є нанесення захисних покриттів з порошкових композиційних матеріалів, що забезпечують наявність у кожній частці комплексу всіх вихідних компонентів. Саме це дозволяє одержати покриття із заданою конструкцією і комплексом властивостей, що задовольняють умовам експлуатації. При конструюванні порошку варто однозначно вибрати основний матеріал композиції, що несе експлуатаційні навантаження, і додатковий (один або декілька), що забезпечує при напилюванні досягнення комплексу необхідних характеристик покриття. Причому в наші дні дуже актуальним є знаходження компромісу між вартістю матеріалу, його властивостями, екологічною безпекою. Існуючі вольфрамівмісні композиційні матеріали не задовольняють вимогам, пропонованим до них з ряду причин, серед яких низький рівень жаро- і корозійної стійкості матеріалу та покриття, і, особливо, дефіцитність і дорожнеча вольфраму і кобальту. Тому є необхідністю розробка нового матеріалу, який би володів високими експлуатаційними властивостями і був би виготовлений з недорогих компонентів. Дослідження пов'язані з вибором цих компонентів, а також визначенням властивостей розробленого композиційного матеріалу описані в розділі 3.

## РОЗДІЛ 2

### ТЕХНОЛОГІЯ НАНЕСЕННЯ ПОКРИТТІВ ПЛАЗМОВИМ МЕТОДОМ

#### 2.1 подача порошку в плазмовий струмінь

У цілому весь технологічний процес плазмового напилювання порошкових покриттів може бути розбитий на три послідовних стадії, розділених просторово, різних по своїй фізичній сутності.

Перша стадія полягає в процесі транспортування порошку на ділянці від джерела до плазмотрона та введення його в плазменний струмінь.

Друга стадія охоплює процеси, що відбуваються при русі часток порошку в об'ємі плазмового струменя (нагрівання, прискорення та уповільнення, взаємодія матеріалу часток із середовищем).

І, нарешті, третя стадія складається власне з формування покриття, тобто охоплює процеси, що протікають у системі «напилюваний матеріал - підкладка» починаючи з моменту досягнення часткою самої підкладки або поверхні частково вже сформованого шару покриття [36].

Велике значення для процесу плазмового напилювання, як уперше було відзначено Д.Р. Махаємо, Н.Е. Вирою й Д.Л. Уолкером, мають тип джерела порошку, склад і витрата транспортуючого газу, розташування точки введення та кут введення порошку в плазменний струмінь.

Важливою характеристикою є ступінь рівномірності подачі порошку в плазменний струмінь. Для більшості конструкцій джерела пульсації витрати порошку обумовлені частотою обертання шнека або іншого механізму, що подає. Неперіодичні пульсації великої амплітуди виявлені у вібраційних і аераційних живильників. Ця нерівномірність у подачі порошку шкідливо впливає на протікання процесу плазмового напилювання та відбивається на стабільності властивостей одержаних покриттів [38].

Точність дозування і рівномірна подача до пальника пов'язані з такими властивостями порошку, як текучість, кут природного відкосу, розсіювання.

Комплекс цих властивостей визначає вимоги до системи подачі порошку при плазмовому напилюванні.

Особливі складності виникають при використанні для напилювання механічних сумішей порошків. У процесі транспортування по трубопроводах, що подають, і вже в самому живильнику відбувається сепарація компонентів задалегідь приготовленої суміші.

Вибір раціонального місця введення порошку в струмінь являє собою предмет досить широкого обговорення. У цілому розглядають чотири основні схеми подачі порошку при плазмовому напилюванні (рисунок 2.1.): в стовп стислого дугового розряду (у дуговий проміжок) (1); до анодної плями з використанням частини стовпа стислого дугового розряду (2); за анодною плямою усередину каналу сопла-анода (3); за зрізом сопла-анода в зовнішню вільнорозширюючу частину струменя плазми (4) [39].

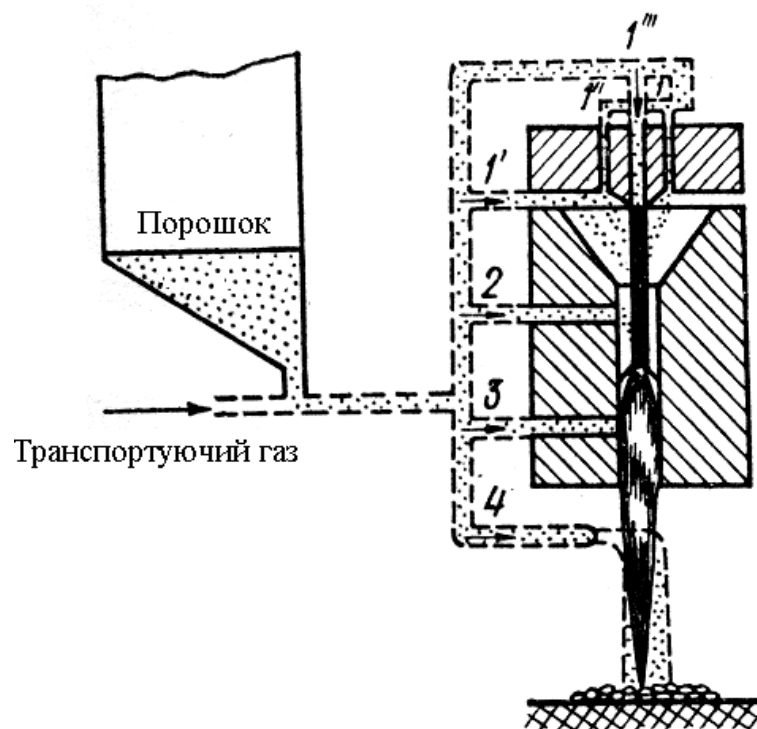


Рисунок 2.1 – Схеми подачі порошку в плазмовий струмінь.

У більшості вітчизняних плазмотронів дотепер реалізується третій варіант - подача за анодною плямою. До його недоліків відноситься можливість утворення

настилів на внутрішній стінці сопла, що порушує нормальну роботу і може привести до появи дефектів у покритті [36].

Зовнішня подача забезпечує найбільш стабільні умови роботи, однак знижує ступінь використання тепла струменя на нагрівання порошку.

До найбільш ранніх робіт по вивченню характеру траєкторії часток, що вводять у плазменний струмінь, відносяться дослідження Б.Ф. Скотта і Дж. Кеннела. Ними встановлений ступінь впливу на положення траєкторії розмірів і щільності часток, їхньої швидкості в точці введення. При напилюванні полідисперсних порошоків і поперечній подачі їх стосовно осі струменя потік порошкового матеріалу ділиться на три частини: частки з високою кінетичною енергією, які проходять крізь плазменний струмінь; частки, що рухаються поблизу осі струменя, і частки з малим запасом енергії, що не проникають у струмінь і рухаються по периферії. Задовільне покриття формують перші дві частини потоку, однак частки, що пройшли крізь струмінь, виявляються в зонах з більшим змістом кисню і піддані значному окислюванню. Слабко прогріті частки із третьої частини потоку, потрапляючи в покриття, приводять до утворення пор та ослабленню міцності зв'язків у покритті.

## 2.2 Процеси руху і нагрівання часток у потоці плазми

Весь комплекс явищ, що мають місце на шляху руху часток порошку від моменту входу в контакт із плазмовим струменем до моменту торкання ними підкладки, може бути розбитий на наступні чотири основні групи:

1) газодинамічні процеси, що викликають прискорення і сповільнення руху частки та визначальний час її перебування в різних зонах, а також запас кінетичної енергії в момент зустрічі з підкладкою;

2) процеси теплообміну, супроводжувані фазовими переходами (плавлення, випаровування), у результаті яких частка до моменту участі її у формуванні покриття здобуває певний запас теплової енергії;

3) процеси зміни хімічного складу вихідного матеріалу, що напилюється, внаслідок термічного розкладання, взаємодії поверхні часток з

елементами навколишнього середовища (киснем, азотом та ін.), а також взаємодії в об'ємі часток у випадку напилювання гетерогенних порошкових матеріалів;

4) морфологічні зміни в порошковому матеріалі внаслідок явищ сфероїдизації при плавленні, зіткнення і руйнування часток у запиленому газовому потоці.

Відомості про значення теплової та кінетичної енергії, частки, її розміри, форми і хімічний склад є необхідними при аналізі процесу формування покриття [40].

Що стосується теплофізичних характеристик, то тут найбільший інтерес представляє критерій Біо. Розрахункові значення свідчать про широкий діапазон його можливих змін залежно від роду напилюючого матеріалу та сполуки плазмоутворюючого газу (0,001 - 5,5), тобто про нагрівання часток як під час відсутності температурного градієнта, так і при істотному перепаді температур між їхньою поверхнею і центром.

Іншим теплофізичним критерієм, що характеризує умови теплообміну, є критерій Фур'є -  $Fo$ . Він визначає час переходу процесу теплообміну у квазістаціонарний стан, вирівнювання температури по перетину частки (обернено пропорційно  $Fo$ ).

Виходячи з положення, що частка порошку взаємодіє з неізотермічним затопленим струменем плазми, що володіє радіальними і осьовими градієнтами температури і швидкостей, можна оцінити сили, що впливають на неї в цих умовах: силу аеродинамічного опору; силу, обумовлену градієнтом тиску в потоці; силу прискорення прилягаючих до поверхні частки шарів газу (приєднаної маси); силу, обумовлену нестационарністю процесу і залежну від характеру руху частки за попередній період (сила Бассе); силу, обумовлену інерцією витиснутого часткою об'єму газу; силу ваги частки; силу термофореза, обумовлену наявністю температурного градієнта в потоці; силу, обумовлену обертанням частки через градієнт швидкості потоку, що обтікає (сила Магнуса).

Розрахункова оцінка величини цих сил показує, що якщо перша з них становить  $50 \cdot 10^{-3} \text{ Н}$ , то сили Бассе й Магнуса перебувають на рівні  $3 \cdot 10^{-3}$  та  $2 \cdot 10^{-3} \text{ Н}$  відповідно, а інші -  $10^{-3}$  -  $10^{-5} \text{ Н}$ .

Нагрівання часток плазмовим струменем при значенні критерію, Кнудсена ( $Kn$ )  $< 1$  в основному визначається конвективним теплообміном і оцінюється за критерієм Нуссельта ( $Nu$ ). У більшості випадків думають, що теплопровідність часток та їхні розміри такі, що тепловідвід поверхні усередину частки в її теплообміні з газом не грає істотної ролі ( $Bi < 0,1$ ).

Експериментальному дослідженню було піддане широке коло варіантів плазмового напилювання. У якості плазми утворюючих газів були застосовані аргон, азот, їхньої суміші з воднем. Число досліджених напилюючих матеріалів досить обмежено, найбільше часто використовували вольфрам і оксид алюмінію, а також алюміній, карбід вольфраму. Досліджували вплив на параметри плазмового струменя та напилюючого порошку сили струму, витрати газу, відстані від зрізу сопла, а також щільності матеріалу і розміру часток дисперсної фази.

Основні висновки, які отримані в результаті виконаного об'єму експериментальних робіт, полягають у наступному. Установлено задовільне (з точністю до 15 %) збіг експериментальних даних з розрахунками по розроблених математичних моделях, більш повне - у випадку застосування часток меншого діаметра. Існуючі залежності коефіцієнта лобового опору ( $C_d$ ) від  $Re$  для холодних потоків застосовні в умовах плазмового напилювання. Радіальний розподіл швидкостей і температур газу та часток у плазмового струменя може бути описано профілями Шліхтінга. Режим плинину газу поблизу поверхні часток у ряді випадків може відповідати плинину з ковзанням.

Всі математичні моделі плазмового напилювання, як правило, розроблені за умови відсутності хімічних реакцій між газом і поверхнею, часток та в об'ємі останніх. Однак у реальних умовах покриття по своїй сполуці в більшості випадків відрізняється від вихідного матеріалу



напилюючих часток. До основних типів змін у складі напилюючого матеріалу, виявленим різними дослідниками, ставляться наступні:

1. Фазові переходи при нагріванні матеріалу з наступною фіксацією високотемпературних фаз при загартуванні. До таким ставляться утворення  $\gamma$ -фази оксиду алюмінію, тетрагональної фази діоксида цирконію.

2. Термічне розкладання напилюваного матеріалу під впливом високих температур. Це приводить, наприклад, до переходу вищих оксидів елементів в оксиди з меншим змістом кисню або навіть до утворення металу ( $\text{TiO}_2$  переходить у  $\text{Ti}_{2-x}$ , Ni - в Ni), розкладанню силікатів ( $\text{ZrSiO}_4$  розпадається на  $\text{ZrO}_2$  та  $\text{SiO}_2$ ) і т.п.

3. Процеси окислювання і нітридоутворювання в результаті взаємодії часток з компонентами навколишнього середовища - повітря. Цей тип змін сполуки є найпоширенішим. Практично всі метали та сплави, карбіди, бориди і інші тугоплавкі сполуки при напилюванні на повітрі в більшому або меншому ступені збагачуються киснем і азотом, гублячи одночасно частину вихідних компонентів. Для металів характерне збільшення вмісту кисню та азоту, поява оксидів і нітридів. У сплавах внаслідок розходження в активностях компонентів у процесі напилювання сполука змінюється в порівнянні з вихідним. Найбільш докладно вивчене поведження при плазмовому напилюванні карбідів різних металів. Різними дослідниками встановлено, що втрати вуглецю можуть становити від 20 до 80 % вихідного змісту, при цьому утворюються нижчі карбіди, оксикарбіди, карбонітриди, вільні метали і їхні оксиди. Те ж спостерігається при нанесенні покриттів з боридів, нітридів та інших безкисневих тугоплавких сполук.

Оскільки багато із встановлених перетворень супроводжуються значними тепловими ефектами (як позитивними, так і негативними), це значно ускладнює протікання процесу теплообміну, відбивається на властивостях покриття, з одного боку, у зв'язку з відхиленнями в його сполуці, а з іншого - за рахунок зміни теплового стану часток.

Явища в об'ємі плазмового струменя з напилюваними частками, пов'язані зі зміною форми та розмірів часток, їхньою взаємодією в процесі руху, особливо при порошковому напилюванні, практично не вивчені. Тому розроблені математичні моделі, як правило, містять у переліку допущень припущення про монодисперсні сферичні частки і відсутність взаємодії в польоті часток між собою. Проте неістотність перетворень часток, обумовлених цими явищами, для процесу напилювання покриттів залишається недоведеною.

Таким чином, у результаті теплової, газодинамічної та хімічної взаємодії порошку із плазмовим струменем у контакт із підкладкою вступає ансамбль часток, що володіє певним спектром значень фізико-хімічних властивостей (розмірів, сполуки), кінетичної та теплової енергії, розподіленим по площі «плями напилювання».

### **2.3. Формування плазмового покриття**

Формування власне покриття є завершальною стадією процесу плазмового напилювання, у результаті якого реалізуються результати двох вище розглянутих стадій і утвориться система покриття – основа з певним комплексом фізико-хімічних і механічних властивостей.

На цій стадії процесу формування покриття крім напилюваного матеріалу бере участь основа, а отже, у число факторів, що впливають на цей процес, входять сполука матеріалу основи з його теплофізичними та фізико-хімічними характеристиками, стан поверхні основи (наявність різного роду плівок, ступінь шорсткості, нагрівання і т.п.). Не можна не враховувати при цьому і термічний вплив на основу газового струменя. Таким чином, етап формування покриття являє собою складний комплекс різного роду явищ, що впливає на одержання покриття з бажаним рівнем властивостей.

Феноменологічний аналіз явищ, що відбуваються на цій стадії, дозволяє виділити в числі основних наступні: удар частки об поверхню; деформацію частки; термічні процеси в зоні контакту; виникнення сил зчеплення частки з контактною поверхнею; установлення термічної рівноваги

системи покриття - основа з навколишнім середовищем і формування залишкових напруг.

Ці явища не розділені строго в часі і в основному накладаються одне на одне.

Ключовим моментом у дослідженні всього цього комплексу є встановлення механізму фізико-хімічних процесів, що протікають при формуванні покриття й приводять до утворення сил зчеплення покриття з основою [41].

Аналіз процесів, що відбуваються при ударі та деформації частки, дозволив зробити принципово важливий висновок - можливість взаємного термічного впливу часток при плазмовому напилюванні надзвичайно мала та імовірність влучення нової розплавленої частки на ще не застиглу, напилянну раніше, може не прийматися в розрахунок. Це істотно полегшує аналіз процесу утворення покриття, зводячи його до дослідження контактної взаємодії окремих часток.

Розрізняють взаємодію напилюваних часток з поверхнею основи і напилюваних часток з поверхнею вже нанесеного шару покриття. У першому випадку виникають сили зчеплення покриття з основою, у другому – сили, що обумовлюють внутрішню (когезійну) міцність самого покриття.

У цей час розглядають в основному три типи взаємодії: механічне зчеплення; фізична взаємодія, обумовлена силами типу сил Ван-дер-Ваальса; хімічна взаємодія і утворення міжатомних зв'язків [42].

Більшість дослідників віддають зараз перевагу гіпотезі утворення сил зчеплення при плазмовому напилюванні переважно за рахунок міжатомних зв'язків, визнаючи в той же час наявність і елементів механічного зачеплення, і міжмолекулярної взаємодії, тобто взаємодія в цьому випадку носить комплексний характер з одночасною реалізацією декількох механізмів зчеплення покриття з основою.

По сучасних поданнях весь процес взаємодії часток з поверхнею можна представити із трьох стадій: утворення фізичного контакту; активізації контактних поверхонь і утворення хімічних міжатомних зв'язків; розвитку

об'ємної взаємодії (релаксація мікронапруг, рекристалізація, гетеродифузія, утворення нових фаз).

Для забезпечення механічного зчеплення і виникнення сил типу Ван-дер-Ваальсових досить наявності першої стадії. Процес сполюки на другій і третій стадіях визначається трьома основними параметрами - температурою в контакті, тривалістю процесу і величиною прикладеного тиску.

У всіх випадках важливим моментом є деформація і розтікання часток, що забезпечує фізичний контакт частки з поверхнею. Ступінь деформації частки і досконалість контакту, що утворився, з поверхнею залежать від великої кількості факторів: теплової та кінетичної енергії часток, властивостей матеріалу розплаву (в'язкості, теплоємності, теплопровідності, поверхневого натягу та ін.), стану поверхні та т.п.

Однієї з основних характеристик процесу формування покриття є температура, що виникає в зоні контакту частки з поверхнею.

Завдання кількісного розрахунку  $T_k$  можуть бути вирішені як завдання контактної теплопровідності з урахуванням фазового переходу

$$T_k = \frac{T_{пл} K_\varepsilon}{K_\varepsilon + \Phi(\alpha)} \quad (2.1)$$

де  $T_{пл}$  — температура плавлення частки;

$K_\varepsilon = b_q / b_n$  — коефіцієнт теплової активності частки;

$b_q, b_n$  — коефіцієнти акумуляції тепла частки і поверхні відповідно;

$\Phi(\alpha)$  — таблична функція інтеграла ймовірності.

Розрахунки показують, що температура  $T_k$  при плазменному напилюванні відповідає твердому стану частки і підкладки. Глибина зони термічного впливу під часткою не перевищує декількох десятків мікрометрів. Тому процеси фізико-хімічної взаємодії при напилюванні, мабуть, не зачіпають основного об'єму матеріалу підкладки, а проходять у при поверховому шарі [42].

Розрахункова оцінка часу взаємодії частки з поверхнею при напилюванні дає величини порядку  $10^{-4}$  —  $10^{-7}$  с. Цей факт привів до висновку про

неможливість внаслідок цього розвитку об'ємних процесів дифузії або про обмеженість можливих її механізмів, наприклад, тільки по границях зерен. Однак своєрідність умов у контактній зоні приводить до істотних відхилень від класичних дифузійних процесів, наприклад, по наступних причинах: зона контакту під впливом удару частки може бути сильно зруйнована та насичена дефектами; самі частки можуть мати високу концентрацію вакансій. Подібні обставини приводять до аномально високих швидкостей дифузії.

Дійсно, багатьма дослідниками встановлений не тільки факт виникнення дифузійних зон при плазмовому напилюванні, але й у ряді випадків значна їхня товщина, що досягає 10-20 мкм.

Розроблені методи теоретичного аналізу утворення сил зчеплення часток з поверхнею дозволяють запропонувати ряд рекомендацій з поліпшення міцності зв'язку плазмових покриттів з основою, які в основному спрямовані на більше повну реалізацію процесів міжатомної взаємодії при формуванні покриття. Використання цих прийомів веде здебільшого або до підвищення  $T_k$  або до зниження енергії активації міжатомної взаємодії.

Спроби теоретичного розрахунку величин адгезії, що утворилася між покриттям і підкладкою на основі того або іншого механізму, показали, що обчислені і вимірювані значення відрізняються на один-два порядків. Цю невідповідність пояснюють двома причинами: структурними дефектами границі розділу та механічних напруг у системі покриття - основа. До структурних дефектів відноситься неповнота фізичного контакту покриття та основи і неповний розвиток міжатомних зв'язків у зонах контакту. З урахуванням наявності напруг сила зчеплення покриття з основою може бути виражена в такий спосіб:

$$F_{\text{цп}} = A/r - f(\tau),$$

де  $A$  - робота адгезії;

$r$  - радіус дії міжатомних сил притягання;

$f(\tau)$  - функція від величини напруги в шарі покриття.

В умовах плазмового напилювання реальні випадки, коли  $f(\tau)$  перевищує по своїй величині  $A/r$  і відбувається мимовільне відшаровування покриття. Тому питанню вивчення формування при плазмовому напилюванні залишкових напруг у покритті та підкладці приділяється велика увага [42].

На основі результатів теоретичного аналізу та експериментальних даних запропонований ряд методів керування залишковими напруженнями в плазмових покриттях. До них відноситься узгодження властивостей матеріалу покриття та основи; регулювання термічного впливу струменя плазми та потоку напилюваних часток; зниження модуля пружності матеріалу покриття; використання перехідних шарів між основою та покриттям, що забезпечують плавний перехід властивостей від покриття до основи; регулювання товщини покриття; зміна форми поверхні.

Одним з істотних, хоча поки щодо маловивчених, питань процесу формування плазмового покриття є формоутворення напилюваного шару. Встановлено, що матеріал покриття розподіляється по площі плями напилювання нерівномірно, утворюючи так звану металізаційну фігуру. Розподіл часток відбувається за законом Гаусса.

Властивості напилюваного матеріалу в об'ємі металізаційної фігури неоднорідні. Величина пористості, наприклад, також розподілена за законом Гаусса. У зв'язку із цим розроблені математичні моделі процесу формоутворення при плазмовому напилюванні з метою розкриття зв'язку геометричних параметрів покриття з параметрами режиму напилювання. Їхнє використання дозволяє визначити умови забезпечення рівномірності товщини покриття на поверхнях різної форми.

У цілому на процес формування покриття при плазмовому напилюванні і в остаточному підсумку на його якість безпосередньо або побічно впливає значне число факторів. По оцінках різних дослідників, їхня кількість становить від 20 до 60.

Міцність зчеплення покриття з підкладкою можна визначити як властивість першого порядку (тільки за умови забезпечення його необхідного

рівня має сенс визначати інші властивості). Тому питання розробки методики експериментального визначення міцності зчеплення має важливе значення для розвитку процесу плазмового напилювання в цілому. Однак варто визнати, що незважаючи на тривалі дослідження в цьому напрямку та наявність великої кількості різноманітних методик надійного рішення одержати поки не вдалося. Відзначається, що одержані значення сили зчеплення не відбивають величини адгезії, а є скоріше технічною характеристикою. Руйнування носить в основному змішаний когезійно-адгезійний або чисто когезійний характер. Всім застосовуваним методикам властивий розкид одержуваних експериментальних даних, причому в деяких діапазонах товщин покриттів він значний. У зв'язку з вищевказаним, показник міцності зчеплення в цей час не може бути використаний для поточного контролю процесу формування покриття, особливо в тих випадках, коли необхідне використання неруйнуючих методів.

Аналіз теоретичних моделей та експериментальних досліджень процесу плазмового напилювання показує, що його критеріями можуть служити пористість і коефіцієнт використання порошку - КВП (відношення маси часток, що сформували покриття, до вихідної маси часток, уведених у плазменний струмінь). Ці параметри найбільше часто застосовуються в цей час при використанні методів багатofакторного кореляційного аналізу в додатку до дослідження та оптимізації процесу плазмового напилювання [36].

#### **2.4 Обладнання для плазмового напилювання композиційних порошкових матеріалів**

Як уже зазначалося вище джерелом високої температури при плазмовому методі нанесенні покриттів є плазменний струмінь, що утворюється в спеціальних пальниках (плазмотронах). До плазмового пальника підводять електричний струм від джерела харчування. При цьому, через анод, виконаний у вигляді сопла, пропускають інертний газ (аргон). При збудженні дуги між катодом і анодом (соплом) відбувається іонізація газу та утворення

плазмового струменя. Швидкість витікання іонізованого газу із сопла плазмотрона становить 350 - 400 м/с, а температура досягає 55000 °С. Напилюваний матеріал у вигляді порошку, розміром часток 40 - 100 мкм, уводиться в струмінь плазми за допомогою транспортуючого газу (аргону) і пристрою дозованої подачі порошку – дозатора. Швидкість часток напилюємого матеріалу в струмені, при підльоті до напилюваної поверхні досягає 80 - 100 м/с. Можливість регулювання теплової потужності плазмового струменя дозволяє використати її як для напилювання тугоплавких, так і легкоплавких матеріалів [39, 41].

Для реалізації технологічного процесу використовувався комплекс для плазмового напилювання (рисунок 2.2). Він виконаний на базі вітчизняної установки типу УПУ- 3Д і поставляється на єдиній переносній платформі. Містить у собі все необхідне устаткування для нанесення будь-яких покриттів. Вага комплексу не більше 1200 кг, споживаюча потужність до 30 кВт. Має автономну систему по газо- і водопостачанню, що дозволяє, при відновленні унікальних великогабаритних деталей, перенести його до місця роботи або механічної обробки цих деталей.

Комплекс призначений для нанесення зносостійких, фрикційних, ізоляційних та інших спеціальних покриттів на поверхні деталей методом плазмового напилювання порошкових матеріалів. У якості плазموутворюючих газів використовуються аргон і суміш аргону з воднем.

У комплект комплексу входять наступні агрегати:

- шафа керування та джерело живлення;
- плазмотрон ПП-25 з комплектом ЗДЖ;
- дозатор порошкових матеріалів;
- балони з газом «Аргон» та «Водень»;
- автономна система охолодження плазмотрона та джерела живлення;
- стійка для балонів;
- редуктори, з'єднувальні шланги;
- платформа для розміщення та транспортування агрегатів комплексу.



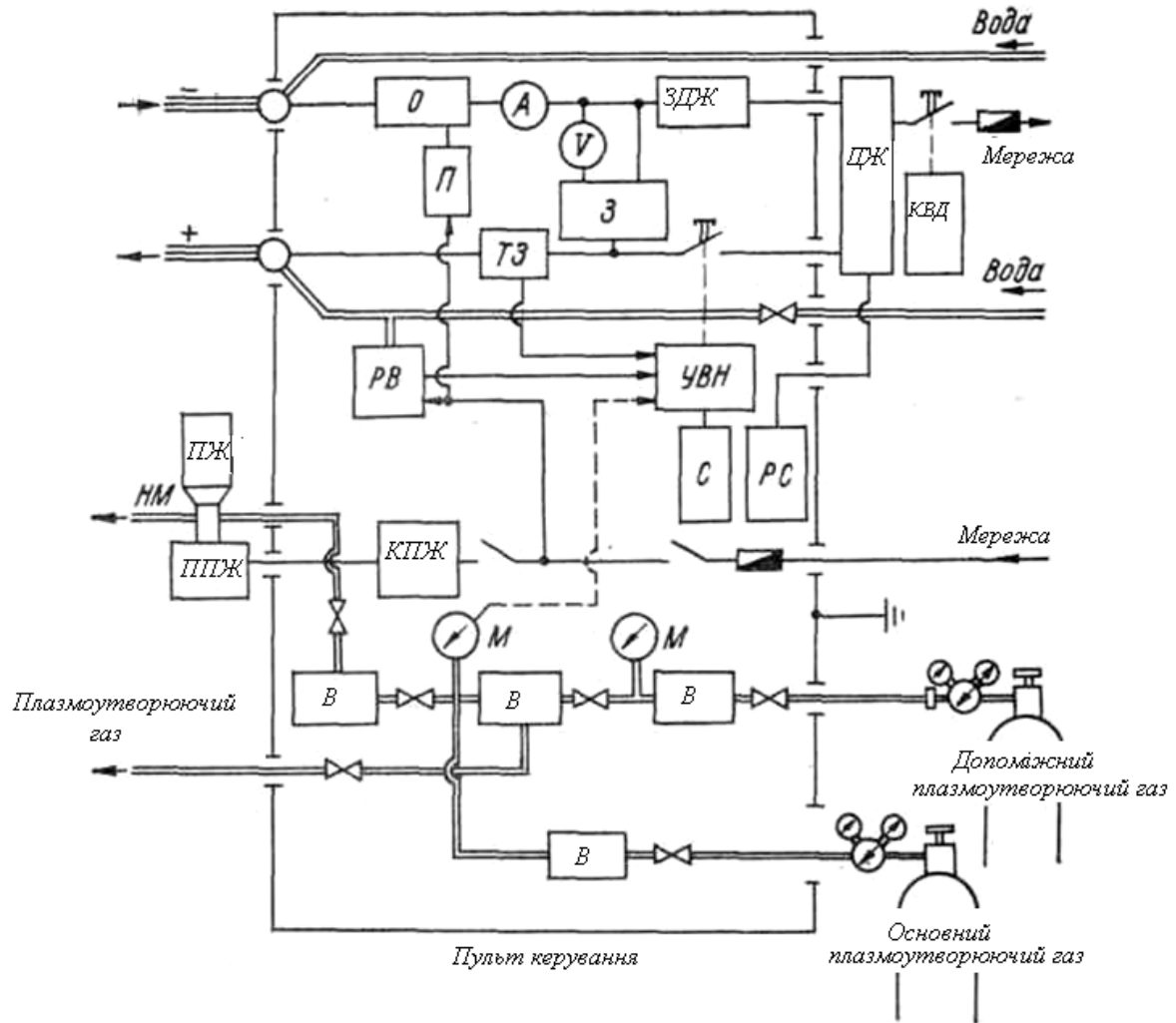


Рисунок 2.2 – Установка для нанесення плазмових покриттів УПУ – 3Д.

На рисунок 2.3 зображено принципову схему установки для плазмового нанесення покриттів.

Основні технічні характеристики установки УПУ – 3Д наведені у таблиці 2.1.

Одним з найважливіших вузлів установки є система водяного охолодження плазмотрона, багато в чому визначає його довговічність і надійність. Наявність в охолоджуваній воді забруднень, високий вміст солей приводить до утворення на охолоджуваних поверхнях плівки, що погіршує тепловідвід, до швидкого виходу електродів з ладу [36].



А – амперметр; З – захист амперметру та вольтметру; ЗДЖ – захист джерела живлення; НМ – напилюваний матеріал; ДЖ – джерело живлення; М – манометр; О – осцилятор; П – кнопка «Пуск»; ПЖ – порошковий живильник; ППЖ – привод порошкового живильника; В – витратомір; РВ – реле тиску води; ТЗ – термозахист; РС – регулятор сили струму; С – кнопка «Стоп»; УВН – управління ввімкненням напруги; КВД – керування ввімкненням джерела; КПЖ – керування порошковим живильником

Рисунок 2.3 – Схема установки для плазмового напилювання покриттів

У зв'язку із цим у сучасних установках плазмово-дугового напилювання застосовують автономні системи охолодження. Через плазмотрон циркулює під високим тиском з витратою 15 - 25 дм<sup>3</sup>/хв дистильована вода зі змістом сульфатних іонів менше 0,5 мг/дм<sup>3</sup>, заліза - не більше 0,5 мг/дм<sup>3</sup>, рН 7,4. Відбір тепла від нагрітої води здійснюється за допомогою фреонового холодильника (установка «Плазма-технік АГ»).

Таблиця 2.1 – Основні технічні характеристики комплексу УПУ-3Д

Найменування параметра	Значення
Габаритні розміри комплексу Д×Ш×В, мм	2500×1500×1700
Вага комплексу, кг	1200
Товщина покриттів, що напилюються, мм	0,05-5,0
Міцність зчеплення напиленого покриття з підкладкою для металевих покриттів, МПа	до 100
Фракція напилюваних порошкових матеріалів, мкм	40-120
Напилюємі матеріали	метали, кераміка
Регулювання струму дуги плазмотрона	плавне
Межі регулювання струму плазмотрона, А	200-400
Межі регулювання напруги плазмотрона, В	30-70
Максимальна споживаюча потужність комплексу, кВт	30
Напруга живлення комплексу, В	380×3ф
Плазмоутворюючі гази і суміші	аргон + водень
Витрата плазмоутворюючих газів, м <sup>3</sup> /год	0,9-1,5
Система охолодження водою	автономна, по замкнутому контуру
Витрата води для охолодження плазмотрона та джерела живлення, л/хв	6
Тиск води в системі охолодження, кгс/см <sup>2</sup> .	2-4
Продуктивність напилювання, кг/година	
кераміка (окисли металів)	2
метали	4

## Висновки до розділу 2

Основними шляхами підвищення надійності елементів машин є раціональне конструювання деталей, застосування нових більш стійких матеріалів, поліпшення технології виробництва, здійснення контролю на всіх стадіях виробництва і, нарешті, удосконалювання умов і способів експлуатації та своєчасне проведення ремонту.

Ефективним способом підвищення опору деталей золотникових регулюючих пристроїв захопленню є застосування для їхнього виготовлення високо твердих металів та інтерметалідних сплавів. Основним напрямком у підвищенні ерозійної стійкості металевих деталей є поверхневе зміцнення.

Тому проблема підвищення зносостійкості шляхом використання композиційних матеріалів і захисних покриттів з них останнім часом стає усе актуальніше. Композиційні порошки представляють собою не механічні суміші, а інтегровані комплекси вихідних компонентів у кожній порошковій частці. Саме це дозволяє одержати покриття із заданою конструкцією і комплексом властивостей, що задовольняють умовам експлуатації.

Для нанесення зносостійких газотермічних покриттів на конструкційні сплави традиційно використовують порошки металевих сплавів на основі Fe - Cr та Ni - Cr із різними добавками металів (Co, Mo, Y), неметалів (B, Si) і тугоплавких сполук (карбіди, бориди, оксиди алюмінію), а також порошки вольфрамових твердих сплавів марки ВК. Покриття на основі металевих сплавів характеризуються відносно низькою зносостійкістю при високій стійкості до окислювання (до 1100 °C), тоді як покриття з вольфрамових твердих сплавів мають високу зносостійкість при низькому опорі високотемпературної корозії (до 700 - 730 °C). До того ж дефіцитність і дорожнеча вольфраму не дозволяє його широкого застосування в промисловості. Тому є необхідністю розробка нового матеріалу, який би володів високими експлуатаційними властивостями і був би виготовлений з недорогих компонентів.

## РОЗДІЛ 3

### РОЗРОБКА КОМПОЗИЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ НА ОСНОВІ КАРБОНІТРИДА ТИТАНУ

#### **3.1 Контактна взаємодія карбонітрида титану з металевими розплавами**

Перспективність карбонітрида титану (КНТ) для наплавлення, а також як зносостійкої складової композиційних матеріалів підтверджується тим, що він має високу термодинамічну стабільність із однієї сторони і більш високу пластичність в порівнянні з карбідом титану з іншої. У роботі [45] показано, що карбід титану змочується сплавами Fe – Cr і Fe – Ni з утворенням контактних кутів, значення яких близькі до нульового. По даним [46] метали групи заліза утворюють із нітридом титану досить великі кути змочування: залізо –  $90^{\circ}$ , нікель -  $113^{\circ}$ . Систематизовані результати по змочуванню карбонітрида титану сплавами на основі заліза та нікелю в літературі відсутній.

Розробці матеріалів на основі TiCN присвячена значна кількість публікацій [47-52]. У роботі [48] пропонується застосування карбонітрида титану з низьким вмістом сполучного металу. Такий матеріал виглядає на металографічному шліфі однофазним, величини зерен становлять близько 3мкм, залишкова пористість близько 1об. %. До складу матеріалу в невеликих кількостях (до 10 мас. %) як метал зв'язування вводили залізо, нікель і марганець.

У роботі [49] досліджували можливість застосування ультрадисперсного карбонітрида титану для створення безвольфрамових твердих сплавів. Відзначається, що карбонітрид титану без металевої зв'язки має низькі значення межі міцності при згинанні та високу твердість. Збільшення механічних властивостей досягається створенням сплавів, цементуємих металевою фазою, що добре змочує основу.

Як металеві зв'язки для створення композиційного матеріалу на основі карбонітрида титану в [53] розглядається можливість використання інтерметалідів нікелю, однак такі зв'язування не завжди доцільно використовувати через відносно високу крихкість останніх.

У роботах [54,55] вивчений вплив композиційних покриттів на основі TiCN, нанесених на різальний інструмент на його експлуатаційні характеристики. Відзначається підвищення стійкості інструмента з покриттям в 3 - 10 разів. Інструмент із покриттям може застосовуватися для процесів обробки без охолоджувальної рідини і забезпечує більш високу якість деталей [54].

Досліджено вплив карбідів WC, Nb, Ta на мікроструктуру та властивості керметів на основі TiCN. Відзначається прискорення процесів ущільнення при спіканні і формування дрібнозернистої структури в спечених композитів [55].

Високою щільністю, стійкістю до зношування та корозії володіє спечена металокераміка на основі карбонітрида титану, у яку для підвищення експлуатаційних властивостей додатково вводять карбіди хрому та бора. Такий кермет рекомендується використати як ущільнювальний матеріал.

Добре зарекомендували себе безвольфрамкові тверді сплави КНТ також як металорізальний інструмент, а при нанесенні електроіскрових і лазерних зносостійких покриттів їхнє застосування виявляється набагато ефективніше вольфрамівмісних твердих сплавів. Існуючі вольфрамівмісні електродні композиційні матеріали не задовольняють вимогам, пропонованим до них з ряду причин, серед яких висока ерозійна стійкість, що лімітує масоперенос матеріалу на зміцнюючу поверхню, низький рівень жаро- і корозійної стійкості матеріалу електрода та покриття, дефіцитність і дорожнеча вольфраму і кобальту.

Таким чином, композиційні матеріали на основі карбонітрида титану КНТ-16 і КНТ-30 є перспективними. Однак вони вимагають доробки, тому, що до складу наведених матеріалів входять дефіцитні та

дорогі нікель і молібден. Крім того, дифузія молібдену в TiCN приводить до часткової втрати міцності твердих сплавів, а, отже, до зниження їх фізико-механічних та експлуатаційних властивостей.

Ціль даних досліджень - розробити наукові принципи створення нових композиційних матеріалів на основі карбонітрида титану, що володіють високим рівнем властивостей, з металевою зв'язкою, що складається з недорогих і недефіцитних компонентів.

Як ми вже відзначали раніше, часткове заміщення азоту вуглецем у металоїдній підґратці карбіду титану приводить до росту межі міцності при згинанні. Максимальне його значення досягається для сполук, близьких до сполуки  $Ti_{0,5}N_{0,5}$ , тому для досліджень нами був обраний карбонітрид титану із співвідношенням C/N=1, що є основою промислового твердого сплаву КНТ. Як металеві зв'язки були вибрані сплави на основі заліза з добавками хрому в концентраційних інтервалах 0-30% Cr. Вибір сплавів заліза для металевих зв'язок композиційного матеріалу на основі карбонітрида титану аргументований тим, що при нанесенні розробленого композита на сталеві поверхні деталей і вузлів, що зношують, компоненти зв'язки не будуть дифундувати в зміцнюємі матеріал.

Для вирішення завдання розробки нових композиційних матеріалів на основі карбонітрида титану з металевою зв'язкою були вивчені особливості контактної взаємодії в системах TiCN - Fe, Fe - Cr методом «лежачої» краплі з наступним металографічним і мікрорентгено-спектральним аналізом продуктів взаємодії контактуючих фаз, що утворилися.

Рідке залізо розтікається по поверхні карбонітрида титану, утворюючи контактний кут, рівний  $11^{\circ}$ . Первісний кут становить  $87^{\circ}$ , а потім протягом 10 хв встановлюється кінцевий контактний кут. Для системи TiCN - Fe спостерігається процес розчинення компонентів

тугоплавкої фази (Ti, C) у рідкому залізі, з утворенням евтектики TiC-Fe (рисунок 3.1).

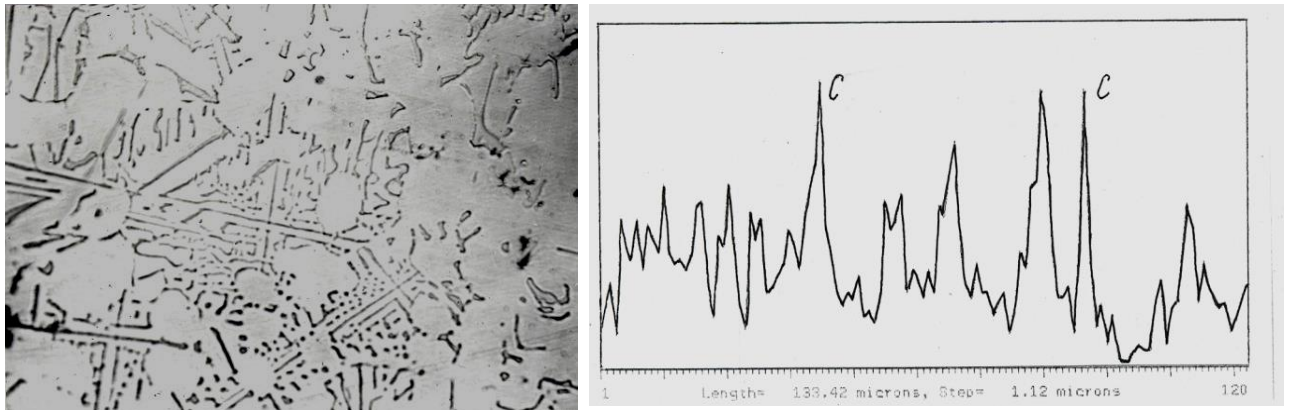


Рисунок 3.1 – Мікроструктура краплі після взаємодії в системі TiCN-Fe, x500 і розподіл вуглецю в ній

Робота адгезії майже в 2 рази перевищує величину поверхневого натягу рідкого заліза (таблиці 3.1). У даній системі спостерігається часткове розчинення компонентів карбонітрида титану (вуглецю і близько 1% титану) у залізі. Система TiCN - Fe характеризується хімічною взаємодією. У рідкій фазі виявлені евтектичні колонії (рисунок 3.1) і одиничні виділення карбідних зерен, що приводять до хрупкості заліза. Тому використання чистого заліза як металої зв'язки композиційного матеріалу на основі TiCN недоцільно.

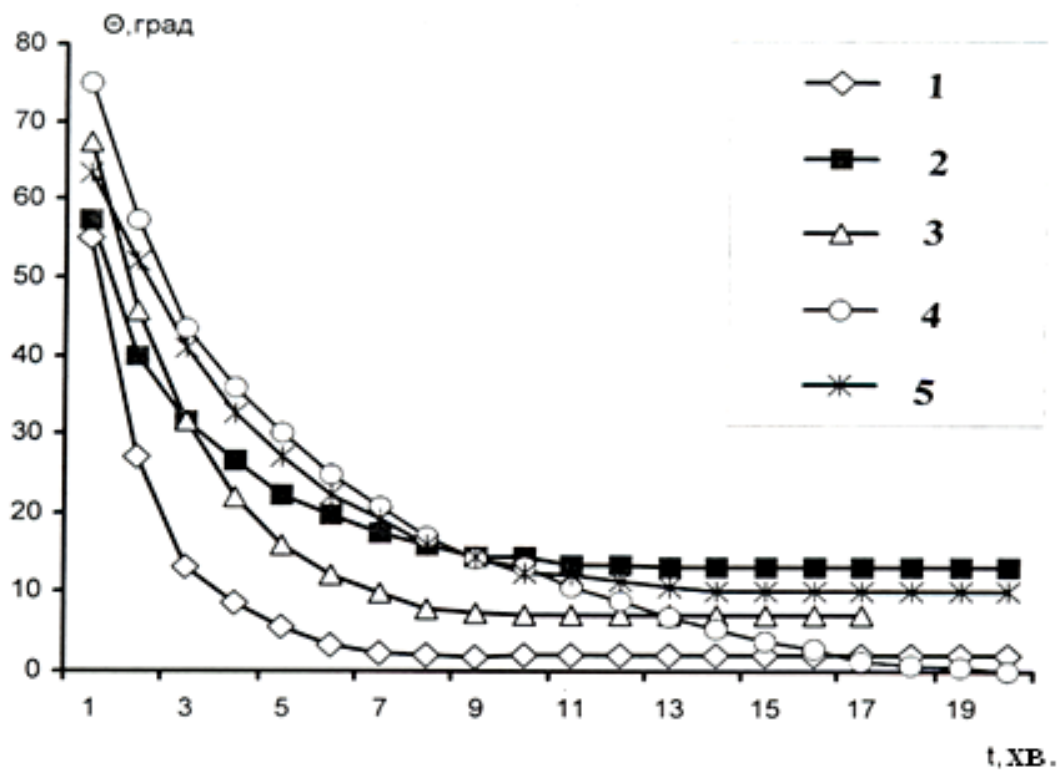
Введення в залізо малих добавок хрому (сплав Fe – 2 % Cr) сприяють розтіканню розплаву по поверхні карбонітрида титану. Первісний кут змочування становить  $62^{\circ}$ , а до 18 хв. відбувається повне розтікання сплаву ( $\Theta=0$ ) (рисунок 3.2). При збільшенні вмісту хрому в сплаві до 5% спостерігається незначне збільшення величини контактного кута до  $2^{\circ}$ , час розтікання в цьому випадку становить 6 – 8 хв. Подальше збільшення вмісту хрому в сплавах Fe – Cr до 13–17 % також приводить до деякого погіршення змочування карбонітрида титану та збільшенню контактних



кутів змочування до  $8 - 9^\circ$ . Час установлення кінцевих кутів становить 8 - 11хв.

Міжфазний натяг при цьому збільшується, а поверхневий натяг сплаву Fe - Cr зменшується, тобто добавки хрому проявляють поверхневу активність, сприяючи розтіканню сплаву по поверхні карбонітрида титану.

Мікроструктурний аналіз контактної зони взаємодії показав, що в даній системі утворюються взаємні тверді розчини: хром і залізо розчиняються в поверхневих шарах зерен TiCN, а титан, - у металевому розплаві. Розчинність титану в металевій фазі не перевищує 1 %.



1 - 5 % Cr; 2 - Fe; 3 - 9 % Cr; 4 - 2 % Cr; 5 - 17 % Cr

Рисунок 3.2 – Кінетика змочування карбонітрида титану залізом та сплавами Fe – Cr

У зоні взаємодії виявлена одинична ділянка з азотом, що виділився. Надлишковий азот виділяється у вільному стані, особливо при зниженні температури та кристалізації розплаву. Це пов'язане з тим, що розчинність азоту в залізі різко падає зі зменшенням температури. У сплаві, що

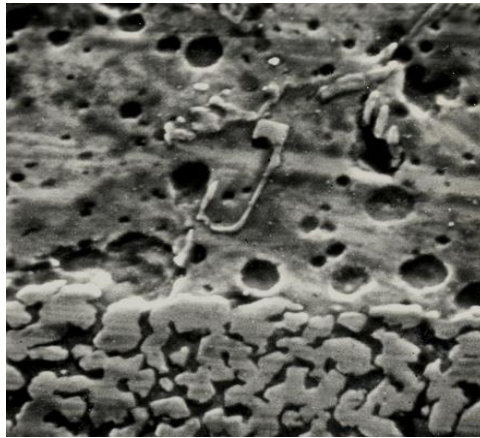
закристалізувався, виявлені одиничні включення світлої фази, у якій спостерігається підвищений вміст титану (рисунок 3.3). За результатами електронографічного та рентгенофазового аналізів зерна світлої фази є твердим розчином титану в залізі. Підвищення вмісту хрому в сплавах Fe - Cr приводить до росту контактних кутів у системі TiCN - (Fe-Cr).

Таблиця 3.1 – Енергетичні параметри змочування карбонітрида титану залізом і сплавами Fe - Cr

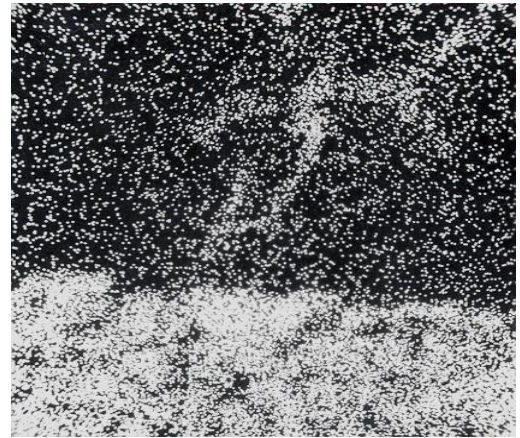
Розплав	Час контактування, хв.	Контакт-ний кут, град	Поверхневий натяг розплаву, мДж/м <sup>2</sup>	Робота адгезії, мДж/м <sup>2</sup>
Fe	10	11	1820	3605
Fe-2%Cr	18	0	1714	3428
Fe-5%Cr	10	2	1680	3359
Fe-13%Cr	6	8	1590	3164
Fe-17%Cr	10	9	1535	3050

З боку підкладки уздовж границі розділу спостерігається шар здрібнених кристалів карбонітрида титану.

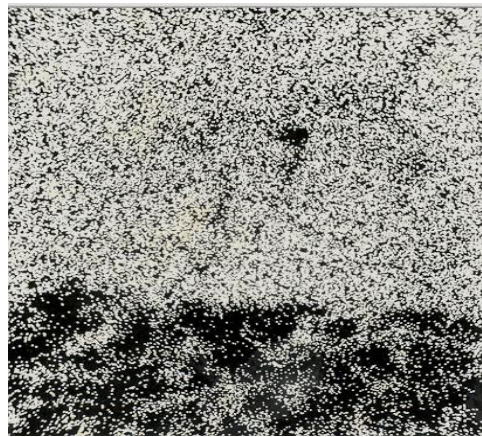
На підставі проведених досліджень по вивченню міжфазної взаємодії TiCN зі сплавами Fe - Cr можна зробити висновок, що в даних системах при контактній взаємодії утворюються нульові (для сплавів, що містять малі 2 – 5 % добавки Cr) або невеликі ( $\Theta < 90^{\circ}$ ) кути змочування. У даних системах відсутня активна хімічна взаємодія між компонентами твердої та рідкої фаз, що приводить до утворення нових сполук отже, сплави Fe - Cr можуть бути рекомендовані як металеві зв'язки для композиційних матеріалів на основі карбонітрида титану. При цьому не рекомендується застосування металу - зв'язки із вмістом хрому в ній більше 15 %.



а)



б)



в)

Рисунок 3.3 - Мікроструктура зони взаємодії системи  $\text{TiCN} - (\text{Fe} - 2\% \text{Cr})$   
(а) і розподіл у ній титану (б) і заліза (в)

### **3.2 Дослідження особливостей мікроструктури і вивчення властивостей розробленого композиційного матеріалу**

В попередньому підрозділі даної роботи наведені результати досліджень контактної взаємодії тугоплавких сполук титану з металевими розплавами, що дозволило зробити рекомендації з найбільш оптимального вибору сполук нових композиційних матеріалів. Залежно від вимог, видвинутих до композиційних матеріалів та областей їхнього застосування при виборі сполук необхідний диференційований підхід.

Деякі із цих матеріалів можуть застосовуватися у вигляді шихти, що складається з ретельно перемішаних порошків металів і тугоплавких сполук. Для приготування сумішей використовується розмелююче устаткування - планетарні млини або рольганги. Такі суміші доцільно використати для нанесення газотермічних і лазерних покриттів на сталеві поверхні.

Для компактних КМ необхідно використання устаткування та технологічних режимів, що дозволяють одержувати деталі з мінімальною пористістю і дрібнозернистою структурою. Крім того при виборі сполук матеріалів необхідно враховувати умови їх експлуатації. Наприклад, при роботі в умовах високих ударних навантажень кількість металевої складової КМ повинне бути більше, ніж у деталей, що працюють в умовах зношування.

У даному підрозділі наведені дослідження з вивчення мікроструктури та властивостей композиційного матеріалу системи TiCN - (Fe - Cr), отриманих спіканням або гарячим пресуванням.

Грунтуючись на результатах змочування і міжфазної взаємодії для одержання нового композиційного матеріалу була обрана система TiCN - (Fe - Cr). Металевою зв'язкою у цьому композиті є сплав на основі заліза з добавкою 5-15 % хрому. Як показано в підрозділі сплави Fe - Cr утворюють на поверхні карбонітрида титану близькі до нульових контактні кути, перехідна зона являє собою гетерофазну структуру, що складається із зерен TiCN, між якими рівномірно розподілена фаза на основі Fe - Cr. У результаті взаємодії в даній системі утворюються взаємні обмежені тверді розчини.

Досліджено кінетику ущільнення розроблених матеріалів при спіканні, що містять 15 та 25 % металевої зв'язки Fe - Cr при температурах 1350, 1450 і 1550 °C. Вихідні зразки одержували шляхом здрібнювання з одночасним перемішуванням у вібротліні в середовищі спирту. В отримані порошки, розмір яких не перевищував 5 мкм, додавали

пластифікатор (4 % розчин каучуку в бензині), потім їх протирали через сито, після чого брикетували під тиском у сталевий пресформі.

Дослідження кінетики ущільнення зразків на основі карбонітрида титану, що містять 15 і 25 % металевої зв'язки Fe – Cr, проводили при температурах 1350, 1450 і 1550 °С у вакуумній печі СШВ при витримці 60 хв.

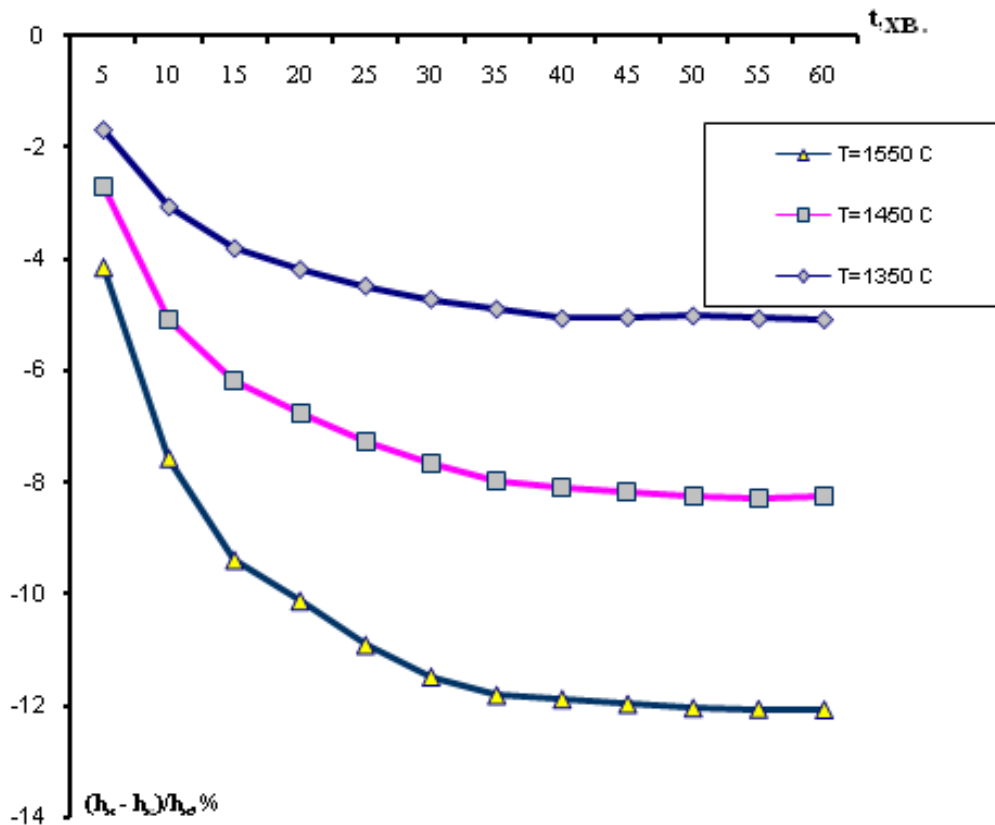


Рисунок 3.4 – Кінетика ущільнення композиційних матеріалів TiCN – 15 % (Fe - Cr)

При температурі спікання 1350 °С усадка зразків відбувається протягом 45 хв. і становить 5,1 %, пористість зразків у цьому випадку – 25 %. Зі збільшенням температури спікання до 1450 °С спостерігається збільшення лінійної усадки до 8,3 % (рисунок 3.4). У цьому випадку, мабуть, утвориться незначна кількість рідкої фази за рахунок контактного плавлення і відбувається часткова активація ущільнювальних процесів. Найбільше інтенсивно процес усадки протікає при

1550 °C. При цих температурах відбувається плавлення металевої зв'язки, що за рахунок гарного змочування проникає між твердими частками карбонітрида титану, ущільнює їх шляхом впливу капілярних сил. Для матеріалу TiCN – 15 % ( Fe – Cr ) при температурі 1550 °C спостерігається усадка 12,1 %, пористість зразка складала приблизно 5,2 %.

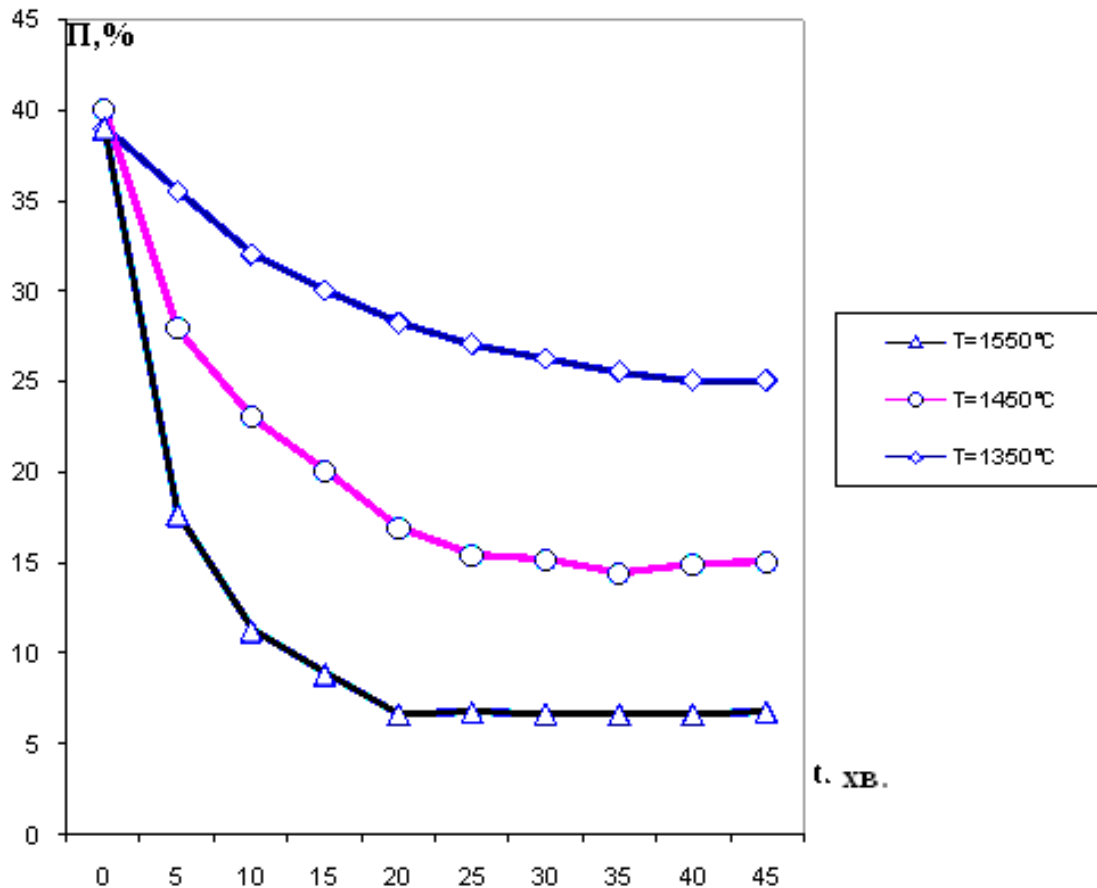


Рисунок 3.5 – Кінетична залежність пористості матеріалу TiCN – 15 % (Fe - Cr) від температури

При збільшенні вмісту металевої зв'язки до 25 % спостерігається збільшення показників лінійної усадки при відповідних температурах (рисунок 3.6). При температурі 1350 °C усадка зразка складала 6,6 %, а при 1450 °C – 9,3 %. Найбільше інтенсивно процес ущільнення протікає при утворенні рідкої фази, усадка зразка при 1550 °C становить 14,9 % і практично завершується після 25 хв. спікання. Залишкова пористість при цьому складала 4,5 %.

Зіставляючи інтенсивність ущільнення матеріалів на основі карбонітрида титану з різним вмістом металевої зв'язки, слід зазначити, що процес ущільнення матеріалу, що містить 25 % зв'язки протікає інтенсивніше, остаточно його щільність вища і становить  $5,39 \text{ г/см}^3$  при  $\gamma_{\text{теор}} = 5,64 \text{ г/см}^3$ .

На підставі проведених досліджень можна зробити висновок, що найбільш інтенсивно процес ущільнення композиційних матеріалів протікає в присутності рідкої фази.

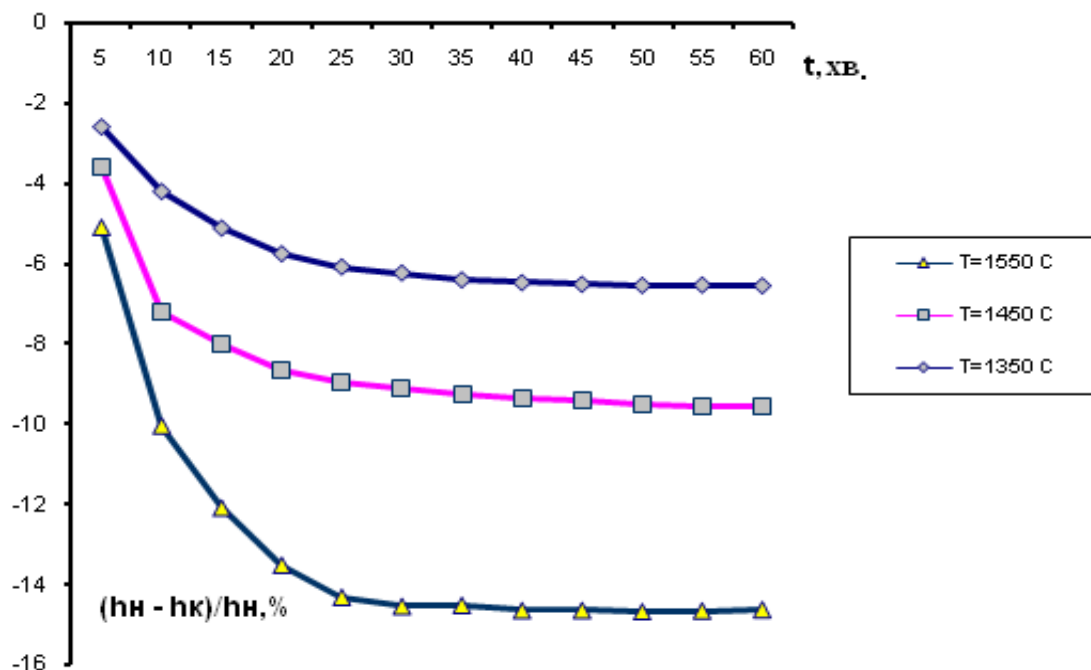


Рисунок 3.6 – Кінетика ущільнення композиційних матеріалів TiCN - 25%(Fe - Cr)

Завдяки змочуванню рідкою фазою твердих часток карбонітрида титану і впливу виникаючих при цьому капілярних сил для визначення оптимальної кількості зв'язки в композиційному матеріалі на основі карбонітрида титану були виготовлені зразки з 15, 25 й 30 % металевої зв'язки, які спекали в печі СШВ у вакуумі при температурах  $1550-1600^{\circ} \text{C}$ .

Процес ущільнення матеріалу системи TiCN – (Fe – Cr) характеризується активованим спіканням у присутності рідкої фази. При

цьому визначальними є дифузійні процеси, у результаті яких відбувається взаємне розчинення компонентів металевої зв'язки і тугоплавкої фази, з утворенням твердих розчинів. Одночасно інтенсифікуються процеси ковзання твердих часток друг відносно друга за рахунок гарного змочування, що різко зменшує тертя між ними, знижує їхнє заклинювання і приводить до заповнення порожнеч, зменшенню об'єму тіла, що спікається тобто відбувається його усадка. Для визначення значень енергії активації  $U$  при температурах  $T_1$  і  $T_2$  визначали час ізотермічної витримки (відповідно  $t_1$  і  $t_2$ ) при яких пористість мала однакову величину, шляхом проведення перетину  $\Pi = \text{const}$  на графіку  $\Pi = f(t)$ .

Композиційні матеріали  $\text{TiCN} - (\text{Fe} - \text{Cr})$  були отримані також методом гарячого пресування в графітових прессформах з високоміцного графіту МПГ - 6 шляхом прямого пропущення струму через прессформу при різних температурах і постійній величині зовнішнього тиску.

Усадка при гарячому пресуванні реєструвалася на приводному барабані, механічно пов'язаним з важелем преса. Через сталість маси зразка, величина поточної відносної щільності  $\rho$  визначалася по зміні висоти  $\Delta h$ , кінцевих значень щільності  $\gamma_{\text{кін.}}$  і висоті зразка  $h_{\text{кін.}}$

$$\rho = \frac{\gamma_{\text{кш}} \cdot h_{\text{кш}}}{(h_{\text{кш}} + \Delta h) \cdot \gamma_{\text{теор.}}} \quad (3.1)$$

де  $\gamma_{\text{теор.}}$  - теоретична щільність композита.

Кінетичні криві будувалися в координатах «відносна щільність  $\rho$  - час  $t$ » при різних температурах ( $T = 1300, 1400$  та  $1500$  °C) і при постійному навантаженні ( $P = 48$  МПа).

При температурі  $1300$  °C були отримані зразки з пористістю  $22$  %. Очевидно, при цій температурі не утвориться рідка фаза, збільшення часу витримки зразків під навантаженням не привело до підвищення їхньої щільності (рисунки 3.7).



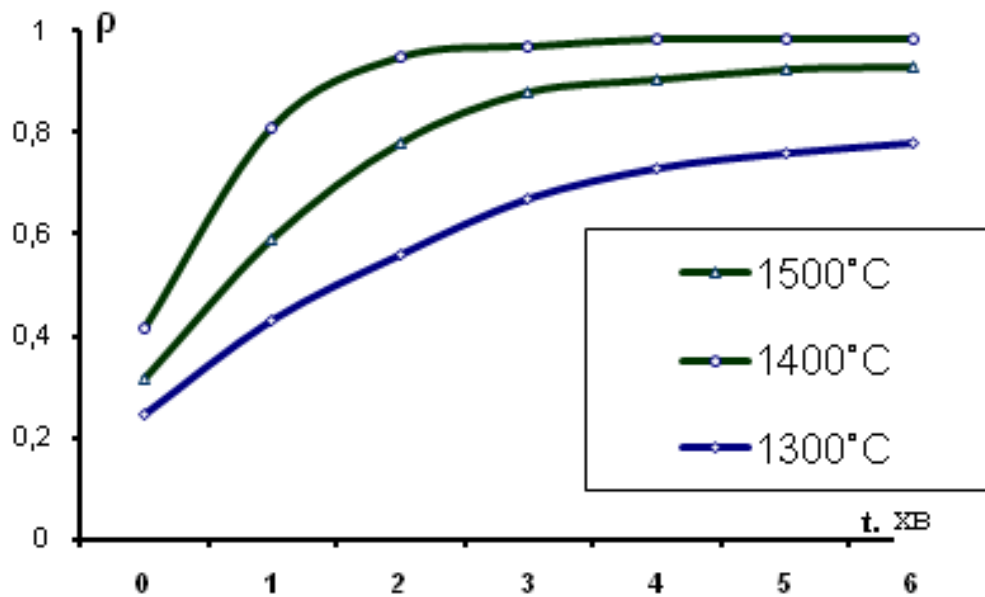


Рисунок 3.7 – Кінетика ущільнення матеріалу TiCN - (Fe - Cr) при гарячому пресуванні.

Підвищення температури пресування до 1400 °С привело до істотного зниження пористості зразків до 3-5 %. При температурі 1500 °С відносна щільність зразків склала 0,99, що пояснюється утворенням рідкої фази. Процес ущільнення зразків у цьому випадку протікав досить інтенсивно і практично завершувався на 2 хв. (рисунок 3.7).

При гарячому пресуванні до діючих капілярних сил і дифузійних процесів додається дія зовнішніх навантажень, що приводять до пластичної деформації твердих часток, і дозволяє підвищити швидкості ущільнення та одержати практично безпористі зразки.

Мікроструктура спечених зразків, досліджена на оптичному мікроскопі МІМ-8, складається із зерен карбонітрида титану, між якими рівномірно розподілена металева зв'язка. Мікротвердість композиційних матеріалів, визначена на приладі ПМТ - 3 становить 18,6 - 21,2 ГПа.

При дослідженні спеченого матеріалу TiCN – 25 % (Fe – 5 %Cr) (марка КН-25) на мікроаналізаторі SX-50 також виявлена гетерофазна структура, що складається із двох фаз: темної та світлої (рисунок 3.8). Темна фаза

містить Ti, N, C, а також незначну кількість Fe (рисунок 3.9). Очевидно, що темна фаза - це карбонітрид титану, у якому розчинена незначна кількість заліза. Зміст заліза в зернах TiCN не перевищує 1 %, що підтверджується величиною відповідного піка на рисунок 3.9, а. Його присутність у карбонітриді є результатом взаємної дифузії компонентів твердої і рідкої фаз при високих температурах у процесі спікання.

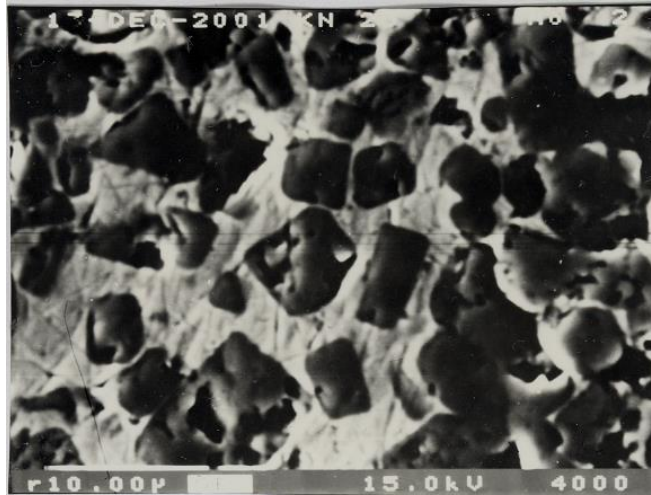


Рисунок 3.8 – Мікроструктура композиційного матеріалу КН - 25, x4000.

Світла фаза - металева, містить залізо, хром, що відповідає вихідній сполуці зв'язки, а також розчинений титан. Спостерігається потужний пік Fe, інтенсивність якого становить 2400 імпульсів, інтенсивність хрому у світлій фазі досягає 300 імпульсів, а титану - не більше 200.

На поверхні досліджуваного зразка була обрана арактерна ділянка, на якому проведений мікрорентгеноспектральний аналіз гетерофазної структури. Результати аналізу показали, що в системі TiCN - (Fe - Cr) відсутня активна хімічна взаємодія, що приводить до утворення нових хімічних сполук (рисунок 3.10).

Виявлено тверді розчини титану в металевій зв'язці та заліза в карбонітриді титану. Про це свідчать кути нахилу кривих, що утворюють піки відповідних елементів (рисунок 3.10). Титан, розчиняючись у розплаві, розподіляється по всьому об'ємі рідкої фази. Залізо дифундує в карбонітрид

на глибину не більше 0,2 мкм, тобто розташовується на периферійних ділянках зерен TiCN.

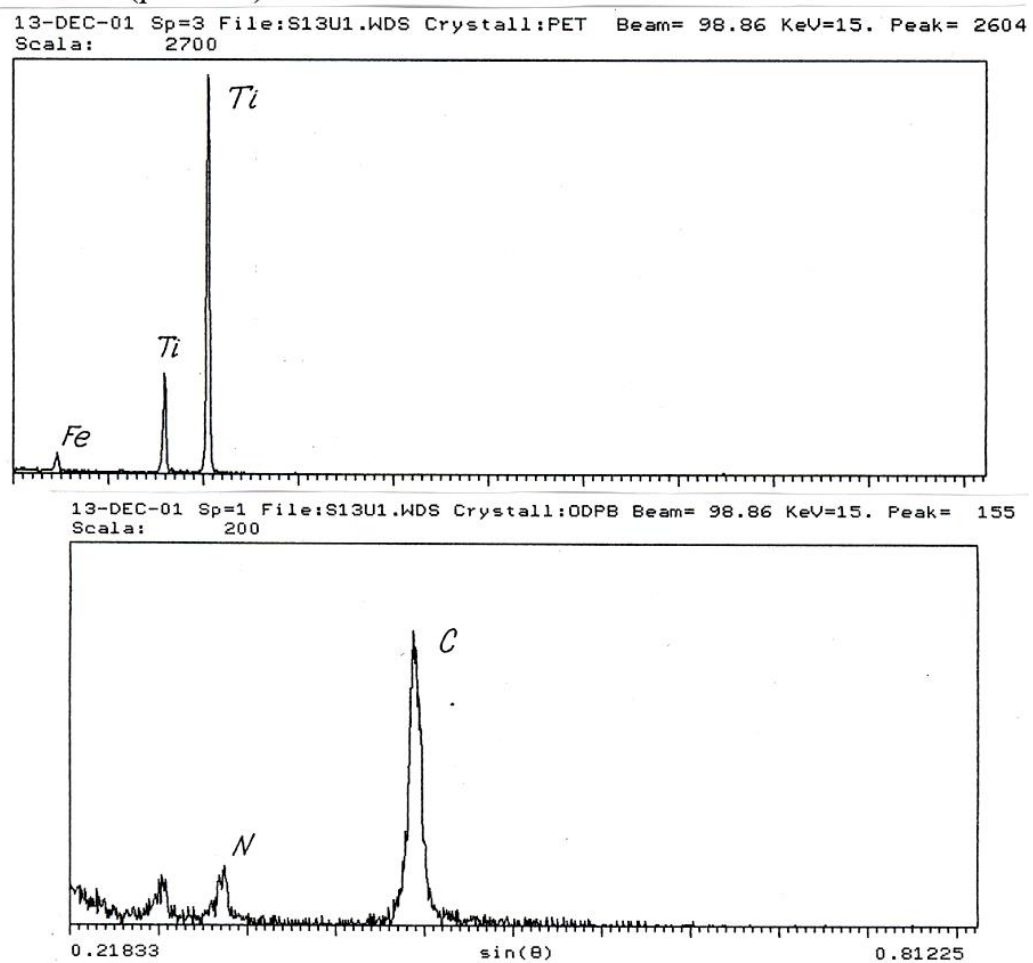


Рисунок 3.9 – Розподіл елементів у темній фазі (по рисунку 3.8)

Для розглянутого матеріалу, мабуть, справедливо зробити висновок, що вихідні компоненти після спікання, в основному, зберігають первісний склад, а отже, і зберігають свої властивості: карбонітрид титану - твердість і зносостійкість, металева зв'язка - пластичність.

Важливим фактором для високого рівня механічних властивостей матеріалу на основі TiCN є одержання дрібнодисперсної структури (розмір зерен зносостійкої фази в отриманих КМ становить 1 - 3,5 мкм), а також рівномірний розподіл металевої зв'язки.

У цілому мікроструктура спеченого матеріалу на основі карбонітрида титану відповідає структурі перехідної зони, отриманої при змочуванні TiCN сплавом Fe - Cr, результати дослідження якої наведені в підрозділі 3.1. Це підтверджує ефективність досліджень змочування методом «лежачої» краплі та наступного металографічного аналізу при конструюванні нових композиційних матеріалів. Для спечених матеріалів були визначені основні механічні і мікромеханічні властивості.

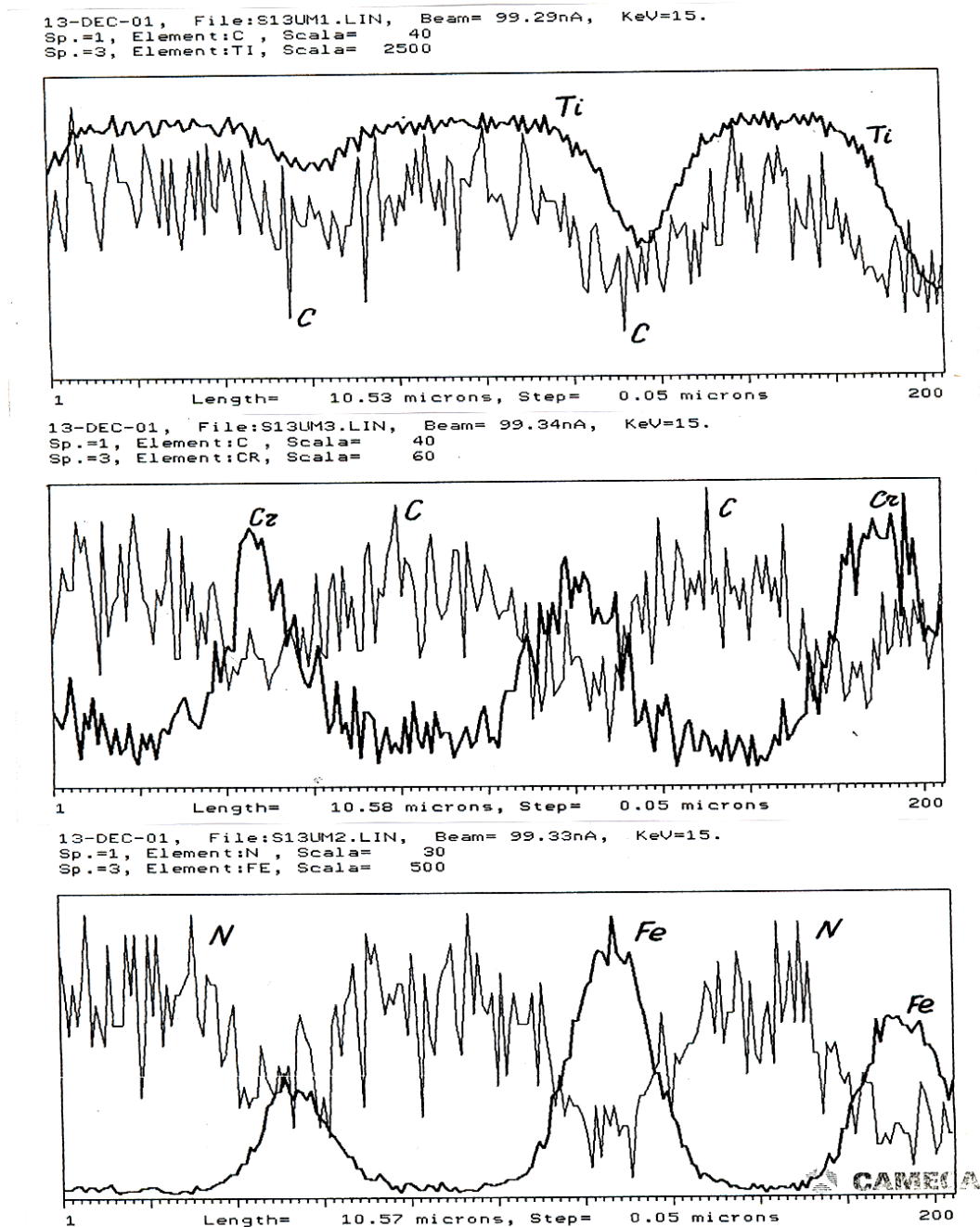


Рисунок 3.10 – Розподіл елементів у матеріалі КН - 25

Твердість визначалася на твердомірі 214 ОТР (ГОСТ 23677-79) шляхом вдавнення алмазної піраміди в поверхню зразка. Величина твердості для спечених композитів 89-90 НРА. Значення межі міцності при згинанні змінюються в діапазоні від 980 МПа (для сплаву з 15 % металевої зв'язки) до 1120 МПа (для сплаву з 30% зв'язки). Випробування на згинання проводилися на установці МР-05-01, відповідно до вимог ГОСТа 18228 - 72. Визначення модуля Юнга проводили шляхом вдавнення сталеві сфери в поверхню шліфа і по діаметру відбитка розраховували величину Е (як для стандартних, так і для розроблених матеріалів) по співвідношенню:

$$E = \frac{9100}{\frac{d^3}{3PD_{\phi}} 10^{-5} - 0,47} \quad (3.2)$$

де  $d$  - діаметр відбитка;

$P$  – навантаження.

Результати випробувань представлені в таблиці 3.2

Відносна зносостійкість матеріалів визначалася на установці Х4-Б, при дотриманні вимог, пропонованих ГОСТом 12357 - 71. Стираючою поверхнею служив шліфувальний папір з карбиду кремнію зеленого з розміром зерна 14 - 28 мкм.

Еталоном служив зразок зі сталі У8. Величина відносної зносостійкості визначалася по втраті ваги і розраховувалася по формулі:

$$\Sigma = \frac{\Delta P_{\text{э}} * \gamma_{\text{м}}}{\Delta P_{\text{м}} * \gamma_{\text{э}}} \quad , \text{ де} \quad (3.3)$$

$\Delta P_{\text{э}}$  і  $\Delta P_{\text{м}}$  – вагове зношування еталона і випробуваного зразка;

$\gamma_{\text{э}}$  і  $\gamma_{\text{м}}$  – щільність еталона та зразка.

Відносна зносостійкість композиційних матеріалів на основі карбонітрида титану становить 21 - 23 (таблиця 3.3) у порівнянні зі

зносостійкістю еталона. По цьому показнику розроблені матеріали незначно уступають сплавам ВК 6 і перевершують титановольфрамівий і безвольфраміві тверді сплави.

Таблиця 3.2 – Фізико-механічні характеристики розроблених композиційних матеріалів і стандартних твердих сплавів.

Матеріал	Щільність, $\rho \times 10^{-3}$ , кг/м <sup>3</sup>	Твердість, HRA	Межа міцності при вигині, МПа	Межа міцності при стиску, МПа	Модуль пружності, ГПа
ВК 6	15,0	88,5	1520	5500	622
T15K6	11,7	90	1180	4200	530
ТН 25	5,7	90	920	3500	405
КНТ 16	5,8	89	1080	3300	492
КН 15*	5,43	90	980	3350	523
КН 25	5,63	89	1110	3300	475
КН 30	5,73	89	1120	3280	453

\* КН - композиційний матеріал на основі TiCN зі зв'язуванням Fe - Cr (відповідно 15, 25 й 30 % зв'язування) .

Вивчено закономірності пружного-пластичного деформування і тендітного руйнування розроблених твердих сплавів на основі карбонітрида титану. Мікромеханічні властивості визначалися методом мікротвердості алмазної піраміди Віккерса, з використанням автоматичного навантаження при навантаженні 0,5 - 3,4Н за методикою наведеної в роботі [57]. Мікромеханічні властивості оцінювали по показниках мікротвердості, мікроміцності і тріщиностійкості як для розроблених матеріалів, так і для стандартних твердих сплавів.

Таблиця 3.3 – Експлуатаційні характеристики розроблених композиційних матеріалів і стандартних твердих сплавів.

Матеріал	Відносна зносостійкість
ВК 6	26
T15K6	20,3
ТН 25	12,9
КНТ 16	16,3
КН 15*	21,2
КН 25	23,5
КН 30	21,7

\* КН - композиційний матеріал на основі TiCN зі зв'язуванням Fe- Cr (відповідно 15, 25 й 30 % зв'язки).

Величина тріщиностійкості розраховувалася по формулі [58]:

$$K_{Ic} = 0,015[E/Hv]1/2PR^{-3/2} \quad (3.4)$$

де Н - твердість по Віккерсу, Е - модуль Юнга, Р - навантаження на індентор, R - відстань від центра відбитка до краю тріщини.

Мікроміцність визначалася по співвідношенню:

$$\sigma = \frac{1000P}{D^2} \quad (3.5)$$

де Р – навантаження на індентор,

D – середній розмір зони пошкоджуваності, мкм.

Вимір розмірів зони пошкоджуваності проводили з точністю  $\pm 0,2$  мкм, вірогідність результатів мікромеханічних характеристик забезпечувалася 30 - 50 кратними випробуваннями зразків при кожному значенні навантаження. Результати досліджень наведені в таблиці 3.4 свідчать про високий рівень властивостей розроблених композиційних

матеріалів і доцільності їхнього широкого застосування. Для порівняння представлені властивості стандартних твердих сплавів.

Таблиця 3.4 – Мікромеханічні властивості зносостійких матеріалів

Композиційний матеріал	Мікротвердість $H_v$ , ГПа	Мікроміцність, $\sigma$ , ГПа	Критичний коефіцієнт інтенсивності напруг, $K_{Ic}$ , МН.м <sup>-3/2</sup>
ВК6	15,5	4,8	6,58
T15K 6	18,8	6,2	6,7
ТН 20	16,0	2,7	4,37
КХН 15	12,0	2,8	4,6
КНТ 16	14,5	5,4	5,88
КН*-15	21,2	6,1	6,48
КН-25	19,5	6,6	6,52
КН-30	18,6	6,2	6,43

Аналіз наведених у таблиці 3.2 - 3.4 результатів випробувань розроблених композиційних матеріалів показує високий рівень їх фізико - механічних і експлуатаційних властивостей. За рівнем мікромеханічних властивостей розроблені матеріали близькі до вольфрамівмісних твердих сплавів і перевищують безвольфрамові тверді сплави.

### 3.3 Структура та властивості плазмових покриттів системи TiCN - (Fe - Cr)

Для нанесення зносостійких газотермічних покриттів на конструкційні сплави традиційно використовують порошки металевих сплавів на основі Fe - Cr та Ni - Cr із різними добавками металів (Co, Mo, Y), неметалів (B, Si) [57] і тугоплавких сполук (карбіди, бориди, оксиди алюмінію) [58], а також порошки



вольфрамових твердих сплавів марки ВК [59]. Покриття на основі металевих сплавів характеризуються відносно низькою зносостійкістю при високій стійкості до окислювання (до 1100 °С), тоді як покриття з вольфрамових твердих сплавів мають високу зносостійкість при низькому опорі високотемпературної корозії (до 700-730 °С). Зростаючі вимоги до таких покриттів у зв'язку з тенденцією до підвищення температур експлуатації, особливо в умовах знакозмінних навантажень та агресивних середовищ, приводять до необхідності створення зносостійких і жаростійких керамічних покриттів, для яких першорядного значення набуває висока твердість у сполученні із пружними властивостями матеріалу. Це досягається варіюванням структурних ефектів: використовуються як багат шарові (градієнтні) покриття, так і тонко дисперсні гете-рофазні системи із чергуванням в обох випадках твердої і м'якої складових [60]. При використанні керамічних композиційних покриттів в умовах сухого та граничного тертя важливий вибір таких фазових складових композита, які б у процесі трибоокислення забезпечували формування в зоні контакту вторинних структур у вигляді нанодисперсних плівок, що перешкоджають адгезійній взаємодії поверхонь тертя і являють собою тверде змащення. Такі плівки повинні мати низький коефіцієнт тертя і високу адгезійну міцність зв'язку з поверхнею керамічного покриття для запобігання їхнього видалення з робочої зони [60]. Цим вимогам відповідають шпінелі типу  $\text{Ni}(\text{FeCr})_2\text{O}_4$ , що утворюються в процесі трибоокислення на поверхні традиційно використовуваних сплавів Ni (Fe) - Cr. Подальшим кроком у підвищенні експлуатаційних властивостей газотермічних покриттів зносостійкого призначення є використання композиційних порошків на основі тугоплавкої фази. Для нанесення різного роду покриттів широко застосовують тугоплавкі з'єднання титану, у першу чергу карбід і нітрид титану, завдяки високому рівню їх фізико-хімічних і фізико-механічних властивостей і наявності широких областей гомогенності.

Карбонітрид титану є перспективним матеріалом для нанесення зносостійких покриттів, тому що має високу твердість, підвищену стійкістю до

корозії і зношування. Однак застосування цього матеріалу обмежено його крихкістю. Застосування складного карбіду  $TiCN$  для нанесення зносостійких газотермічних покриттів більш ефективно в комплексі з металевими зв'язками. Як металеві зв'язки доцільно використати сплави на основі ферума. У цьому випадку при нанесенні покриттів на сталеві поверхні знижується градієнт концентрації заліза в захисному шарі, і поверхня зміцнюється. Це сприяє зниженню інтенсивності дифузійних процесів на границі покриття і сталевій основи, а отже, дозволяє зберегти їхній склад і при нанесенні захисного шару, і в процесі експлуатації.

Після нанесення покриття на зразки вивчимо склад, структуру і триботехнічні властивості в умовах фретинг-корозії газотермічних покриттів на основі карбонітриду титана в зіставленні із традиційно використовуваними матеріалами на основі сплаву Ni-Cr.

Для напилювання використовували конгломеровані композиційні порошки КН-25 складом  $TiCN - 25\%$  (Fe-Cr) дисперсністю 60 - 80 мкм. Порошки одержували шляхом розмелу вихідних компонентів у планетарному млині зі сталевими кулями в середовищі ацетону з наступним брикетуванням і спіканням у вакуумі при  $T = 1400$  °C у печі СШВЛ. Спіканням досягався більш рівномірний розподіл структурних складових (металевої зв'язки і тугоплавкої фази). Вихідний композиційний порошок одержували дробленням отриманого зразка з наступним просіванням через набір сит (- 0,63 + 0,4 мм).

Плазмові покриття наносили на підкладки зі сталі 30ХГСА і титанового сплаву ВТЗ-1, використовуючи установку УПУ-3Д. Плазмоутворюючим газом служила аргонводнева суміш. У процесі відпрацювання режимів напилювання варіювали потужність і спосіб подачі порошку в струмінь ( $I = 410-450$  А,  $U = 50-56$  В,  $L = 100-150$  мм).

Попередньо поверхню зразка або піддавали традиційній піскоструминній обробці, або наносили електроіскровий підшар. Легуючим електродом був композиційний матеріал  $TiCN - (Fe - Cr)$  того ж складу, що і

нанесений порошок, завдяки чому підсилювалася адгезійне взаємодія в системі покриття-основа. Електро-іскрове легування (ЕІЛ) проводили на установці "Елітрон-21" у режимі: частота імпульсів струму 1200 Гц, струм короткого замикання  $<1$  А.

Склад і структуру покриттів досліджували на електронному мікроаналізаторі "Самебах SX-50". Отримані покриття випробовували за стандартною методикою (ГОСТ 23.211-80) в умовах сухого тертя на фретинг-корозію в парі зі сталлю 45 на повітрі (амплітуда 100 мкм, частота 25 Гц, навантаження 200 Н). Зношування вимірювали на профілографі-профілометрі 286 і мікроскопі МБІ-2, мікротвердість - на мікротвердометру ПМТ-3 при навантаженні 0,5 Н.

Для вибору складу металевої зв'язки на основі заліза проводилося дослідження змочування в системі TiCN - (Fe - Cr) з наступним металографічним і мікрорентгеноспектральним аналізом зони взаємодії. Оптимальному складу зв'язки відповідав сплав на основі заліза, що містить 5% (мас.) Cr: при його плавленні на поверхні TiCN утворюються близькі до нульові контактних кути. Взаємодія в даній системі характеризується утворенням у зоні контакту обмежених твердих розчинів (заліза в TiCN і титану в сплаві Fe-Cr). Кількість металевої зв'язки (25 %) обрано з урахуванням технологічних параметрів формування покриттів, коли зв'язування повинна забезпечувати досить високу адгезію покриття до основи, а тугоплавка складова - високий рівень фізико-механічних та експлуатаційних властивостей.

Рентгенофазовий аналіз (РФА) покриттів показує, що поверхня збагачена тугоплавкою фазою TiCN з невеликою кількістю сплаву Fe - Cr. При пошаровому РФА встановлене, що кількість ферохромової зв'язки зростає по товщині покриття в напрямку до основи. Це обґрунтовується більш низькою температурою плавлення металевого сплаву в порівнянні з карбідною фазою, у результаті чого при зіткненні частки з основою

металевий сплав сильніше деформується та підплавляється, ніж тугоплавка складова, що сприяє кращій її адгезії з основою.

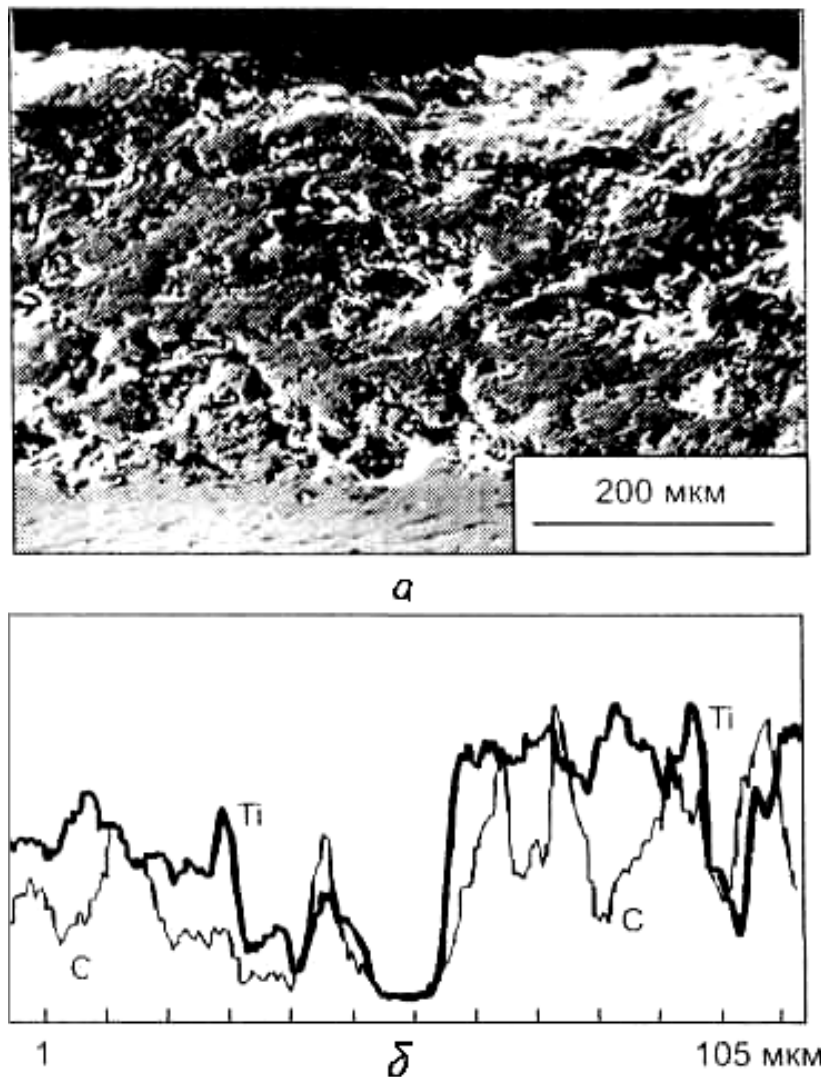


Рисунок 3.11 – Мікроструктура (а) і розподіл елементів (б) у поперечному перерізі композита КН – 25 після пікоструйної обробки

Дослідження структури та границі розділу покриття – основа методом мікрорентгеноспектрального аналізу свідчить про високу якість покриттів (рисунок 3.11, 3.12). Покриття з ЕІЛ-підшаром характеризуються суцільністю, щільним приляганням до основи та низькою пористістю (<1%). Привертає увагу відсутність типової для газотермічних покриттів лускатої (ламельної) структури. Покриття являє собою гетерофазний матеріал з досить рівномірним розподілом фаз. Це може бути пов'язано зі

структурою гранульованого порошку, у якому частки є конгломератами, що містять карбідну і металеву фази, адгезійно міцно зв'язані між собою. При проходженні такого структурованого в плазмовому струмені порошку практично відсутній поділ компонентів через різну швидкість. У результаті об поверхню вдаряється частка на основі тугоплавкої складової, що у меншому ступені, ніж металева частка, схильна до пластичного деформування, відповідальному за утворення ламелей. Наслідком цього є формування матричної структури покриття (рисунок 3.12, в), у якій зерна тугоплавкої фази TiCN розміром 3 - 5 мкм оточені тонким прошарком сплаву Fe - Cr.

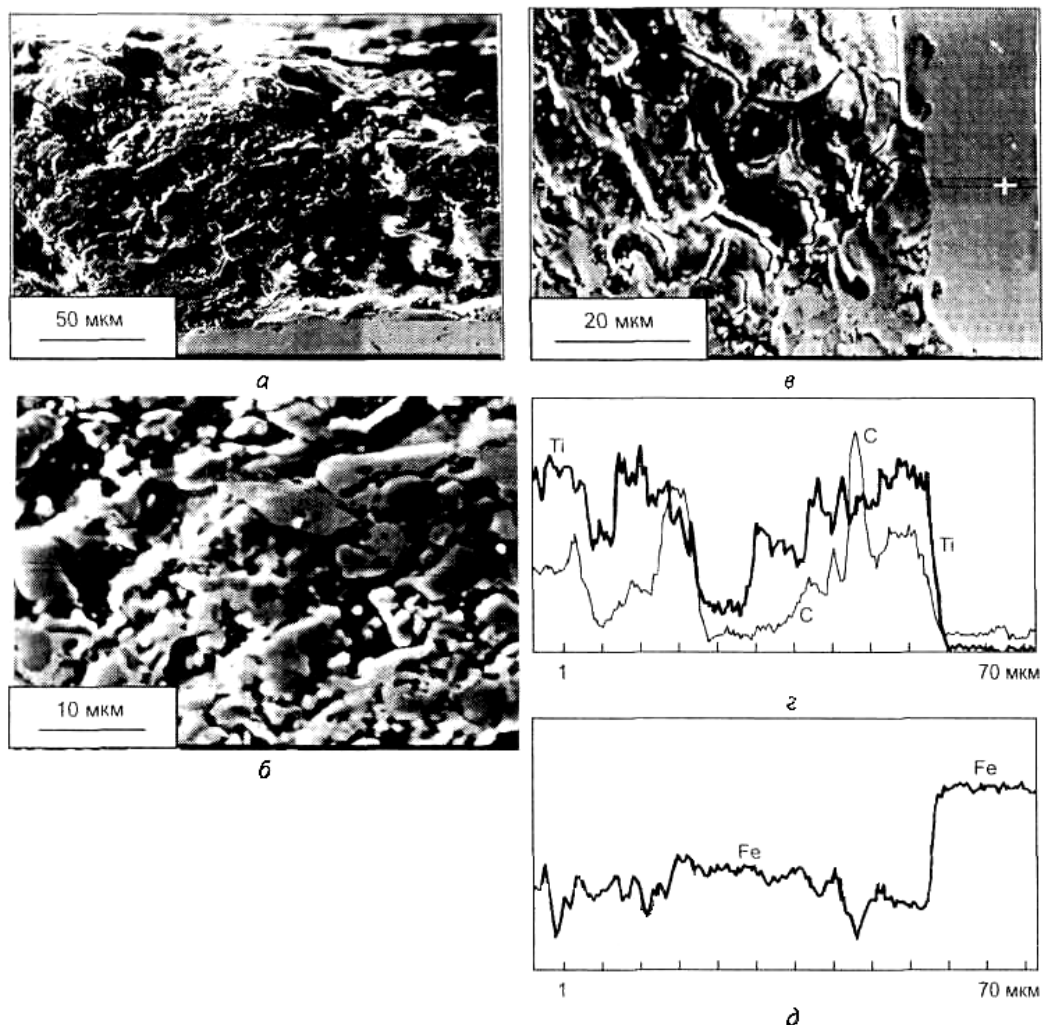


Рисунок 3.12 – Мікроструктура (а,б,в) і розподіл елементів (г, д) у поперечному перерізі композиту КН – 25 з ЕІЛ - підшаром

Зміна мікротвердості по товщині покриттів на обох підкладках (рисунок 3.13) має однаковий характер: значення  $H_{\mu}$  плавно знижуються в напрямку до основи, що свідчить про градієнтний розподіл фаз по товщині. Можна припустити, що в початковий період нанесення покриття на поверхні підкладки закріплюються переважно частки металевої зв'язки, адгезійно більш міцно пов'язані з титановим сплавом і сталлю в порівнянні із частками тугоплавкої фази TiCN. Тому внутрішня частина покриття, що примикає до основи, являє собою сплав Fe-Cr, у якому присутні частки карбідної фази, тоді як зовнішня поверхня збагачена тугоплавкою фазою. Це підтверджується високою мікротвердістю покриття ( $\sim 25$  ГПа) у зовнішньому шарі, близькому до мікротвердості карбонітрида титану, а також фазовим складом поверхні, у якому частка сплаву Fe-Cr невелика.

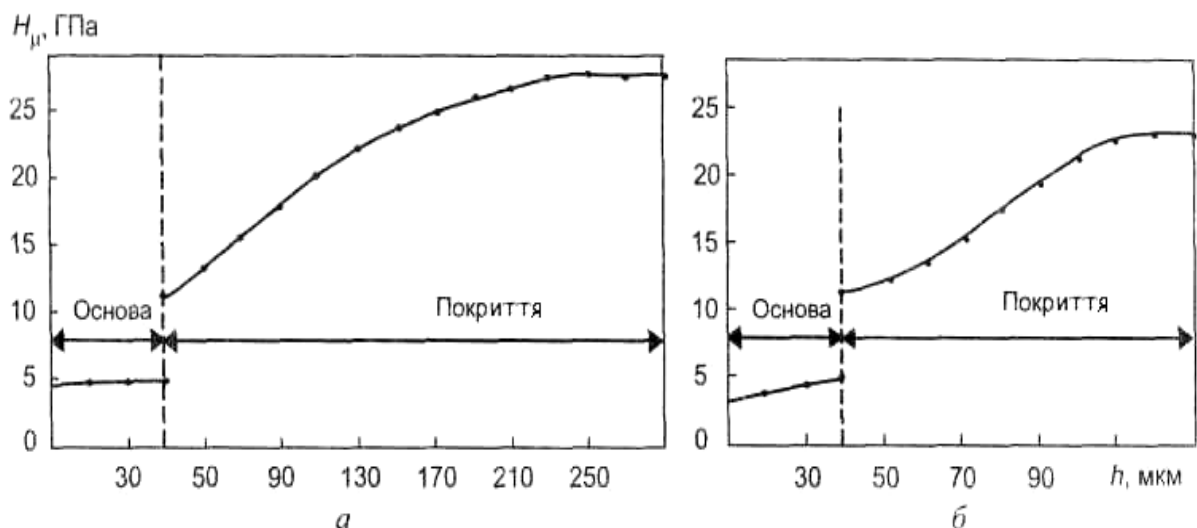
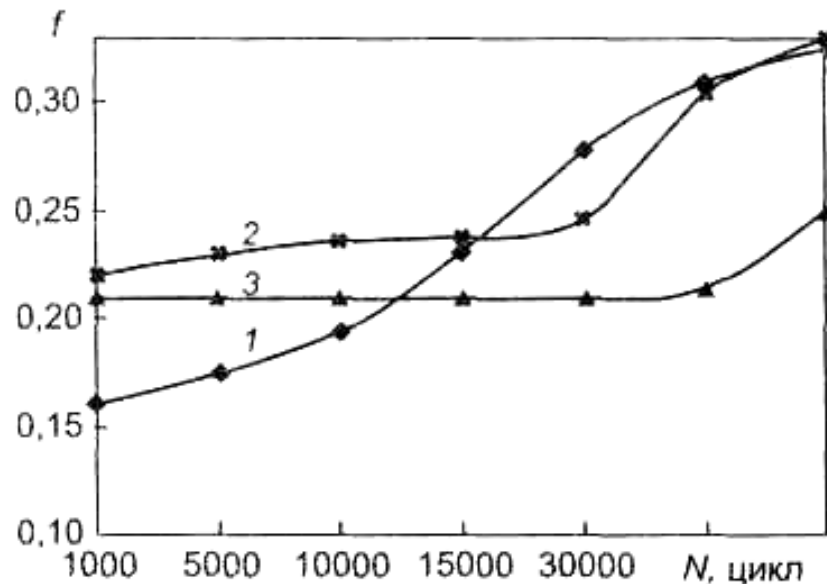


Рисунок 3.13 – Розподіл мікротвердості по товщині покриття КН – 25 на сплаві ВТЗ-3 (а) і сталі 30ХГСА (б).

Товщина покриття на сталі становить 250 - 300 мкм. Мікротвердість фази на основі TiCN дорівнює  $25,7 \pm 2,5$  ГПа, металевої фази - 5,5 - 6 ГПа, сталевій підкладки -  $2,5 \pm 0,5$  ГПа (рисунок 3.13, б). Коефіцієнт тертя покриттів TiCN - (Fe - Cr) на сталі 30XGSA на початковому етапі зношування ( $N < 10000$  циклів) становить 0,16 - 0,22 (рисунок 3.14), знос дорівнює 2 - 5 мкм (таблиця). Ці параметри практично зберігаються до 75000-100000 циклів, що свідчить про

міцний адгезійний зв'язок між покриттям та основою. Позитивним фактором є те, що в процесі формування покриття на сталі не відбувається істотного перерозподілу компонентів покриття і підкладки в зоні контакту, оскільки склад металевої зв'язки близький до складу сталі, а карбонітрид титану взаємодіє зі сталлю, уворюючи обмежені тверді розчини (Fe в TiCN).



1 – КН-25 (піскоструйна обробка), 2 – КН-25 (ЕІЛ-підшар), 3 – ПХ20Н80 (піскоструйна обробка)

Рисунок 3.14 – Залежність коефіцієнта тертя  $f$  від кількості циклів для покриттів на сталі 30ХГСА

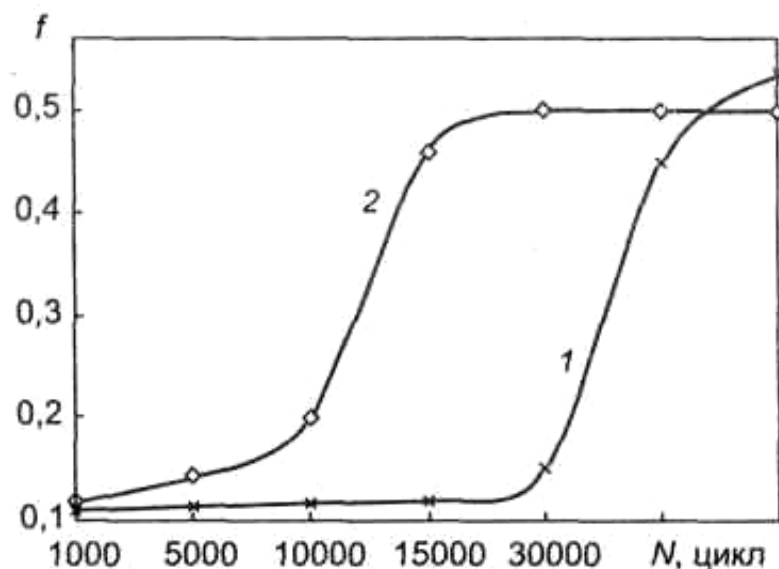
Товщина покриття на титановому сплаві становить 250 - 300 мкм; мікротвердість на поверхні покриття дорівнює  $27,5 \pm 2,5$  ГПа, по товщині вона змінюється від 23,3 до 12,8 ГПа. Мікротвердість основи складала 4,5 - 5 ГПа (рисунок 3.13, а). Структура покриття гетерофазна: між зернами карбонітрида титану розміром 5 - 10 мкм рівномірно розподілені фази на основі сплаву Fe-Cr. Коефіцієнт тертя покриття TiCN - (Fe - Cr) на сплаві ВТЗ-1 з ЕІЛ-підшаром в умовах фретинг-корозії залишався на рівні 0,12 - 0,13 (рисунок 3.15) протягом 30000 циклів, потім спостерігалось збільшення  $f$  внаслідок часткового

сколювання покриття, порушення суцільності і віднесення із зони контакту оксидних плівок, що утворилися в процесі тертя вторинних ( $\text{TiO}_2$ ).

Таблиця 3.5 – Знос плазмових покриттів після 100000 циклів випробування на фретинг-корозію

Покриття	Матеріал підкладки	Обробка підкладки	Знос, + 0,5 мкм
КН-25	Сталь 30ХГСА	Піскоструминна	1,98-4,6/2—4,6*
КН-25		ЕІЛ-підшар	3,5—5,2/3,5—5,2
ПХ20Н80 (Cr—80Ni)		Піскоструминна	28,6/—
КН-25	Титановий сплав ВТЗ-1	Піскоструминна	3,4/3,3
КН-25		ЕІЛ-підшар	4,0—6,2/5,0—6,1
ВН15( $\text{Cr}_2\text{C}_3$ —85NiCr)		Піскоструминна	6,2/6,3

\* До риски зазначені результати виміру профілографом-профілометром, за рискою - МБІ-2.



1 – КН-25 (ЕІЛ-підшар), 2 – ВН-15 (піскоструйна обробка)

Рисунок 3.15 – Залежність коефіцієнта тертя  $f$  від кількості циклів для покриттів на сплаві ВТЗ – 1



Порівнюючи триботехнічні властивості покриттів з розробленого матеріалу на обох підкладках, варто вказати, що їхній знос на порядок нижче в порівнянні з покриттям зі сплаву Ni - Cr (ПХ20Н80). Це пов'язане з мікротвердістю матеріалу ПХ20Н80 ( $H_{\mu} = 2,5-5$  ГПа) і КН-25 ( $H_{\mu} = 23 - 27$  ГПа) або є наслідком переносу матеріалу покриття з порошку ПХ20Н80 на контртіло. Таким чином, зміцнюючі карбідні фази TiCN і металева зв'язка у покриттях перешкоджають схоплюванню і руйнуванню поверхні завдяки пластичному деформуванню, а також можливому утворенню в процесі тертя вторинних оксидних плівок, адгезійно міцно пов'язаних з основою.

Загальним для обох підкладок є характер залежності коефіцієнта тертя від кількості циклів (рисунок 3.14, 3.15): з ростом N, тобто зі збільшенням інтенсивності навантаження, коефіцієнт тертя зростає, імовірно, за рахунок видалення із зони тертя вторинної плівки, що формується в процесі трибоокислення. Відмінність полягає в тому, що різке підвищення коефіцієнта тертя покриттів на титановому сплаві починається при набагато меншій кількості циклів:  $N > 30000$ , тоді як для сталі - при  $N > 75000$ .

Склад поліоксидних вторинних плівок, що формуються в зоні тертя в процесі трибоокислення, визначається складом матеріалів покриття і контртіла. У покриттях на основі сплаву Ni - Cr основними фазами вторинної плівки є шпінелі системи Ni-Cr-O, що грають роль твердої змазки в умовах сухого тертя. При наявності карбідних фаз TiCN і Fe - Cr у матеріалі таких покриттів у зоні тертя можуть утворитися високотемпературні оксидні фази на основі системи TiO<sub>2</sub>.

Виходячи із властивостей покриттів, розроблені композиційні матеріали можуть бути використані для зміцнення деталей, що працюють в умовах інтенсивного зношування.

Як бачимо в процесі плазмового напилювання гранульованих композиційних порошків на основі TiCN зі зв'язкою Fe - Cr формується гетерофазне градієнтне покриття, збагачене з поверхні тугоплавкою фазою. Покриття характеризується кільцевою структурою, у якій зерна твердої фази

розміром 3-5 мкм оточені тонким прошарком металевого сплаву. Інтенсивність зношування покриттів на сталі і титановому сплаві в умовах фретинг-корозії майже на порядок нижче, ніж у традиційних покриттів зі сплаву Ni - Cr. Коефіцієнт тертя покриттів на сталі становить 0,16-0,24, а на титановому сплаві - 0,12-0,30.

### Висновки до розділу 3

Перспективність карбонітрида титану для наплавлення, а також як зносостійкої складової композиційних матеріалів підтверджується тим, що він має високу термодинамічну стабільність із однієї сторони і більш високу пластичність в порівнянні з карбідом титану з іншої. Систематизовані результати по змочуванню карбонітрида титану сплавами на основі заліза та нікелю в літературі відсутній. Як металеві зв'язки для створення композиційного матеріалу на основі карбонітрида титану розглядається можливість використання інтерметалідів нікелю, однак такі зв'язування не завжди доцільно використовувати через відносно високу крихкість останніх. Ґрунтуючись на результатах змочування і міжфазної взаємодії для одержання нового композиційного матеріалу була обрана система TiCN - (Fe - Cr). Металевою зв'язкою у цьому композиті є сплав на основі заліза з добавкою 5-15% хрому. Сплави Fe - Cr утворюють на поверхні карбонітрида титану близькі до нульових контактні кути, що є необхідною умовою високої адгезії та когезії покриття.

В процесі плазмового напилювання гранульованих композиційних порошків на основі TiCN зі зв'язкою Fe - Cr формується гетерофазне градієнтне покриття, збагачене з поверхні тугоплавною фазою. Покриття характеризується кільцевою структурою, у якій зерна твердої фази розміром 3-5 мкм оточені тонким прошарком металевого сплаву.

Результати випробувань розроблених композиційних матеріалів показують високий рівень їх фізико - механічних і експлуатаційних властивостей. За рівнем мікромеханічних властивостей розроблені матеріали близькі до вольфрамівмісних твердих сплавів і перевищують безвольфрамові тверді сплави.

Інтенсивність зношування покриттів на сталі і титановому сплаві в умовах фретинг-корозії майже на порядок нижче, ніж у традиційних покриттів зі сплаву Ni - Cr. Це пов'язане з мікротвердістю матеріалу ПХ20Н80 ( $H_{\mu} = 2,5 - 5$  ГПа) і КН-25 ( $H_{\mu} = 23 - 27$  ГПа) або є наслідком

переносу матеріалу покриття з порошку ПХ20Н80 на контртіло. Таким чином, зміцнюючі карбідні фази TiCN і металева зв'язка у покриттях перешкоджають схоплюванню і руйнуванню поверхні завдяки пластичному деформуванню, а також утворення в процесі тертя вторинних оксидних плівок, адгезійно міцно пов'язаних з основою.

Склад поліоксидних вторинних плівок, що формуються в зоні тертя в процесі трибоокислення, визначається складом матеріалів покриття і контртіла. У покриттях на основі сплаву Ni - Cr основними фазами вторинної плівки є шпінелі системи Ni-Cr-O, що грають роль твердої змазки в умовах сухого тертя. При наявності карбідних фаз TiCN і Fe - Cr у матеріалі таких покриттів у зоні тертя можуть утворитися високотемпературні оксидні фази на основі системи TiO<sub>2</sub>.

Коефіцієнт тертя покриттів на сталі становить 0,16 - 0,24, а на титановому сплаві - 0,12 - 0,30.

Отже, результати досліджень наведені в даній роботі свідчать про високий рівень властивостей розроблених композиційних матеріалів і доцільності їхнього широкого застосування в промисловості для підвищення довговічності і надійності прецизійних пар як при виготовленні так і відновлення при ремонті.

## РОЗДІЛ 4

### ОХОРОНА ПРАЦІ

#### **4.1 Небезпечні і шкідливі виробничі фактори при випробуванні зносостійкості титанових сплавів в умовах тертя ковзання**

Згідно з ГОСТ 12.0.003-74, при випробуванні зносостійкості титанових сплавів в умовах тертя ковзання встановлено багато різного устаткування. Використовуються верстати настільно-свердлильний НС-12, універсальний круглий-шліфувальний верстат 310 П, наждаковий верстат 332 Б. Рухливі й обертові частини цього устаткування становлять небезпеку травматизму.

Проводячи експеримент з верстатами й при випробуванні зносостійкості на стенді створюється підвищений рівень шуму й вібрації від роботи насосів і верстатів. Виробничий шум здатний вплинути на центральну нервову систему, в результаті чого можуть спостерігатися зниження уваги, й реакції. У процесі праці шум і вібрація негативно відображається на таких функціях, як пам'ять і мислення. Крім того, шум відволікає увагу людини від виконання точних робіт.

Неправильна установка устаткування й агрегатів приводить до того, що шум і вібрація від них можуть проникати не тільки в суміжні, але й у віддалені від них приміщення.

Причина цього - «розтікання» вібрацій у вигляді пружних хвиль в усі приміщення, де вони проявляються у вигляді шуму. Персонал, що обслуговує ці стенди й верстати може виявитися під впливом вібрацій, достатніх для виникнення вібраційної хвороби. При цьому захворюванні людина скаржиться на болі в руках, втрату чутливості. Характерними симптомами захворювання є приступ, обілення пальців і спазм судин, а після 2-4 років роботи відзначається зниження слуху.

На ділянці промивання титанових деталей повітря насичене токсичними парами, тому що для промивання титанових деталей використовують бензин Б-70. При роботі на стенді для експерименту титанових

деталей літака застосовують гас ТС-1 і гідравлічну рідину FH51. При роботі на цій ділянці неминучий контакт із цими речовинами.

Одним з факторів визначаючих сприятливі умови праці в цеху випробування зносостійкості титанових сплавів є раціональне висвітлення робочої зони й робочих місць. При правильно підбраному й виконаному освітленні приміщень очі працюючого впродовж тривалого часу зберігають здатність добре розрізняти предмети й знаряддя праці не стомлюючись. Це сприяє зниженню виробничого травматизму й професійного захворювання очей. Недостатнє освітлення робочих місць - одна із причин низької продуктивності праці. При недостатньому освітленні очі працюючого сильно напружені, при цьому погіршується розпізнавання оброблюваних предметів, знижується темп й якість роботи, погіршується загальний стан. На органах зору негативно позначається як недостатнє, так і надмірне освітлення, що приведе до осліплення, що характеризується різкою дратівною дією й різню в очах, при цьому очі працюючого втомлюються й зорове сприйняття погіршується.

Таким чином, при проведенні експериментів з випробуванні зносостійкості титанових сплавів присутні небезпечні й шкідливі фактори, викладені вище.

Інженерні рішення, спрямовані на запобігання впливу небезпечних і шкідливих виробничих факторів представлені в наступному розділі.

#### **4.2 Профілактика небезпечних і шкідливих виробничих факторів при випробуванні зносостійкості титанових сплавів**

Для запобігання впливу на робітників такого небезпечного фактора, як рухомі механізми і машини, застосовувати на території ділянки необхідні доріжки, розмічені жовтогарячою фарбою. Засоби, що рухаються, офарблюються в жовто-чорні кольори, швидкість руху обмежується від 3 до 12 км/ч. Залежно від ширини проїзного шляху. На всіх видимих місцях біля

кожного робочого місця розміщені плакати й покажчики по Т.Б. Приступати до роботи на всіх видах устаткування, установленого в цеху робітникам дозволяється тільки після інструктажу й вказівок, а також перевірки знань із розписом у журналі 3-х ступеневого контролю.

Верстати й інше устаткування встановлено на міцній підставі або фундаменті й ретельно закріплене. Робочі місця ремонтних слюсарів обладнані відповідними шафами, верстатами, стелажми. Частини верстатів і механізмів, що рухаються, які можуть з'явитися причиною травматизму працівників, укриті відповідними захисними огороженнями або кожухами.

Робітникам, що працюють на верстатах й устаткуванні, що конструктивно або по інших обставинах не можуть бути забезпечені захисними пристроями, адміністрація зобов'язана видати зручні, що не заважають роботі захисні окуляри й постійно стежити за їхнім застосуванням під час роботи на верстатах й устаткуванні.

При роботі з ручним інструментом робітникам видаються захисні окуляри, ручний інструмент справний і промартільний.

Наявність токсичних речовин на ділянці промивання, перевірки на герметичність може привести до загального отруєння. Промивання агрегатів варто робити в мийних машинах, ваннах або на спеціальних робочих місцях, обладнаних витяжною вентиляцією. Для операції очищення й промивання деталей, є можливість заміни горючих розчинів невогнебезпечними: заміна бензину, гасу наприклад хлорованими вуглецьми (трихлоетан й інші).

У випадку застосування легко займистих рідин робочі місця для промивання обладнані місцевою витяжною вентиляцією у вибухобезпечному виконанні. Кількість легкозаймистих рідин на робочому місці не повинне перевищувати змінної потреби. По закінченні зміни ці рідини необхідно зливати в небиткі посудини, що щільно закриваються, і здавати на зберігання в спеціальній коморі. Обтиральний матеріал - дрантя, варто зберігати в металевій тарі, що щільно закривається кришкою. Використані обтиральні матеріали щодня наприкінці зміни видаляють із робочих місць.

Ділянка промивання ізольована від інших ділянок і обладнана витяжною вентиляцією. Розташовувати їх треба в одноповерхових вогнетривких будинках. Підлоги цеху промивання повинні бути вогнетривкими, міцними, рівними, неслизькими, що дозволяють робити легке очищення забруднень. Стіни приміщень фарбуються світлою олійною фарбою або обкладаються плиткою (висота фарбування або обкладки плиткою від підлоги піднята на висоту 2 м.).

Періодично проводиться аналіз змісту пару і газів у повітрі виробничого приміщення спеціальними або стаціонарними газостабілізаторами.

На ділянці промивання для захисту шкіри рук від впливу нафтопродуктів і гідросуміші їх покривають пастами, що не розчиняються в нафтопродуктах, але легко змиваються водою. Зокрема, використовується паста ИЕР-1, що складається з натрієвого нейтрального минола, технічного гліцерину, білої глини й води.

При потраплянні бензину або мастил на відкриті ділянки шкіри їх необхідно видалити ватним тампоном, а потім ретельно промити забруднені ділянки шкіри теплою водою з милом.

При виконанні технологічних операцій пов'язаних з утворенням пилу й стружок, таких як при спилуванні, свердлінні, шліфуванні необхідно передбачити засоби для відсмоктування пилу й видалення стружки. Обдування стисненим повітрям деталей роблять у спеціально обладнаних шафах з місцевою витяжною вентиляцією. Щоб уникнути травматизму дрібними стружкам, обпилюваннями й залишками абразиву, що вилітають із великою швидкістю з отворів і поглиблень при обдуві, на кінцевік доцільно закріпити гумовий обтічник. Наявність металевого пилу, і абразивного пилу в повітрі робочої зони може привести до захворювання слюсарів пневмокніозом, хронічним пиловим бронхітом.

У цей час накопичено великий досвід зниження шуму й вібрації при роботі верстатного встаткування, вентиляторних систем і різних стендів. Для



зниження шуму в цеху використовуються методи звукоізоляції й звукопоглинання. Якщо є технічна можливість, гучні машини потрібно закривати звукоізолюючими кожухами, виготовленими з метала, пластмаси й облицьованими зсередини звуковбирним матеріалом. 20-50 мм. Висока ефективність звукоізоляції забезпечена лише при відсутності щілин й отворів у кожусі.

Для зниження рівня шуму в цеху застосовуються віброізоляції й шумопоглинальні покриття.

Останнім часом одержали поширення шумопоглинальні навушники для індивідуального захисту від шуму, а також вкладиші «Беруші». Захист вкладишами дозволяє знизити шум в 4-6 разів, залежно від рівнів і секторів шуму. Люди, що працюють в умовах шуму, повинні строго дотримувати режиму праці й відпочинку. Особливо велике значення має для них нормальний сон, що повинен бути не менш 8 годин.

При неправильній установці встаткування в цеху шум і вібрація від них можуть проникати в змінні й у віддалені від них приміщення. Для ізоляції такого корпусного звуку головну роль грає матеріал фундаменту, стін, підлог й елементів, що з'єднують їх.

Агрегати, що створюють вібрацію, установлюють у підвальних приміщеннях будинків або на першому поверсі на масивних фундаментах, розміщених безпосередньо в ґрунті й незв'язаних з конструкціями будинків. Якщо ж його необхідно встановити в міжповерховому перекритті, то завдання ускладнюється. У цьому випадку між джерелами вібрації і його

основою містяться пружні елементи - амортизатори. Вони виготовляються у вигляді сталевих пружин або прокладок із пружних матеріалів, наприклад, гуми, пробки, азбесту й інших.

Як засоби індивідуального захисту від вібрації використовують рукавиці з подвійним шаром з поролону або інших вібропоглинаючих матеріалів. Ефективним засобом індивідуального захисту від вібрації є антивібраційні пояси, подушки, прокладки, взуття що поглинають вібрацію й

т.п. Недостатнє освітлення робочих місць - одна із причин низької продуктивності праці. У цеху випробування зносостійкості титанових сплавів освітлення люмінесцентне, що є самим економічним й забезпечує нормальну освітленість робочого місця з нормою 150 Лк лампами ЛТ5 у світильниках ОДР. Поряд з люмінесцентними лампами застосовуються лампи накаливання у світильниках ВЗК-200, що забезпечують безпеку від вибуху.

Необхідна освітленість робочих приміщень і місць залежить не тільки від потужності й розташування світильників, а також від обробки й фарбування стін, стелі й устаткування. Стелі варто офарблювати в білі кольори, стіни й устаткування у світлі тони (устаткування у світло-салатовий або ясно-сірий кольори).

Правильно обрані кольори сприяють зниженню стомлюваності очей, підвищується загальний тонус організму людини, завдяки чому підвищується працездатність і продуктивність праці. Колірна обробка й фарбування в процесі праці, при якому вона стає безпечною, більш ефективною, та приносить задоволення.

### **4.3 Розрахунок механічної вентиляції при випробуванні зносостійкості титанових сплавів**

У цеху при випробуванні зносостійкості титанових сплавів в умовах тертя ковзання одне з важливих місць займає ділянка промивання деталей. Від того наскільки ретельно промиті й очищені окремі деталі залежить якість дефекації й наступного ремонту. Для цього в останні роки все частіше застосовуються пожежебезпечні промивні рідини.

Однак використовуються також і легкозаймисті й горючі рідини, такі, як бензин, гас й інші. Тому в приміщеннях, де робиться промивання цими рідинами, утворюються багато токсичних пар. Крім цього бензин і гас при випарі забруднює вуглеводами повітря робочої зони.

У цей час головним фактором забезпечення безпечної праці на ділянці промивання є надійна робота вентиляційних систем.

Промивання титанових деталей проводять у спеціальних ваннах, при цьому застосовують місцеву вентиляцію. Основними її елементами є: місцеві відсоси, вентилятор, воздуховод, пристрій для очищення повітря.

Визначаємо необхідну продуктивність місцевої витяжної вентиляції. Розраховуємо повітрообмін через витяжну камеру ( $\Phi_v$ ), виходячи зі швидкості підсмоктування повітря через відкриті робочі отвори по формулі.

$$\Phi_v = F * V * 3600 \text{ ( м}^3\text{/година )} \quad (4.1)$$

Де:

$F$  - площа робочого отвору, м<sup>2</sup>

$V$  - швидкість підсмоктування повітря, м/с

Швидкість підсмоктування повітря враховує характер і температуру шкідливих виділень. Вибираємо  $V = 1,5$  м/с й  $F = 1,7$  м<sup>2</sup>

$$\Phi_v = 1,7 * 1,5 * 3600 = 9180 \text{ м}^3\text{/год.} = 2,55 \text{ м}^3\text{/с.}$$

Потребує продуктивність вентилятора

$$\Phi = 1,1 * \Phi_v = 1,1 * 9180 = 10098 \text{ м}^3\text{/год.} = 2,8 \text{ м}^3\text{/с.}$$

Вибираємо в каталозі потреб продуктивності центробіжний вентилятор ЦН-70 №5. користуючись графіками, визначаємо характеристики вентилятора. При  $\Phi = 3,05$  м/с номер вентилятора  $H_v = 1035$  Па,  $\eta_v = 0,64$ .

Вентилятор задовольняє вимогам пожежної безпеки. Для визначення потужності приводного електродвигуна потрібна формула:

$$N_e = \frac{\Phi H_v * \kappa}{1000 * \eta_v * \eta_n} \quad (4.2)$$

Де:  $\kappa$  = коефіцієнт запасу,  $\kappa = 1,05 \div 1,5$

$V_n$  - КПД передачі (для клиноремінних передач  $V_n = 0,9$ )

$$N_3 = \frac{2,8 * 10,35 * 1,3}{1000 * 0,64 * 0,9} = 6,2 \text{ (кВт)} \quad (4.3)$$

Вибираємо в каталозі електродвигун типу ВАСВ-10, згідно умов роботи на ділянці. Частота обертання  $n = 370$  про/хв.. потужність :  $N_e = 9$  кВт, напруга  $U_n = 380$  В.

#### **4.4 Пожежна й вибухова безпека в цеху випробуванні зносостійкості титанових сплавів**

Пожежна й вибухова безпека - одне з найважливіших питань охорони праці на ремонтних підприємствах ЦА.

Пожежна безпека повинна забезпечуватися:

- системою запобігання пожежі;
- системою пожежного захисту;

Вся робота з пожежної безпеки будується відповідно до НПО ЦА-85.

Основним завданням профілактичної роботи є: усунення причин, що викликають виникнення пожежі; здійснення заходів, що обмежують поширення пожежі у випадку його виникнення; створення умов для успішної евакуації людей, майна й устаткування при пожежі, проведення заходів, що забезпечують посилену ліквідацію пожежі підрозділами пожежної охорони або добровільних пожежних дружин.

У цеху випробування зносостійкості титанових сплавів використовується гас, бензин, ФН-51, дрантя.

Джерелом пожежі в цеху дослідження зносостійкості титанових сплавів можуть бути:

1. Несправність виробничого устаткування й порушення технологічного процесу (розгерметизація устаткування й установок які виділяють горючі або вибухонебезпечні пари, гази й пил, порушення встановлених технологічних процесів).

2. Запобігання пожеж від зазначених причин може бути досягнута в результаті підвищення відповідальності ІТП й обслуговуючого персоналу до якості монтажу, технічного нагляду, своєчасне проведення перевірок і планово-попереджувальних ремонтів технологічного встаткування

3. Несправність і перегрів електричних пристроїв (неправильний вибір перетину проводів електромереж і підбір електроустаткування,

електродвигунів і світильників, несправність в електромережі, електроустаткуванні, відсутність або несправність заземлення). Виключити ці причини можна, підсиливши контроль за строгим дотриманням правил пристрою електроустановок при монтажі електроустаткування й правильної експлуатації.

4. Необережне поводження з вогнем (паління й застосування відкритого вогню в заборонених місцях, залишення без догляду електронагрівальних приладів, перевірка витоку газу за допомогою відкритого вогню, а також підігрів масла й т.д.). Для усунення цих причин необхідно підвищити виробничу дисципліну, установити в цеху строгий протипожежний режим. Паління дозволяється тільки в спеціально відведені для цього місцях.

5. На ділянці промивання ручне протирання виробів бензином, при цьому запалення може відбутися в результаті тертя. Можливо мимовільне запалення промаслених матеріалів, одягу, дрантя. Дрантя відкладається в алюмінієву, що щільно закривається герметичну тару й по закінченні зміни віддаляються із приміщення.

6. Статична електрика на ділянці промивання може виникнути при промиванні титанових деталей у ваннах, крім того, верстати де використовується електрика повинні бути заземлені. Для попередження іскріння борта сталевих промивних ванн необхідно оббити алюмінієвими смужками, а самі ванни надійно заземлити. Для відводу статичної електрики гумові шланги, незастосовувані для промивання деталей утворюються заземленими наконечниками з кольорового металу. Транспортувальні візки варто обладнати колесами на гумовому ході.

На випадок виникнення пожежі на ділянці цеху розроблені інструкції з організації гасіння пожежі, а також план евакуації працівників з небезпечної зони.

Як засоби гасіння пожежі цех оснащений воздухо-пінними вогнегасниками ОВП-100 і пересувною вуглекислотою установкою УП-1М. Пожежний інвентар, устаткування, засоби пожежогасіння, розташовуються з обліком їхнього швидкого використання. Система сигналізації передбачає автоматизацію сигналізації в пожежну частину, а також телефонного виклику. Номер телефону для виклику у випадку пожежі повинен знати кожен працівник цеху. І додатково номер виклику при пожежі пишеться на телефоні. До прибуття пожежної команди працівник повинен вжити заходів до гасіння пожежі наявними засобами пожежогасіння.

#### **4.5 Інструкція з охорони праці при випробуванні зносостійкості титанових сплавів в умовах тертя ковзання**

Загальні вимоги безпеки.

1. До виконання ремонтних робіт допускається робітник не молодше 18 років, який має посвідчення за фахом слюсаря-ремонтника і пройшов навчання безпечним методам і прийомам робіт і склав іспит на право проведення ремонтних робіт; вступний інструктаж з охорони праці; первинний інструктаж на робочому місці.

2. Згідно з типовими галузевими нормами слюсареві-ремонтнику видається: костюм віскозно-лавсановий; головний убір х / б; рукавиці комбіновані; черевики шкіряні, чоботи гумові.

3. До роботи з етилованим бензином допускається слюсар після проходження спеціального інструктажу.

4. При виконанні робіт із застосуванням етилованого бензину необхідно проходити періодичний медичний огляд один раз на шість місяців.

5. Слюсар з ремонту машин і механізмів зобов'язаний:

1) виконувати тільки доручену роботу;

2) виконувати вимоги правил внутрішнього трудового розпорядку. Не допускати вживання спиртних напоїв, наркотичних і токсичних засобів в

робочий час або за місцем роботи. Палити дозволяється тільки в спеціально встановлених місцях;

3) дотримуватися вимог цієї інструкції, інструкції про заходи пожежної безпеки та інструкції з технічної експлуатації закріпленого за ним устаткування;

4) знати місце розташування засобів надання долікарської допомоги, первинних засобів пожежогасіння, головних і запасних виходів, шляхи евакуації в разі аварії або пожежі.

6. При захворюванні або травмуванні необхідно повідомити майстра, звернутися до медпункту

7. При нещасному випадку слід надати першу долікарську допомогу потерпілому, викликати працівника медичної служби, повідомити майстру. Зберегти до розслідування обстановку на робочому місці і стан устаткування такими, якими вони були в момент події, якщо це не загрожує життю та здоров'ю оточуючих, не спричинить аварії.

8. При виявленні пожежі або загорянь необхідно:

- негайно повідомити про це в пожежну охорону або адміністрації;
- приступити до гасіння вогнища пожежі наявними в цеху чи на робочому місці засобами пожежогасіння (вогнегасники, внутрішній пожежний кран, пісок і т. п.).

9. Небезпечні і шкідливі виробничі фактори: електричний струм; етилований бензин; заповигованість; загазованість; підвищений рівень шуму; вібрації від роботи насосів і верстатів.

10. За невиконання вимог цієї інструкції працівник несе відповідальність згідно з чинним законодавством.

11. Вимоги безпеки перед початком роботи:

- встановлені за нормами і згідно з виконуваним видом робіт засоби індивідуального захисту.
- перевірити технічний стан робочого місця та пристроїв, необхідних для виконання ремонту.

- перевірити справність ручного інструменту і підготувати його до роботи.

#### 12. Вимоги безпеки під час роботи.

- під час експериментів з титановими деталями, упевнитися, щоб поруч не було інших працівників для запобігання отримання їми ушкоджень;

- роботи по відрізання, шліфуванню, розвальцовці необхідно виконувати обережно, щоб запобігти потраплянню металевої стружки на шкіру та в обличчя.

#### 13 Вимоги безпеки після закінчення роботи.

- Провести прибирання робочого місця.

- Провести візуальний огляд інструменту, пристосувань

- Засоби індивідуального захисту почистити і скласти в гардеробна шафа.

- Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях.

- При отриманні травми або раптового захворюванні негайно повідомити майстра або керівника робіт, який повинен невідкладно організувати першу допомогу і направити в медичну установу.

- При виникненні пожежі, аварії, робітник зобов'язаний повідомити (по телефону) в пожежну частину і адміністрації, вжити заходів до гасіння пожежі і ліквідації аварії.



#### **Висновки до розділу 4**

В розділі з охорони праці проведено аналіз охорони праці при роботі з газотермічними покриттями та при виконанні досліджень на зносостійкість та при шліфування титанових сплавів. Також проаналізовано пожежну безпеку при виконанні досліджень на зносостійкість титанових сплавів та газотермічних покриттів.

## РОЗДІЛ 5

### ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

#### 5.1 Забруднення атмосферного повітря повітряними суднами

Повітряні судна викидають шкідливі речовини з відпрацьованими газами авіаційних двигунів в зоні аеропорту та на трасах польоту, забруднюють атмосферне повітря в глобальних масштабах. При 300 зльотах і посадках трансконтинентальні лайнери за добу викидають в атмосферне повітря близько 3,7 т оксида вуглецю, 2 т вуглеводневих сполук (не згорівше паливо) та 1,7 т оксидів азоту. Дослідження в деяких аеропортах світу показали, що забруднення атмосферного повітря перевищувало допустимий рівень. Наприклад, в районі аеропорту Лос-Анджелес було зареєстровано, що 45 % часу за рік вміст оксида вуглецю перевищувало ПДК на  $11,5 \text{ мг/м}^3$ , один день на місяць могло досягати  $25 \text{ мг/м}^3$ , а один день на рік –  $37,5 \text{ мг/м}^3$ .

Склад відпрацьованих газів (інгредієнтів), які забруднюють атмосферу, сучасних авіаційних двигунів (пальне – гас):

- Монооксид вуглецю – CO (чадний газ);
- Вуглеводні, які не повністю згоріли –  $C_xH_y$  (метан  $CH_4$ , ацетилен  $C_2H_2$ , етан  $C_2H_6$ , бензол  $C_6H_6$  та ін.)
- Альдегіди (формальдегід  $HCHO$ , акролін  $CH_2=CH=CHO$ , оцтовий альдегід  $CH_3CHO$  та ін.) (виділяється у невеликих кількостях).
- Оксиди азоту  $NO_x$ .
- Оксиди сірки  $SO_x$  (виділяється невелика кількість).
- Бенз(а)пірен (канцерогенна речовина) – виділяється у кількості 2...4 мг за 1 хв роботи двигуна ( при тому, що допустимий рівень забруднення –  $0,0001 \text{ мг на } 100 \text{ м}^2 \text{ площі}$ ).

Сажа (дрібнодисперсні частинки чистого вуглецю) – виділяється у вигляді шлейфу за соплами двигунів під час зльоту літака, (сажі виділяється загалом небагато).

Оскільки літаки в процесі роботи переміщуються з одного місця в інше (з аеропорту в аеропорт), то атмосфера забруднюється в глобальних масштабах, тобто забруднення має місце як в зонах аеропортів, так і на трасах польоту.

Викид дренованого палива в атмосферу авіаційними двигунами нормами ІСАО не допускається і повинен виключатися в процесі конструювання нових авіаційних двигунів в повітряних суден.

За 1 рік сучасний трансконтинентальний лайнер може виконувати до 300 зльотів і посадок. При цьому тільки за 1 добу (в середньому) двигунами авіалайнера в атмосферне повітря викидається близько 3,7 т  $\text{CO}$ , 2 т  $\text{C}_x\text{H}_y$  і 1,7 т  $\text{NO}_x$ .

Сірковий вуглеводень ( $\text{SO}_2$ ) подразнює дихальні шляхи, викликаючи спазм бронхів. Загальна дія його полягає в порушенні вуглеводного та білкового обмінів, пригніченні окислювальних процесів в головному мозку, печінці, м'язах.

Вуглеводні обладують вираженою токсичною дією.

Канцерогенні речовини – хімічні сполуки здатні при дії на організм викликати ракові захворювання та інші злоякісні пухлини, а також доброякісні новоутворення.

Тобто, має місце значне забруднення атмосфери. Причому, якщо на трасах польоту ( на висоті 8-12 км) шкода від цього забруднення невелика, то в зоні аеропорту не рахуватися з таким забрудненням не можна. Дослідження в деяких аеропортах світу показали, що забруднення атмосферного повітря значно перевищувало допустимий рівень. Наприклад:

Аеропорт Лос-Анджелес, забруднення  $\text{CO}$  (чадним газом):

- 45 % на рік – концентрація  $\text{CO}$  складала  $14,5 \text{ мг/м}^3$  ;

- 1 день в місяць – концентрація  $\text{CO}$  сягала  $25 \text{ мг/м}^3$  ;

- 1 день в рік – концентрація  $\text{CO}$  складала  $35,5 \text{ мг/м}^3$ .

При тому, що допустимий рівень забруднення (тобто, такий, що не має шкідливого впливу на організм людини) чадним газом складає  $5 \text{ мг/м}^3$ .

Аеропорт Шереметьєво, забруднення  $\text{NO}_x$  (оксидами азоту):

- Зимово-весняний період - 3,1 мг/м;

- Літній період - 4,0 мг/м .

При тому, що допустимий рівень забруднення оксидами азоту складає  $0,085 \text{ мг/м}^3$ .

В 1981 р. Комітет з емісії авіаційних двигунів (ICAO) розробив та прийняв проект норм на емісію та звів їх в Додаток 16 «Охорона навколишнього середовища».

Для зниження емісії продуктів неповного згоряння палива (СН та СО) при конструюванні необхідно збільшувати коефіцієнт повноти згоряння палива, від якого залежить індекс емісії  $EI_{\text{CO}}$  та  $EI_{\text{CH}}$ . Це може досягатися застосуванням систем попереднього випаровування палива, збагаченням паливо-повітряної суміші в зоні горіння та збільшенням числа зон горіння в камері згоряння, що дозволяє регулювати роботу двигунів шляхом включення або виключення частини форсунок. Неважко бачити, що ці конструктивні заходи призводять до зниження питомої витрати палива, тобто поліпшенню економічності авіаційних двигунів, а значить, і до зниження індексів емісії СО і СН.

Зниження емісії шкідливих речовин від авіаційних двигунів в зоні аеропорта може досягатися: буксируванням повітряних суден від стоянки до злітно-посадкової смуги; рулінням повітряних суден на частині працюючих двигунів; найвигіднішим розподіленням повітряних суден по злітно-посадкових смугах (при більш ніж одній злітно-посадковій смузі) при їх зльотах та посадках. Запровадження буксирування повітряних суден може знизити емісію продуктів неповного згоряння палива на етаві «запуск – руління» до зльота на 50 %, оксида азота – 5 %, а економію пального на 25 %. Застосування цього метода виправдано, якщо викиди буксирувальника незначні або він працює, наприклад, на електротязі.

Вміст інгредієнтів СО і  $\text{C}_x\text{H}_y$  у відпрацьованих газах авіадвигунів обумовлений неповним згорянням палива в двигуні, яке залежить від

характеристики його камери згорання (величини коефіцієнта повноти згорання  $\eta$ ) і режиму роботи двигуна.

Максимальна повнота згорання палива в двигуні має місце на розрахунковому режимі – зльотному (режимі максимальної тяги двигуна). На цьому режимі сучасні двигуни мають  $\eta = 0,97 \dots 0,99$  ( $\eta = 1,0$  при абсолютно повному згоранні, чого в дійсності досягти неможливо). На всіх інших режимах величина  $\eta$  нижча, тобто повнота згорання менша ( $\eta = 0,75 \dots 0,85$ ), з двигуна в атмосферу викидається більше продуктів неповного згорання ( $\text{CO}$  і  $\text{C}_x\text{H}_y$  та інших), і забруднення повітря збільшується.

Норми на емісію встановлюють межу газової емісії оксида вуглецю ( $\text{CO}$ ), вуглеводнів ( $\text{CH}$ ) та оксидів азоту ( $\text{NO}_x$ ), а також димлення авіадвигунів і виключення викида в атмосферу.

Вміст інгредієнта  $\text{NO}_x$  у відпрацьованих газах авіадвигуна залежить від:

- величини температури суміші в камері згорання (чим вона вища, тим більше утворюється  $\text{NO}_x$ ), а вона максимальна (2500...3000 K) на злітному режимі;
- часу перебування суміші в камері згорання (чим він більший, тим більше утворюється  $\text{NO}_x$ ), а це має місце на невеликих швидкостях літака.

Очевидно, що в зоні аеропорту емісія авіадвигуна залежить від режиму його роботи і тривалості роботи на цьому режимі.

Під зоною аеропорту будемо розуміти простір, обмежений висотою 1000 м і розмірами аеродрому.

Двигуни сучасних авіалайнерів працюють в зоні аеропорту на таких режимах і такій тривалості роботи (таблиця 5.1).

Як видно з таблиці, найбільш тривалим і екологічно небезпечним є режим малого газу. Значення величини тяги на цьому режимі для сучасних авіадвигунів складає 3% ... 9% від її максимального значення  $R_0$ . Цей режим використовується під час руління повітряного корабля перед зльотом і після посадки, а також під час прогрівання двигуна після запуску.

Тривалість режиму руління залежить від розмірів аеропорту, часу доби вильоту і прильоту, інтенсивності польотів і метеоумов.

Для типового сучасного двигуна залежність емісії шкідливих речовин від режиму його роботи має такий вигляд:

Таблиця 5.1 – Режими і тривалість роботи двигунів в зон аеропорту

№ режиму	Найменування режиму роботи двигуна	Відносна тяга, $\bar{R}$	Тривалість режиму, t, хв.
1.	Режим малого газу (холостого ходу) під час руління перед зльотом	0,07	15
2.	Зльотний режим	1	0,7
3.	Режим набору висоти (1000 м)	0,85 (або 0,9 номіналу)	2,2
4.	Режим заходу на посадку	0,3 (або 0,42 номіналу)	4
5.	Режим малого газу (холостого ходу) під час руління після посадки	0,07	7

Тут  $\bar{R} = \frac{R}{R_0}$ , де  $R$  – тяга двигуна на заданому режимі, а  $R_0$  – тяга

двигуна на зльотному режимі (максимальна тяга).

В таблиці наведені середньостатистичні значення параметрів ( $\bar{R}$  і  $t$ ) для великих аеродромів світу.

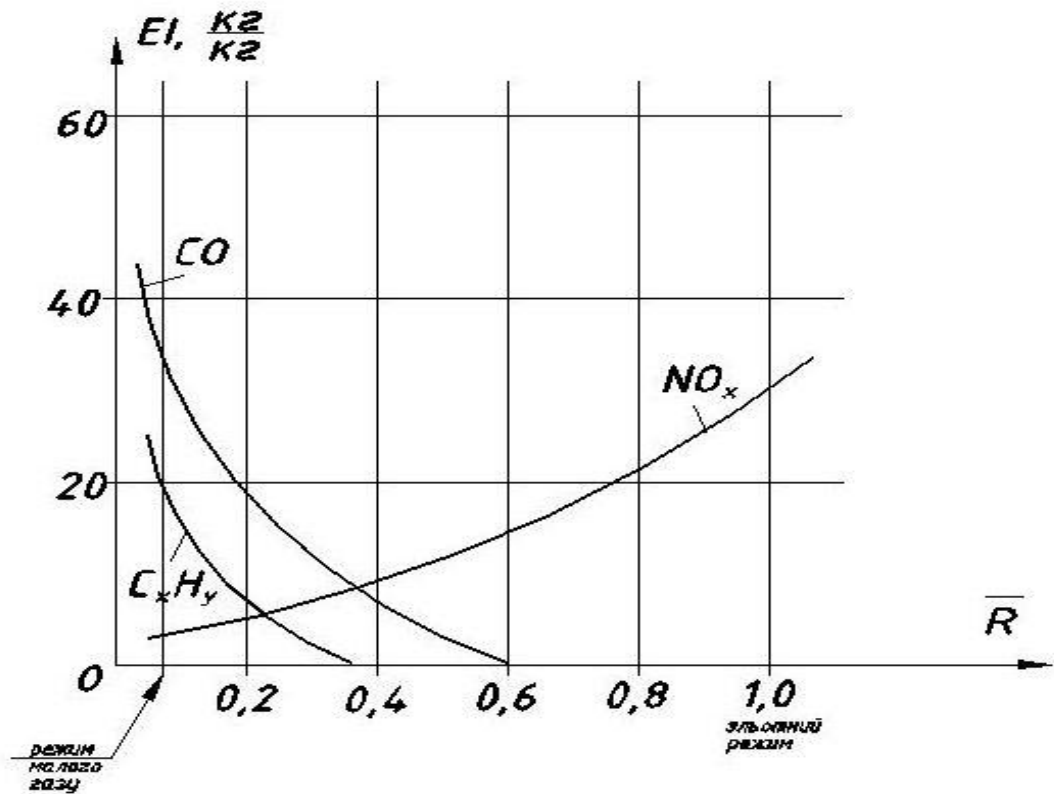


Рисунок 5.1 – Залежність емісії шкідливих речовин від режиму роботи типового сучасного авіадвигуна

Визначаючи під час сертифікаційних випробувань індекси емісії шкідливих речовин на відповідних режимах роботи двигуна, знаходять контрольний параметр емісії  $\frac{M_i}{R_0} \left[ \frac{г}{кН} \right]$  випробуваного двигуна, по якому установлені норми ІСАО.

Цей параметр характеризує «ступінь шкідливості» двигуна. В ньому:  $M_i$  – маса в грамах викинутої  $i$ -тої шкідливої речовини (інгредієнта) за деякий визначений час роботи двигуна,  $R_0$  – зльотна тяга двигуна в кілоньютонах.

Норми ІСАО по контрольному параметру емісії для авіаційних двигунів на сьогоднішній день такі:

$$\frac{M_{CO}}{R_0} = 118 \frac{г}{кН}; \quad \frac{M_{NO_x}}{R_0} = (40 \dots 80) \frac{г}{кН}; \quad \frac{M_{C_xH_y}}{R_0} = 19,6 \frac{г}{кН}.$$

## 5.2 Розрахунок емісії авіаційного двигуна

Емісія, тобто викиди забруднюючих речовин авіадвигунами, буде неоднаковою в зоні аеропорту і під час польоту по маршруту, так як двигуни в цих випадках працюють на принципово різних режимах.

Як видно з наведених таблиці і графіка, забруднення в зоні аеропорту є більш шкідливим (на маршруті значення відносної тяги лежить в межах 0,6-0,8). Крім того, локальне забруднення приземного шару повітря в зоні аеропорту, де працює багато людей, є більш концентрованим і стійким, ніж загальне забруднення верхніх шарів тропосфери на маршруті польоту, оскільки робота двигунів є стабільною на великих швидкостях, а забруднюючі речовини швидко розсіюються.

Тому розрахунок емісії (рівня забруднення) двигунами авіалайнерів в зоні аеропорту є більш важливим і ми приділимо йому більше уваги.

"Ступінь шкідливості" кожного авіадвигуна характеризується його контрольними параметрами емісії за різними інгредієнтами -  $\frac{M_i}{R_0}$ . Тобто,

задача розрахунку емісії двигуна зводиться до визначення маси кожного інгредієнта, викинутого з двигуна за деякий визначений час його роботи, -  $M_i$  (бо  $R_0$  – тяга двигуна на зльотному режимі – величина, відома з документації, зокрема з формуляра двигуна).

Будемо розраховувати величини  $M_i$  для зони аеропорту (з наведених вище міркувань), тобто  $M_i = M_{i,ап}$ , на тих режимах і за той період часу його роботи, поки повітряний корабель знаходиться в цій зоні з працюючими двигунами.

А повітряний корабель в зоні аеропорту щонайменше здійснює зльотно-посадковий цикл польоту, який складається з таких етапів:

1. запуск і прогрівання двигуна;
2. руління на виконавчий старт;
3. зльот;



4. набирання висоти 1000 м;
5. зниження з висоти 1000 м;
6. пробіг;
7. руління до зупинки двигунів.

Проте двигуни корабля на цих етапах працюють на різних режимах. Тому для зручності розрахунку розділим зльотно-посадковий цикл повітряного корабля на два види операцій: наземні операції і операції зльот-посадка, тобто

$$M_{i_{АП}} = M_{i_n} + M_{i_{з-п}}. \quad (5.1)$$

Наземні операції – це запуск двигунів, їх прогрівання, руління корабля перед зльотом і після посадки.

Головною характеристикою цих операцій (з точки зору розрахунку емісії двигуна) є те, що двигуни повітряного корабля працюють на одному режимі – режимі малого газу (холостого ходу) – і за часом – це самі тривалі операції в зоні аеропорту. Ця обставина спрощує розрахунок.

Визначення  $M_{i_n}$  ведеться за формулою:

$$M_{i_n} = K_{i_n} \times G_{П_n}, \quad (5.2)$$

де  $K_{i_n}$  – коефіцієнт викиду і-го інгредієнта під час наземних операцій (кг інгр. / кг пального).

Очевидно, що  $K_{i_n} = 10^{-3} EI_{i_n}$  (за визначенням), тобто, це той же індекс емісії.

Якщо і  $EI_i$ ,  $K_i$  визначаються під час сертифікаційних випробувань двигунів (див. табл. 3.3) [10].

$G_{П_n}$  - маса пального (кг), витраченого двигуном повітряного корабля під час наземних операцій зльотно-посадкового циклу.

$$G_{П_n} = c_{num_{MG}} \times R_{MG} \times t_{MG} \quad (5.3)$$

Тут:  $c_{\text{вит}_{MG}}$ ,  $\left[ \frac{\text{кг}}{H \times \text{год}} \right]$  - питома витрата пального під час роботи двигуна на режимі малого газу (наводиться в формулярі двигуна, як одна з його важливих характеристик),

$R_{MG}, [H]$  - тяга двигуна на режимі малого газу (наводиться в формулярі двигуна, як його технічна характеристика),

$t_{MG}, [\text{годин}]$  - напрацювання двигуна на режимі малого газу за зльотно-посадковий цикл.

Операції зльот-посадка – це зльот, набирання висоти 1000 м, зниження з висоти 1000 м і посадка.

В цьому випадку для розрахунку емісії двигунів повітряного корабля, який знаходиться в повітрі, емісійною характеристикою є *масова швидкість емісії*  $W_i, \left[ \frac{\text{кг}_{\text{інгр.}}}{\text{год}} \right]$ , яка показує, скільки даної шкідливої речовини виділяється на даному режимі роботи двигуна за одиницю часу.

$W_i$  також визначається під час сертифікаційних випробувань двигуна (див. табл. 3.4) [10].

Тоді визначення  $M_{i_{3-n}}$  ведеться за формулою:

$$M_{i_{3-n}} = W_{i_1} \times T_{1_{3-n}} + W_{i_2} \times T_{2_{3-n}} + W_{i_3} \times T_{3_{3-n}}, \quad (5.4)$$

де  $W_{i_{1,2,3}}, \left[ \frac{\text{кг}}{\text{год}} \right]$  - масова швидкість емісії інгредієнта  $i$  при відповідних режимах роботи двигуна відповідно на зльоті, під час набирання висоти 1000 м і під час зниження з висоти 1000 м,

$T_{1,2,3}, [\text{годин}]$  - режимне напрацювання двигуна відповідно на зльоті, під час набирання висоти 1000 м і під час зниження з висоти 1000 м.

Величини  $t_{MG}, T_{1,2,3}$  беруться з вищенаведеної таблиці режимів роботи двигуна в зоні аеропорту.

Вирахувавши таким чином  $M_{i_{АП}} = M_{i_n} + M_{i_{3-n}}$ , розраховуємо контрольний параметр емісії двигуна  $\frac{M_{i_{АП}}}{R_0}$  (де  $R_0$  - зльотна тяга двигуна в кілоньютонах) і порівнюємо його з нормами ІСАО, роблячи висновок про відповідність даного двигуна сучасним вимогам з емісії у відношенні даного інгредієнта.

Отже розраховуємо контрольні параметри емісії двигунів CFM56-7B26 літака Boeing-737-800 за інгредієнтами CO, C<sub>x</sub>H<sub>y</sub> і NO<sub>x</sub>.

Вихідні дані: тип двигуна – CFM56-7B26;

$$R_0 = 73,6 \text{ кН};$$

$$R_{\text{мг}} = 5,2 \text{ кН};$$

$$c_{\text{пит.мг}} = 0,06 \text{ кг}/(\text{Н*год}).$$

Використовуючи таблиці 3.3 і 3.4 [10], маємо:

$$K_{CO_H} = 0,0193 \frac{KZ_{\text{інгр.}}}{KZ_{\text{пального}}};$$

$$K_{C_xH_y_H} = 0,0034 \frac{KZ_{\text{інгр.}}}{KZ_{\text{пального}}};$$

$$K_{NO_{xH}} = 0,0084 \frac{KZ_{\text{інгр.}}}{KZ_{\text{пального}}};$$

$$W_{CO_1} = 0,2 \frac{KZ_{\text{інгр.}}}{200};$$

$$W_{C_xH_y_1} = 0,5 \frac{KZ_{\text{інгр.}}}{200};$$

$$W_{NO_{x1}} = 98 \frac{KZ_{\text{інгр.}}}{200};$$

$$W_{CO_2} = 0,44 \frac{KZ_{\text{інгр.}}}{KZ_{\text{пального}}};$$

$$W_{C_xH_y_2} = 0,57 \frac{KZ_{\text{інгр.}}}{KZ_{\text{пального}}};$$

$$W_{NO_{x2}} = 40 \frac{KZ_{\text{інгр.}}}{KZ_{\text{пального}}};$$

$$W_{CO_3} = 1,3 \frac{KZ_{інгр.}}{KZ_{пального}};$$

$$W_{C_xH_{y_3}} = 0,07 \frac{KZ_{інгр.}}{KZ_{пального}};$$

$$W_{NO_{x_3}} = 10,5 \frac{KZ_{інгр.}}{KZ_{пального}}.$$

З таблиці режимів роботи двигуна в зоні аеропорту маємо:

$$t_{MG} = 15 + 7 = 22 \text{ хв} = 0,367 \text{ год.}$$

$$T_{13-П} = 0,7 \text{ хв} = 0,0117 \text{ год.}$$

$$T_{23-П} = 2,2 \text{ хв} = 0,0367 \text{ год.}$$

$$T_{33-П} = 4 \text{ хв} = 0,067 \text{ год.}$$

Тоді:

$$G_{ПН} = 0,06 \times 5200 \times 0,367 = 114,504 \text{ кг}$$

$$M_{CO_H} = 0,0193 \times 114,504 = 2,21 \text{ кг}$$

$$M_{C_xH_{y_H}} = 0,0034 \times 114,504 = 0,389 \text{ кг}$$

$$M_{NO_{x_H}} = 0,0084 \times 114,504 = 0,962 \text{ кг}$$

$$M_{CO_{3-П}} = 0,2 \times 0,0117 + 0,44 \times 0,0367 + 1,3 \times 0,067 = 0,106 \text{ кг}$$

$$M_{C_xH_{y_{3-П}}} = 0,5 \times 0,0117 + 0,57 \times 0,0367 + 0,07 \times 0,067 = 0,031 \text{ кг}$$

$$M_{NO_{x_{3-П}}} = 98 \times 0,0117 + 40 \times 0,0367 + 10,5 \times 0,067 = 3,318 \text{ кг}$$

$$M_{CO} = 2,21 + 0,106 = 2,316 \text{ кг}$$

$$M_{C_xH_y} = 0,389 + 0,031 = 0,42 \text{ кг}$$

$$M_{NO_x} = 0,962 + 3,318 = 4,28 \text{ кг}$$

$$\frac{M_{CO}}{R_0} = \frac{2316}{73,6} = 31,5 \frac{\text{г}}{\text{кг}} < 118 \frac{\text{г}}{\text{кг}}$$

$$\frac{M_{C_xH_y}}{R_0} = \frac{420}{73,6} = 5,7 \frac{\text{г}}{\text{кг}} < 19,6 \frac{\text{г}}{\text{кг}}$$

$$\frac{M_{NO_x}}{R_0} = \frac{4280}{73,6} = 58,2 \frac{\text{г}}{\text{кг}} < 80 \frac{\text{г}}{\text{кг}}$$

### **Висновки до розділу 5**

В роботі проаналізовано вплив газотурбінного двигуна на екологію планети. Двигун CFM56-7B26 літака Boeing-737-800 за своїми емісійними характеристиками відповідає нормам ІСАО.

## ОСНОВНІ ВИСНОВКИ З РОБОТИ

Паливні і гідравлічні агрегати сучасних зразків авіаційної наземної техніки мають велику кількість різних по конструкції та призначенню золотникових і плунжерних пар, які застосовуються для автоматичного регулювання подачі палива і оливи у двигуни, для підтримки або зміни по заданій програмі тиску в паливних і гідравлічних системах, для регулювання продуктивності насосів і керування гідравлічними силовими агрегатами. Плунжерні пари використовуються в якості насосних і силових елементів у різного роду насосах і гідромоторах.

Особливості конструкції, технології виготовлення, умов роботи та характеру зношування при експлуатації роблять необхідним розгляд прецизійних золотникових і плунжерних пар як самостійного виду деталей машин.

Необхідною умовою надійної роботи золотникових і плунжерних пар, а отже, і відповідних паливних і гідравлічних агрегатів є висока стабільність сил тертя в зазначених парах. Довговічність агрегатів часто визначається зносостійкістю деталей золотникових і плунжерних пар. Тому в основу вивчення надійності та довговічності зазначених пар було покладене дослідження факторів, що визначають рівень тертя і зносостійкість відповідних деталей.

Всі несправності в роботі золотникових і плунжерних пар гідравлічних і паливних агрегатів можна розділити на два основних види:

- 1) викликані підвищенням тертя в парах;
- 2) пов'язані зі зміною форми та розмірів деталей у результаті їхнього зносу.

Підвищення тертя в золотникових і плунжерних парах має раптовий характер і призводить до тимчасового зависання або заклинювання золотника (плунжера) у гільзі (гнізді ротора).

Найпоширенішою причиною підвищення тертя, що викликає заклинювання та вихід з ладу деталей золотникових регулюючих пристроїв, є захоплювання поверхонь тертя, гідро ерозія, а також фретинг-корозія.

Основними шляхами підвищення надійності елементів машин є раціональне конструювання деталей, застосування нових більш стійких матеріалів, поліпшення технології виробництва, здійснення контролю на всіх стадіях виробництва і, нарешті, удосконалювання умов і способів експлуатації та своєчасне проведення ремонту.

Ефективним способом підвищення опору деталей золотникових регулюючих пристроїв захоплюванню є застосування для їхнього виготовлення високо твердих металів та інтерметалідних сплавів. Основним напрямком у підвищенні ерозійної стійкості металевих деталей є поверхневе зміцнення.

Тому проблема підвищення зносостійкості шляхом використання композиційних матеріалів і захисних покриттів з них останнім часом стає все актуальніше. Композиційні порошки представляють собою не механічні суміші, а інтегровані комплекси вихідних компонентів у кожній порошковій частці. Саме це дозволяє одержати покриття із заданою конструкцією і комплексом властивостей, що задовольняють умовам експлуатації.

Для нанесення зносостійких газотермічних покриттів на конструкційні сплави традиційно використовують порошки металевих сплавів на основі Fe - Cr та Ni - Cr із різними добавками металів (Co, Mo, Y), неметалів (B, Si) і тугоплавких сполук (карбіди, бориди, оксиди алюмінію), а також порошки вольфрамових твердих сплавів марки ВК. Покриття на основі металевих сплавів характеризуються відносно низькою зносостійкістю при високій стійкості до окислювання (до 1100 °C), тоді як покриття з вольфрамових твердих сплавів мають високу зносостійкість при низькому опорі високотемпературної корозії (до 700 - 730 °C). До того ж дефіцитність і дорожнеча вольфраму не дозволяє його широкого застосування в промисловості. Тому є необхідністю розробка нового матеріалу, який би

володів високими експлуатаційними властивостями і був би виготовлений з недорогих компонентів.

Перспективність карбонітрида титану для наплавлення, а також як зносостійкої складової композиційних матеріалів підтверджується тим, що він має високу термодинамічну стабільність із однієї сторони і більш високу пластичність в порівнянні з карбідом титану з іншої. Систематизовані результати по змочуванню карбонітрида титану сплавами на основі заліза та нікелю в літературі відсутній. Як металеві зв'язки для створення композиційного матеріалу на основі карбонітрида титану розглядається можливість використання інтерметалідів нікелю, однак такі зв'язування не завжди доцільно використовувати через відносно високу крихкість останніх. Ґрунтуючись на результатах змочування і міжфазної взаємодії для одержання нового композиційного матеріалу була обрана система TiCN - (Fe - Cr). Металевою зв'язкою у цьому композиті є сплав на основі заліза з добавкою 5-15% хрому. Сплави Fe - Cr утворюють на поверхні карбонітрида титану близькі до нульових контактні кути, що є необхідною умовою високої адгезії та когезії покриття.

В процесі плазмового напилювання гранульованих композиційних порошків на основі TiCN зі зв'язкою Fe - Cr формується гетерофазне градієнтне покриття, збагачене з поверхні тугоплавкою фазою. Покриття характеризується кільцевою структурою, у якій зерна твердої фази розміром 3-5 мкм оточені тонким прошарком металевого сплаву.

Результати випробувань розроблених композиційних матеріалів показують високий рівень їх фізико - механічних і експлуатаційних властивостей. За рівнем мікромеханічних властивостей розроблені матеріали близькі до вольфрамівмісних твердих сплавів і перевищують безвольфрамові тверді сплави.

Інтенсивність зношування покриттів на сталі і титановому сплаві в умовах фретинг-корозії майже на порядок нижче, ніж у традиційних покриттів зі сплаву Ni - Cr. Це пов'язане з мікротвердістю матеріалу



ПХ20Н80 ( $H_{\mu} = 2,5 - 5$  ГПа) і КН-25 ( $H_{\mu} = 23 - 27$  ГПа) або є наслідком переносу матеріалу покриття з порошку ПХ20Н80 на контртіло. Таким чином, зміцнюючі карбідні фази TiCN і металева зв'язка у покриттях перешкоджають схоплюванню і руйнуванню поверхні завдяки пластичному деформуванню, а також утворення в процесі тертя вторинних оксидних плівок, адгезійно міцно пов'язаних з основою.

Склад поліоксидних вторинних плівок, що формуються в зоні тертя в процесі трибоокислення, визначається складом матеріалів покриття і контртіла. У покриттях на основі сплаву Ni - Cr основними фазами вторинної плівки є шпінелі системи Ni-Cr-O, що грають роль твердої змазки в умовах сухого тертя. При наявності карбідних фаз TiCN і Fe - Cr у матеріалі таких покриттів у зоні тертя можуть утворитися високотемпературні оксидні фази на основі системи TiO<sub>2</sub>.

Коефіцієнт тертя покриттів на сталі становить 0,16 - 0,24, а на титановому сплаві - 0,12 - 0,30.

Отже, результати досліджень наведені в даній роботі свідчать про високий рівень властивостей розроблених композиційних матеріалів і доцільності їхнього широкого застосування в промисловості для підвищення довговічності і надійності прецизійних пар як при виготовленні так і відновлення при ремонті.

**СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Лозовский В.Н. Надежность и долговечность золотниковых и плунжерных пар. — М., «Машиностроение», —1990.
2. Вульф В. К., Ромадин К. П. Авиационное материаловедение. — М., «Машиностроение», — 1997.
3. Костецкий Б. И., Кучерявый О. И., Куюн А. И. Структура и свойства поверхности при шлифовании стали. Сб. докладов совещания по качеству поверхности в машиностроении. — М., Изд. АН СССР, —1980.
4. Кремень З. И., Павлючук А. И. Абразивная доводка. — М., «Машиностроение», —1997.
5. Белянин П. Н., Черненко Ж. С. Авиационные фильтры и очистители гидравлических систем. — М., «Машиностроение», —1964.
6. Антипов В.В. Износ плунжерных пар и нарушение характеристики топливной аппаратуры дизелей. — М., «Машиностроение», — 1965.
7. Голего Н. Л. Схватывание в машинах и методы его устранения. — Киев, «Техника», —1965.
8. Костецкий Б. И., Лозовский В. Н. Факторы, определяющие вероятность возникновения схватывания и окисления металлов при трении. «Физико-химическая механика материалов». Изд. АН УССР, - 1968, т. 4, № 5.
9. Лозовский В. Н. Схватывание в прецизионных парах трения, Сб. О природе схватывания твердых тел. — М., «Наука», —1968.
10. Никитин Г. А., Красницкий С. Е. Силы трения и разгрузочные канавки в золотниковых распределителях. «Станки и инструмент», - 1964, № 12.
11. Фомин В.В. Гидроэрозия металлов. - М., «Маш.», - 1996.
12. Елин Л. В. Прочность масляной пленки и износ металлов при несовершенной смазке. Сб. «Трение и износ в машинах». — М., Изд. АН СССР, —1970.
13. Борисов Ю. С., Харламов Ю. А. Газотермические покрытия из порошковых материалов. К., «Наукова думка», —1987.

14. Kretzchmar E. Variants of metal spraying and problems of atomisation in electric arc spraying / Proc. 7th Int. Metal Spray. Conf.— London, 1974.—P. 43—52.
15. Харламов Ю. А. Классификация способов газотермического напыления покрытий / Свароч. пр-во,— 1982.— № 3.— С. 40—41.
16. Харламов Ю. А. Способы газотермического напыления покрытий и их классификация.— Ворошиловград: Машиностроит. ин-т, 1981.— 149 с.— Рукопись деп. в УкрНИИНТИ, № 2481.
17. Шоршоров М. Х., Кудинов В. В., Харламов Ю. А. Состояние и перспективы развития нанесения покрытий распылением / Физика и химия обработки материалов.— 1977.— № 5.
18. Демиденко Л. М. Высокоогнеупорные композиционные покрытия.— М. : Metallurgia, 1979.
19. Бартенев С. С., Федько Ю. П., Григоров А. И. Детонационные покрытия в машиностроении.— Л. : Машиностроение, 1982.
20. Зверев А. П., Шаривкер С. Ю., Астахов Е. А. Детонационное напыление покрытий.— Л. Судостроение, 1979.
21. Семенов А. П., Федько Ю. П., Григоров А. И. Детонационные покрытия и их применение. — М. : НИИмашиностроения.— 1977.
22. Шоршоров М. Х., Харламов Ю. А. Физико-химические основы детонационно-газового напыления покрытий.— М. : Наука, 1978.
23. Манохин Б. И., Золотухин В. Д., Гравцев Н. В. Влияние параметров разрядного контура на формирование пленок при напылении электрическим взрывом // Физика и химия обраб. материалов.— 1973.— № 2.
24. Сухара Т., Фукуда С. Нанесение покрытий взрывающимися проволочками // Получение покрытий высокотемпературным распылением.— М. : Атомиздат, 1973.
25. Кудинов В. В., Иванов В. М. Нанесение плазмой тугоплавких покрытий.— М. : Машиностроение, 1981.

26. Оситинский Б. Л., Баско В. П. Применение плазменного напыления для изготовления контактных участков керамико-металлических электронагревателей // Порошковая металлургия.— 1977.— № 1.

27. Ощепков Ю. П., Кузнецов В. В., Никольский Н. Н. Влияние механического и теплового активирования на структурообразование и свойства твердосплавных покрытий // Защит, покрытия.— Л. : Наука, 1979.

28. Орлов Л. П., Катков И. Н., Рогинский В. Э. Применение газотермических покрытий для повышения износостойкости деталей, механизмов и коррозионной стойкости изделий // Теория и практика газотермического нанесения покрытий.— Рига : Зинатне, 1980.— Т. 2.

29. Газотермическое напыление композиционных порошков/ А.Я. Кулик, Ю.С. Борисов, А.С. Мнухин, М.Д. Никитин. — Л. : Машиностроение, 1985.

30. Кудинов В. В. Плазменные покрытия. — М.: Наука, 1977.

31. Современные композиционные материалы/Под ред. Д. Браутмана, Р. Крока. — М.; Мир, 1970.

32. Плазменные покрытия состава Ni —Ti для защиты титановых сплавов от износа/Ф. И. Китаев, А. Г. Цидулко. — В кн.: Высокотемпературная защита материалов. Л.: Наука, 1981.

33. Применение композитных порошков типа керамика—алюминий—никель для получения покрытий/Н. Н. Новиков, С. Р. Пустотина, — М. Соловьев. — Порошковая металлургия, 1979, № 11.

34. Свойства и применение плазменных покрытий из терморезагирующего никель-алюминиевого порошка/Г. Д. Никифоров, А. Г. Цидулко. — I кн.: Неорганические и органосиликатные покрытия. Л.: Наука, 1975.

35. Федорченко И. М., Пугина Л. И. Композиционные спеченные антифрикционные материалы. Киев: Наукова думка, 1980.

36. Борисов Ю.С. , Борисова А.Л. Плазменные порошковые покрытия. — К.: Техника, 1986.

37. Антошин Е. В. Газотермическое напыление покрытий.— М. : Машиностроение, 1974.
38. Готлиб Л. И. Плазменное напыление,— М. : ЦИНТИхим-нефтемаш, 1970.
39. О перспективах развития электродуговых плазмотронов для напыления / В. Е. Белащенко, В. А. Вахалин, А. М. Гонопольский и др.— В кн.: Процессы и оборудование плазменной обработки металлов. М. : ВНИИавтогенмаш, 1980.
40. Лясников В. Н., Глебов Г. Д. Свойства плазменных покрытий.— Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ, 1979, вып. 2.
41. Костиков В. И., Шестерин Ю. А. Плазменные покрытия.— М. : Metallurgia, 1978.
42. Прочность сцепления плазменных покрытий с основой / Б. А. Ляшенко, В. В. Ришин, В. Г. Зильберберг, С. Ю Шаривкер.— Порошковая металлургия, 1969, № 4.
43. Износостойкие плазменные покрытия из композиционных порошков / А. С. Синьковский, В. К. Толок, Г. Г. Онищенко и др.— Защитные покрытия на металлах, 1976, вып. 10, с. 69—71.
44. Исследование возможности повышения физико-механических характеристик плазменных покрытий на основе тугоплавких окислов / А. А. Ткаченко, Г. Н. Миллер, А. А. Ковалевский и др.— В кн.: Теория и практика газотермического нанесения покрытий. Рига : Зинатне, 1980, т. 2, с. 61—64.
45. Панасюк А.Д., Уманский А.П., Винокуров В.Б. Основы формирования структурных составляющих композиционных порошковых материалов на основе карбида титана // Тезисы доклада VIII Международного совещания по порошковой металлургии. – Дрезден, 1985. – С.115

46. Ясинская Г.А. Смачиваемость тугоплавких карбидов, боридов и нитридов расплавленными металлами// Порошковая металлургия. – 1966. – №7. – С.55 – 57.

47. Билык И.И. Перспективы использования карбонитридов в качестве твердой составляющей металлокерамических твердых сплавов// Порошковая металлургия. – 1972. – №6. – С.49 – 52.

48. Крумпхольд Р. Новый материал на основе карбида и карбонитрида титана с низким содержанием связующего// Труды семинара по развитию и использованию порошковой металлургии в машиностроении. – Минск., 1985.

49. Дроздецкая Г.В., Васильева Н.О., Орданьян С.С. Свойства керметов на основе ультрадисперсного карбонитрида титана / Новые порошковые материалы // Труды 15 Всесоюзной конференции. Киев, 1986. – С.52 – 56.

50. Zhang S.Y. Titanium Carbonitride-Based Cermets-Processes and Properties // Mater. Sci. Eng.-1993-163-P.141-148. Welham N.J., Willis P.E. Direct Synthesis of TiC/TiN-Fe Composites from Ilmenite Concentrate // Metall. Mater. Trans.-1998-29-P.1077-1083

51. Welham N.J., Willis P.E., Kerr T. Mechanochemical Formation of Metal-Ceramic Composites//J. Am.Ceram. Soc.-2000-83-P.33-40.

52. Туманов А.В., Митин Б.С., Панов А.С. Исследование кинетики смачивания карбида и карбонитрида титана расплавами интерметаллидов никеля // Журн. физической химии. – 1980. – 54. - №6. – С.1434 – 1437.

53. Rainer H. Plasma – Hartstoffbeschichtungsalagen auf dem weg zur standart – werkzeugmaschine // Jahrb. Oberflachentechn. – 1998 – 54. – P.153 – 162.

54. D`errico G.E., Bugliosi S., Guglielmi E. A Tribological Evaluation of Coated Cermet Systems for Cutting Tools // Surface and Coat. Technol. – 1997. – 94-95. – №1 – 3. P. 627 – 631.

55. Zhang S.Y. Titanium carbonitride – based cermets – processes and properties // Mater. Sci. Eng. – 1993. – 163. – P.141 – 148.

56. Берди́ков В.Ф., Бабанин А.В., Артемьева Ю.П. Определение модуля Юнга различных абразивных материалов методом микровдавливания // Заводская лаборатория. – 1975. - №8. – С.1014 – 1019.

57. Huchin Jean-Pierre, Manesse Denis. Application des revetements projetés par plasma sur pièces de turbomachines // Galvano-Organo-Trait. Surface. — 2000. — 69, No. 701. — P. 177—181.

58. Комратов Г. Н. Кинетика окисления порошков двойного карбида титана и хрома и карбида хрома//Порошковая металлургия.— 1999. — №9/10. — С. 52—57.

59. Allan Matthews, Adrian Zeyland. Developments in vapor deposited ceramic coatings for tribological application // Key Eng. Mat. — 2001. — 206-213. — P. 459-166.

Getting into the groove // Metalwork Prod. — 1998. —142, No. 6. — P. 26

60. Li Zhiwen, Liu Changson, Huang Jihua, Yin Sheng. Синтез и осаждение покрытий TiC—Fe кислород-ацетиленовым пламенным распылением // J. Mater. Sci. Technol. — 2003. —19, No. 2. — P. 161—163.

61. Тарова Л.С. Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды. ТГТУ, 2004.

62. Брахнова И. Г. Токсичность порошков металлов и их соединений.— Киев : Наукова думка, 1971.

63. Коган Э. И., Хайкин В.А. Охрана труда на предприятиях автомобильного транспорта. — М.: Транспорт. — 1984.