

**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  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 р.

# **КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)  
ЗДОБУВАЧА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА  
ЗА ОСВІТНЬО-ПРОФЕСІЙНОЮ ПРОГРАМОЮ  
«ТЕХНІЧНЕ ОБСЛУГОВУВАННЯ ТА РЕМОНТ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН І  
АВІАДВИГУНІВ»

**Тема: Відновлення бандажних полиць лопаток турбін газотурбінних  
двигунів високотемпературними методами нанесення покриттів**

**Виконав:** \_\_\_\_\_ **В.М. Петенко**

**Керівник: д-р.техн. наук, проф.** \_\_\_\_\_ **О.І. Духота**

**Консультанти з окремих розділів пояснювальної записки:**

**охорона праці: ст.викладач** \_\_\_\_\_ **О.О. Козлітін**

**охорона навколишнього середовища:**  
**канд. біол. наук, доц.** \_\_\_\_\_ **А.О. Падун**

**Нормоконтролер** \_\_\_\_\_

**Київ 2022**

## НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Аерокосмічний факультет

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

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 р.

### ЗАВДАННЯ

на виконання кваліфікаційної роботи

### ПЕТЕНКА ВЛАДИСЛАВА МИКОЛАЙОВИЧА

1. Тема роботи: **«Відновлення бандажних полиць лопаток турбін газотурбінних двигунів високотемпературними методами нанесення покриттів»** затверджено наказом ректора від 29 вересня 2022 року № 1786/ст.
2. Строк виконання роботи: з 26 вересня 2022 року по 30 листопада 2022 року.
3. **Вихідні дані до роботи:** є статистичні данні зносостійкості газотермічних покриттів їх характеристики.
4. **Зміст пояснювальної записки:** аналіз використання газотермічних покриттів в авіації, методика випробувань покриттів, розробка методології вибору покриття.
5. **Перелік обов'язкового графічного матеріалу:** застосування газотермічних покриттів в авіаційній промисловості, види газотермічних методів нанесення покриття, властивості покриття, методика випробувань властивостей покриттів, методологія вибору покриття для бандажних полок лопаток газотурбінних двигунів, результати досліджень випробувань покриттів.

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

## 6. Календарний план-графік

Завдання	Термін виконання	Відмітка про виконання
Видача завдання на дипломне магістерське досліджування	26.09.2022-30.09.2022	
Пошук матеріалу до кваліфікаційної роботи	01.10.2022 – 14.10.2022	
Аналіз процесу напilenня і обладнання для виконання роботи	15.10.2022 – 20.10.2022	
Забезпечення охорони праці та охорони навколишнього середовища при виконання дослідження	21.10.2022 – 30.10.2022	
Оформлення кваліфікаційної роботи	28.10.2022 – 10.11.2022	
Підготовка презентації до захисту кваліфікаційної роботи	10.11.2022 – 20.11.2022	

## 7. Консультанти з окремих розділів

Розділ	Консультант (посада, П.І.Б)	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Охорона праці	Ст. викладач Козлітін О. О.		
Охорона навколишнього середовища	Канд. біол. наук, доц. Падун А.О.		

8. Дата видачі завдання: \_\_\_\_\_ 2022 р.

Керівник кваліфікаційної роботи \_\_\_\_\_ Духота О.І.

Завдання прийняв \_\_\_\_\_ Перенко В.М.

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи «Відновлення бандажних полиць лопаток турбін газотурбінних двигунів високотемпературними методами нанесення покриттів»:

101 с, рисунків 11, таблиць 5, бібл. джер. 24

**Об'єкт дослідження** – процеси зношування високотемпературних покриттів в залежності від умов використання.

**Предмет дослідження** – газотермічні покриття.

**Мета кваліфікаційної роботи** – розробка методу вибору газотермічних покриттів для відновлення деталей авіаційної техніки.

**Метод дослідження** – аналізування методів нанесення покриттів, вдосконалення процесів системи вибору покриттів на авіаційних деталях.

Матеріали кваліфікаційної роботи рекомендується використовувати під час викладання методів та методик нанесення покриттів на авіатранспортних підприємствах, при відновленні на деталях авіаційної техніки, та під час практичних та теоретичних занять.

Матеріали кваліфікаційної роботи рекомендується використовувати як основу для проведення наступних, більш широких наукових досліджень. Існуючими результатами та рекомендаціями необхідно скористатися при обслуговуванні та відновленні працездатності планера літака.

**МЕТОДИ ВІДНОВЛЕННЯ ЗАХИСТНИХ ПОКРИТТІВ, ЗНОСОСТІЙКИ ПОКРИТТЯ, МЕТОДОЛОГІЯ ВИБОРУ, ПРОЦЕСИ НАНЕСЕННЯ ПОКРИТТІВ, ВІДНОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ АВІАЦІЙНОЇ ТЕХНІКИ**

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ, ПОЗНАЧЕНЬ ТА ІНДЕКСІВ...	8
ВСТУП.....	10
<b>РОЗДІЛ 1. ВИКОРИСТАННЯ ГАЗОТЕРМІЧНИХ МЕТОДІВ НАНЕСЕННЯ ПОКРИТТІВ В АВІАЦІЇ.....</b>	<b>12</b>
1.1 Аналітичний огляд газотермічних покриттів стосовно умов роботи вузлів повітряних суден і газотурбінних двигунів.....	12
1.2 Технологічні методи нанесення та матеріали газотермічних зносостійких покриттів .....	19
1.3 Довідкові дані про властивості стійких проти спрацювання покриттів при фретингу та фретинг-корозії.....	23
1.4 Технологічні особливості газотермічного напилення.....	29
Висновки до розділу 1.....	34
<b>РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ МЕТОДИК ДОСЛІДЖЕНЬ ХАРАКТЕРИСТИК ГАЗОТЕРМІЧНИХ ПОКРИТТІВ .....</b>	<b>35</b>
2.1 Методики досліджень фізико-механічних властивостей матеріалів покриттів.....	35
2.1.1 Вимірювання коефіцієнта теплового розширення.....	35
2.1.2 Випробування матеріалів на термостійкість.....	37
2.1.3 Вимірювання гарячої твердості матеріалів наплавки і матеріалів лопаток.....	39
2.1.4 Визначення міцності зчеплення покриттів.....	42
2.1.5 Проведення металографічних досліджень газотермічних покриттів.....	43
2.2 Установка для напівнатурних досліджень лопаток турбіни.....	44

2.2.1	Методика проведення напівнатурних досліджень лопаток турбіни.....	45
2.2.2	Основні технічні дані машини.....	47
2.2.3	Методика виміру зносу матеріалу лопаток в умовах високотемпературної фретінг – корозії.....	47
	Висновки до розділу 2.....	51

<b>РОЗДІЛ 3. ВИБІР ЗНОСОСТІЙКИХ ПОКРИТІЙ ДЛЯ</b>		
<b>ВІДНОВЛЕННЯ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ...</b>		<b>52</b>
3.1	Аналіз умов роботи та характеру експлуатаційних пошкоджень бандажних лопаток турбіни.....	52
3.2	Особливості високотемпературної фретінг – корозії матеріалів лопаток турбіни.....	54
3.3	Аналіз технологічних методів, що дозволяють повисити зносостійкість бандажних полиць.....	55
3.4	Порівняльна оцінка зносостійкості та фізико-механічних властивостей порошкових і монолітних матеріалів для зміцнення бандажних полиць.....	57
3.5	Методологія вибору покриттів при розв’язанні задач підвищення зносостійкості та відновлення деталей.....	65
3.5.1	Розробка основних технічних, виробничих і економічних напрямів, дослідження яке необхідне при створенні концепції покриття.....	65
3.5.2	Методика вибору покриття з урахуванням забезпечення міцності деталі.....	71
	Висновки до розділу 3.....	79

<b>РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ.....</b>	<b>80</b>
4.1 Перелік небезпечних і шкідливих виробничих факторів, які можуть впливати на оператора ділянці відновлення деталей.....	80
4.2 Організаційні та технічні заходи по виключенню або зменшенню рівня небезпечних та шкідливих виробничих факторів на ділянці плазменного напилення лопаток .....	81
4.3 Організаційні, технічні заходи по виключенню або зменшенню рівня небезпечних і шкідливих факторів на ділянці відновлення деталей.....	83
4.4 Забезпечення пожежної та вибухової безпеки на ділянці відновлення деталей.....	85
4.5 Основні правила техніки безпеки для оператора при детонаційному напиленні.....	86
4.6 Основні рекомендовані методи та засоби зниження шкідливого впливу шуму на оператора ділянки відновлення деталей	88
Висновки до розділу 4.....	90
<b>РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА</b>	<b>92</b>
5.1 Аналіз екологічної небезпеки проектованого обладнання	92
5.2 Розробка заходів, що підвищують екологічну безпеку ділянки відновлення деталей.....	92
5.3 Методи та засоби очищення викидів в атмосферу.....	93
5.4 Визначення еколого-економічної шкоди від викидів в атмосферу забруднюючих газів та від забруднення сточних вод....	96
Висновки до розділу 5.....	98
<b>ОСНОВНІ ВИСНОВКИ.....</b>	<b>99</b>
<b>СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>	<b>100</b>

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ, ПОЗНАЧЕНЬ ТА ІНДЕКСІВ

АД	- авіаційний двигун
АТ	- авіаційна техніка
ГТД	- газотурбінний двигун
ДСанПіН	- Державно-санітарні правила і норми
ЕОМ	- електронно-обчислювальна машина
КПО	- коефіцієнт природньої освітленості
ЛА	- літальний апарат
НД	- нормативні документи
СН	- санітарні норми
СНіП	- санітарні норми і правила
СОП	- самогенеруюча органічна плівка
СУ	- силова установка
ТУ	- технічні умови
КЗ	- камера згорання
МГ	- малий газ
ІСАО	- International Civil Aviation Organization (Міжнародна організація цивільної авіації)



$P_i$  – тиск робочого тіла в  $i$ -ом перерізі проточної частини;  
 $T_i$  – температура робочого тіла в  $i$ -ом перерізі проточної частини;  
 $C_i$  – швидкість потоку в  $i$ -ом перерізі проточної частини;  
 $\eta_{\Gamma}$  – коефіцієнт полноти згорання в камере згорання;  
 $\phi_i$  – коефіцієнт швидкості;  
 $q(\lambda_i)$  – відносна густина току в  $i$ -ом перерізі проточної частини;  
 $G_{\Pi}$  – витрата повітря;  
 $G_{\Pi}$  – витрата палива;  
 $F$  – площа;  
 $V$  – об'єм;  
 $C$  – питома теплоємність;  
 $R$  – газова постійна;  
 $m$  – маса;  
 $\delta$  – відносне відхилення;  
 $\Delta$  – абсолютне відхилення;  
 $N_{ki}, N_{Ti}$  – необхідна потужність для приводу компресору;  
 $n_i$  – частота обертання ротору  $i$ -ого каскада;  
 $0$  – параметри, відповідності  $M_{\Pi} = 0, H_{\Pi} = 0$ ;

## ВСТУП

Вся діяльність цивільної авіації спрямована на задоволення потреб у пасажирських і вантажних перевезеннях, у виконанні народногосподарських робіт.

У теперішній час цивільна авіація оснащена сучасною вітчизняною та зарубіжною авіаційною технікою, проводиться реконструкція ремонтних заводів, авіаремонтні підприємства переходять на нові форми господарювання, що дають змогу доцільно використовувати свій багатий досвід і накопичений потенціал.

Основними задачами науки та виробництва щодо вдосконалення ремонту авіаційної техніки є:

- забезпечення повної безпеки відремонтованої авіаційної техніки;
- скорочення тривалості ремонту;
- скорочення витрат на запасні частини;
- підвищення продуктивності праці;
- скорочення матеріальних витрат на ремонт.

Технічний прогрес у вітчизняному літакобудівництві, авіадвигунобудівництві та ремонтному виробництві нерозривно пов'язаний з підвищенням потужностей і ресурсів, що веде до зростання швидкостей, робочих температур і силових навантажень на конструктивні елементи [1].

Враховуючи зазначене, останнім часом зростає значимість проблеми розробки та впровадження зносостійких, антифрикаційних покриттів. Незважаючи на велику кількість існуючих методів нанесення покриттів із різноманітними властивостями, виробництво і ремонт сучасних літальних апаратів і двигунів вимагає в першу чергу одержання таких покриттів, які могли б протистояти конкретним умовам експлуатації. Тобто технологія, розробка і впровадження покриттів може дати максимальний ефект тоді, коли вона враховує конструктивно-технологічні особливості конкретного трибовузла.

В практиці ремонтних заводів цивільної авіації, крім традиційних методів відновлення деталей авіаційної техніки (зварювання, електролітичне і хімічне покриття), значне поширення та застосування здобули методи наплавки, газотермічного напилення покриттів.

Через економічні реалії, що склалися, на ремонтні підприємства випадає додаткове навантаження в повному циклі ремонту авіаційної техніки, а у використанні методів, газотермічного напилення велике майбутнє як у найперспективніших методах відновлення спрацьованих деталей.

Створення методики по розробці й впровадженню ефективних зносостійких і антифрикаційних покриттів, дослідження їх властивостей залишається актуальною задачею, яка повинна включати:

- розробку основних технологічних, виробничих і економічних напрямів, необхідних при створенні концепції покриттів;
- проведення детального аналізу конструктивно-технологічного виконання трибовузлів (розробка паспорту трибовузла, що включає аналіз пошкодження контактуючих поверхонь);
- розробку рекомендацій щодо створення покриття для конкретного трибовузла, відпрацювання технології нанесення покриття;
- розробка методик і проведення порівняльних випробувань та дослідження зносостійких і антифрикційних властивостей розроблених покриттів;
- стендові випробування.

У даній дипломній роботі пропонується обладнання та для дослідження механічних властивостей матеріалів та методика вибору зносостійких газотермічних покриттів з урахуванням забезпечення міцності деталей.

## РОЗДІЛ 1

### ВИКОРИСТАННЯ ГАЗОТЕРМІЧНИХ МЕТОДІВ НАНЕСЕННЯ ПОКРИТТІВ В АВІАЦІЇ

#### **1.1 Аналітичний огляд газотермічних покриттів стосовно умов роботи вузлів повітряних суден і газотурбінних двигунів**

Серед багатьох методів нанесення покриттів газотермічне напилення привертає особливу увагу завдяки своїм технологічним можливостям. Універсальність такої технології дає змогу наносити будь-яке покриття – стійкі проти спрацювання, ущільнювання, жаростійкості та теплозахисні.

Властивості напилених покриттів відрізняються від властивостей цих же матеріалів у спеченому та в литому стані. Вони характеризуються шаруватою міцною структурою, яка виникає внаслідок сильної деформації та дуже швидкої кристалізації напилюваних часток. Шаруватість надає покриттям еластичності та підвищує їх стійкість в умовах термоциклічних навантажень. Крім цього, газотермічні покриття (ГТП) мають певну пористість, яка залежно від матеріалу та умов напилення може коливатися в межах 2-15%. Специфічна структура напилених покриттів і їх пористість значно поліпшує працездатність стійких проти спрацювання покриттів в умовах тертя з мастильним матеріалом.

Покриття, просочені мастилом, можуть тривалий час працювати без заїдання після припинення подачі масла. Застосовуючи плазму – високо-температурне джерело нагрівання – можна наносити покриття практично з усіх тугоплавких матеріалів, які в плазменій струмині не сублімують і не зазнають інтенсивного розкладання. Покрита поверхня заготовки нагрівається до температури не вище 200 °С, що виключає короблення деталей. Застосуванням газотермічного напилення можна одержати покриття товщиною від 0,02 до 15 мм і більше [1].

Технологічні параметри напилення значно впливають на властивості покриттів і дають змогу регулювати їх у досить широких межах.

Для одержання необхідної розмірної точності та шаруватості поверхні покриття з напиленого матеріалу може бути піддане механічній обробці.

Розвиток методів газотермічного нанесення покриттів відбувається у напрямках: удосконалення обладнання, розробка номенклатури порошкових матеріалів, механізація та автоматизація процесів, поліпшення умов праці обслуговуючого персоналу.

Незважаючи на перераховані переваги газотермічного напилення та позитивний досвід використання, обсяг застосування його у вітчизняній промисловості особливо в авіаційній, відносно невеликий.

Одною з основних причин цього є обмежена номенклатура плазмених покриттів, що відповідають вимогам служби газотурбінних двигунів (ГТД) і матеріалів для їх нанесення, які має у своєму розпорядженні вітчизняна промисловість.

В той же час аналіз зарубіжного і вітчизняного досвіду свідчить, що застосування сучасних газотермічних покриттів проти спрацювання дає змогу значно підвищити ресурс експлуатуємих двигунів. Застосування технології газотермічного напилення стійких до спрацювання та термостійких покриттів на деяких деталях двигунів дало змогу збільшити їх ресурс до 20000 год. і вище. Крім цього, газотермічне напилення широко застосовується при капітальному ремонті авіадвигунів для відновлення спрацьованих деталей.

У таблиці 1.1 наведено деякі дані щодо газотермічних покриттів стосовно до деталей авіаційних ГТД [2].

У зарубіжній практиці обсяг застосування плазмених покриттів особливо збільшився починаючи з 60-х років. Застосування покриттів дає змогу не лише поновити розміри спрацьованих деталей, але й підвищують їх стійкість до різних видів спрацювання та теплового впливу.

Як матеріали для газотермічного напилення покриттів на деталі авіадвигунів фірмами широкого застосуються композиційні порошки, часточки яких складаються з ядра, плакованого шаром металу, суміші тугоплавких матеріалів із металевими порошками, порошки із самофільтруючих сплавів. Найбільш поширеними покриттями є: покриття з алюмінію, нікелю, часточки якого складаються з:

- алюмінієвого ядра і нікельової оболонки;
- покриття на основі карбїду вольфрама з металевою зв'язкою;
- покриття з карбїду хрому з металевою зв'язкою;
- покриття із самофлюсуючих сплавів на нікельовій основі з бором, кремнієм та ін.

Актуальність застосування стійких проти спрацювання покриттів у вітчизняному двигунобудівництві можна показати на прикладі сучасних ГТД. Аналіз свідчить, що основна частина деталей із дефектами двигунів відноситься до компресора, турбіни та реверсивного пристрою турбіни. Ця обставина пов'язана з тим, що у газотурбінних двигунів компресор, турбіна та реверсивний пристрій є найбільш навантаженими у силовому і вібраційному відношенні, а конструктивно-технологічне виконання деталей у більшості випадків не задовольняють вимогам антифрикційності. Так, наприклад, деталі компресора виготовлені в основному з титанових сплавів і працюють, як правило, в одноіменних парах (титановий сплав – титановий сплав). Таке сполучення матеріалів у трибопарі є несприятливим і в процесі експлуатації призводять до скріплювання контактованих поверхонь. Технологічні заходи, передбачувані у даному випадку для підвищення контактної міцності та стійкості деталей проти спрацювання гідродробеструменева обробка, електромеханічні сріблення, покриття ВАП-2 неможна визнати достатньо ефективним [1].

На підставі аналізу, виконаного за результатами дефектації деталей на ремонтних заводах цивільної авіації, а також за даними про технічний стан і

відказам авіаційної техніки Казанського, Пермського і Запорізького моторобудівних об'єднань, 70-90 % деталей (залежно від типу двигуна) після відпрацювання визначеного ресурсу мають спрацювання, що перевищує допустиме або близьке до нього [2].

Таблиця 1.1 - Застосування покриттів у газотурбінних двигунах

Тип покриття	Товщина шару, мм	Максимальна робоча температура 50°C	Грануляція мкм	Основне призначення покриття	Приклади застосування
1	2	3	4	5	6
ВКНА	0,1-0,3	750	50-80	Захист спряжених поверхонь від спрацювання від тертя, вібрацій. Жаростійке покриття (підшар)	Телескопічне з'єднання жарової труби та газозбірника. Кільця соплового апарату, форсунки, диск турбіни.
ВКНА + галтування + алітування	0,15-0,20	1150	40-60	Захист жароміцних сплавів від окислення	Лопатки соплового апарату
НА-67	0,1-0,15	900	63-100	Підшар, ремонт спрацьованих поверхонь	Проміжні кільця газових турбін
ПХ20Н80	0,1-0,15		40-60	Ущільнювальне покриття, підшар	Корпусні деталі компресора, агрегатів
ZrO <sub>2</sub>	0,1-0,15	2500	28-100	Термозахисний шар	Проміжні кільця газових турбін. Термостійкі екрани
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,1-0,15	1800	20-40	Електроізоляційні покриття	Захисні шари струмопідводів у запальнику

Завершення таблиці 1.1

1	2	3	4	5	6
70% WC + 30% Ni	0,1-0,15		20-100	Покриття стійкі проти спрацювання струм компресорів	Бандажні полиці лопавали, втулки
КХН – 15 85% Cr <sub>3</sub> O <sub>2</sub> + 15% Ni	0,1-0,15			- “ -	- “ -
СНГН	0,1-0,2	700	150	Зміцнення деталей, що працюють в умовах абразивного спрацювання	Вали, калібри штампи
ВСНГН	0,1-0,2	700	150		
АНБ 20%NB+5- 6%SiO <sub>2</sub> Al – решта	0,1-5,0	до 550	40-300	Ущільнення	Статорні кільця, направляючі апарати, лабіринтні кільця, корпусні деталі
Mo	0,1-1,0		40-100	Підшар	Корпусні деталі
W	0,1-1,0		40-100	- “ -	- “ -
ЭИ435	0,1-1,0	700	40-100	- “ -	- “ -
20Б	2,0-3,0	400	40-300	Ущільнення	Направляючі апарати кришки лабіринтів та ін.

Співставлення за номенклатурою кількості деталей, показує що мають високу інтенсивність спрацювання, і кількості незміцнених деталей показує, що інтенсивно спрацьованих деталей у 1,5 рази більше, ніж незміцнених. Це говорить про те, що причиною недостатньої стійкості проти спрацювання є відсутність зміцнюючої обробки, а також значною мірою й недостатня ефективність застосованих методів зміцнення.



Найявний досвід експлуатації та ремонту ГТД свідчить, що обсяги застосування газотермічного напилення стійких проти спрацювання покриттів на деяких деталях і вузлах є явно недостатніми. А дані про те, що більш як половина деталей ГТД не має спеціальної обробки, направленої на підвищення стійкості проти спрацювання, покривають широкі можливості застосування плазмених зміцнюючих стійких проти спрацювання та термостійких покриттів. Крім цього більшість деталей авіадвигунів мають плоску, циліндричну і сферичну зовнішні поверхні контакту, що найсприятливіші з точки зору застосування плазменої технології нанесення покриттів [3].

Отже, при виробництві та ремонті авіаційних ГТД є великі можливості щодо зміцнення та відновлення деталей і вузлів тертя газотермічними методами, зокрема плазменим напиленням як найбільш універсальним і технологічним. Тому для широкого застосування цього методу в двигунобудівництві та ремонтному виробництві необхідне інтенсивне проведення робіт у області збільшення номенклатури сучасних матеріалів для плазмених стійких до спрацювання покриттів.

Для підвищення надійності та експлуатаційних характеристик цих покриттів необхідно подальшим вдосконалення технології їх нанесення та наступної обробки з метою забезпечення необхідних службових властивостей.

Реалізація газотермічних методів нанесення захисних покриттів ефективна лише за правильного вибору матеріалу та відповідності його властивостей технологічним можливостям конкретних методів напилення.

Для забезпечення широкого впровадження газотермічних методів нанесення покриттів на ряді підприємств країни організоване виробництво різних порошків. Проте інформація про склад, властивості та призначення порошків, які випускають для стійких проти спрацювання покриттів, досить коротка, а літературні відомості неповні, протирічні та застарілі.

У зв'язку з цим вибір найефективнішого, економічно доцільного покриття для конкретної деталі з конкретними умовами експлуатації надзвичайно ускладнений і у ряді випадків практично неможливий.

Наявні у літературі рекомендації з вибору покриттів типу “стійкий проти спрацювання” не є достатньою підставою для його застосування у конкретних умовах, оскільки супроводжуються чіткими обмеженнями параметрів механічного навантаження.

Враховуючи, що поняття “стійкість проти спрацювання” є комплексним, остаточний висновок про працездатність газотермічних покриттів можуть дати лише випробування на спеціальних триботехнічних установках, моделюючих тертя реальних трибопар у визначених режимах (тертя, ковзання, реверсивне тертя, вібропереміщення і т.д.). Лише після проведених триботехнічних досліджень можна визначити робочі діапазони газотермічних покриттів для конкретних трибопар із визначеними режимами тертя та навантаження [2, 3].

Якщо не брати до уваги такі види спрацювання, як тертя кочення та тертя кочення з проковзуванням, що становлять у загальному обсязі видів спрацювання незначну частку, то можна сказати, що переважна більшість контактуючих деталей ГТД (у середньому від 70 до 95 % залежно від типу двигуна) працюють і пошкоджуються в умовах наявності малих циклічних переміщень, обумовлених вібрацією та недостатньою жорсткістю кріплення. Значно меншу частку становлять деталі, що працюють в умовах однонаправленого тертя сковзання та реверсивного тертя сковзання.

В авіадвигунобудівництві, наприклад, номенклатура напилених деталей невпинно зростає і перевищує вже понад 100 найменувань.

За останні тридцять років газотермічне нанесення покриттів досягло високих результатів. Досвід, надбаний у застосуванні напилення, дає змогу сформулювати певні рекомендації, що є підставою для вибору матеріалів, способів підготовки поверхні, механічної обробки покриттів.

Ці ГТП можуть істотно впливати на механічні властивості матеріалу, на який вони нанесені. Тому всебічне дослідження ступеня впливу ГТП на механічні властивості матеріалу, що є їх важливою характеристикою, повинно бути невід'ємною складовою частиною комплексу заходів щодо вибору матеріалу та методу нанесення покриття для максимального зниження негативного впливу покриттів на механічні характеристики основного матеріалу.

## **1.2 Технологічні методи нанесення та матеріали газотермічних зносостійких покриттів**

Нанесення захисних стійких проти спрацювання покриттів є одним з найефективніших засобів боротьби з фретинг-спрацюванням. У даний час розроблено та використовуються десятки технологічних методів і велика номенклатура матеріалів, які дають змогу одержувати покриття з високою стійкістю проти спрацювання. При виробництві та ремонті деталей авіаційної техніки як стійких проти зношення найбільш широко використовують покриття, одержані методами газоплазменого, плазменого, імпресно-плазменого і детонаційного напилення.

Суть процесів газотермічного напилення полягає у створенні направленого потоку нагрітих або розплавлених часток напилюваного матеріалу на заздалегідь підготовлену поверхню деталі. З'єднання покриття з матеріалом деталі відбувається за рахунок утворення молекулярних зв'язків і механічного зчеплення на мікронерівностях поверхні.

Основними тривогами газотермічних методів напилення є: невисокі температури нагрівання деталі (до 573К), можливість нанесення покриттів практично з будь-яких матеріалів (метали, кераміка, органічні матеріали), висока продуктивність процесу. До недоліків технології газотермічного напилення можна віднести відносно невисоку для ряду експлуатації

механічної міцності і міцності зчеплення покриттів з основою, а також пористість.

Залежно від виду використовуваного джерела енергії розрізняють газополуменевий, плазменний і детонаційний способи напилення.

Газоплазменним способом напилення розпилення матеріалу відбувається за рахунок тепла, яке виділяється при горінні суміші: горючий газ – кисень. Як горючий газ використовують ацетилен, пропан або пропан-бутан. Найінтенсивніший тепловий потік забезпечує ацетимно-кисневе полум'я, температура якого сягає 7300К. Швидкість часток при газополуменевому напиленні в момент співудару з підкладкою становить 50-100 м/с.

При плазменому напиленні джерелом енергії є струм інізованого плазмотворного газу, температура якого становить 5000-5500 К, а швидкість напилюваних часток досягає 300 м/с. Як плазмотворні гази використовують: аргон, азот, гелій, водень, аміак та інші гази, а також їх суміші. Основним способом одержання плазменого струменя, що реалізується в плазмотронах промислових установок, є пропускання плазмотворного газу через полум'я стиснутої електричної дуги.

У результаті теоретичних і експериментальних досліджень з прискорення та нагрівання часток плазменним струменем встановлено, що міцність зчеплення покриттів з основою в основному зростає зі збільшенням швидкості зменшується пористість покриттів [4].

З метою збільшення швидкості напилюваних часток, в Інституті надтвердих матеріалів розроблено метод напилення покриттів з використанням імпульсного плазменого потоку. Швидкість часток напилюваного матеріалу в імпульсно-плазменому потоці досягає  $1 \times 10^3 \dots 4 \times 10^3$  м/с, що забезпечить більш високі експлуатаційні властивості покриттів.

Таблиця 1.2 - Характеристика матеріалів, які використовують для нанесення стійких проти спрацювання покриттів газотермічного напилення

№ пп	Найменування матеріалу	Хімічний склад, %	Тип матеріалу	ГОСТ, ТУ
1	2	3	4	5
1.	НА-67	20Al + 80Ni	порошковий матеріал	Інструкція ИА.1.983, КуАИ
2.	КХН	25Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> + 75Ni	- “ -	- “ -
3.	ВКНА	Ni – Fe – Al - Мо	- “ -	ТУ-14-1-1790-76
4.	ПГ-ХН80СР3	14Cr + 3,5Si + 2,5В + 80 Ni	- “ -	РТУ 11 79-67
5.	СНГН-60	16Cr + 4Si + 3,7В + 78,3Ni	- “ -	ТУ-48-42-99-71
6.	ВСНГН	15СНГН + 85Со	- “ -	ТУ-43-42-100-71
7.	ВК-15	85WC + 15Со	- “ -	ТУ1-999-0480-78
8.	ВК-20	80WC + 20Со	- “ -	ТУ-48-19-60-73
9.	ВН-30	70WC + 30Ni	- “ -	ТУ01.1273
10.	ПС-12НВК-01	65 (Ni–Cr–В-Si) + 35 (WC)	- “ -	ТУ48-19-383-84
11.	ПН55Т45	43...47Ti + 0,2Fe + 0,1N + +0,07C + Ni – остальне	- “ -	ТУ14-1-3282-81
12.	Алюник 7/1	20Al + 80Ni	дріт	ТУ48-21/ОП-5060-75
13.	БрАЖ10-1,5	10Al + 1,5Fe + Cu – ост.	- “ -	ТУ48-08-5047-74
14.	Мо	100Мо	- “ -	ТУ48-42-7-70
15.	У7	0,7C + ост. Fe	- “ -	ГОСТ 9389-75
16.	50ХФА	0,5Al + 1Cr + (0,1-0,2) V + ост. Fe	- “ -	ГОСТ 4543-71
17.	ИПМ-1	75Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> + 20Ni + 5Cr	порошковий матеріал	Дослідний, ИПМ, м. Київ
18.	ПНХАБ	64Ni + 16Cr + 12Al + 8В	- “ -	- “ -
19.	ПНХАЛ	83,5NiCr + 15Al + 1,5La	- “ -	- “ -

Завершення таблиці 1.2

1	2	3	4	5
20.	ПНХАИ	83,5NiCr + 15Al + 1,5Y	- “ -	- “ -
21.	ПНХАИ-РАР	84,7NiCr + 15Al + 0,3Y	- “ -	- “ -
22.	ПКТХНХ	20 (TiCr) + 80NiCr	- “ -	- “ -
23.	ПКТХНА	20 (TiCr) + 80NiAl	- “ -	- “ -
24.	ПХ23Н18	23Cr + 18Ni + ост. Fe	- “ -	- “ -
25.	ПЖБН	50Fe + 40Ni + ост. В	- “ -	- “ -
26.	ПКТХСРЗ	80 (Ni – Cr – Si) + 20 (TiC – - Cr)	- “ -	- “ -
27.	ПНЖХБАКТХ	80Ni + 20 (Cr – Fe – AL – В)	- “ -	- “ -

Формування покриттів при детонаційному напиленні відбувається за рахунок енергії вибухової хвилі, що виникає при запалюванні газової суміші. Як горючі гази можуть використовуватися: метан, пропан-бутан, ацетилен, водень, а як окислювач – кисень. Вибухова хвиля забезпечує перенесення часток напилюваного матеріалу на поверхню деталі зі швидкістю  $8 \times 10^2 \dots 1,2 \times 10^3$  м/с, що на порядок вище, ніж за газополуменевого та плазменого напилення. Температура продуктів згоряння залежно від складу детонуючої газової суміші досягає 2500...500 К. Продуктивність детонаційного напилення нижче, ніж газополуменевого і плазменого, однак забезпечується вища щільність і міцність зчеплення покриттів з основою.

Фізико-механічні властивості газотермічних покриттів і характеристики їх тертя і спрацювання залежать від вихідних матеріалів і технології нанесення. В той же час технологія нанесення до певної міри залежить від застосованого матеріалу [5].

Як матеріали для газополуменевого і плазменого напилення можуть використовуватися порошки, дріт або прутики. Для детонаційного і імпульс-

сно-плазменного напилення використовують лише порошкові матеріали. Практично, газотермічним напиленням можна наносити покриття з товщиною шару до 1-2 мм, але найвищу адгезію та міцність мають покриття товщиною 0,2...0,4 мм. Номенклатура освоєних у авіаційному виробництві та деяких розроблених матеріалів для одержання стійких проти спрацювання покриттів методами газотермічного напилення наведена в таблиці 1.2.

### **1.3 Довідкові дані про властивості стійких проти спрацювання покриттів при фретингу та фретинг-корозії**

Фретинг і фретинг-корозія.

Основні поняття, терміни та визначення, особливості розвитку. Згідно ГОСТ 23.002.73 визначає поняття “спрацювання при фретингу” та “спрацювання при фретинг-корозії” відповідно як “механічне і корозійно-механічне спрацювання від зіткнення тіл при коливальних відносин переміщеннях”.

У першому значенні під “фретингом” і “фретинг-корозією” мається на увазі явище руйнування контактних поверхонь деталей машин при колиальному відносному мікропереміщенні під навантаженням [5].

Термін “фретинг” і “фретинг-процес” вживається також для позначення дій, в результаті яких відбувається спрацювання при фретингу і фретинг-корозії. В цьому смислі “фретинг” – це коливальний рух однієї сполученої поверхні відносно другої з малою амплітудою.

Для визначення фретингу як дії вживається також вираз “вібраційне навантаження”, “контактне тертя” і “вібраційне тертя”. Однак у цьому разі необхідно розуміти, що пересування сполучених поверхонь при фретингу повинне відбуватися у тангенційній площині, а не нормально до поверхні контакту, що відрізняє фретинг від динамічного контактного навантаження або контактної втомленості.

Спрацювання при фретингу може мати місце при контакті благородних матеріалів, неметалічних матеріалів, при роботі деталей у вакуумі або середовищі інертних газів. Для більшості машин і механізмів найхарактерніше спрацювання при фретинг-корозії [6].

В даний час загальноприйнято вважати, що причиною фретинг-корозії є специфічний характер механічної взаємодії контактуючих поверхонь, що супроводжується деформацією та окисленням. Проте ролі механічного і хімічного факторів у розвитку фретинг-корозії відводиться різне значення.

Деякі дослідники вважають, що основними процесами спрацювання металів при фретинг-корозії механічного руйнування, що розвиваються на поверхні та в поверхневих об'ємах тертьових деталей. Механізм фретинг-корозії у цьому разі може складатися з таких стадій:

- утворення дрібних часток ювенильного металу внаслідок здійснювання містків зварювання мікронерівностей поверхні;
- хімічна взаємодія часток спрацювання з навколишнім середовищем та їх окислення;
- абразивне стирання тертьових поверхонь.

Розвиток абразивних процесів при фретинг-корозії в основному пов'язаний з дією окислення продуктів спрацювання, що мають вищу міцність, ніж вихідний матеріал. У ролі абразива можуть виступати і зношені деформацією неокислені частинки спрацювання. Однак слід відзначити, що певного зв'язку між твердістю окислів і величиною фретинг-спрацювання не вдалося знайти.

Існує думка, за якою вирішальну роль у розвитку фретинг-корозії відіграють хімічні процеси. Згідно з цією концепцією вважається, що при надлишку кисню фретинг-корозія обумовлена в основному хімічною взаємодією металу з киснем, в результаті якого на терновій поверхні утворюються окисли. Роль механічного чинника у цьому разі полягає у видаленні продуктів окислення та оновлення ювенильних поверхонь.



При розгляданні механізму фретинг-корозії велика роль відводиться процесам втомленості. Вважається, що руйнуванню від утомленості поверхні металів при фретинг-корозії значною мірою сприяє коливальний характер взаємодії з'єднаних поверхонь. Хімічна взаємодія з середовищем у цьому разі розглядається як чинник, інтенсифікуючий накопичення пошкодженості від утомленості та поширення тріщин, як це спостерігається при втомленості від корозії в умовах об'ємного циклічного навантаження.

Висувались також теорії, за якими в основу механізму руйнування металів при фретинг-корозії покладено явища електрокорозії та дифузійні процеси. Однак, ці теорії не одержали подальшого розвитку [7].

Не вдаючись у детальніший аналіз можна відзначити, що жоден із запропонованих механізмів фретинг-корозії не описує всього різнобарв'я її розвитку. Іншими словами, механічні та хімічні процеси не можуть розглядатися окремо. Вони діють спільно і взаємно обумовлюють один одного. І все ж таки можна говорити про переважну роль того або іншого чинника на різних стадіях розвитку фретинг-корозії, а також залежно від властивостей контактуючих матеріалів і умов контактної взаємодії. З урахуванням стадійності найдетальніше механізм фретинг-корозії представлено в роботі. Комплексний аналіз накопичення пошкодженості дав змогу відмітити процес три основні стадії.

На першій стадії відбувається взаємодія мікронерівностей, руйнування адсорбованих і природних окисних плівок із наступним скріплюванням ювенильних поверхонь. Руйнування внаслідок втомленості контактуючих виступів мікронерівностей і зрізання вузлів скріплювання призводить до утворення первісних продуктів спрацювання, більша частина яких окислюється.

Друга стадія характеризується появою в зоні тертя корозійно-активного середовища внаслідок адсорбції на окислах кисню та вологи. Взаємодія між з'єднаними поверхнями відбувається через прошарок продуктів спрацювання,

який відіграє захисну роль, зменшуючи на цій стадії інтенсивність спрацювання. Зміцнені багаторазовим пластичним передеформуванням поверхневі шари відчують помірні навантаження. Із зростанням кількості циклів фретингу у поверхневих шарах металу накопичується пошкодженість від утомленості, посилена корозійними процесами [1, 6].

На третій стадії поверхневі шари металу, тривалий час піддані навантаженню, розтріскуються та їх прогресивне відокремлення, що виявляється у зростанні швидкості спрацювання.

Описаний механізм спрацювання діє при терті без змазування при помірних навантаженнях і невисоких робочих температурах (до 2000 °C). За цих умов протікають найхарактерніші для фретинг-корозії процеси.

За високих навантажень і температур посилюються адгезійні процеси та розвиток фретинг-спрацювання відбувається в основному по механізму скріплювання.

Якщо у зоні контакту утворюються тверді продукти спрацювання, то ведучим процесом фретинг-корозії абразивне спрацювання.

Для розвитку фретинг-корозії не досить лише відносного пересування поверхонь, обов'язково повинно бути проковзування. Вважається, що верхня межа амплітуди мікропересування для фретинг-корозії не перевищує 1 мм. Однак найхарактерніший діапазон амплітуд розвитку фретинг-корозії для деталей знаходиться в межах 50...300 мкм. Величина фретинг-спрацювання при зростанні амплітуди відносного пересування збільшується, хоча залежно від властивостей контактуючих матеріалів і умов роботи деталей характер цієї залежності різний.

На відміну від амплітуди спрацювання при фретинг-корозії не завжди збільшується із зростанням навантаження. Якщо при підвищенні навантаження інтенсифікується зчеплення, спрацювання може зменшитися внаслідок взаємного переносу матеріалу між поверхнями тертя. Однак у цьому

разі утворюються глибокі локальні пошкодження, що різко знижують міцність деталей від втомленості.

Вплив частоти коливань на інтенсивність фретинг-спрацювання пов'язано із дією часового чинника та температури. Зі зменшенням частоти зростає час тривалості окислення, що призводить до збільшення товщини, видаленої за цей період з поверхні плівки, а отже, й величини спрацювання.

За високих частот коливань з часовим чинником конкурує температурний, вплив якого може компенсувати зниження тривалості окислення. Однак, якщо матеріал чутливий до змін температури, остання з ростом частоти може набувати ведучої ролі, що призводить не лише до зміни величини спрацювання, а й характеру руйнування поверхні [3].

З підвищенням температури спрацювання металевих матеріалів зменшується. Для металів з добре обробленою поверхнею (з малою шорсткістю) є температура, вище якої опір спрацюванню різко зростає. Це пояснюється утворенням міцно зчепленої з металом окисної плівки, яка екранує поверхню металу та виконує роль твердого мастила. Захисні властивості окисної плівки залежать від її несучої властивості та умов навантаження. Якщо відбудеться руйнування плівки, спрацювання буде набагато більшим, ніж за нижчої температури внаслідок високої швидкості окислення та зчеплення.

Великий вплив на інтенсивність спрацювання при фретинг-корозії має природа контактуючих матеріалів: їх кристалічна структура, твердість, міцність, хімічна активність. Дослідження, проведені на різних металах, показали, що в широкому діапазоні умов віброконтактного навантаження має місце підвищення фретинг-стійкості зі збільшенням міцносних характеристик матеріалу. Проте нерідко спостерігається відхилення від цієї залежності.

Вплив структурних факторів на величину фретинг-спрацювання визначається структурною чутливістю міцності матеріалу, корозійної стійкості, схильності до зчеплення та інших властивостей, що визначають

інтенсивність процесів, відповідних за руйнування металів при фретинг-корозії. Залежно від структурного стану один і той же матеріал може мати різну фретингостійкість.

Загальні відомості про вплив покриттів на механічні властивості матеріалів. Проблема впливу твердих поверхневих плівок на механічні характеристики матеріалів постійно знаходиться в полі зору дослідників.

Останнім часом інтенсифікувались дослідження в галузі вивчення впливу різних ГТП на механічні властивості матеріалів.

Досліджено вплив плазмених покриттів із сталей 40ХІЗ, 11ХІ8МВД, УЮА на стійкість сталі 40ХНМА і молібденового покриття на стійкість сталей 30ХГСА, Х18Н9Т і сплаву Д16Т в умовах розвитку на поверхні зразків фретинг-корозії. Встановлено, що на усіх досліджуваних матеріалах нанесення плазмених покриттів призводить до зниження стійкості від втомленості.

Вплив детонаційних покриттів на механічні властивості матеріалів розглянуто в роботах [1-3].

Автори [1] досліджували вплив покриттів типу ВК15 і ВН30 на механічні властивості титанового сплаву ВТ20 при статичному та циклічному розтягу. Результати досліджень показали істотне зниження межі текучості сплаву ВТ20 на 17-19 %, межі міцності на 21-22,5 %, відносного подовження на 43-44,5 % і межі витривалості на 65-70 %.

Авторами [1] відмічено, що причиною такого зниження механічних властивостей може бути значна різниця в модулях пружності матеріалу основи і покриття, що спричиняє виникнення додаткової напруги на межі покриття – основа.

У роботі [3] показано, що напилення порошку ВК15 на сплав ВТ20 призводить до зниження межі витривалості в 6,5 рази. Однак абразивне шліфування напиленого шару до деякої міри поновлює межі витривалості.

Авторами [2] встановлено, що детонаційні покриття, підвищуючи стійкість проти спрацювання та довговічності деталей, не змінюють значення їх первісної витривалості від втомленості.

У багатьох роботах велика увага приділяється дослідженню повзучості на довговічності матеріалів із плазменими покриттями за нормальної й підвищених температур, у вакуумі та в середовищі металевих розплавів. Зазначено, що плазмені покриття на випробуваннях у вакуумі в одному діапазоні температур і напруг можуть знеміцнювати основний матеріал (довговічність зменшується, швидкість повзучості зростає), а в іншому – зміцнювати. Автори вказують, що тривала міцність і повзучість конструкційних сплавів із плазменими покриттями залежать від складу та структури взаємодіючих матеріалів, від перехідної зони на границі основний матеріал – покриття, тобто від фізичних процесів, які відбуваються на границі при плазменому напиленні.

Вплив різних покриттів на механічні характеристики конструкційних металів і сплавів також пояснюється з позиції дислокаційної уяви про зміни у структури поверхневих шарів у процесів деформації.

У роботі [4] розглянуто ряд чинників, якими визначається і позитивна, і негативна роль покриттів.

Коректність і точність розв'язання багатьох інженерних задач проектування, створення та ремонту машин, ріст номенклатури напилюваних деталей та все зростаючі вимоги до їх експлуатаційної здатності спричиняють необхідність пошуку ефективних методів обліку впливу покриттів на основні механічні властивості матеріалів.

#### **1.4 Технологічні особливості газотермічного напилення**

Технологічний процес нанесення покриттів складається з таких операцій:

- 1 – підготовка та приготування вихідних матеріалів;
- 2 – підготовка поверхні деталі під нанесення покриття;
- 3 – напилення;
- 4 – подальша обробка напилених шарів: галтування, алітування, дифузійний віджиг, механічна обробка;
- 5 – поопераційний контроль технологічних режимів і якості нанесеного шару покриття.

Підготовка поверхні виробу під газотермічне напилення.

1. Перед напиленням всі деталі повинні бути старанно знежирені. З поверхонь, які підлягають напиленню, повинна бути знята емульсія, мінеральне масло, нагар, старе покриття.

Чистоту підготовленої поверхні нових деталей контролювати на відсутність масла та забруднень, а ремонтних – на відсутність нагару та зняття старого покриття. Знежирення проводити хімічне, у травильних розчинах. Локальні свіжі забруднення допускається видаляти протиранням бензином, ацетоном і спиртом.

2. Після знежирювання поверхні, що захищені потрібно обдути чистим електрокорундом марки 14А або 23АН63-125. Обдувка електрокорундом повинна проводитися безпосередньо перед напиленням, допускається також проводити струминно-ерозійну обробку нікельованих сплавів не більше ніж за 6 годин до напилення, а сплавів на залізній та титановій основах не більше ніж за 2 години до напилення за умови зберігання деталей після піскоструминної обробки в сухому приміщенні та виключені попадання пилу на підготовлену поверхню.

Особливу увагу при піскоструминній обробці слід звернути на якість очищення та осушення повітря. Використання в цьому разі повітря забрудненого парами води та масла, недопустиме.

(Експрес-пробу якості повітря провести на фільтрувальному папері при відкритому повітряному вентилі: сліди масла на папері свідчать про погане очищення повітря).

У випадку незадовільного очищення повітря необхідно поставити на ділянці піскоструминення додатково масловодовідокремлювач і засоби осушення.

Поверхні деталей, що не підлягають піскоструминенню, повинні бути закриті спеціальними пристосуваннями (екранами). Транспортувати деталі після піскоструминної обробки потрібно в чистій тарі.

3. Після струминно-ерозійної обробки шліфзерном і зняття захисних екранів оброблювану деталь обдути сухим стиснутим повітрям при тиску 4-6 атм. для очищення її від пилу.

4. У разі локального забруднення деталі допускаються безпосередньо перед напиленням знежирити забруднену поверхню бензином і спиртом чистою серветкою, після чого обдути її сухим повітрям до повного видалення волокон тканини [8].

5. Всі операції з підготовленими до напилення деталями проводити в чистих хлопково-паперових рукавицях.

Газотермічне напилення.

1. Перед напиленням оператор зобов'язаний перевірити справність пульта управління, наявність індивідуальних засобів захисту, готовність матеріалу, деталей. Процес напилення складається з підготовки (включення вентиляції, охолодження джерел струму, подачі порошку, регулювання робочого режиму та ін.); власне напилення (слідкування за роботою розпилювача, рівномірністю напилених шарів, дистанцією напилення, промірювання товщини напиленого шару) і заключної операції (вимкнення електропостачання дуги, відключення живильника порошку, перекриття газів і води, зняття деталі та ін.).

2. При роботі на пультах ручного регулювання процес напилення ведеться двома операторами.

3. Режими напилення коригуються залежно від типу пальника, маси, розмірів, марки матеріалу деталі, складу напилюваного матеріалу і плазмотворного газу.

4. Плазмені покриття рекомендується наносити на повітрі в струміні аргоно-водневої плазми, допускається застосування азотної плазми з попереднім відпрацюванням режиму напилення.

Оптимальний кут похилу осі сопла пальника до напилюваної поверхні  $90^\circ$ .

5. Пошарове напилення рекомендується вести без перерви (перерву робити лише для контрольних операцій).

6. Рекомендується напилення (у крайньому разі останнього шару) вести “назустріч потоку”, наприклад, на соплових лопатках нанесення покриття виконувати переміщенням розпилювача вздовж утворюючої пера лопатки у напрямку від вихідної до вхідної кромки з обох сторін і закінчувати напиленням вхідної кромки [9].

7. Недопустимо попадання в покриття нерозплавлених пилових часток, що може відбуватися при порушенні режимів напилення, витрати порошку. Непряме порушення режиму можна виявити у процесі напилення по значній кількості пилу, що осів на поверхні у безпосередній близькості до робочої зони. Осівний пил легко видаляється чистою щіткою.

8. Після напилення виріб необхідно обдути сухим повітрям ( $P = 30-50$  МПа) або інертним газом (аргон, азот).

Подальша обробка напилених шарів.

1. Процес алітування лопаток після напилення відбувається відповідно з інструкцією ВІАМ 883-70.

2. Механічна обробка напилених поверхонь (токарна, шліфівка, віброгалтування та ін.) проводиться на попередньо відпрацьованих для



кожного виду покриттів і конкретної деталі режимах на заводському обладнанні.

Контроль технологічного процесу та якості покриття.

1. Усі застосовувані матеріали повинні відповідати нормам.
2. Процес струминно-ерозійної обробки контролюється за грануляцією корунду, тиском і чистого повітря, суцільністю поверхні після обробки (піскоструминної).
3. Після піскоструминної обробки контролювати поверхню на відсутність необроблених місць візуально. У разі виявлення ці місця підлягають повітряній піскоструминній обробці.
4. У процесі напилення контролювати режим напилення відповідно діючої виробничої інструкції.
5. Товщину покриття контролювати в процесі напилення спеціальним або універсальним інструментом.
6. Якість напиленого шару контролювати зовнішнім оглядом за еталоном на відсутність сколів, шпарин, крапель, пропусків запиленості поверхні.
7. У разі виявлення дефектів на напиленому шарі, виниклих у процесі напилення, при подальшій обробці або складанні допускається видалення дефектного шару з усієї деталі струйно-ерозійною обробкою та повторним напиленням покриття. Місцевий ремонт покриття не допускається.
8. Міцність зчеплення напиленого покриття перевіряється на зразках – свідках при відпрацюванні технології. Форма, розміри зразків і пристосування для склеювання, а також методика випробування описані в інструкції ВІАМ 713-65.

## **Висновки до розділу 1**

У сучасному машинобудуванні та авіабудуванні на сьогоднішній день всюди використовуються захисні покриття, без яких вже неможливо уявити собі сучасну техніку. Покриття мають безліч переваг, які дозволяють істотно збільшити експлуатаційні характеристики сучасної авіаційної техніки.

Найбільш вживані на сьогоднішній день покриття являються газотермічні. Ці покриття володіють великим рядом переваг в порівнянні з іншими методами нанесення покриттів.

## РОЗІЛ 2

### АНАЛІЗ МЕТОДИК ДОСЛІДЖЕНЬ ХАРАКТЕРИСТИК ГАЗОТЕРМІЧНИХ ПОКРИТТІВ

#### 2.1 Методики досліджень фізико-механічних властивостей матеріалів покриттів

Лопатки ГТД знаходяться у дуже складних умовах силового і теплового навантаження. У зв'язку з цим контроль якості нанесених на них покриттів повинен відповідати найважливішим вимогам, що забезпечують комплексність і надійність оцінки параметрів працездатності покриттів у заданих експлуатаційних умовах.

##### 2.1.1 Вимірювання коефіцієнта теплового розширення

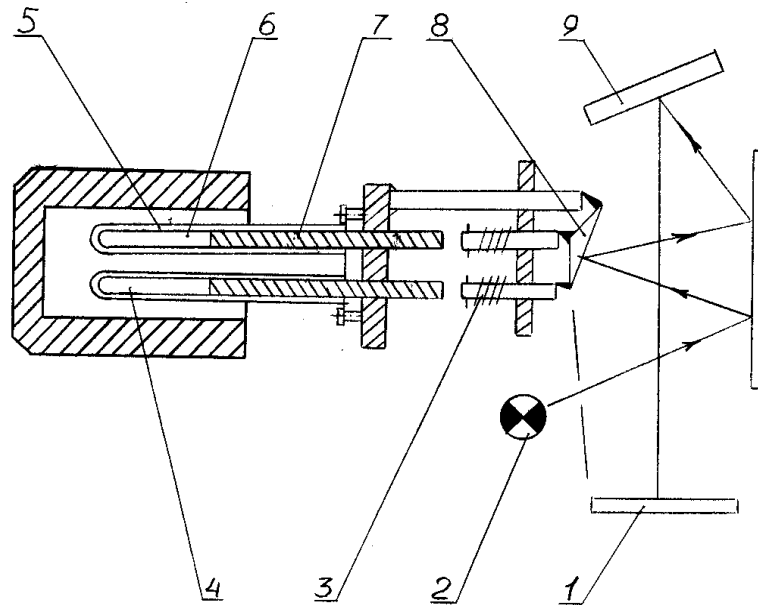
Одною з основних причин, що призводять до руйнування покриттів при теплозмінах, є існування градієнта напруження на границі розділу пари “покриття – основа”. Величина цих напружень прямо пропорційна різниці значень коефіцієнта теплового розширення (КТР) матеріалу основи і покриття, тому при виборі матеріалу покриття необхідно співставити його КТР і КТР матеріалу основи досягаючи при цьому мінімальної різниці у значеннях. КТР (2) знаходиться як відносна зміна лінійних розмірів ( $\Delta\alpha$ ) при зміні температури ( $\Delta t$ ) на один градус температурної шкали

$$\alpha = \frac{\ell}{t} - \frac{1}{\ell_0} \quad (1/\text{град}), \quad (2.1)$$

де:  $\ell_0$  – початкова довжина зразка.

Звичайно, дилатометричний аналіз (вимір КТР) проводять за дуже низьких швидкостей нагріву із метою звести температурний гістерезис до мінімуму.

Методи вимірювання КТР застосовані на порівнянні КТР матеріалу, що досліджуються, з КТР еталона. Для цього найчастіше використовують диференційний ділатометр Шевенара. Схема ділатометра такого типу наведена на рисунок 2.1.



1 - фотопластинка, 2 – освітлювач, 3 - штовхачі, 4 - досліджуваний зразок, 5 - кварцеві трубки, 6 – еталон, 7 – стержні, 8 – дзеркало, 9 – система дзеркал

Рисунок 2.1 – Схема установки для вимірювання коефіцієнту теплового розширення

У ділатометрі використовують зразок-еталон 6 у вигляді циліндра, який у використаному інтервалі температур не зазнає фазових перетворень.

Кварцеві трубки 5, в котрих знаходяться зразки та стержні, жорстко кріпляться до корпусу ділатометра, а запаяними кінцями поміщаються у нагрівальні елементи. Досліджуваний зразок 4 також у вигляді циліндра аналогічної довжини поміщають поруч з еталоном. Два кварцевих стержні 7, що передають зміни довжини зразка й еталона, одним кінцем спираються у

зразок і еталон, а іншим – у підпружинені штовкачі 3, котрі, в свою чергу спираються в кути пластини у вигляді прямокутника, на якому закріплено дзеркало 8. Третій кут цієї пластини із дзеркалом спирається на нерухому опору.

Падаючий від освітлювача промінь світла через систему дзеркал 9 відбивається на реєструючий пристрій з фотопластинкою 1. У ході експерименту розширення еталону спричиняє нажим дзеркала пропорційно температурі [3].

Досліджуваний зразок забезпечує нажим дзеркала, який пропорційний розширенню зразка так, що відображений від дзеркала промінь креслить на фотопластинці криву в координатах “різниця розширень зразка й еталона – температура”.

### **2.1.2 Випробування матеріалів на термостійкість**

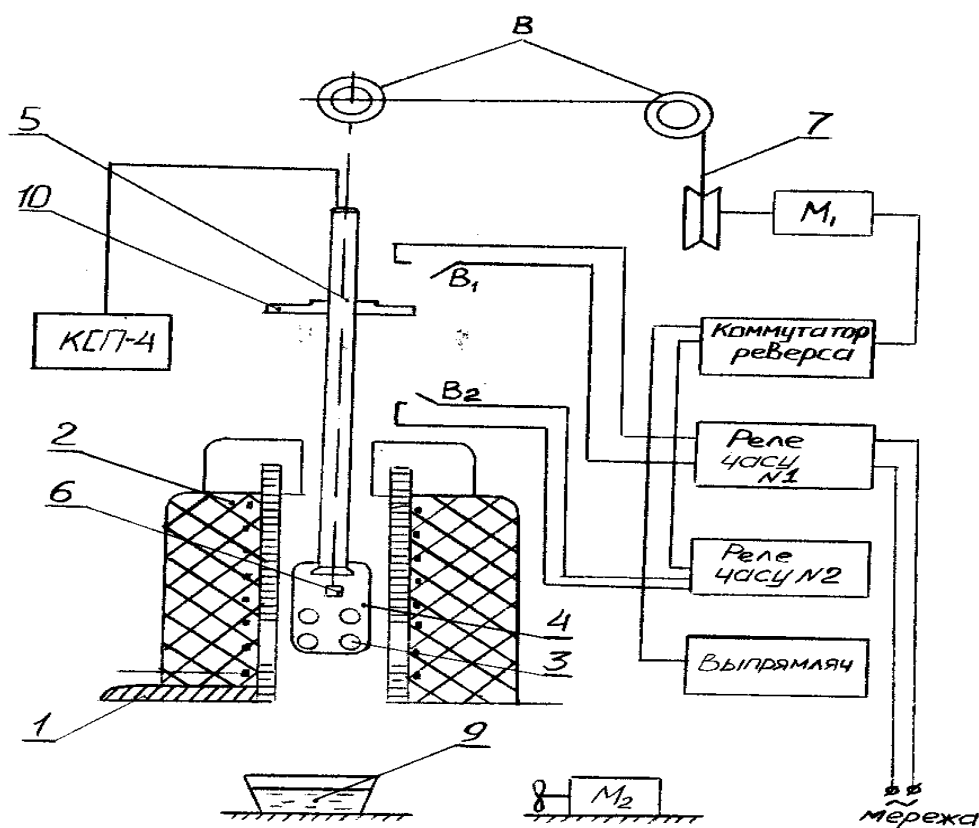
Випробування матеріалів на термостійкість неможна замінити лише вимірюванням його дилатометричних характеристик, оскільки при дилатометричних випробуваннях процес підвищення температури зразків відбувається досить повільно, тому в будьякий момент часу температуру зразків можна вважати встановленою у всьому об’ємі, виниклі напруження зумовлені лише різними значеннями КТР, в той час, як при термоцикуванні напруження зумовлено градієнтом температур при неусталених режимах.

Для порівняльних випробувань на термостійкість застосовується установка, схема якої наведена на рисунок 2.2. На станині 1 установки розміщено піч 2 шахтного типу з ніхромовим нагрівачем. Температура всередині робочої зони печі регулюється за допомогою напруги, яка підводиться від трансформатора. Робочі зразки 3 розташовуються у контейнері 4, який жорстко кріпиться до тяги 5. Тяга зроблена у вигляді порожньої трубки, всередині якої розташована термопара 6, що дає змогу потенціометром

типу КСП-4 контролювати температуру робочих зразків, а також швидкість її зміни.

Контейнер з робочими зразками вводиться або виводиться з гарячої зони за допомогою двигуна постійного струму  $M$  і тягового тросика 7, який через систему блоків 8 кріпиться до тяги 5.

Постійна напруга від випрямлювача (27В) типу ВСА-1115 подається на двигун через комутатор реверса, виконавчий механізм якого вмикається напругою, що поступає з реле часу 1 і з реле часу 2.



1 – станина; 6 – термопара; 2 – електропіч; 7 – трос; 3 – досліджувані зразки; 8 – блоки; 4 – контейнер; 9 - охолоджувач; 5 – тяга; 10 – шайба.

Рисунок 2.2 – Установа для випробувань на термостійкість

Установа працює таким чином. Після включення нагрівача і виходу його на заданий режим вмикають джерело постійного струму, напруга від якої

через елементи автоматики подається на двигун. Комутатор реверса забезпечує такий напрям обертання двигуна, при якому контейнер рухається вгору, до спрацювання кінцевого вимикача В1. При спрацюванні вимикача вмикається реле часу 1, робочі контакти якого роз'єднують ланцюг живлення двигуна. Відбувається швидке нагрівання зразків до заданої температури [5].

Після відпрацювання часу нагрівання на двигун подається напруга протилежної полярності. Контейнер опускається вниз до спрацювання вимикача В2. Реле часу 2 розриває ланцюг живлення двигуна і вмикає вентилятор. Після відпрацювання заданого часу цикл повторюється. Критерієм термостійкості служить число циклів до появи тріщин і дефектів.

### **2.1.3 Вимірювання гарячої твердості матеріалів наплавки і матеріалів лопаток**

Схема установки для вимірювання гарячої твердості наведена на рисунок 2.3.

Установка створена на базі твердоміра типу ТП-2. Вузол навантаження розглядуваної установки складається з навантажувального гвинта 1 і дволанкового важеля 2, на одному з вільних кінців якого закріплений тримач індикатора 3, а на іншому – підвіска для навантажуваних шайб 4. Ланки 2 навантажуючого важеля з'єднані між собою тягою 5. Кожна з ланок одним кінцем з'єднана шарнірно з корпусом 6 установки. У вихідному стані важіль розвантажений. Зусилля створюване вагою навантажувальних шайб, компенсується реакцією опори 7 і вісі шарніра 8. Система нагрівання зразка складається з нагрівального елемента 9, виконаного у вигляді трубчатої тяги, термопари 12 регульованого джерела живлення і самописця КПС-4, за допомогою якого відбувається стабілізація печі. Трубчата піч 9 розташована на координатному столику 10, що дає змогу міняти її положення і положення робочого зразка відносно індикатора.

Теплоізоляція координатного столика від нагрівального елемента відбувається за допомогою керамічної шайби 14. А положення зразка 11 у гарячій зоні печі регулюється підбором висоти керамічного штабика 15.

Крім термопари у гарячу зону печі введена трубка 13 для подачі аргону або іншого інертного газу, що дає змогу проводити вимірювання гарячої твердості матеріалів, що легко окислюються на повітрі.

Процес вимірювання гарячої твердості за допомогою розглядуваної установки заводиться до наступного:

Зразок з досліджуваного матеріалу у вигляді циліндру діаметром 20 мм або прямокутної призми з основою 14x14 мм поміщають у робочу зону нагрівального елемента.

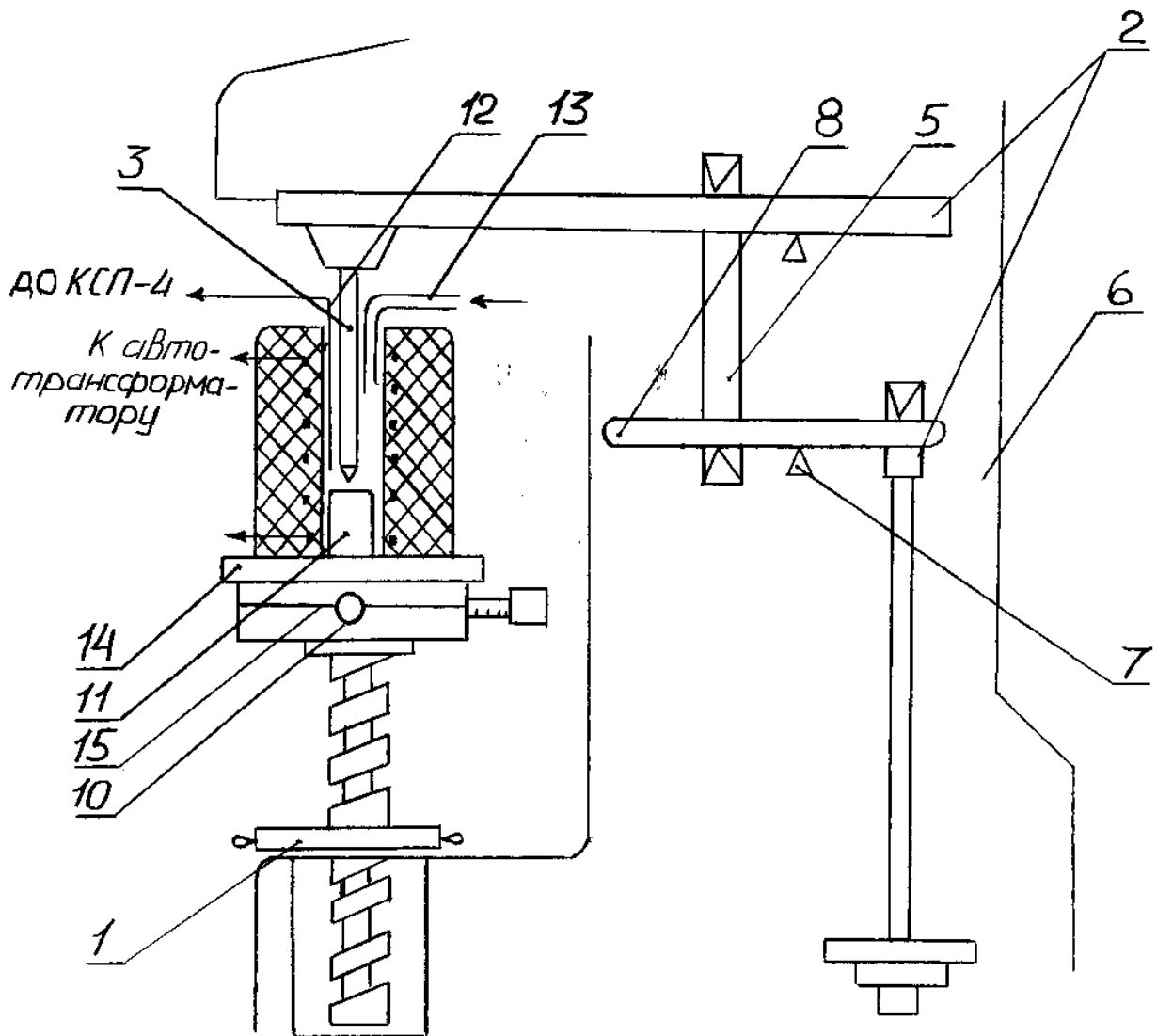
За допомогою навантажувального вузла проводять зближення зразка з індикатором до відстані 1...2 мм. У такому положенні проводять нагрівання зразка й індикатора до заданої температури.

Після цього подальшим обертанням гвинта проводять навантаження зразка. Момент полкового прикладання навантаження до індикатора фіксується за початком руху вгору навантажувальною шайбою.

Після витримки під навантаженням протягом 20с зразок розвантажують і зміщують зразок відносно індикатора для нанесення наступного уколу [9].

Відбитки, що відповідають одному значенню температури, розташовують на одній лінії по горизонталі, а по вертикалі розташовуються відбитки, що відповідають різним значенням температури.





1 – навантажувальний гвинт; 2 – дволанковий важіль; 3 – індикатор; 4 – навантажувальна шайба; 5 – тяга; 6 – корпус; 7 – опора; 8 – вісь шарніра; 9 – нагрівальний елемент; 10 – столик; 11 – зразок; 12 – термопара; 13 – трубка для подачі аргону; 14 – керамічна шайба; 15 – керамічний штабик.

Рисунок 2.3 – Установа для вимірювання гарячої твердості

#### 2.1.4 Визначення міцності зчеплення покриттів

Стосовно деталей літальних апаратів та ГТД визначальними показниками якості є міцність зчеплення та твердість.

Контроль цих властивостей в основному дає змогу оцінити правильність призначення режимів і умов нанесення покриттів.

Слід мати на увазі, що міцність зчеплення залежить від величини залишкових напружень, що виникли в покриттях після охолодження нанесеного шару.

Величина цих напружень залежить, зокрема, від товщини покриття, збільшуючись з її зростанням, тому в експериментах по визначенню міцності зчеплення товщини покриття на зразках-свідках повинна мало відрізнялася від товщини покриття на реальних деталях.

Відомо кілька основних методів кількісної оцінки зазначених властивостей покриттів. При їх виборі слід виходити з того, що вони повинні забезпечити:

- можливість кількісної інтерпретації результатів;
- максимальне наближення лабораторних умов випробувань до реальних умов експлуатації;
- можливість співставлення одержаних результатів із попереднього відомими даними;
- доступність, простоту й економічну доцільність.

При визначенні міцності зчеплення дозволяється виключати з розгляду не більше двох зразків, що мають розкид понад 30%.

Міцність зчеплення конкретного покриття не повинна бути нижче величини, встановленої технологічною інструкцією по його нанесенню.

### **2.1.5 Проведення металографічних досліджень газотермічних покриттів**

Металографічний контроль якості покриттів необхідний при розробці технологічного процесу напилення для визначення параметрів і умов, що забезпечують оптимальні властивості напиленого шару. Він проводиться після того, як досягнуті визначені властивості покриття, які є необхідними (твердість, адгезійна міцність, зносостійкість і т.ін.). Структура, що відповідає оптимальним властивостям покриття, приймається за еталон.

У подальшому металографічний аналіз проводиться у разі одержання покриття з незадовільними властивостями для встановлення причин браку, тобто служать контролем додержання технологічного процесу нанесення покриттів. Металографічним контролем – визначають дійсну товщину покриття, щільність прилягання між шарами, між покриттям і основою, приховану пористість, характер перехідної зони, присутність непропиленних часток, кількість і розподілення окислів.

Металографічний контроль відноситься до руйнівних методів, тому він проводиться на дослідних зразках або на зразках – свідках, напилених одночасно з партією виробів. Матеріал зразка – свідка повинен бути таким же, як виробу.

При дослідженні впливу ГТП на опір деформуванню основного матеріалу за статичного і циклічного навантаження, а також залежно від характеру навантаження на покриття проводять металографічні дослідження перехідної зони та прилеглих до неї зон основного металу та покриття.

Дослідження проводять на спеціально виготовлених шліфах. Для металографічних досліджень використовують мікроскопи типу “НЕОРНОТ 21”, МБС-9, мікротвердомір ПМТ-3. Для фіксації структури перехідної зони та прилеглих до неї зон покриття і основного матеріалу застосовують чорно-білу мікрофотографію.

## 2.2 Установка для напівнатурних досліджень лопаток турбіни

Конструкція і принцип роботи.

Умови тертя, відтворені на установці МФКТ-1, досить близькі до умов лопаток турбіни, однак, не повторюють повною мірою кінематику щодо переміщення поверхонь тертя бандажних полиць. Ця невідповідність значною мірою усувається при проведенні іспитів на установці, кінематична схема якої і схема взаємодії контактуючих поверхонь приведена на рисунку 2.4. Аналіз по установках для досліджень матеріалів на фретинг-корозію показує, що дана схема в даний час є найбільш оптимальною з погляду простоти конструкції, обслуговування і проведення досліджень.

Вважаю за необхідне привести коротку теоретичну схему роботи даної установки. Випробувані лопатки 7, 8, закріплюються в ресорах 9. На валу 2 з'єднуючому електродвигун 1 з ресорою, установлений маховик 5 із грузиком 4, що створює дисбаланс при обертанні вала. Пульсуюче навантаження приводить до вібрацій ресори і лопатки і викликають коливання лопаток відносно одна до одної [10].

Амплітуда мікропереміщень лопаток може бути проконтрольована за допомогою бінокулярного мікроскопа МБС-2 при стробоскопічному висвітленні від строботометра ТСТ-100. Статичне напруження полиць лопаток здійснюється за допомогою рухливого супорта 10. Навантаження виконуються перпендикулярно контактуючим поверхням лопаток. Контроль статичного і динамічного навантажень виконується за допомогою тензодатчиків, наклеєних на одну з ресор і тензометричної апаратури типу 8АНЧ-7М і осцилографа Н 145.

Регулюючи величину статичного навантаження і дисбалансу маховика, можна забезпечити режими контактної взаємодії від режиму нерозривного контакту до взаємодії із зіткненнями.

Нагрівання лопаток до робочих температур виконується за допомогою спеціальної трубчатої печі, обладнаної обігрівачами 6 типу КЕН. Температура в зоні контактування лопаток контролюється термопарою типу ПП. Під час досліджень від пальника 5 у зону контактування лопаток подаються продукти згоряння газу. Знос пропонується вимірити за допомогою спеціально сконструйованого приладу з індикатором годинникового типу “Калібр” з ціною розподілу 2мкм.

Знос бандажної полиці лопатки варто визначати за формулою:

$$H = K_{\text{ср}} - K_{\text{ср}}', \quad (2.2)$$

де  $K_{\text{ср}}$  – середній розмір бандажних полиць лопаток до експерименту;

$K_{\text{ср}}^1$  – середній розмір лопаток після експерименту.

### **2.2.1 Методика проведення напівнатурних досліджень лопаток турбіни**

Методика проведення напівнатурних досліджень лопаток турбіни містить у собі наступні етапи:

1. провести тарировку тензометричної апаратури;
2. встановити лопатки у закріплювачах і зафіксувати так, щоб на контактних площинах залишалася ділянка незадіяної базової поверхні;
3. за допомогою копіювального паперу проконтролювати величину площі контакту і якість прилягання площин. При цьому лопатки необхідно притулити одну до одної з зусиллям, рівним постійному навантаженню, яке задається. Орієнтацію лопаток відносно одна одної проводити за допомогою кронштейна на верхній частині супорта й опорних болтів, розташованих на плані. Крім цього зсув контактних площадок відносно один одного для

одержання необхідної площі контакту можна здійснювати, переміщаючи лопатки в протилежні сторони по кодах замків.

4. після того, як всі необхідні дії по контролю величини площі і якості прилягання контактних площин виконані, розвести лопатки обертанням гвинта на супорті.

5. контактуючі поверхні бандажних полиць знежирити бензином ГОСТ 443 – 76 чи ацетоном ГОСТ 2605 – 79.

6. Обертанням штурвала на супорті задати статичну складову навантаження на полки лопаток, контролюючи її по стрілочному приладу тензозусилювача чи по відхиленню зайчика на осцилографі. Зафіксувати супорт у цьому положенні.

7. обертанням гайки на рухливому гвинті відпустити кронштейн із термopарою вниз так, щоб лопатки вийшли в прямокутний отвір нижньої стінки камери не менш, ніж на  $2/3$  їхньої висоти. Зафіксувати камеру, вмикнути нагрівачі.

8. після досягнення необхідної температури зробити запуск електродвигуна на необхідний режим установки (при необхідності і гасовому пальнику) і зафіксувати час дослідження.

9. після закінчення досліджень відключити двигун, нагрівачі і зафіксувати кінець досліджень. Підняттям термopари вивести лопатки з зони нагрівання. Розвести лопатки й охолодити їх на повітрі.

10. зняти лопатки з установки і заміряти їхній лінійний знос. При дослідженні лопаток на напівнатурній установці вимірюється середній лінійний знос кожної лопатки. Вимір лінійного зносу проводиться за допомогою спеціального приладу з індикатором годинникового типу не менш, ніж у десятих точках контактної площадки лопатки щодо незношеної поверхні. Потім визначаємо середнє значення лінійного зносу кожної лопатки.

11. для підвищення ступеню вірогідності отриманих результатів рекомендується при фіксованих параметрах умов напруження, дослідження повторити не менш, ніж на трьох парах лопаток.

### **2.2.2 Основні технічні дані машини**

Кількість одночасно випробовуваних лопаток - 2 шт

Частота напруження -  $10 \dots 150 \text{ c}^{-1}$

Амплітуда відносних переміщень -  $15 \dots 300 \text{ мкм}$

Навантаження на контактуючі поверхні –  $10 \dots 300 \text{ Н}$

Температура дослідження –  $297 \dots 1173 \text{ К}$

Привод – електродвигун постійного струму типу МП 400 чи йому аналогічний з напругою 27 В.

Джерело живлення термокамери - мережа перемінного струму і понижуючий регульований трансформатор.

Маса установки – не більш 60 кг.

### **2.2.3 Методика виміру зносу матеріалу лопаток в умовах високотемпературної фретінг – корозії**

Основними критеріями вибору матеріалів для зміцнення і відновлення контактуючих поверхонь бандажних полиць служили результати випробувань лопаток на напівнатурні установці, моделюючої умови роботи турбіни лопаток. Кінематична схема взаємодії контактуючих поверхонь представлена на рисунку 2.4.

На установці працюють в контакті дві лопатки 6, 7, закріплені в ресорах. Одна із лопаток з'єднана з гнучким волом 2 з електродвигуном 1. На цьому ж валі встановлений маховик 3 з вантажем 4, що створює дисбаланс при обертанні вала. Виникаюча при цьому пульсуюче навантаження передається на лопатку і ресори, і виникає коливання лопаток один відносно другого.

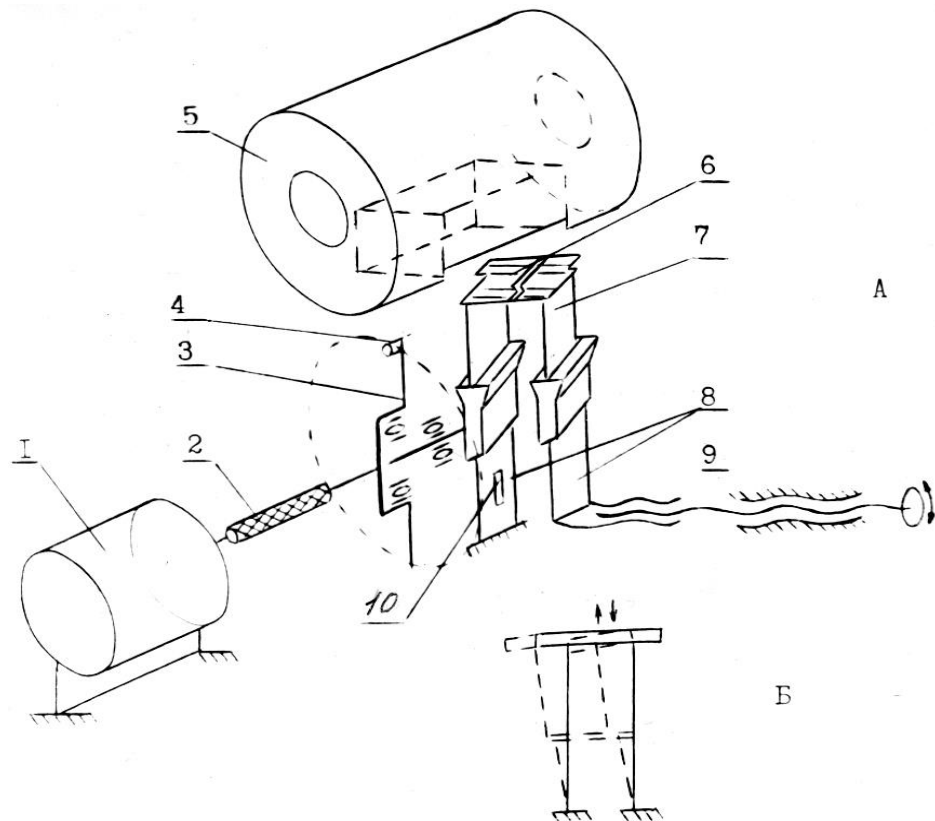
Відносне зміщення контактуючих поверхонь досягаються за рахунок різної жорсткості ресорів. Лопатка, в якій збуджуються колювання, встановлені на ресорах меншої жорсткості. Величина що обурює сили  $F$  залежить від маси навантаження, координати його установки і швидкості обертання вала:

$$F = mR\omega^2, \quad (2.3)$$

де  $m$  – вага грузка;

$R$  – відстань від вісі валу до центру ваги грузика;

$\omega$  - частота обертання валу.



1 - електродвигун; 2 - гнучкий вал; 3 - диск; 4 - грузок; 5 - електоропіч; 6, 7 - лопатки; 8 - ресори; 9 - супорти; 10 – тензодатчики

Рисунок 2.4 – Кінематична схема установки для напівнатуральних випробувань лопаток турбіни на зносостійкість (а) і схема взаємодії бандажних полиць (б).



Амплітуда мікро зміщення лопаток контролюється за допомогою бінокулярного мікроскопа при стробоскопічного освітлення від строботахометра ТСТ – 100.

Статистичне навантаження полиць лопаток (натяг) здійснюється з допомогою рухомого супорта 9, на якому встановлена лопатка з жорсткою ресорою. Навантаження виробляється перпендикулярно контактуючим поверхням лопаток. Контроль величини статистичного і динамічного навантаження відбувається за допомогою тензодатчиків 10, наклеєних на ресорі малої жорсткості, тензометричної апаратури типу 8 АНЧ – 7 М і осцилографа Н145. Регулюючи величину статистичного навантаження, можна забезпечити різні режими контактної взаємодії з зіткненням. Частоту і кількість циклів навантаження фіксували з допомогою частотоміра ЧЗ – 36. Нагрів лопаток до робочої температури виробляли за допомогою спеціальної трубчатої печі 5, обладнаною нагрівачами типу КЭИБ. Температура контролювалася термпарою, розташованою, в зоні контактування лопаток. В цій зоні контактування під час випробувань подавали від пальника продукти згорання керосину [6].

Виходячи із аналізу роботи турбінних лопаток були вибрані наступні умови проведення випробувань.

Випробування на напівнатуральних установках:

- амплітуда мікро переміщень 200 мкм;
- статистична складова навантаження  $7 \div 10$  МПа;
- перемінна складова від дисбалансу 10 МПа;
- температура 293, 953, 1073 К;
- частота навантаження  $120 \pm 2$  Гц;
- база випробувань  $250 \cdot 10^3$  циклів;
- режим контактного ковзання, взаємодії ковзання з зіткненням.

При випробуванні лопаток на напівнатурній установці виміряли середнє лінійне зношення полиць кожної лопатки і сумарного зношення лопаток.

Погрішність виміру становила  $\pm 1$  мкм. Перед установкою на випробування контактуючих поверхонь бандажних полиць обезжирювалися бензином і ацетоном, потім лопатки встановлювалися в пази елементів дисків і приводилися в зіткнення по бандажним полицям. Обертання супорта задавалося постійне складове навантаження. Лопатки вводили в робочий простір трубчатої печі і включали нагрівачі, після досягнення робочої температури виконували запуск електродвигунів установки і керосинові пальники. Після закінчення випробування піч піднімали, лопатки охолоджувалися, потім вони встановлювалися в спеціальне пристосування і відбувалось вимірювання зносу бандажних полиць.

## **Висновки до розділу 2**

Розробка технології відновлення спрацьованих поверхонь газотермічним напиленням вимагає всебічного дослідження як триботехнічних характеристик матеріалів, що пропонуються для використання, так і показників фізико-механічних властивостей.

У зв'язку з тим, що всі газотермічні покриття, як правило знижують міцність основного матеріалу, вивчення можливої зміни характеристик міцності повинне займати в процесі розробки технології особливе, самостійне місце.

## РОЗДІЛ 3

### ВИБІР ЗНОСОСТІЙКИХ ПОКРИТІЙ ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ

Даний розділ дипломної роботи присвячений розробці методології вибору покриття та методик і установок для лабораторних досліджень механічних властивостей і матеріалів з ГТП.

Метою цих досліджень є вибір матеріалів для відновлення деталей літальних апаратів і ГТД, які за своїми фізико-механічними властивостями та зносостійкістю повинні відповідати високим вимогам щодо надійності.

#### **3.1 Аналіз умов роботи та характеру експлуатаційних пошкоджень бандажних лопаток турбіни**

Основною причиною відбракованих лопаток турбіни сучасних ГТД являється знос контактуючих поверхонь бандажних полиць, в наслідок яких натяг в спряженні становиться або менше заданого, або появиться зазор. В останньому випадку посилюючі коливання лопаток можуть призвести до їх руйнування [3].

Аналіз статистичних даних про кількість відбракованих лопаток при I та II ремонтах на прийомі ГТД Д – 36 показує, що при I ремонті в брак надходить 10 – 15% лопаток із комплекту, а при другому ремонті процент відбракованих лопаток подвоюється, не дивлячи на те, що при першому ремонті натяг, заданий кресленням, встановлюється за рахунок встановлення лопаток. Очевидно, в поверхневих шарах контактуючих поверхонь не відбракованих лопаток відбувається такі структурні зміни матеріалу, які обумовлюють інтенсифікацію зносу при подальшій експлуатації лопаток.

Про це, наприклад, свідчить і гістограма зносу бандажних полиць лопаток турбіни II ступені ГТД Д – 36, які будуть приведені нижче. Із

приведених даних навіть з урахуванням максимального допуску на розмірі лопаток по „зигам” бандажних полиць можна зробити висновки, що перед II ремонтом, доля лопаток, працюючих з зіткненням, збільшується.

Знос вимірюється по відношенню до непошкодженої ділянки, становив для полиць із сторони коритця 0.45...0,65 мм, а із сторони спинки лопатки 0.45...0,55 мм. Площа контакту бандажних полиць займає 95...96 % номінальної площі. Зношені поверхні мають темний колір з явним вираженням ямки, зливаючи в борозни та вм'ятини. Борозни та вм'ятини мають чітку орієнтацію, вказуючи напрямлення мікро переміщень.

Аналіз умов роботи лопаток і конструктивних особливостей їх закріплення дозволяє вважати, що величина питомого навантаження на контактуючих площадках бандажних полиць лопаток турбіни ГТД Д-36 в залежності від фактичних розмірів бандажних полиць може коливатися в границях 7... 10 МПа. За рахунок дії газодинамічних та відцентрових сил може виникати допоміжне навантаження до 10 МПа. Для отримання в лабораторних випробуваннях величини зносу порівняно з експлуатаційними, необхідно форсування режиму навантаження, наприклад, по амплітуді мікро переміщень бандажних полиць в 3...4 рази [1].

Виходячи із результатів аналізів пошкоджень, умов роботи лопаток і попередніх результатів випробувань лопаток на напівнатурній установці були вибрані наступні основні параметри режиму напруження при навантаженнях напівнатурних випробувань лопаток: статистичне навантаження 7...10 МПа, динамічна складова навантаження 10 МПа, амплітуда мікро переміщень бандажних полиць 200 мкм, база випробувань  $250 \times 10^3$  циклів, частота навантаження  $120 \pm 2$  Гц, температура 293, 953, 1073 К.

### 3.2 Особливості високотемпературної фретінг – корозії матеріалів лопаток турбіни

Дослідження зношення матеріалу, використаних для виготовлення деталей гарячого тракту авіадвигунів та працюючих в умовах контактних вібропереміщень, показали, що кінематика процесів, що протікають при терті жароміцних і жаростійких матеріалів мають ряд особливостей.

Ці особливості зв'язані, в першу чергу, з різною інтенсивністю протікання і різною роллю окислення металічних поверхонь при фретінг – корозії в умовах нормальних і підвищених температур. При фретінг – корозії окисленню піддаються такі матеріали, як нержавіючі сталі, сплави на основі нікелю, титана, які в звичайних умовах добре протистоять атмосферній корозії [1, 2].

В умовах підвищеної температури порошкоподібні продукти утворюються в малій кількості, поверхня тертя покриті плівкою окислів, що запобігає адгезійного взаємодії та схоплювання. Однаково руйнування окисної плівки при підвищених температурах на конструкційних сталях може викликати ще більше пошкодження, ніж при кімнатній температурі.

Для деталей гарячого тракту газотурбінних двигунів використовуються сталі з підвищеним змістом нікелю, хрому, титана та сплавів на основі нікелю, кобальту з добавками молібдену, вольфраму, ніобію та ін.. елементів.

Процес фретінгу при підвищених температурах на сплавах нікелю утворюють плівки типу „глазури”. До температури 873 К в складі „глазури” присутній окис NiO, а в остаточно сформованої „глазури” при температурі 1073 К шпінель  $NiO \times Cr_2O_3$  та окисел  $Cr_2O_3$ . Вважається, що „глазури” формуються із частинок окислів діаметром 10...50 мкм і під дією механічного фактору ущільнюються. При цьому утворюються тверді блискучі поверхні, ковзання яких один по одному відбуваються з мінімальним тертям по порівнянні з взаємодією металевих поверхонь в аналогічних умовах.

На сплавах нікелю при температури 837...1073 К споглядається зниження як загального, так і локального зносу. В області порівняно низьких температур (237...473 К) зберігається втомлено – окислювальний механізм зношування. З подальшим підвищенням температури швидкість окислення може привисити швидкість зношування окисних плівок. Зношування локалізується на фактичних плямах контакту, при цьому спільна дія окислення і температурного фактору викликають утворення в поверхневому шарі текстурованих зон з високою твердістю.

Таким чином, високо температурна фретінг – корозія матеріалів лопаток турбіни характеризуються наступними особливостями:

- в області робочих температур для матеріалів лопаток ГТД вирішальну роль здобуває співвідношення твердості окисних плівок і текстурованих зон з твердістю основи;

- втомленість – окислювальний механізм зношування не являється ведучим при високих температурах.

Основну роль при високотемпературної фретінг – корозії грають адгезіоно – окислювальний процес.

### **3.3 Аналіз технологічних методів, що дозволяють повисити зносостійкість бандажних полиць**

Як показали результати досліджень зношування бандажних полиць лопаток турбіни двигуна Д-36, матеріали лопаток володіють неостаточною зносостійкістю в експлуатації і вже при першому ремонті частина лопаток по цій причині відбраковується. В загальному випадку зносостійкість матеріалів в умовах високотемпературної фретінг – корозії зв'язані з окалиностійкістю жароміцністю і жаростійкістю. По цій причині для підвищення зносостійких бандажних полиць доцільно використовувати композиційні покриття на основі

тугоплавких карбідів, спеціальних наплавочних сплавів, насичення поверхні лопаток елементами, здібними утворити зміцнюючу фазу.

Реалізація вказаних заходів може бути здійснена різними технологічними методами. Відновлення бандажних полиць здійснюється детонаційним і плазмовим напиленням покритій на основі карбиду хрому, наплавкою, напайкою, дифузійною зваркою спеціальних сплавів, дифузійним насиченням. Переваги газо термічних методів являють можливість отримання композицій із тугоплавких з'єднань із зв'язкою із нікелю або хрому. Тверді карбіди забезпечують покриттю зносостійкість і жаростійкість, а „м'яка ” плівка NiO на зв'язці – добру припрацьовуваність. Перевагу із двох методів потрібно віддавати детонаційному напиленню, яке дає більш високу адгезію покриття і має найкращий коефіцієнт використання матеріалів, що не маловажно при відновленні бандажних полиць, мають невелику площу контактуючих поверхонь. Загальний недостаток методів ГТН - невисока адгезія покриття і основні, яка може виявитися неостаточною при динамічному характері контактної взаємодії полиць [5].

Для відновлення бандажних полиць лопаток турбіни ГТД необхідно дослідити зносостійкість матеріалу, нанесення методами газо-термічного напилення, на плавки і напайки. Основні напрямлення досліджені: підбором матеріалів, по зносостійкості не вступають основному матеріалу лопаток, маючи мінімальну різницю коефіцієнтів термічного розширення і максимальну стійкість до тепло зміни.



### **3.4 Порівняльна оцінка зносостійкості та фізико-механічних властивостей порошкових і монолітних матеріалів для зміцнення бандажних полиць**

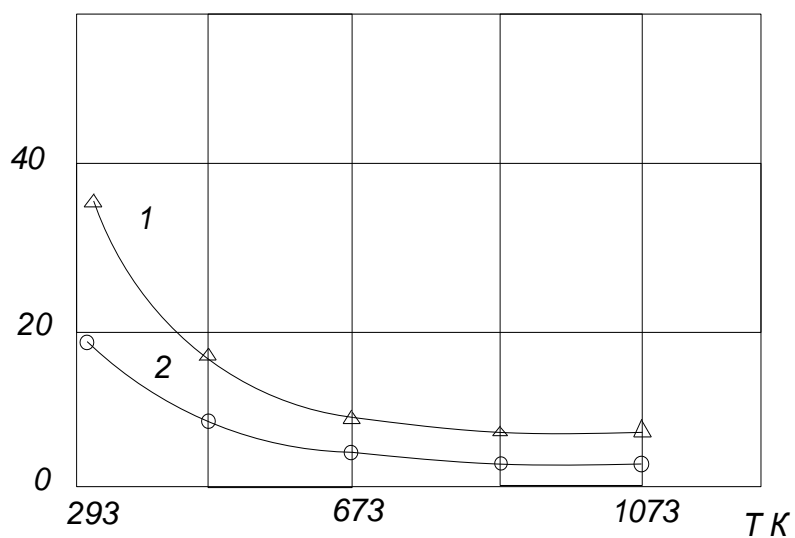
Для гарячого тракту сучасних авіадвигунів ГА найбільш широке використання знайшли сплави на основі нікелю ЖС-6К і EI 437 Б.В якості матеріалу працюючих лопаток перших, найбільш термонапружених ступіней турбіни ГТД, частіше всього використовується сплав ЖС-6К. По цій причині для порівняльної оцінки ефективності різноманітних технологічних методів відновлення і зміцнення бандажних полиць лопаток турбін був вибраний сплав ЖС-6К. Про поведінку сплавів ЖС-6К і EI-437 Б в умовах високих температур та віброконтактного напруження можна судити по висновках випробувань, проведених на стандартних зразках. (рисунок 3.1)

Величина зносу оцінюється по двом параметрах  $H_1$  і  $H_2$ , де параметр  $H_1$  являє середній лінійний знос, виявлений по методиці ГОСТ 23.211-80, а параметр  $H_2$  являє середнім квадратичним відхиленням від точок реле фа поверхні тертя.

Вплив температури на середній (а) і локальний (б) знос сплавів EI-437Б і ЖС-6К при високотемпературних фретінг корозій. Параметр  $H_2$  характеризує нерегулярність рельєфу поверхонь, які труться. Як видно із рисунка 3.1 найбільш середній та локальний знос споглядається при кімнатній температурі, причому сплав ЖС-6 К являє собою більш зносостійким у зрівнянні зі сплавом EI-437 Б в усьому дослідженому діапазоні температур.

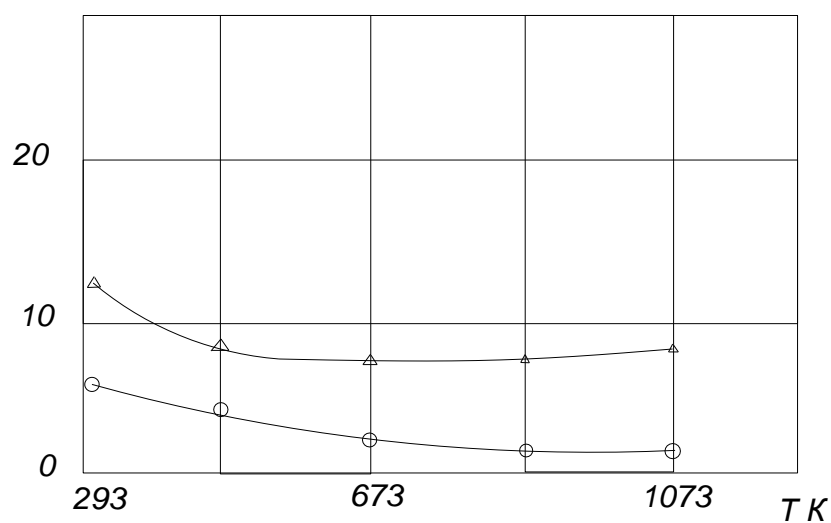
У відповідності з висновками, для проведення дослідження по оцінці ефективності різноманітних технологій зміцнення контактуючих поверхонь бандажних полок лопаток турбін вибрана наплавка-сплав ВКНА-2МТУ-1-801-262-81,напайки- сплави ВКНА-2М, ВЖЛ-2, експериментальний сплав 492 на основі кобальту, газо термічне напилення- сплав ВКНА-2М, карбід хрому, плакований нікелем (типу КХН).

H1 мкм



а

H2 мкм



б

1, 2 - сплави EI-437Б і ЖС-6К відповідно; амплітуда переміщень  
100 мкм; питоме навантаження 19,6 МПа; частота 30 Гц

Рисунок 3.1 – Зносостійкість сплавів та умови проведення випробувань

Наплавка бандажних полиць сплавом ВКНА-2М проводилась аргонно-дуговою зваркою в мідному водо-охолоджувальному пристрої на спеціальній установці. Після наплавки і механічної обробки лопатки віджигались при температурі 1223 К (витримка 2.2-5 години, середовище аргон або вакуум).

Плазмове покриття напилялось на установці УПУ-3М двома типами горілок. Плакований порошок карбїду хрому наносили плазменою горілкою типу ПП-25, а покриття із порошку ВКНА-2М- спеціальною горілкою типу ПЛ-20, розроблений в НІАТ і забезпечуючий ламінарну плазмову струю.

Сплави ВКНА-2М, ВКЛ-2 і 492 уявляють зносостійкі та жаростійкі сплави на основі нікелю і кобальту з інтерметалідним зміцненням. Сплав 492 на основі кобальту являється експериментальним. Деякі фізико-механічні властивості сплавів ВКНА-2М і ВЖЛ-2 призведені у таблиці 1.2.

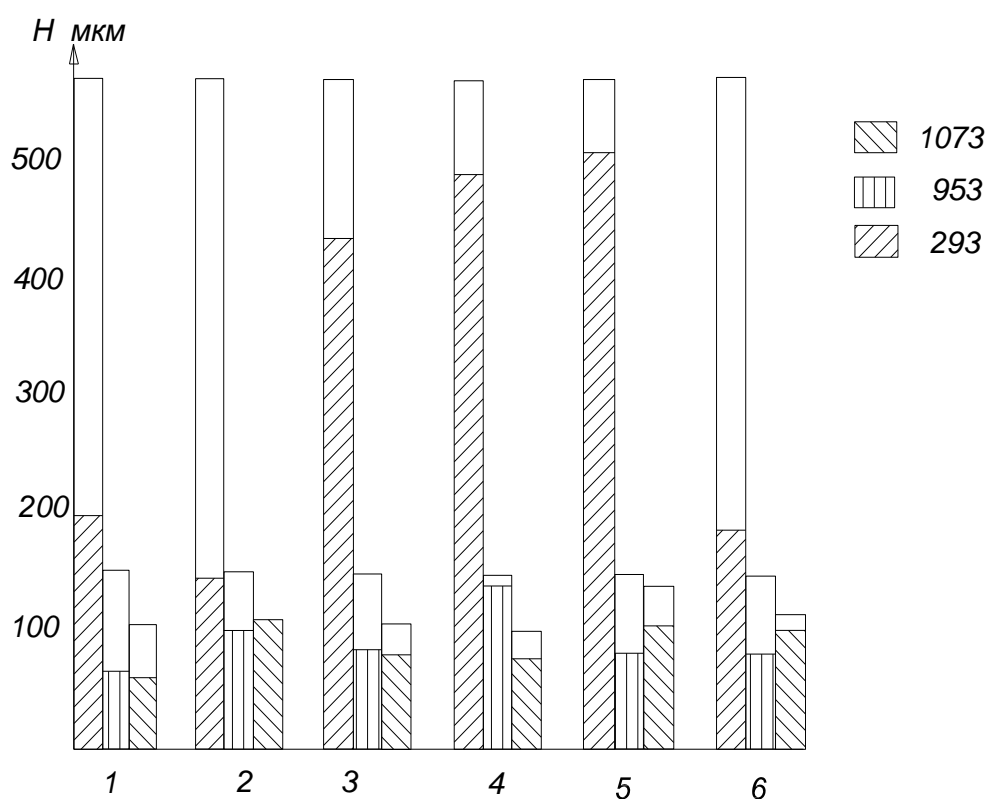
Гістограми середнього сумарного зносу бандажних полиць пар лопаток, зміцнених вказаними вище методами, приведені на рисунку 3.2.

Температури випробувань 95-3К і 1073- К були вибрані у застосуванні з режимами праці ГТД [8].

За результатами випробувань на знос, беручи до уваги здебільшого знос при підвищених температурах, кращі показники мають напайки ВЖЛ-2 і ВКНА-2М. Наплавка сплаву 492 має найбільший середній знос при підвищених температурах, однак сильно зношується при нормальній температурі. Крім цього цей сплав здатний до сильного адгезійної взаємодії при підвищених температурах, що обумовлює нерегулярний характер поверхонь тертя на відміну від напайок ВЖЛ-2 ВКНА-2М (рисунок 3.2 б, в, г). На поверхні тертя пластинки з сплаву 492 споглядають ся вириви та нарости, а в цей час в той час як площадки контакту полук з напайками ВЖЛ-2 і ВКНА-2М уявляють сукупність блискучих пятен з відносно регулярним релефом.

Наплавка ВКНА-2М по величинам зносу при всіх значеннях температур по рельфу поверхонь тертя зближується до сплаву ЖС-4К (рисунок 3.1 і 3.2 а, д).

У групі плазмових покриттів кращі результати показало покриття із плакованого карбиду хрому. Особливістю зносу бандажних полок з плазмовими покриттями являється те, що з підвищенням температури від 953К знос їх збільшується, що зв'язано вірогідно з розм'якшенням зв'язки і зміцненням покриття.



1, 2, 3 - напайка сплавами ВЖЛ-2, ВКНА-2М сплавом 492, відповідно, 4 - наплавка сплавом ВКНА-2М; 5 - напилення ламінуючої плазмою сплавом ВКНА-2М; 6 - плазмове покриття типу КХН; в кожній групі показаний пунктиром рівень зносу сплаву ЖС-6К при відповідній температурі від контактуючих поверхонь бандажних полиць після випробувань на знос при температурі 1073 К.

Рисунок 3.2 – Зносостійкість газотермічних покриттів

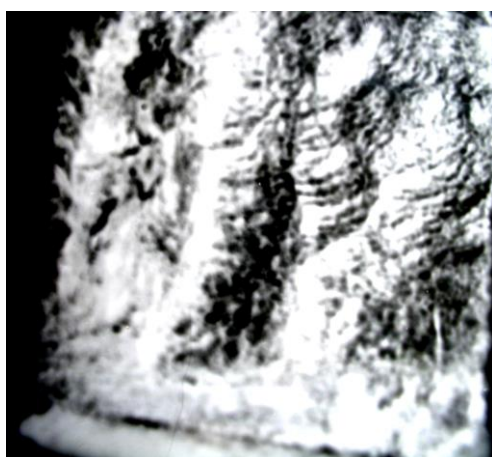
Гістограми середнього сумарного зносу сплаву ЖС-6К і матеріалів використаних для зміцнення контактуючих поверхонь бандажних полиць лопаток 1 ступені турбіни ГТД



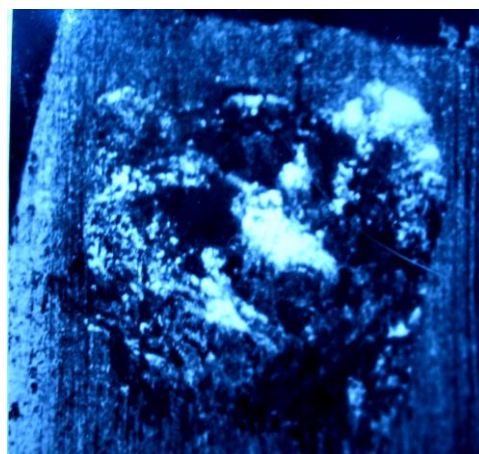
а



б



в



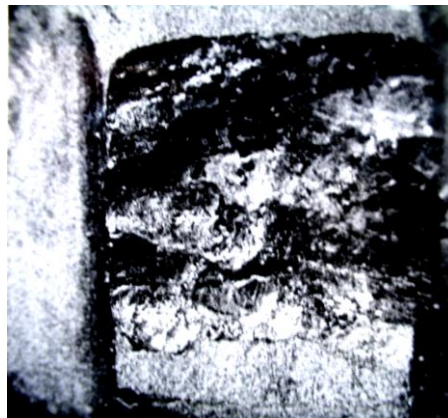
г

а) - сплав ЖС-6К; б), в), г) - напайка сплавами ВЖЛ 2,  
ВКНА-2М, 492 відповідно

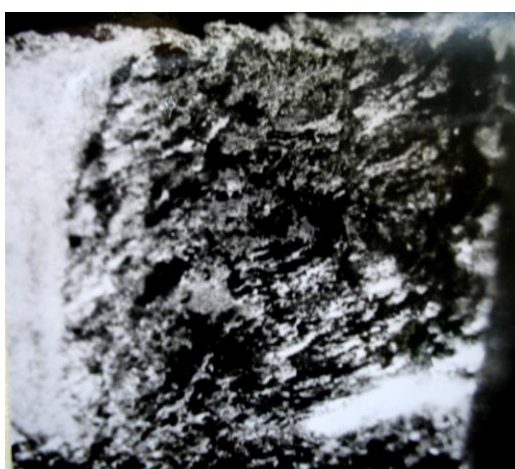
Рисунок 3.3 – Фізико-хімічні властивості сплавів ВКНА-2М і ВЖЛ-2



д



е



ж

д) - наплавна сплавом ВКНА-2М; е) - напилення ламінарною плазмою сплаву ВКНА-2М; ж) - плазмове покриття типу КХН

Продовження рисунку 3.3 – Фізико-хімічні властивості сплавів ВКНА-2М і ВЖЛ-2

Необхідно відмітити, що плазмове покриття при випробуваннях на знос мають більший розкид результатів котрі вірогідно, обумовленні нестабільністю параметрів режиму набувається напилення та обробки [9].

Поверхні тертя покриття з карбїду хрому мають за полірований вид з регулярним рельєфом (рисунок 3.3 ж).Такий вид поверхонь тертя набуває завдяки тому, що порівняльно м'яка окису нікелю NiO набувається на

плакованих частках карбіду хрому, при підвищеній температурі грає роль змазки. Вимір твердості сплаву ЖС-6К та матеріалів, використаних для зміцнення бандажних полиць, проводилось в діапазоні температур 293-1000К (рисунок 3.5) .Аналіз результатів виміру твердості показує, що ця характеристика являється значним фактором, впливаю чим на зносостійкість.

Таблиця 3.1 - Фізико-хімічні властивості сплавів ВКНА-2М і ВЖЛ-2

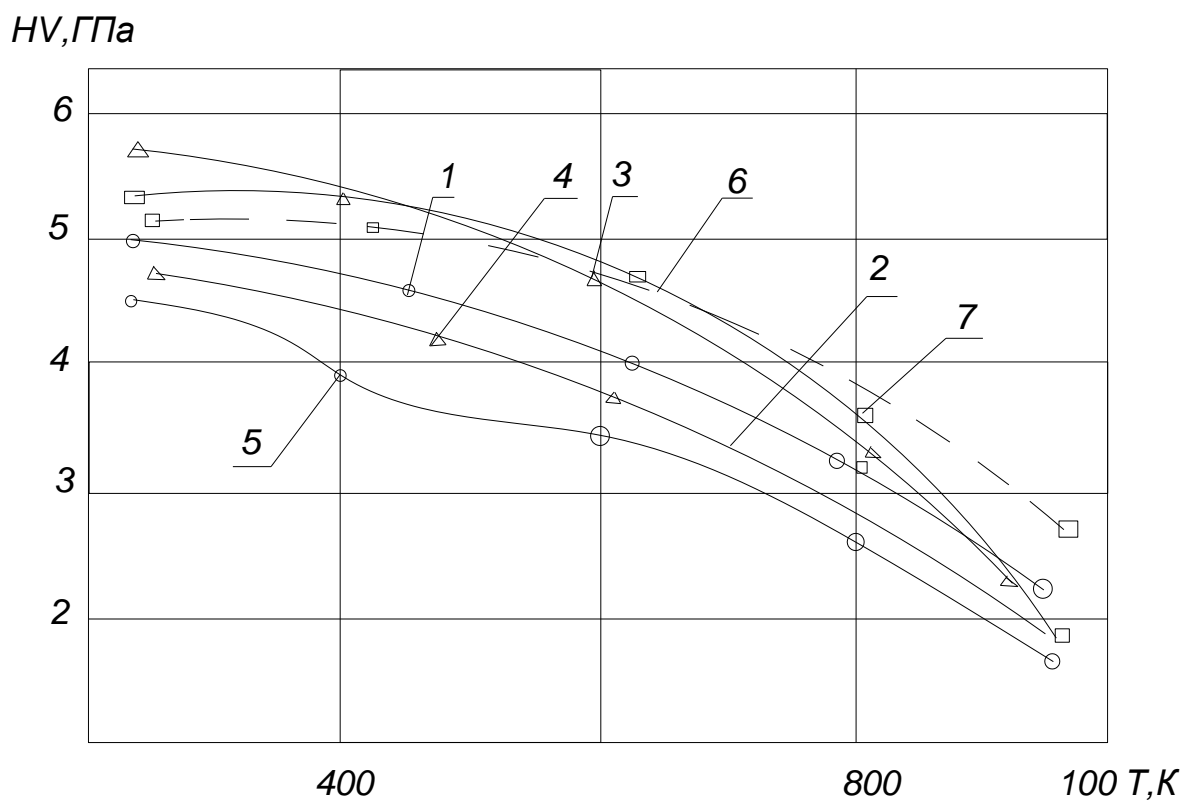
Властивості	ВКНА-2М				ВЖЛ-2			
	293 К	1173 К	1273 К	1373 К	293 К	1173 К	1273 К	1373 К
Щільність, г/см <sup>3</sup>	7,49				8,5			
Модуль нормальної пружності, МПа	18000		61000		205000			
Границя міцности, МПа	540... 630		240 300	130 150	850 900	380 430	280 320	180 200
Жаростійкість (привіс) г/м <sup>2</sup> час			0.058	0.076			0.018	0.302
КТР, град <sup>-1</sup> ·10 <sup>6</sup>	11,7	14,6	14,9	15,5	11,7	15,9	17,2	

Так, сплав ВЖЛ-2, який має мінімальний знос (рисунок 3.2) зберігає високу твердість (рисунок 3.4 крива 3) у зрівнянні з іншими матеріалами в усьому дослідженому діапазоні температур. І навпаки, сплав 492, проявляючи здатність до сильної адгезіонної взаємодії при високій температурі 1073К, супроводжується взривом часток і взаємним переносом металу, має низькі значення гарячої твердості(рисунок 3.4 крива 5).

Інші матеріали за значенням гарячої твердості займають проміжне положення між сплавами ВЖЛ-2 і сплавом 492.

Таким чином, враховується увесь комплекс проведених досліджень, для дослідження бандажних полиць працюючих лопаток турбін ГТД.Із групи наплавом та напайок можна рекомендувати напайку зі сплавами ВЖЛ-2 в

ВКНА-2М.Із групи плазмових покриттів перспективним матеріалом являється покриття на основі плакованого карбиду хрому, однак його застосування вимагає лопаткових дослідження по оптимізації технології процесу утворення покриття.



1 - напайка ВКНМ-2М; 2 - наплавка ВКНА-2М; 3 - напайка ВЖЛ-2;

4 - наплення ламінуючою плазмою ВКНА-2М, 5 - напайка сплавом 492; 6- плазмове покриття типу КХН; 7- сплав ЖС-6К

Рисунок 3.5 – Залежність твердості на плавок, напайок та плазмових покриттів від температури



### **3.5 Методологія вибору покриттів при розв'язанні задач підвищення зносостійкості та відновлення деталей**

#### **3.5.1 Розробка основних технічних, виробничих і економічних напрямів, дослідження яке необхідне при створенні концепції покриття**

Діяльність багатьох фірм як вітчизняних, так і зарубіжних сконцентрована на розробках методів по створенню зносостійких і антифрикційних покриттів. Методи й технології нанесення їх широко впроваджені на більшості підприємств і викладені в багатьох монографіях, журналах, збірниках.

Однак зміни експлуатаційних параметрів (збільшення швидкості, навантажень і ресурсів) висувають нові вимоги до покриттів, постійно ускладнюючи задачу технологів у створенні нових складів і технологій нанесення їх, тобто у розробці нового рішення. Тим більше, що конструювання зносостійких покриттів є складною задачею, оскільки процес спрацювання супроводжується складними фізико-хімічними явищами й багатьма формами [11].

Ураховуючи це, останніми роками з'явилися роботи, (3), в яких пропонують різні методики розробки покриття для конкретних вузлів з наперед заданими властивостями. Так наприклад, може бути запропонована така послідовність вибору схеми створення зносостійкого покриття:

- аналіз конкретної триботехнічної системи;
- вибір технічно реалізованих варіантів методів утворення покриттів;
- вибір експертним методом варіанту утворення покриттів, орієнтованого на конкретний приклад навантаження;
- оцінка варіантів рішень за технічними й економічними критеріями.

На підставі аналізу літературних даних за методиками розробки зносостійких покриттів нами визначено такі техніко-економічні питання, розкриття яких необхідне для створення концепції нового покриття:

- 1 – експлуатаційні результати попереднього рішення;
- 2 – розробка рішення в процесі проектування;
- 3 – розробка рішення з точки зору явища спрацювання;
- 4 – методи нанесення покриттів і їх можливості;
- 5 – економічне обґрунтування запланованого рішення.

Експлуатаційні результати попереднього рішення.

У цьому підрозділі важливим є дослідження деталі, підданій спрацюванню, та якості її, що проявилися в процесі експлуатації, а саме:

- який опір зсуву;
- як нагрівається деталь;
- які вібрації;
- деформації (на холоді), повзучість (при нагріванні);
- втрати товщини шару, ваги, зменшення розмірів;
- спрацювання поза захищеною зоною;
- зміни поверхні;
- стан структури на глибині.

Зміни поверхні в свою чергу дали змогу виявити й ідентифікувати процеси, що лежать в основі спрацювання: перенос, сколювання, зумовлені зчепленням; подряпини більш або менш глибокі, зумовлені абразивним спрацюванням; мікрофарбування, зумовлене втомленістю поверхневого шару.

Визначивши основні процеси спрацювання, можна ідентифікувати супутні процеси:

- винесення матеріалу, зумовлене тангенціальною ерозією;
- вибоїни, спричинені навігацією;
- утворення порошку, спричинене фретинг-корозією. Стан структури по глибині характеризується формою продуктів спрацювання;

- луската свідчить про адгезійне спрацювання;
- спіралеподібні частинки говорять про абразивне спрацювання;
- частинки у вигляді паралелепіпедів означають спрацювання, зумовлене втомленістю поверхневого шару;
- розкладання фази на окремих ділянках свідчать про корозійне спрацювання.

Розробка рішення в процесі проектування.

При підготовці рішення в процесі проектування необхідно знати:

- призначення, використання і продуктивність вибору;
- розміри, потужність, швидкість, питоме навантаження;
- температуру, середовище;
- призначення, роль, розміри трибоелемента;
- випробуване зусилля, швидкість, куб насадки, поверхню й площу контакту;
- тривалість прикладеного зусилля, повторюваність зусиль і термічні цикли.

Після визначення вищезазначених аспектів можна виявити: умови тертя без мастильного матеріалу і з мастилом (рідким, твердим, газоподібним), схему контакту (плоскість – плоскість, циліндр – плоскість, вал – втулка), характер впливу (питоме навантаження, питоме навантаження і швидкість ковзання, питоме навантаження і швидкість удару, термічні напруги, фаза + корозія) [1].

Питоме навантаження – зусилля на одиницю поверхні без розгляду того, що відбувається у зоні контакту. Необхідно врахувати не лише загальний тиск, а й хороше з'єднання, випадкове нагрівання й особливо адгезійні характеристики покриттів, а також макро й мікро стан поверхні, тобто дійсний тиск у зоні контакту.

Питоме навантаження і швидкість ковзання (параметр  $\mu$ ). Для кожного покриття існує своя допустима межа, перевищення якої спричиняє нагрівання, що призводить до зниження триботехнічних характеристик.

Тиск і швидкість удару. Сильний удар може призвести до крихкого руйнування. Менш сильний удар, але повторюваний може призвести до руйнування від утомленості.

Термічні цикли (з більшою або меншою частотою) породжують термічні напруження, що призводять до втомленості поверхневого шару.

Проаналізувавши характер впливу, його можна ідентифікувати. Як параметр, узагальнюючий всі випадки напруження, приймається сукупний тиск. Він може відрізнятися за величиною: малою, середньою, високою; бути динамічним залежно від швидкості удару; циклічним залежно від повторюваності зусиль або ударів.

Оскільки характер дії має вплив на характеристики металічної основи покриття, необхідно мати таку інформацію:

- хімічний склад їх забруднення;
- фізичні характеристики (температура плавлення, коефіцієнт дилотації, теплопровідність);
- фізико-хімічні характеристики; макроструктура (пористість, присутність окислів); мікроструктура (природа, кристалічна структура, процентне вміщення летючих елементів, дисперсність, розподіл твердих складових);
- матриця (природа, мікротвердість);
- механічні характеристики (твердість при температурі експлуатації, міцність на стискання, міцність від утомленості);
- покриття-підкладка (сила відриву, існування залишкових напружень).

Розробка рішення щодо явища спрацювання.

Зібрана інформація в процесі експлуатації та проектування повинна віднайти певне значення при відпрацюванні рішення щодо явища спрацювання. Оскільки адгезійно, абразивне спрацювання або спрацювання від втомленості можуть привести до повної модифікації навантажень. Щоб повернутися до “нормальних навантажень” потрібно інколи просто змінити умови експлуатації. З іншого боку зовнішній вигляд поверхні, підлеглий спрацюванню, дає змогу визначити локалізацію руйнування, якщо напруження є повністю поверхневим. Якщо ж вони діють на глибину, це вказує на в'язкість нанесеного покриття, на хороше зчеплення його з підкладкою, а також на велику величину тиску, що діє на покриття.

Дослідження поверхні, підданій спрацюванню, дає змогу встановити не лише процеси тертя, але й здійснити підбір характеристик покриття. Характеристики покриття необхідно порівняти з характеристиками, що звичайно рекомендують для даного процесу спрацювання, тобто:

- одержаними в результаті статичного вивчення;
- металургійними критеріями, встановленими досвідом. Основними характеристиками покриття є хімічний склад і мікроструктура їх.

Механічні характеристики є складними у визначенні та не завжди відображають можливості покриття [6].

Таким чином можна встановити придатність покриття. Якщо спрацювання є незначним і характеристики покриття узгоджуються з шуканими, то покриття є придатним і немає смислу його змінювати в технічному плані. При подальшій експлуатації покриття можливе незначне поліпшення його триботехнічних властивостей.

Методика нанесення покриттів і їх можливості.

Щоб здійснити рішення, необхідно знати:

- операційні можливості виробництва;

- можливості контролю якості поверхонь покриття, що наноситься;
- можливості механічної обробки.

Методи нанесення газотермічних покриттів.

- Плазмене напилення;
- імпульсно-плазмене напилення;
- детонаційне напилення;
- газополуменеве напилення.

Контроль якості покриттів.

Контроль якості покриттів є необхідним елементом технології, що забезпечує її надійність в умовах виробництва. Застосовувані методи контролю якості покриттів діляться на неруйнівні та руйнівні.

Неруйнівні методи контролю:

- контроль зовнішнього вигляду;
- контроль товщини покриття;
- жорсткість покриття в напиленому стані порівняно з еталоном;
- метод нанесення паст і змазування;
- ультразвуковий метод.

Руйнівні методи контролю якості покриттів застосовуються переважно при випробуваннях зразків-свідків. До основних показників якості покриття, що визначаються руйнівними методами, відносяться: міцність зчеплення (на відрив, на вигин, на зріз), пористість (загальна, відкрита, наскрізна), зносостійкість, макро- і мікротвердість покриття, міцність матеріалу покриття на розрив, стискання та міцність від утомленості [2].

Механічна обробка покриттів.

Нанесення покриттів є одною з проміжних операцій формоутворення деталі із заданими формою, розмірами і комплексом властивостей. Однак

поверхні не набувають необхідних параметрів після напилення, через що вони підлягають механічній обробці.

Існують декілька методів механічної обробки:

- обробка різанням;
- точіння;
- шліфування;
- інші методи (для чистової обробки покриттів застосовують тонке шліфування, доводку, хонінгування, тонку розточку алмазним інструментом, полірування).

Економічне обґрунтування планового рішення.

Для здійснення прийнятого рішення з точки зору собівартості та економічності необхідно знати:

- собівартість (витрати на дослідження, постачання, підготовку виробництва, операції контролю);
- ступінь шуканої якості: оптимізація та відновлюваність.

### **3.5.2 Методика вибору покриття з урахуванням забезпечення міцності деталі**

Велике різноманіття конструктивно-технологічних варіантів виконання деталей і вузлів сучасних машин, складний комплекс чинників, характеризуючи умови їх експлуатації, виключають можливість використання будь-яких універсальних способів захисту від фретингкорозії. Також відсутні універсальні методи, що дають змогу без будь-яких обмежень відновлювати спрацьовані деталі. У загальному випадку методика вибору покриттів при розв'язанні задач підвищення зносостійкості та відновлення деталей, пошкоджених фретинг-корозією, може бути представлена алгоритмом, схема якого зображена на рисунку 3.6.

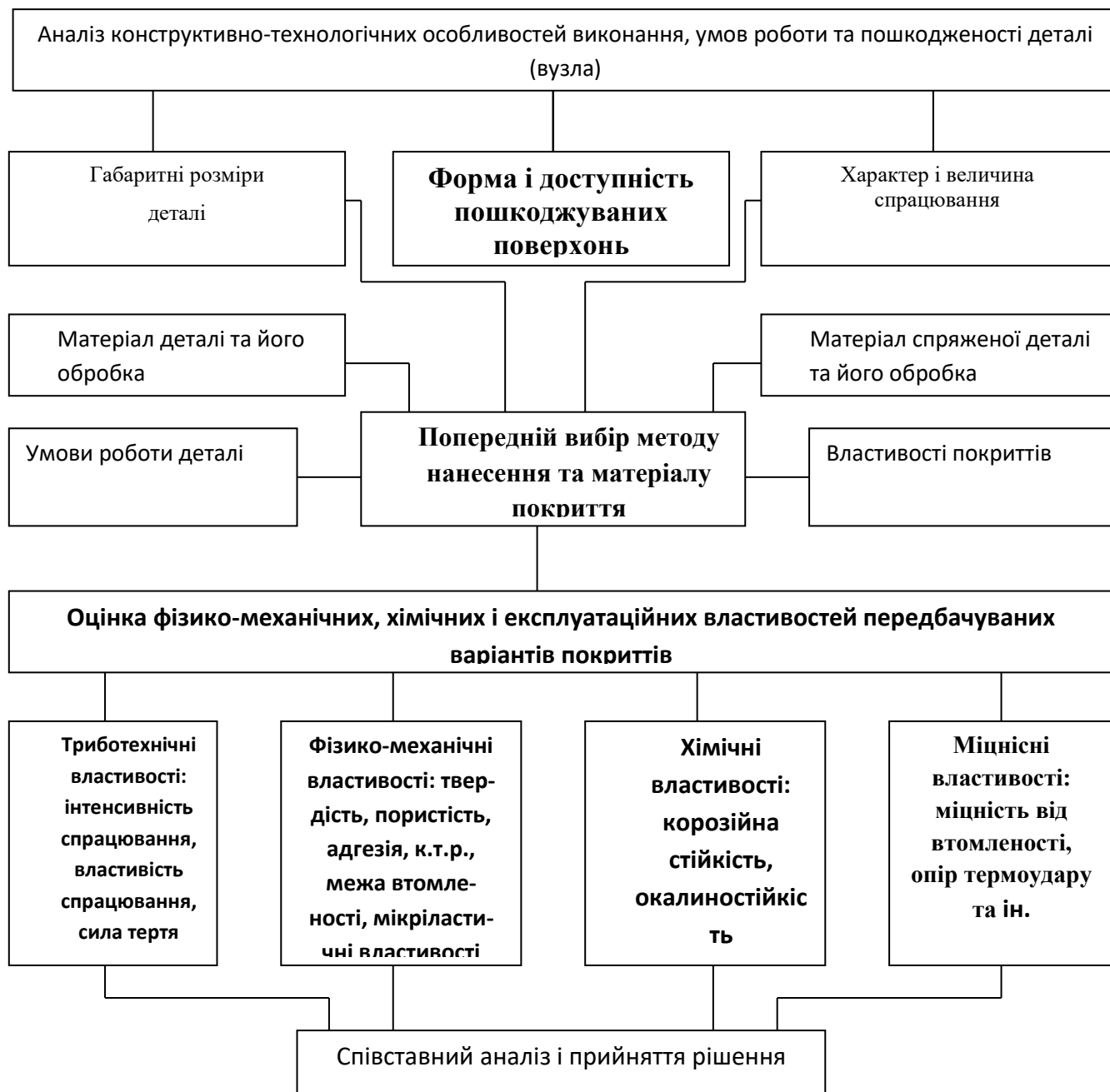


Рисунок 3.6 – Алгоритм вибору покриттів для розв’язання задач підвищення стійкості проти спрацювання деталей

На початку першого етапу аналізується інформація про конструктивно-технологічні особливості виконання деталі: габаритні розміри, форма і доступність пошкоджуваних поверхонь, матеріал і його обробка та ін. Зважаючи на ці дані, визначають можливість нанесення покриттів існуючими



технологічними методами. При виборі покриттів для відновлення додатково аналізується умова ремонтпридатності. У цьому разі необхідно провести металографічний аналіз пошкодженої поверхні та визначити характер і величину спрацювання (глибину пошкоджень). Оцінка ремонтпридатності полягає в порівнянні спрацювання деталі й оптимальної товщини покриття, забезпечуваної даним технологічним методом.

Товщина покриття повинна бути більше величини спрацювання з урахуванням видалення дефектного шару припуску на механічну обробку покриття. Зменшення розміру деталі після зняття дефектного шару не повинно призводити до недопустимого зниження міцності.

Наступна інформація необхідна для вибору покриття, - це умови роботи деталі. Аналізуючи умови роботи, необхідно одержати такі відомості:

- тип контакту сполучених поверхонь; матеріал і обробка сполучених деталей;
- діапазон робочих температур і робоче середовище;
- рівень діючих об'ємних і контактних навантажень;
- частота і амплітуда вібропереміщень;
- призначений ресурс та ін.

Залежно від умов роботи деталі при виконанні службових функцій у складі вузла або агрегату встановлюються вимоги до властивостей покриття.

Слід сказати, що на етапі проектування розвиток у сполученні фретинг-корозії не завжди можливо передбачити. Тому оцінку параметрів віброконтактного навантаження при аналізі умов роботи деталі у більшості випадків має приблизний характер. Величини діючих контактних навантажень і амплітуд вібропереміщень можуть бути визначені розрахунками, враховуючи дані про передані сполученням зусиллях, геометрії та умовах контактування деталей. Джерелом інформації для визначення амплітудно-вантажних параметрів взаємодії контактуючих деталей може бути також трасологічний аналіз місць пошкодження [3].

На підставі аналізу результатів конструктивно-технологічних особливостей виконання та умов роботи деталі проводиться попередній вибір методу нанесення та матеріалу покриття. На цьому етапі можуть бути виділені кілька варіантів покриття, задовольняючи необхідним вимогам.

Тут враховуються такі основні чинники:

- існування освоєної технології та необхідних матеріалів;
- можливість нанесення покриттів, урахувавши матеріал деталі, її габаритні розміри, розташування та геометрії пошкодженої поверхні;
- забезпечення необхідної товщини нарощуваного шару;
- можливості та ефективності роботи при заданих умовах експлуатації.

На етапі лабораторних досліджень необхідно одержати експериментальні дані, сукупність яких визначає працездатність деталі з покриттями. Кількість таких показників залежить від умов роботи деталі й виконуваних службових функцій.

Аналіз причин відказів через розвиток фретинг-корозії дає змогу виділити такі триботехнічні критерії, що впливають на роботоздатність деталей:

- інтенсивність спрацювання та здатність до спрацювання матеріалу деталі;
- величина і характер зміни коефіцієнта тертя в трибострумені;
- схильність до зчеплення матеріалів сполучених деталей;
- об'єм утворюваних продуктів спрацювання;
- характер руйнування поверхонь.

Інтенсивність спрацювання матеріалу та його здатність до спрацювання по відношенню до матеріалу сполученої деталі є визначальними критеріями у разі, коли роботоздатність сполучення порушується через появу між деталями зазору певної величини внаслідок спрацювання. У випадках, коли втрата роботоздатності настає з причини заклинення або тугого ходу, визначальними трибопоказниками можуть бути коефіцієнт тертя або об'єм утворюваних

продуктів спрацювання. Останній залежить як від інтенсивності спрацювання, так і від природи контактуючих матеріалів, та відіграє визначальну роль у тих випадках, коли продукти спрацювання можуть накопичуватися в зоні контакту.

Високе значення коефіцієнта тертя в сполученнях, де має місце розвиток фретинг-корозії, може бути як позитивним, так і негативним. З одного боку, підвищуючи коефіцієнти тертя, можна знизити амплітуду відносного переміщення деталей, а отже, й інтенсивність спрацювання. З другого, високе значення коефіцієнта тертя у разі, коли деталь одночасно підпадає під об'ємне циклічне навантаження, стає чинником, сприятливим руйнуванню від утомленості [4].

При виконанні триботехнічних досліджень щодо вибору матеріалу та технології нанесення покриттів оцінка їх ефективності для прийняття рішення повинна виконуватися в першу чергу за тими критеріями, що відіграють основну роль у забезпеченості надійності та ресурсу роботи сполучених деталей. Тут потрібно, щоб умови лабораторних випробувань максимально відповідали умовам роботи реального сполучення. Особливу увагу слід звернути на ідентичність схеми контакту. Важливість виконання умови пояснюється необхідністю виключення впливу на динаміку розвитку фретинг-пошкоджень, залежних від схеми контакту, чинників: зміни внаслідок спрацювання площі контакту і контактного тиску; доступ в зону контакту навколишнього середовища; накопичення продуктів спрацювання.

Додатково, стосовно конкретно розв'язуваної задачі, для оцінки експлуатаційної придатності покриттів можуть застосовуватися дані про такі властивості, як твердість, пористість, адгезія, корозійна стійкість, жаростійкість, опір термоудару, міцність матеріалу з покриттям, опір деформаціям і т. ін.

Слід сказати, що за великої кількості аналізованих чинників простим співставленням “кращий – гірший” не завжди можна одержати оптимальне

рішення. Припустимо, що задача вибору покриття полягає в тому, щоб із ряду покриттів, що задовольняють вимогам комплексу триботехнічних властивостей (зносостійкість, коефіцієнт тертя), витрати покриття, що має мінімальний негативний вплив на міцність матеріалу основи. Для розв'язання цієї задачі необхідно мати дані по результатах лабораторних досліджень міцнісних властивостей системи “основний матеріал – покриття” та триботехнічних властивостей аналізованих покриттів.

Для прикладу розглянемо п'ять варіантів покриттів і шість показників міцнісних і триботехнічних властивостей.

Кращі показники (максимальні або мінімальні значення) по кожному варіанту заносимо у таблицю [3].

Далі по кращим показникам “конструємо” умовне “ідеальне” покриття, що має кращі триботехнічні властивості та мінімальний негативний вплив на міцнісні властивості основного матеріалу. Так, модуль пружності нашого “ідеального” покриття відповідає модулю пружності покриття 4 (див. табл. 3.2), міцність від утомленості відповідає міцності від утомленості покриття 2, інтенсивність спрацювання відповідає інтенсивності спрацювання покриття 3 і т.д.

Одержане таким чином покриття є відображенням найкращих якостей усього набору аналізованих покриттів. Наступні дії щодо визначення оптимального покриття полягають у аналізі кожного покриття з набору відносно одержаного “ідеального”.

Відносне відхилення значення і-го параметру j-го покриття від значення і-го параметра “ідеального покриття” визначається за формулою:

$$H_i^j = \left| \frac{\Pi_{opt}^i - \Pi_i^j}{\Pi_{opt}^i + \Pi_i^j} \right|, \quad (3.1)$$

де  $\Pi_i^{opt}$  - значення і-го параметра “ідеального” покриття;

$\Pi_i^j$  - значення і-го параметра j-го покриття набору.

Таблиця 3.2 - Міцнісні властивості системи “основний матеріал – покриття” та триботехнічні властивості досліджуваних варіантів покриттів

Параметр Тип покриття	Модуль пружності E	Міцність втомленості $\delta_{-1}$	Міцнісне зчеплення P	Пористість n	Інтенсивність спрацювання I	Коефіціє нт тертя f
1				min		min
2		max	max			
3					min	
4	max					
5						min

Стремління відносного відхилення значення параметра  $H_i^j$  до нуля вказує на те, що значення і-го параметра j-го покриття близьке до значення параметра “ідеального” покриття.

В цілому відхилення будь-якого покриття з набору заданих від “ідеального” характеризується узагальнюючим параметром М, який враховує відносне відхилення кожного і-го параметра.

Запис цієї умови має такий вигляд:

$$M_i = \frac{1}{K} \cdot [H_E^j + H_\delta^j + H_P^j + H_n^j + H_I^j + H_f^j], \quad (3.2)$$

де К – кількість розглянутих параметрів.

Необхідно визначити значення параметра М для всіх існуючих покриттів. Покриття, що має мінімальне значення узагальнюючого параметра М є оптимальним за прийнятих умов задачі та найближче до “ідеального” покриття. Покриття мінімальним значенням параметра М створює

мінімальний негативний вплив на міцнісні властивості основного матеріалу і також є оптимальним.

Враховуючи додаткові параметри, умова оптимуму формулюється таким виразом:

$$S_j = \frac{1}{m+1} \cdot \left[ M_j + \sum_{i=1}^m P_i^j \right] \rightarrow \min, \quad (3.3)$$

де  $m$  - число додаткових параметрів;

$P_i$  – відхилення значення  $i$ -го додаткового параметра  $j$ -го покриття від значення відповідного параметра “ідеального” покриття.

На основному етапі підбирання покриття маючи значення основних і додаткових параметрів матеріалу без покриття, можна кількісно оцінити наскільки вибране оптимальне покриття змінює висхідні пружно-пластичні властивості основного матеріалу.

Отже, методика дозволяє проводити вибір покриттів з урахуванням будь-якого числа додаткових параметрів, які відображають функціональні або фізико-механічні властивості покриття, основного матеріалу або всієї системи “основний матеріал – покриття”.

Методика дає змогу:

Оптимізувати: режим попередньої підготовки поверхні; режим нанесення покриття; режим механічної та термообробки; товщину покриття.

Вибирати: матеріал покриття та метод нанесення покриття [11].

Прогнозувати: швидкість і напрямлення зміни опору деформуванню матеріалу з покриттям залежно від конструктивних особливостей деталі та сприйняття нею в процесі експлуатації навантажень; довговічність матеріалів з покриттями.

Визначати діапазон допустимих робочих напружень у матеріалі з покриттям.

### **Висновки до розділу 3**

В дипломній роботі приведений аналіз методів дослідження впливу газотермічних покриттів на міцність основного матеріалу, представлені технологічні особливості газотермічних методів нанесення покриття.

У третій частині дипломної роботи розроблено методику дослідження мікропластичних характеристик зразків з газотермічними покриттями, а також спроектовано спеціальну установку для випробування конструкційних матеріалів в умовах циклічного навантаження.

Крім того, в дипломній роботі розроблено методологію вибору покриттів при розв'язанні задач підвищення зносостійкості та відновлення деталей, а також розроблено і запропоновано для використання методики вибору покриття з урахуванням мінімально можливого негативного впливу покриття на характеристики міцності деталей.

На основі результатів досліджень, з використанням вказаної методики, рекомендовано для підвищення зносостійкості і відновлення деталей авіаційної техніки ряд детонаційних та плазмових покриттів, вказана їх оптимальна товщина, що забезпечує мінімальне зниження міцності основного матеріалу.

## РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ

### 4.1 Перелік небезпечних і шкідливих виробничих факторів, які можуть впливати на оператора ділянці відновлення деталей

У відповідності з ДСН 3.3.6.037-99. на ділянці відновлення деталей ГТД детонаційним покриттям, наплавкою та легуванням слід відмітити такі небезпечні та шкідливі фактори:

- Підвищений рівень шуму на робочому місці (при пострілах 125 дБ), що перевищує допустиме для організму значення (80-85 дБ);
- Підвищений рівень електромагнітного імпульсу (в ультрафіолетовому, інфрачервоному і ВЧ діапазоні);
- Підвищена іонізація повітря (в робочій зоні електроду при наплавці);
- Підвищена запилюваність і загазованість повітря робочої зони (продукти детонації у вигляді аерозолей);
- Підвищене значення напруги у електромережі, замикання якої може відбутися через тіло людини (380В);
- Підвищена температура поверхонь обладнання, матеріалів і повітря робочої зони (2700-3700°C).
- Підвищена запиленість повітря горючої зони продуктами взаємодії плазми з матеріалами, які підвергнуті обробці. До їх числа відносяться аерозолі, які знаходяться в якості твердої фази, різні матеріали, їхні окисли, карбіди, силіциди, бориди;
- Забруднення повітря робочої зони продуктами його радіолізу ( озон, окисли азоту), а також продуктами реакцій при плазменно-хімічній технології [12].

Перенапруга зорового та слухового аналізаторів ( яскраве освітлення плазменного струменю, шум від роботи плазмотрону).



#### **4.2 Організаційні та технічні заходи по виключенню або зменшенню рівня небезпечних та шкідливих виробничих факторів на ділянці плазменного напилення лопаток**

1. З метою виключення часткового обмеження дії на працюючих людей на ділянці відновлення рухливі елементи (такі як шківни клиноремених передач, обертаючі барабани) зачинені в металеві кожухи або захищені сітковими загорожами. Корпуси електродвигунів та станків мають заземлення, електросилові підводи до обладнання прокладені в спеціальних тунелях. Крім денного світла на ділянці передбачене штучне освітлення.

2. Для інструктажу по техніці безпеки на ділянці є спеціальний кабінет, наділений та обладнаний необхідними наглядними посібниками.

3. На ділянці передбачений вентиляційний пристрій. Для видалення з робочої зони шкідливих парів та газів застосовується витяжна вентиляція.

Споруда ділянки ремонту — одноповерхова, прямокутної форми. Від підлоги до перекриття  $H=7$ м. Ця висота вибрана з врахуванням габаритів обладнання та транспортних засобів. Підлоги в виробничому приміщенні бетонні. Стіни, стелі та внутрішні конструкції відділкових приміщень, а також огорожі мають звуковбирне облицювання та фарбуються у світлі тона з використанням цинкових та титанових білил або жовтого кольору, які поглинають ультрафіолетові промені. Всі вхідні двері відчиняються у напрямку входу. Для підтримки необхідної температури в осінньо-зимовий період року передбачене парове опілення, змонтоване під підлогою у виді змійовиків. На випадок відкриття створок є повітряно-теплові завіси. Для працівників передбачено санітарно-побутові приміщення: гардеробні з умивальником, душова кімната, приміщення для відпочинку та споживання їжі, кімнати для надання першої медичної допомоги, а також ведення лікової та санітарної профілактики [13].

В данному дипломному проекті пропонується обладнання для плазменного нанесення покриттів, в яке входять: камера для напилення, шкаф, пульт керування. Камери обладнані захисними щитами. Механізм плазмотрону зачиняється герметичною дверцятю. Все технічне обладнання на ділянці відновлення деталей газотермічними покриттями не має гострих кутів. Завдяки дверцяті камери напилення виключена можливість випадкового співдотику з плазменним струменем, температура якого  $T=20000$  К. Установа заземлена, також заземлені джерело струму та пульт керування. Для видалення виділяючихся в процесі нанесення покриттів та піскоструйної обробки шкідливих покриттів, таких як: окисли азоту, окисли нікелю, кварцева пилюка — в камері напилення покриттів, на відкидній кришці встановлений патрубок для підключення відсмоку з виробничістю  $5000-6000$  м<sup>3</sup>/год. Конструкція камери для нанесення покриття, завдяки двійним стінкам корпусу, між якими розміщений войлок двухшаровий, забезпечує зниження шуму при роботі плазмотрону. Для захисту очей від надзвичайної яркості плазменного струменю в дверцяті встановлено вікно, із склом світлофільтра марки ЕІ. Органи управління аварійними вимикачами зафарбовані в червоний колір. Для схову балонів з плазмовиробничим газом та електрокорундом для піскоструя передбачені спеціальні рампи. Транспортування, схов та експлуатація балонів повинні відповідати правилам пристрою безпечної експлуатації судів, працюючих під тиском.

Процеси навантажень та повернення дробі в піскосрумній установці, вмикання та вимикання стислого повітря механізовані. В піскостумі передбачене блокування пускових пристроїв [14].

До роботи на установці допускаються особи не менше 18 років, пройшовші медичний огляд, виховання нормам роботи на установці, які мають кваліфікаційну групу по електронезбезпеці (не нижче другої). Оператори працюючі на плазменній установці повинні періодично проходити медичне освідчення. Вони забезпечуються спеціальним одягом та взуттям, засобами

індивідуального захисту згідно “Типовим отраслевим нормам безкоштовної видачі спецодягу, спецвзуття та запобіжних пристроїв робочим та службовцям машинобудівельних та металообробних закладів”.

У випадку, якщо оператор виконує напилення деталей при відчиненій дверцяті камери напилення, його передпліччя необхідно захищати нарукавниками, відкриті ділянки шкі, шию та грудину — нагрудниками з азбестової тканини. Очі захищають від випромінення захисними щитками для зварників із склом товщиною  $\delta=2.0$  мм. Для захистення оператора від дії аерозолей використовують распіратори типу ШБ-1 “Пелюстка” по ДСН 3.3.6.042-99.

#### **4.3 Організаційні, технічні заходи по виключенню або зменшенню рівня небезпечних і шкідливих факторів на ділянці відновлення деталей**

З метою зменшення впливу на людину діючого шуму, необхідно керувати детонаційною установкою дистанційно, відокремлюючи пульт управління від технічного приміщення оглядовим вікном. Стіни з одного шару звичайної будівельної цегли дають змогу знизити рівень шуму у пульта (на робочому місці операторів) до (114-117) дБ в імпульсі.

В цих умовах доцільно використовувати навушники-антифони ПН-2К і ВЦ НУЮТ-2, за допомогою яких вдається довести рівень шуму до 78-80 дБ і проводити роботи без небезпеки для організму протягом тривалого часу.

Якщо помістити установку для детонаційного напилення в бетонний бункер, де товщина стін 0,9 м, можна знизити шум на робочому місці до норми і працювати без навушників-антифонів протягом тривалого часу [15].

Рекомендується тонку стіну боксу обладнати звуконепроникними плитами. Таким чином, 1-ша вимога до приміщення, де розміщено детонаційну установку, - відокремлення звуконепроникною перегородкою

робочого місця оператора від технологічної кімнати (боксу), де безпосередньо проводиться напилення виконано.

Корпуси електродвигуна і маніпулятора мають заземлення. Проводку до обладнання прокладено в тунелях. У боксі рекомендується застосовувати світильники ВЦА-20 або НОБ-200, а електромагнітні клапани, кабельні коробки та інші прибори, встановлені в боксі, необхідно виконати вибухобезпечно. Для інструктажів з техніки безпеки на території обладнано спеціальний кабінет з необхідними наочними посібниками.

У випадку напилення матеріалів ВК 15, ВК 20 (дискретність 45 мкм) безпосередньо після пострілу концентрація часток у повітрі становить 18 мг/м<sup>3</sup>, що у 4 рази перевищує ПДК для цього матеріалу (4мг/м<sup>3</sup>). Вміст окислів азоту в боксі становив 0,16-0,4 мг/м<sup>3</sup> безпосередньо після пострілу і швидко зменшувався. ПДК для окислів азоту у боксі 5 мг/м<sup>3</sup>. Концентрація окису вуглецю після пострілу становила 68,5 мг/м<sup>3</sup>, що більше як у 3 рази перевищує ПДК (20мг/м<sup>3</sup>). При вимірюванні запилюваності повітря використали детонаційну установку, що виконує 1 постріл в секунду. У виробничих умовах усі ці значення будуть у 3 рази більші. Отже, необхідно забезпечити виробничу вентиляцію приміщення або дозволити вхід оператора в бокс лише в респіраторі.

Якщо джерелом чадного газу є лише зріз ствола, то завислий у повітрі порошок генерується, і в місці викиду його зі ствола (за рахунок повного використання порошку на формування покриття) і в місці розташування живлення та вводу порошку в ствол – над обома цілими точками необхідно встановлювати витяжні зонти. Причому, зонти над зрізом ствола повинен проводити повітрообмін і над напилюваними виробами.

Рекомендується також приміщення для детонаційного напилення (боксу) обладнати системою аварійної вентиляції, продуктивність якої на 0,15 більше продуктивності діючої вентиляційної системи. Аварійна система повинна автоматично вмикатися, якщо концентрація горючих газів перевищила 50%

гранично допустимої. При цьому блокування повинне повністю відімкнути установку для напилення.

Інші необхідні блокування повинні відімкнути детонаційну установку, якщо припинилась подача води на охолодження ствола, перегрілись системи захисту від зворотних ударів (буфер вогнеперепинювача), не спрацював один з клапанів подачі газу, не генерується іскра в системі запалювання, відкриті двері, відокремлюючі бокс від пультового приміщення.

#### **4.4 Забезпечення пожежної та вибухової безпеки на ділянці відновлення деталей**

Оскільки детонаційна установка знаходиться в боксі, можна виконати ряд заходів по забезпеченню вибухобезпечності. Згідно ДНАОП 0.01-1.01-95. Серед них : захист оператора від осколків внаслідок випадкового вибуху (для цього скло в амбразурі повинно бути виконане з литого блоку оргскла товщиною не менше 20 мм); організація інтенсивної вентиляції в боксі для напилення; розділення електричних керуючих і газових ротаметрів (останні можуть бути розміщені на газорозподільчому пульті у боксі перед відсіком). Останні заходи дають змогу зробити пультове приміщення абсолютно безпечним що до вибуху, що спрощує його обладнання і вимоги до електроприладів.

Бокс для напилення звичайно відносять до категорії вибухонебезпечних приміщень і обладнують відповідно з вимогами.

В цілому процес детонаційного напилення віднесено до категорії А за ступенем пожежної безпеки. Сама установка для напилення відноситься до класу В, оскільки утворення вибухонебезпечних сумішей в них можливе лише внаслідок аварії або неполадок. Приміщення, відокремлені від боксу з установкою двома стінами, дверима, що утворюють тамбур або коридор, не є вибухонебезпечними.

У боксі передбачається встановлювати сигналізацію типу СГР-2-ВЧБ або СВК-3-МІ для визначення і автоматичної сигналізації у повітрі вибухонебезпечної концентрації горючих газів. Паління категорично заборонено.

У зв'язку з вибухонебезпечністю бажано розмістити установку в окремому будинку з легкоз'ємним дахом або одною із стін боксу.

Розміщення установки у підвальному приміщенні недопустимо. Бажано, щоб проміжок до найближчого виробничого приміщення був не менше 20м.

Газові рампи для кисню і ацетилену повинні бути: розташовані зовні будинку на різних (краще протилежних) стінах; старанно закриватися для попередження впливу на них випадкових факторів (вітер і т.д.), пофарбовані у зазначені кольори; забезпечені попереджувальними написами.

#### **4.5 Основні правила техніки безпеки для оператора при детонаційному напиленні**

Загальні правила.

1. До роботи на детонаційного напилення покриттів допускаються особи, що досягли 18 років, пройшли підготовку, склали іспити з професії і після проходження інструктажу на робочому місці. Всі робітники повинні проходити періодичний медогляд.

2. При проведенні напилення необхідно виконувати ДНА ОП 0.03-1.32-85.

3. Робоче приміщення повинно бути обладнане протипожежним інвентарем: вогнегасником марки ОУ-2 і ОУ-8, буграми і піском; азбестовим порошком [16].

4. Прибирання виробничих і побутових приміщень повинно виконуватися щоденно вологим способом, після закінчення кожної зміни відповідно з інструкцією з санітарного стану приміщень.

5. Монтаж крупногабаритних і важких деталей (масою понад 16 кг) і демонтаж повинні відбуватися за допомогою підйомних пристосувань.

6. Робоче місце повинно бути чистим і утримуватися в порядку.

7. Порошки для напилення повинні зберігатися в тарі з герметичною кришкою на спеціально обладнаних стелажах.

8. Всі роботи з пожежної охорони проводяться відповідно з ДНАОП 0.01-1.01-95.

Перед початком роботи:

- перевірити надійність заземлення установки і якість монтажу всього обладнання зовнішнім оглядом;

- перевірити підготовку установки і функціональних пристроїв до пуску тільки при вимкненому силовому електроживленні;

- впевнитися в надійності закриття усіх дверей, що обладнані блокуванням;

- перевірити роботу захисних блокувань. Після відкриття будь-яких дверей повинно відключитися електроживлення установки і

- увімкнутися заземлення;

- перевірити наявність на робочому місці шумознижуючих навушників, спецодягу і спецвзуття;

- ввімкнути вентиляцію з місцевим відсосом;

- перевірити наявність на робочому місці вогнегасників і засобів необхідної медичної допомоги.

Під час роботи.

Заборонено:

- допускати сторонніх осіб до обладнання;

- залишати без нагляду працююче обладнання;

- суворо забороняється палити;

- доторкатися голими руками до частин установки, які знаходяться під напругою;

- при роботі зі стисливими газами не допускається піддавати балони ударним впливам, нагріву, користуватися поблизу балонів

- відкритим вогнем, користуватися балонами, не обладнаними паспортом заводу-виготовлювача або не запломбованими.

Після закінчення роботи:

- відпрацювання установкою заданого числа розрядів повинно відключити електроживлення пульту керування. При цьому всі лампи на пульті керування повинні згаснути;

- вимкнути систему вентиляції;

- вимкнути електричний ланцюг та закрити вентиля газів балонів.

#### **4.6 Основні рекомендовані методи та засоби зниження шкідливого впливу шуму на оператора ділянки відновлення деталей**

Фундамент для стаціонарно встановленого устаткування розташовують на ґрунті ізольовано від будівельних конструкцій. К комунікаціям механічне устаткування приєднуються за допомогою гнучких вставок.

Устаткування поміщаємо в звукоізолюючі кожухи, наприклад, з пенополіуретану. Кожух встановлюють на гумових прокладках, не допускаючи його зіткнення з устаткуванням.

Для зниження рівня вібрації від приводу устаткування стінки захисного кожуху покривають вібродемпфіруючим матеріалом. Кожухи можуть бути з'ємними чи розбірними, можуть мати оглядові вікна та отвори для комунікацій чи для проходження повітря, що охолоджує закриті кожухом устаткування. В цих випадках отвори слід обладнати глушителями шуму із звукопоглинаючого матеріалу [17].

Для зниження інтенсивності відбитих звукових хвиль здійснюють акустичну обробку приміщень. Щоб запобігти відбиттю звуку стелю, стіни, підлогу тощо покривають звукопоглинаючими матеріалами.



Якщо одержане зниження шуму недостатнє, тоді встановлюють над джерелами шуму штучні звукопоглиначі чи застосовують екрани між джерелом шуму і робочим місцем, яке захищається від шуму.

Для зниження шуму газодинамічних установок на вихідних патрубках встановлюються глушители шуму різних конструкцій. Це можуть бути, наприклад, дві концентрично розташовані труби, простір між якими заповнюється мінераловатними матеріалами з оболонкою з металічної сітки. Такий глушитель може знижувати рівень шуму на 20...25 дБ у всьому діапазоні частот.

Для запобігання шуму при закриванні дверей промисловістю випускаються спеціальні пружини, що забезпечують плавне прикриття дверей.

Названі методи забезпечують зниження шуму як в джерелах його виникнення (за рахунок розробки більш досконалої конструкції), так і при його розповсюдженні та сприйнятті (організаційні заходи, засоби індивідуального захисту від шуму тощо).

Оскільки основними джерелами шуму є установка для напилання, то найбільш ефективні методи зменшення шумового забруднення довкілля пов'язані з вдосконаленням установки, їхнього робочого процесу, конструкцій, застосуванням засобів шумоглушення.

Зниження шуму установки здійснюється як шляхом допрацювання існуючих установок, так і створення нових малошумних установок. При конструюванні нових установок можна передбачити такі додаткові протишумні заходи як установку сопел з шумоглушителями, регулювання площ перерізу реактивних сопел, акустичну обробку вхідних і вихідних каналів вентилятора тощо [18].

Постановка задачі: Визначити кількість заземлювачів і довжину сполучної смуги контурного заземлювального пристрою для дослідження матеріалів на тертя та зношування від статичної електрики. Опір контуру  $R_n \leq 100$  Ом. Одиночний заземлювач – сталевий стрижень, ширина сполучної смуги  $b = 0,04$  м,

глибина закладання  $H = 2,1$  м (грунт – пісок). Відстань між кутками  $a = 2,7$  (відношення  $a/l = 1$ ).

Вхідні дані:

$K_{сез} = 2$  – коефіцієнт збільшення питомого опору ґрунту (коефіцієнт сезонності), пісок (табл. 3.3).

$l = 2,7$  м – довжина, заземлювачі – сталеві стрижні (табл. 3.4).

$d = 0,038$  м – діаметр (табл. 3.4).

$H = 2,1$  м – глибина закладення (табл. 3.4).

$b = 0,04$  м – ширина смугової сталі (табл. 3.4).

$\rho_{гн} = 10$  Ом, норма опору захисного заземлення (табл. 3.4).

$= 7 \cdot 10^2$  Ом м (табл. 3.1)

1. Діаметр стрижня беруть  $d = 0,95b$ ,  $= 7 \cdot 10^2$  Ом м. Опір одиничного заземлювача зі сталевих кутків визначаємо за формулою:

2. Орієнтовно взявши кількість забитих кутків  $n = 3$ , визначаємо довжину сполучних смуг:

Глибина закладення смуги

3. Опір розтікання струму в землі від сталевих смуг

4. Опір контурного заземлювального пристрою:

Отримане значення опору контурного заземлювального пристрою менше нормованого (т.з. менше 100 Ом ), тому беремо кількість заземлювачів  $n = 3$ , довжина сполучних смуг  $l = 8$  м.

#### **Висновки до розділу 4**

Таким чином при виконання досліджень по визначенню властивостей газотермічних покриттів та обробці даних на комп'ютерах необхідно строго підтримувати рекомендації при роботі за комп'ютером та при використанні газотермічного напилення. В протилежному випадку наступить помітне зменшення працездатності людини від втому під час обробки досліджень

## РОЗДІЛ 5

### ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

#### 5.1 Аналіз екологічної небезпеки проектованого обладнання

Проектованина дільниця плазменного напилення призначена для відновлення зношених деталей ГТД.

При здійсненні цього процесу виникає ряд факторів, які погано впливають на стан навколишнього середовища [20].

В першу чергу — це забруднення навколишнього середовища. Небезпека забруднення атмосфери складається з можливості засмічення шкідливими речовинами та продуктами, які знижують прозорість повітря та знижують здатність атмосфери до самоочищення. Основними видами забруднення атмосфери є:

- кварцевий пил від піскостуменевої обробки;
- високодисперсійний аерозоль розпилених матеріалів;
- токсичні гази ( окисли азоту, окисел нікелю);

Ці викиди є шкідливими для навколишнього середовища.

#### 5.2 Розробка заходів, що підвищують екологічну безпеку ділянки відновлення деталей

Для усунення впливу дії шкідливих речовин на навколишнє середовище передбачається встановлення фільтрів на виходах трубопроводів викидів. Крім цього, відбувається фільтрація інших шкідливих речовин з метою виключення забруднення. Стік відходів відбувається в підключену очисну систему цеху, яка забезпечує очищення до рівня вимог відповідності складу стічних вод існуючим вимогам.

При нанесенні покриттів детонаційним способом створюється шум у безпосередній відстані від установки, що сягає 125 дБ. Як заходи щодо

попередження шкідливої дії шуму передбачено встановлення захисного екрану, посадку навколо цеху посаджень дерев та чагарників.

Заходи щодо дії електроенергії – то це її економія (обезточування у перервах і після закінчення роботи).

Заходи щодо витрати матеріалів:

- зменшення браку в напиленні (витрата порошку);
- підвищення ресурсу детонаційної установки (менше спрацьованих деталей відправляють на переробку та ін.).

Забруднення повітряного середовища можливе під час роботи вентиляційних витяжних систем, які обслуговують пости плазменного напилення. Допустимий викид пилу в повітрі, який викидається в атмосферу визнаємо за формулою:

$$C = (160 \times 4 \cdot 10^{-3} \cdot L) \cdot k; \quad (5.1)$$

де  $L$  — втрата повітря, яке ми витрачаємо,  $m^3/год$ ;

$k$  — коефіцієнт витрат, рівний 0,6.

Знаючи витрати порошкових матеріалів та питома виділення пилу, можна визначити максимальну концентрацію аерозолу в повітрі, яке викидається, а саме:

$$C_B = 0,8 z/l; \quad (5.2)$$

де  $z$  — кількість аерозолу, який виділяється ( $m^2/год$ ) від плазменної установки.

Якщо  $C_B > C_i$ , то повітря підлягає обов'язковому очищенню. Для очищення вентиляційних викидів від аерозолу можуть бути використані пластинкові електрофільтри, які забезпечують ефективність очищення біля 0,95. Такими чином установки, які обслуговуються данною системою витяжної вентиляції доцільно об'єднувати у великі вентиляційні системи, до яких повинні під'єднуватись найбільші установки місцевої вентиляції.

При цьому необхідно забезпечити постійне очищення фільтрів від осідаючого пилу.

На викидній стороні вентиляційних установок необхідно встановити глушники адсорбційного типу (трубчаті або пластинчаті). З метою виключення забруднення водного басейну сточними водами ділянки відновлення, стік відходів приєднаний до очисної системи цеху, яка забезпечує доведення сточних вод до вимог діючих “Правил охорони поверхневих вод від забруднення сточними водами”, а також вимог СніП 2.04.03-85.

### 5.3 Методи та засоби очищення викидів в атмосферу

Однією з особливостей атмосфери є її здатність до самоочищення. Самоочищення атмосферного повітря відбувається шляхом сухого або мокрого випадання домішок, абсорбції їх земною поверхнею, поглинання рослинами, переробки бактеріями, мікроорганізмами та іншими шляхами. Садіння дерев та чагарників сприяє очищенню повітря від пилу, оксидів вуглецю, діоксидів сірки та інших речовин. Найкращі поглинальні властивості стосовно діоксиду сірки має тополя, липа, ясен. Одне доросле дерево липи може акумулювати протягом доби десятки кілограмів діоксиду сірки, перетворюючи його в нешкідливу речовину. Велика роль в очищенні атмосферного повітря належить ґрунтовим бактеріям та мікроорганізмам. При температурі 15-35 °С мікроорганізми переробляють на 1 м<sup>2</sup> до 81 кг на добу оксидів та діоксидів вуглецю. Однак можливості природи щодо самоочищення мають обмеження, що слід враховувати при розробці нормативів ГДВ [21].

Одним з основних показників очищення викидів є ступінь їхнього очищення від шкідливих речовин  $K_m$ .

$$K_m = M_y / M_{ш}, \quad (5.3)$$

де  $M$  — маса шкідливих речовин, які вловлюються в очисному пристрої;

$M_{ш}$  — загальна маса шкідливих речовин у викидах.

Ступінь очищення повинен визначатися за кожною забруднюючою речовиною. Ступінь очищення поділяється на проектну та фактичну, а за рівнем на максимальну та експлуатаційну.

Для оцінки забезпеченості підприємств очищенням в часі використовується коефіцієнт забезпеченості технологічних процесів газоочищенням:

$$K_{,,} = T_z / T_m, \quad (5.4)$$

де  $T_m$  — час роботи технологічного обладнання;

$T_z$  — час роботи газоочисних установок.

За несприятливих метеорологічних умов, коли викиди із забрудненнями можуть бути шкідливими для здоров'я населення, підприємства повинні знизити викиди шкідливих речовин за рахунок технічних засобів або повної (часткової) зупинки джерел забруднення.

Сучасні вимоги до якості та ступеня очищення викидів досить високі. Для їхнього дотримання необхідно використовувати технологічні процеси та обладнання, котрі знижують або повністю виключають викид шкідливих речовин в атмосферу, а також забезпечують нейтралізацію утворених шкідливих речовин; експлуатувати виробниче та енергетичне обладнання, котре виділяє мінімальну кількість шкідливих речовин; закрити невеликі котельні та підключити споживачів до ТЕЦ; застосовувати антитоксичні присадки, перевести теплоенергетичні установки з твердого палива на газ. Способи очищення викидів в атмосферу від шкідливих речовин можна об'єднати в такі групи [22]:

- очищення викидів від пилу та аерозолів шкідливих речовин;
- очищення викидів від газоподібних шкідливих речовин;
- зниження забруднення атмосфери вихлопними газами від двигунів внутрішнього згоряння транспортних засобів та стаціонарних установок;
- зниження забруднення атмосфери при транспортуванні, навантаженні і вивантаженні сипких вантажів.

Крім визначених для очищення викидів від шкідливих речовин використовуються також механічні, фізичні, хімічні, фізико-хімічні та комбіновані методи.

Механічні методи базуються на використанні сил ваги (гравітації), сил інерції, відцентрових сил, принципів сепарації, дифузії, захоплення тощо.

Фізичні методи базуються на використанні електричних та електростатичних полів, охолодження, конденсації, кристалізації, поглинання.

У хімічних методах використовуються реакції окислення, нейтралізації, відновлення, каталізації, термоокислення.

Фізико-хімічні методи базуються на принципах сорбції (абсорбції, адсорбції, хемосорбції), коагуляції та флотації [23, 24].

#### **5.4 Визначення еколого-економічної шкоди від викидів в атмосферу забруднюючих газів та від забруднення сточних вод**

Величина платежів визначається за формулою:

$$П_{AC} = \sum_{i=1}^n [(H_{in} + M_{in}) + (K_n \cdot H_{in} \cdot M_{in})] K_T, \quad (5.6)$$

де

$H_{in}$  – норматив плати за викиди в атмосферу однієї тони  $i$ -тої забруднюючої речовини в межах ліміту ВСВ;

$M_{in}$  – маса газового викиду  $i$ -тої забруднюючої речовини в атмосферу в межах ліміту;

$K_n$  – коефіцієнт відповідності плати за понадмірний викид;

$K_T$  – коефіцієнт, що враховує територіальні і екологічні особливості

$$K_T = H_{AC} \cdot K_{\phi} = 1,8 \cdot 1,25 = 2,25 \quad (5.7)$$

$K_{nac}$  – коефіцієнт, що залежить від чисельності населення;

$K_{\phi}$  – коефіцієнт, що залежить від народногосподарського значення міста;



$N_{\text{пл}}$  – встановлюється на основі граничної концентрації та відносин агресивності;

окис азоту:  $1300 \cdot 1,05$  (грн/т);

окис вуглецю:  $100 \cdot 1,05$  (грн/т);

дрібнодисперсійний пил:  $1300 \cdot 1,05$  (грн/т);

М окиси азоту  $0,09$  т/год;

М пилу  $0,42$  т/год;

М окиси вуглецю  $1,6$  т/год.

Отже, плата за викиди в атмосферу забруднюючих речовин становить:

$$\begin{aligned} P_{AC1} &= 1300 \cdot 1,05 \cdot 0,09 \cdot 2,25 + 0,42 \cdot 1300 \cdot 1,05 \cdot 2,25 \\ &+ 1,6 \cdot 10 \cdot 1,05 \cdot 2,25 = 1604 \text{ (грн)} \end{aligned}$$

При удосконаленні установки і використовуючи більш сучасні матеріали вдалось зменшити викиди на:

окис вуглецю:  $50 \cdot 1,05$  (грн/т);

дрібнодисперсійний пил:  $950 \cdot 1,05$  (грн/т);

М окиси азоту  $0,07$  т/год;

М пилу  $0,31$  т/год;

М окиси вуглецю  $1,1$  т/год.

окис азоту:  $680 \cdot 1,05$  (грн/т);

$$\begin{aligned} P_{AC2} &= 680 \cdot 1,05 \cdot 0,07 \cdot 2,25 + 0,31 \cdot 680 \cdot 1,05 \cdot 2,25 \\ &+ 1,1 \cdot 5 \cdot 1,05 \cdot 2,25 = 623,4 \text{ (грн)} \end{aligned}$$

Отже еколого-економічний ефект від удосконалення складе на рік:

$$W = P_{AC1} - P_{AC2} = 1604 - 623,4 = 980,4 \text{ (грн)}$$

### Висновки до розділу 5

Для зменшення емісії продуктів згоряння палива  $СН$  при конструюванні необхідно збільшити  $\eta_r$ . Цього можна досягти завдяки застосування систем попереднього випаровування палива, збагаченням паливно-повітряної суміші в зоні згоряння та збільшення числа зон згоряння в КЗ, шляхом включення або відключення частини форсунок. Ці конструктивні заходи приводять до зниження  $С_{уд}$ , і до зниження індексу емісії.

Для зниження емісії  $NO$  застосовують наступні конструктивні рішення: вприскування води в зону згоряння; застосування дво- або багатозонних КЗ; застосування в КЗ каталітичного горіння, при якому температура газів в зоні згоряння зменшується. У двозонних КЗ паливо згоряє в два етапи в різних частинах камери, при цьому в першій зоні забезпечується оптимальне згоряння палива на режимі МГ, у другій зоні забезпечується оптимальний процес згоряння та необхідна тяга.

## ОСНОВНІ ВИСНОВКИ

Розробка технології відновлення спрацьованих поверхонь газотермічним напиленням вимагає всебічного дослідження як триботехнічних характеристик матеріалів, що пропонуються для використання, так і показників фізико-механічних властивостей.

У зв'язку з тим, що всі газотермічні покриття, як правило знижують міцність основного матеріалу, вивчення можливої зміни характеристик міцності повинне займати в процесі розробки технології особливе, самостійне місце.

В дипломній роботі приведений аналіз методів дослідження впливу газотермічних покриттів на міцність основного матеріалу, представлені технологічні особливості газотермічних методів нанесення покриття.

У третій частині дипломної роботи розроблено методику дослідження мікропластичних характеристик зразків з газотермічними покриттями, а також спроектовано спеціальну установку для випробування конструкційних матеріалів в умовах циклічного навантаження.

Крім того, в дипломній роботі розроблено методологію вибору покриттів при розв'язанні задач підвищення зносостійкості та відновлення деталей, а також розроблено і запропоновано для використання методики вибору покриття з урахуванням мінімально можливого негативного впливу покриття на характеристики міцності деталей.

На основі результатів досліджень, з використанням вказаної методики, рекомендовано для підвищення зносостійкості і відновлення деталей авіаційної техніки ряд детонаційних та плазмових покриттів, вказана їх оптимальна товщина, що забезпечує мінімальне зниження міцності основного матеріалу.

В інших розділах дипломної роботи розглянуті питання охорони навколишнього середовища та рекомендовано заходи з охорони праці при використанні методів газотермічного відновлення деталей.

## СПИСОК БІБЛЮГРАФІЧНИХ ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кулагин Н.С., Духота А.И. О применении газотермических покрытий при ремонте деталей авиационной техники, подвергающихся статическим и циклическим нагрузкам. /В сб. Повышение эффективности системы и методов ремонта ВС. –М.: «Воздушный транспорт», 1992. с.115-117.

2. Назарян К.Х., Саркисян М.С., Гурчян Ю.А. Исследование износостойкости и усталостной прочности деталей с детонационными окрытиями. /”Промышленность Армении”, 1994, №9. с.31-33.

3. Димаков С.С., Шкапов И.Н., Логинов Н.З., Павлов А.Ф., Макарова М.С., Сергеев В.В., Ильенко А.М., Белоног В.М. Влияние детонационного напыления твердосплавных порошков на усталостную прочность титанового сплава ВТ8. /В сб.: Теория и практика газотермического нанесения покрытий, - Рига, “Зинатис”, 2000. с.75-79.

4. Максимович Г.Г., Шатинский В.Ф., Копылов В.И. Физико-химические процессы при плазменном напылении и разрушении материалов с покрытиями. –К.: Наукова думка, 1993. –264с.

5. Ильинский И.И., Шевеля В.В., Круглик А.П. Методика определения параметров микротекучести листовых материалов. /Проблемы прочности, 1993, № 2. с.105-109.

6. Павлов В.Н., Палков А.Т., Цымбалюк А.А. Детали машин: Методические указания и задания на курсовой проект. –К.: КИИГА, 1994. –52с.

7. Иванов М.Н., Иванов В.Н. Детали машин: Курсовое проектирование. –К.: НАУ, 1995. –551с.

8. Кудрін.А.П,Зайвенко Г.М, Волосович Г.А, Хижко В.Д. Ремонт повітряних суден і авіаційних двигунів. Підручник Р 386 ник.-к.:НАУ, 2002-492с.

10. ДНАОП 0.03-3.14-85 Санітарні норми допустимих рівнів шуму на робочих місцях №3223-85.-М., 1985.
11. ГОСТ12.1.012-90 ССБТ. Вибрационная безопасность. Общие требования. -М., 1990.
12. ГОСТ 12.1.028-80 ССБТ. Шум. Определение шумовых характеристик источников шума. Ориентировочный метод (СТ СЭВ 1413-78). -М., 1980.
13. ГОСТ 12.1.029-80 ССБТ. Средства, и методы защиты от шума. Классификация (СТ СЭВ 1928-79). -М., 1980.
14. ДСТУ 2867-94 Шум. Методи оцінювання виробничого шумонавантаження. Загальні вимоги. - К., 1994.
15. ДСТУ 3010-95 Обладнання для кондиціонування повітря та вентиляції. Методи визначення шумових характеристик кондиціонерів. - К., 1995.
16. Борьба с шумом на производстве: Справочник / Под общ. ред. Е. Я. Юдина. - М.: Машиностроение, 1985. -400 с.
17. ДНАОП 0.03-1.65-79 Санітарні правила робота з джерелами невикористаного рентгенівського випромінювання №1960-79.
18. ГОСТ 12.2.006-87 ССБТ. Безопасность аппаратуры электронной сетевой и сходных с ней устройств, предназначенных для бытового и аналогичного общего применения. Общие требования и методы испытаний.
19. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов.
20. ГОСТ 12.1.013-78 ССБТ. Строительство. Электробезопасность. Общие требования.
21. ГОСТ 12.1.030-81 ССБТ. Электробезопасность. Защитное заземление, зануление.
22. ДНАОП 0.00-8.02-93 Перелік робіт з підвищеною небезпекою.

23. ДСТУ 2817-94 (ГОСТ 12.2.007.6-93) Система стандартів безпеки праці. Апарати електричні комутаційні на напругу до 1000 В. Вимоги безпеки.

24. Старовертов И. Г. Справочник проектировщика. Часть II. Вентиляция и кондиционирование воздуха. К.: Воля, 2008. -510 с.