

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Інженерно-фізичний факультет

(повне найменування факультету)

Фізичне матеріалознавство

(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проєкту (роботи)

магістр

(ступінь вищої освіти)

на тему Вплив комплексного легування ітрієм та іншими рідкоземельними металами
на властивості покриття КНА-82
(назва теми)

Виконав(ла): студент(ка) 2 курсу, групи ІФ214м

Спеціальності 132 Матеріалознавство

(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)

Прикладне матеріалознавство

МАРУНОВ Д.Ю

(ПРІЗВИЩЕ та ініціали)

Керівник ГРЕШТА В.Л

(ПРІЗВИЩЕ та ініціали)

Рецензент

(ПРІЗВИЩЕ та ініціали)

2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Факультет Інженерно-фізичний факультет

Кафедра Фізичне матеріалознавство

Ступінь вищої освіти магістр

Спеціальність 132 Матеріалознавство
(код і найменування)

Освітня програма (спеціалізація) Прикладне матеріалознавство
(назва освітньої програми (спеціалізації))

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри _____

«_____» _____ 20__ року

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА(КИ)

МАРУНОВ Дмитро Юрійович

(ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) Вплив комплексного легування ітрієм та іншими рідкоземельними металами на властивості покриття КНА-82

керівник проєкту (роботи) професор, к.т.н, профе. ГРЕШТА Віктор Леонідович
(науковий ступінь, вчене звання, ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

затверджені наказом закладу вищої освіти від «13» листопада 2025 року №511

2. Строк подання студентом проєкту (роботи) 18.12.2023

3. Вихідні дані до проєкту (роботи) вимоги до ущільнювальних покриттів, покриття складу КНА-82

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)
Літературний огляд, матеріали та методика досліджень, експериментальна частина, охорона праці, економіко-організаційна частина

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, кількість слайдів, плакатів)

Презентація

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	ПРИЗВИЩЕ, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	приймав виконане завдання
1	ГРЕШТА В.Л професор, к.т.н		
2	ГРЕШТА В.Л професор, к.т.н		
3	ГРЕШТА В.Л професор, к.т.н		
4	НЕСТЕРОВ О.В., доцент, к.т.н		
5	КРУГЛІКОВА В.О, доцент, к.т.н		
НК			

7. Дата видачі завдання « _____ » _____ 20__ року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	Комплексний аналіз факторів впливу на експлуатаційну ефективність газотурбінних установок: сучасний стан досліджень та перспективи розвитку		
2	Матеріали та методика досліджень		
3	Експериментальна частина		
4	Економіко-організаційна частина		
5	Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях		

Студент(ка)

_____ Дмитро МАРУНОВ
(підпис) (Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

Керівник проєкту (роботи)

_____ Віктор ГРЕШТА
(підпис) (Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломної роботи бакалавра: 92 с., 15 табл., 12 рис., 17 джерел.

ГАЗОТУРБІННИЙ ДВИГУН, УЩІЛЬНЮВАЛЬНІ ПОКРИТТЯ, ІТРІЙ, РІДКОЗЕМЕЛЬНІ ЕЛЕМЕНТИ, ЛЕГУВАННЯ, ЖАРОСТІЙКІСТЬ, ЗНОСОСТІЙКІСТЬ, МІКРОСТРУКТУРА, АДГЕЗІЙНА МІЦНІСТЬ, ЕКОНОМІЧНИЙ ЕФЕКТ, ОХОРОНА ПРАЦІ

Об'єкт дослідження: Ущільнювальні покриття типу КНА-82, леговані ітрієм та рідкоземельними елементами для газотурбінних двигунів.

Мета дослідження полягає у вивченні впливу легування ітрієм на структуру, фазовий склад та комплекс експлуатаційних властивостей ущільнювальних покриттів КНА-82. Основна мета - розкриття взаємозв'язку між хімічним складом, морфологією структурних складових покриття і його механічними, теплофізичними та трибологічними характеристиками.

Дослідження включає аналіз розподілу хімічних елементів, морфології структурних складових, характеру формування оксидних та інтерметалідних фаз у покриттях КНА-82 з різним вмістом ітрію. Проводяться детальні мікроструктурні аналізи з використанням методів оптичної та растрової електронної мікроскопії, мікрорентгеноспектрального аналізу та інших технік для характеристики покриттів.

Метою є також встановлення оптимального складу легування, який забезпечить максимальне підвищення жаростійкості, зносостійкості, адгезійної міцності та інших параметрів покриттів КНА-82, важливих для їх використання в ущільнювальних вузлах турбін газотурбінних двигунів.

ЗМІСТ

Вступ.....	7
1 Комплексний аналіз факторів впливу на експлуатаційну ефективність газотурбінних установок: сучасний стан досліджень та перспективи розвитку	8
1.1 Особливості функціонування турбіни ГТД: ключові аспекти	8
1.2 Залежність ККД турбіни та споживання палива від величини радіальних зазорів.....	13
1.3 Сучасні методи розробки хімічного складу та побудови структури покриттів	19
2 Матеріали та методика досліджень	28
2.1 Характеристика матеріалів та об'єктів експериментального дослідження	28
2.3 Методика визначення мікроструктури на оптичному мікроскопі.....	31
2.4 Методика дослідження мікроструктури на растровому електронному мікроскопі	32
3 Експериментальна частина	34
3.2 Дослідження розподілу хімічних елементів у покритті методом мікрорентгеноспектрального аналізу.....	35
3.2 Дослідження мікроструктури експериментальних покриттів, отриманих газотермічним методом	39
3.3 Дослідження твердості та міцності ущільнювальних покриттів	41
4 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	45
4.1 Аналіз потенційних небезпек	45
4.2 Заходи забезпечення безпеки.....	47
4.3 Заходи з виробничої санітарії	53
4.4 Заходи з пожежної безпеки	55
4.5 Заходи безпеки в умовах НС.....	57

5 Економічне обґрунтування	62
5.1 Виробництво ущільнювальних покриттів	62
5.2 Техніко-економічні розрахунки	64
5.3 Розрахунок економічного ефекту при впровадженні результатів НДР	79
Висновки	83
Перелік літературних джерел	85
ДОДАТОК А	

ВСТУП

Підвищення ефективності газотурбінних двигунів є пріоритетним напрямком розвитку сучасного авіаційного двигунобудування. Одним із ключових факторів, що визначають експлуатаційні характеристики турбіни, є величина радіальних зазорів між обертовими та нерухомими елементами. Збільшення цих зазорів внаслідок ерозійного зносу призводить до перетікання газу, зниження ККД турбіни та підвищення споживання палива.

Застосування ущільнювальних покриттів дозволяє ефективно контролювати величину радіальних зазорів протягом усього терміну експлуатації двигуна. Такі покриття повинні поєднувати комплекс протилежних властивостей: низьку твердість для швидкого припрацювання на початковому етапі експлуатації та високу зносостійкість при тривалій роботі, а також жаростійкість при температурах до 1200°C.

Традиційні ущільнювальні покриття типу КНА-82 на основі системи Ni-C-Al-BN не завжди забезпечують необхідний комплекс експлуатаційних характеристик. Перспективним напрямком удосконалення цих покриттів є їх модифікування рідкоземельними елементами, зокрема ітрієм, який здатний формувати термостабільні оксидні фази та підвищувати жаростійкість матеріалів.

Метою роботи є дослідження впливу легування ітрієм на структуру, фізико-механічні та експлуатаційні властивості ущільнювальних покриттів типу КНА-82 для підвищення ефективності та надійності газотурбінних двигунів. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі: провести аналіз сучасних підходів до розробки ущільнювальних покриттів, обґрунтувати вибір легувальних елементів, розробити експериментальні склади покриттів, дослідити їх структуру та властивості, а також провести економічне обґрунтування впровадження розроблених матеріалів.

1 КОМПЛЕКСНИЙ АНАЛІЗ ФАКТОРІВ ВПЛИВУ НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНУ ЕФЕКТИВНІСТЬ ГАЗОТУРБІННИХ УСТАНОВОК: СУЧАСНИЙ СТАН ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ

1.1 Особливості функціонування турбіни ГТД: ключові аспекти

Газотурбінний двигун (ГТД) являє собою тепловий агрегат, де відбувається компресія та нагрівання газу з подальшою трансформацією енергії у механічну роботу на валу турбіни. Це складна термодинамічна система, що реалізує цикл Брайтона і характеризується високою питомою потужністю при відносно компактних розмірах [1].

На відміну від поршневих систем, робочі процеси ГТД реалізуються у безперервному газовому потоці без циклічності та зворотно-поступального руху. Атмосферне повітря після компресії надходить до камери згоряння, де змішується з паливом. Продукти згоряння під високим тиском спрямовуються на турбіну, де їхня енергія перетворюється на механічну роботу через обертання лопаткового апарату. Частина цієї роботи забезпечує функціонування компресора, а решта передається на привідний механізм як корисна робота двигуна. ГТД характеризуються найвищою питомою потужністю серед двигунів внутрішнього згоряння – до 6 кВт/кг, що робить їх особливо привабливими для авіаційного та енергетичного застосування.

Паливна гнучкість ГТД дозволяє використовувати різноманітні диспергуємі речовини: від рідких вуглеводнів (бензин, гас, дизпаливо, мазут) до газоподібних (природний газ, водяний газ) та альтернативних енергоносіїв (спирт, подрібнене вугілля). Це забезпечує універсальність застосування таких двигунів у різних галузях промисловості та транспорту, а також підвищує їхню стратегічну значущість в умовах диверсифікації енергетичних ресурсів [2].

Турбіна ГТД – це ключовий функціональний вузол для перетворення енергії газового потоку в корисну роботу, що спрямовується на привід компресора та

інших систем залежно від призначення двигуна (повітряний гвинт, несучий гвинт, електрогенератор, насос або інші допоміжні агрегати). Конструктивно застосовуються переважно осьові турбіни (одно- та багатоступеневі), рідше – радіальні або діагональні доцентрові варіанти. У осьових турбінах газовий потік рухається паралельно осі обертання, забезпечуючи оптимальну ефективність при значних витратах газу. Радіальні модифікації, де потік спрямований вздовж радіусу, використовуються за умов обмеженої витрати газу та специфічних конструкційних вимог.

Конструкційно ступінь турбіни містить сопловий апарат, закріплений у корпусі, робочі лопатки на диску ротора та комплекс ущільнювальних елементів. Сопловий апарат формує направлений газовий потік з оптимальними параметрами швидкості та тиску, а робочі лопатки перетворюють кінетичну енергію цього потоку в механічну роботу обертання.

Турбінний вузол має відповідати високим вимогам щодо ефективності, надійності та масогабаритних показників при збереженні стабільного ККД на різних експлуатаційних режимах. Особливо критичними є умови роботи при високих температурах газового потоку (до 1600-1700 К і вище в сучасних двигунах), що вимагає застосування спеціальних жароміцних матеріалів та систем охолодження [3].

Ефективність турбіни оцінюється трьома видами ККД: ізоентропічним (відношення фактичного теплоперепаду до теоретичного ізоентропічного), потужнісним або ефективним (відношення механічної роботи до ізоентропічного теплоперепаду) та ККД у параметрах загальмованого потоку (відношення отримуваної роботи до теплоперепаду, визначеного за параметрами загальмованого потоку) [3-4]. Останній найчастіше використовується у газодинамічних розрахунках завдяки його інформативності щодо реальних умов експлуатації. У турбінах з охолодженням ККД визначається з урахуванням енергетичного балансу охолоджувального повітря, що ускладнює розрахунки, але підвищує їхню точність.

Для досягнення високих показників ефективності оптимізуються кінематичні характеристики ступеня (ступінь реактивності і співвідношення між окружною швидкістю ротора та швидкістю газового потоку) та газодинамічні параметри лопаткових вінців. Особлива увага приділяється мінімізації втрат від перетікання газу в радіальному зазорі між лопатками ротора і корпусом турбіни, що може становити значну частину загальних енергетичних втрат. Зниження таких втрат досягається застосуванням бандажних полиць з лабіринтними ущільнювачами на кінцях лопаток або мінімізацією зазору з використанням стиранних вкладишів на внутрішніх поверхнях корпусу. Останній підхід дозволяє допускати контрольований контакт лопаток з корпусом на певних режимах роботи без пошкодження основної конструкції.

Бандажування робочих коліс найбільш доцільно застосовується для лопаток із значним подовженням (високе співвідношення довжини до хорди). Окрім функції ущільнення, бандажні полки ефективно знижують вібраційні напруження, критичність яких зростає пропорційно довжині лопаток. При конструкціях із короткими лопатками (коли співвідношення діаметру турбіни до довжини лопатки перевищує 10) першочергового значення набуває мінімізація радіального зазору та забезпечення його стабільності на всіх експлуатаційних режимах. Це досягається системами термічного регулювання шляхом запрограмованої модифікації температурних режимів корпусних елементів і роторної частини турбіни.

Сучасні турбінні системи демонструють винятково високі показники ефективності з ККД у параметрах загальмованого потоку до 90% для одноступеневих та до 93% для багатоступеневих конструкцій.

Визначення оптимальної кількості ступенів турбіни відбувається відповідно до функціонального призначення двигуна, його архітектури та експлуатаційних параметрів. Для забезпечення роботи компресора газогенератора типово застосовуються одно- або двоступеневі турбіни, тоді як для приводу вентилятора у високодвоконтурних двигунах чи повітряних

гвинтів використовуються багатоступеневі системи (до 6 ступенів). У двигунах з помірною двоконтурністю зазвичай достатньо одно- чи двоступеневих турбін [5-7].

Ключовими характеристиками оцінки турбін виступають питома потужність (енергія, отримувана з одиниці маси робочого тіла) та питома вага (відношення маси конструкції до генерованої потужності). Підвищення температури газового потоку, швидкісних характеристик потоку та ротора безпосередньо сприяє зростанню питомої потужності при зниженні питомої ваги. У сучасних системах температура газу досягає 1600-1700 К, швидкості обертання ротора – 500 м/с, а швидкості потоку у високоперепадних одноступеневих конструкціях наближаються або перевищують звукові.

Експлуатація турбін при надвисоких температурах стала можливою завдяки розробці спеціалізованих жароміцних та жаростійких ливарних сплавів у поєднанні з прогресивними системами повітряного охолодження теплонавантажених поверхонь. Подальший розвиток турбінних технологій орієнтований на підвищення робочих температур, впровадження новітніх жаростійких матеріалів (включаючи композити), теплозахисних покриттів та інноваційних охолоджувальних систем на основі передових технологічних методів виготовлення критичних компонентів – лопаток, корпусних елементів, дисків [6].

Ефективність роботи турбінних систем значною мірою залежить від точності профілювання лопаткового апарату та якості поверхонь проточної частини. Сучасні методи числового моделювання дозволяють оптимізувати геометрію профілів з урахуванням тривимірних ефектів потоку, що забезпечує мінімізацію гідравлічних втрат та підвищення загального ККД. Крім того, впровадження прецизійних технологій виготовлення з жорсткими допусками на розмірні та геометричні параметри лопаток гарантує відповідність реальних характеристик турбіни розрахунковим значенням.

Особливого значення в сучасних конструкціях турбін набуває інтеграція діагностичних систем, що дозволяють в реальному часі відстежувати тепловий

стан, вібраційні характеристики та параметри зазорів. Це забезпечує не лише безпечну експлуатацію, але й оптимізацію режимів роботи для максимальної ефективності перетворення енергії.

На рисунку 1.1 представлена турбіна компресора турбогвинтового двигуна серії МС-500В виробництва АТ «МОТОР СІЧ».

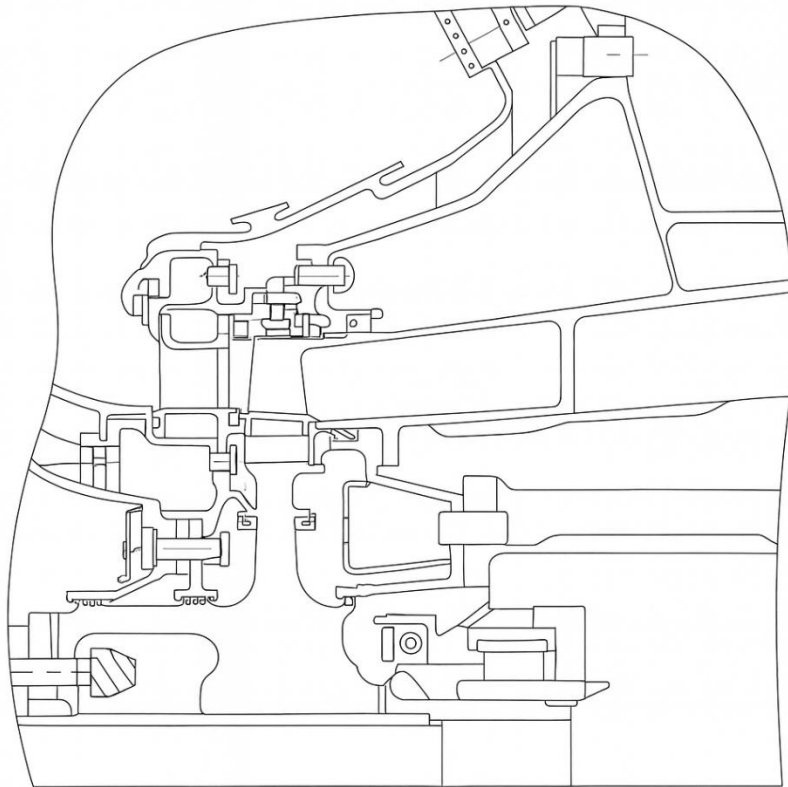


Рисунок 1.1 – Турбіна компресора турбогвинтового двигуна сімейства МС-500В

Аналіз конструкції на рисунку 1.1 демонструє наявність лабіринтних ущільнюючих елементів у трьох різних зонах внутрішніх порожнин турбіни компресора. Для підвищення ефективності ущільнення та зносостійкості в даній конструкції на нерухомих компонентах (статорних елементах) використано спеціальне покриття типу АНБ [8].

1.2 Залежність ККД турбіни та споживання палива від величини радіальних зазорів

Лабіринтні ущільнення застосовують у турбінах, які працюють за умов високих окружних швидкостей та істотних перепадів тиску. Їхня ефективність визначається кількістю гребінців, їх формою та розміром радіального проміжку.

Втрати повітря через ущільнення є одним із факторів, які погіршують коефіцієнт корисної дії турбіни і знижують загальну економічність силової установки. Лабіринтна конструкція створює значний гідравлічний опір на шляху перетікання повітря. При зменшенні радіального проміжку між гребінцями та статорною частиною, а також при збільшенні кількості гребінців, гідравлічний опір зростає, що призводить до скорочення обсягу повітря, яке протікає через ущільнення.

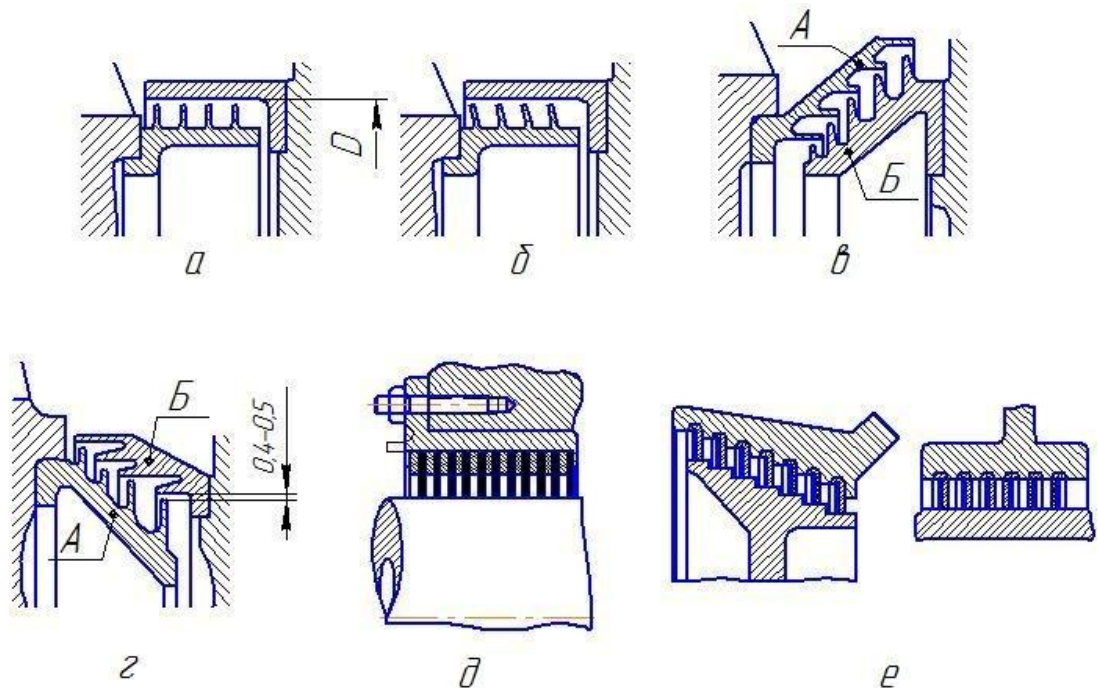
Однак надмірне зменшення радіальних зазорів може спричинити контакт між рухомими та нерухомими елементами через температурні деформації або вібрації під час роботи двигуна. Такий контакт призводить до механічного пошкодження гребінців, зносу деталей та можливого заклинювання ротора. Тому при проектуванні лабіринтних ущільнень необхідно знаходити оптимальний баланс між мінімізацією витоків повітря та забезпеченням надійності конструкції.

Сучасні технології виробництва дозволяють виготовляти гребінці з високою точністю, що забезпечує мінімально допустимі зазори. Крім того, застосування жароміцних матеріалів та спеціальних покриттів підвищує стійкість ущільнень до зносу та температурних навантажень, що сприяє підтриманню їхньої ефективності протягом тривалого періоду експлуатації.

У процесі експлуатації турбіни радіальні зазори можуть збільшуватися внаслідок абразивного зносу гребінців твердими частинками, які потрапляють з повітряним потоком, або через ерозійні процеси при високих температурах.

Це призводить до поступового зростання витоків повітря та зниження ефективності двигуна. Регулярний контроль стану ущільнень під час технічного обслуговування дозволяє своєчасно виявляти критичне збільшення зазорів.

Різновиди лабіринтних ущільнень наведені на рисунку 1.2.



а – з прямими гребінцями; б – з гребінцями, які розташовані під кутом до осі обертання; в, г – з гребінцями, які розташовані на конічних поверхнях (деталь А – обертається, деталь Б – нерухома); д, е – із штампованих дисків

Рисунок 1.2 – Лабіринтні повітряні ущільнення

Аналіз рисунку 1.2 показує, що найпростішу конструкцію має ущільнення, зображене на рисунку 1.2, а. Розміщення гребінців під кутом (рисунок 1.2, б) або з нахилом проти напрямку потоку дещо покращує ефективність ущільнення. Якщо гребінці такого ущільнення розташовані на конічній поверхні, то до дросельного ефекту додаються втрати енергії через

зміну траєкторії повітряного потоку, що сприяє зменшенню перетоків повітря (рисунок 1.2, в, г, д, е) [9].

Як зазначалося раніше, скорочення радіального проміжку підвищує ефективність лабіринтного ущільнення. Проте необхідно враховувати, що при занадто малих зазорах виникає ризик торкання гребінців до статорних кілець, що призводить до інтенсивного зносу, механічних пошкоджень і перегріву деталей.

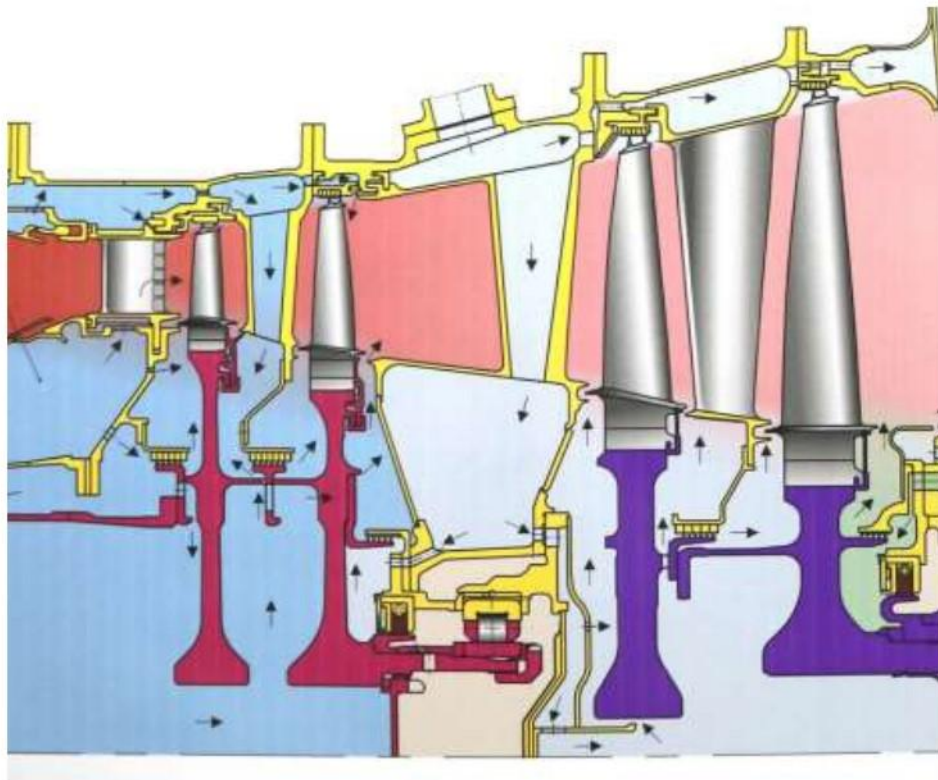


Рисунок 1.3 - Схема охолодження турбіни ГТД сімейства ТВ3-117

З рисунку 1.3 можна побачити, що в конструкції турбіни компресора та вільної турбіни газотурбінного двигуна сімейства ТВ3-117 лабіринтні ущільнення використовуються як для зменшення перетоків газу між ступенями, так і для герметизації масляних порожнин.

Радіальні проміжки між ротором і статором турбіни є необхідними для коректної роботи та суттєво впливають на її ефективність. Цей вплив

посилюється при зростанні як абсолютної, так і відносної (стосовно висоти лопатки) величини радіального проміжку.

Абразивний знос торцевої частини робочої лопатки турбіни високого тиску є головною причиною збільшення радіального проміжку між обертовими та нерухомими елементами. Знос ротору (який може відбутися на одному з перехідних режимів роботи) спричиняє розширення робочого проміжку, погіршення коефіцієнта корисної дії, підвищення споживання палива на всіх наступних – включаючи основні експлуатаційні – режимах силової установки. Знос корпусу частіше має локальний характер (спричинений недосконалою геометрією деталі) і зазвичай не призводить до таких серйозних наслідків для ефективності турбіни [10].

Головними факторами зносу торцевої частини робочої лопатки є тертя (врізання у корпус) та ерозійне руйнування. Ерозійне руйнування торців лопаток (а також корпусних проставок над ними) під час експлуатації стає основною причиною некерованого збільшення радіального проміжку для першого (і певною мірою – у другому) ступеня турбіни високого тиску.

Деталі з більшою масою або меншою інтенсивністю теплообміну (наприклад, диски) прогріваються та охолоджуються повільніше, тоді як деталі з меншою масою чи вищим коефіцієнтом теплообміну – швидше (наприклад, корпус).

Аналіз свідчить, що зміни геометричних параметрів деталей протягом роботи викликані переважно температурним впливом. Вплив відцентрових сил (для ротору) у кілька разів менш суттєвий.

Корпус є тонкостінною конструкцією, що швидко реагує на зміну режиму двигуна, і зазвичай досить оперативно змінює свою температуру (і, відповідно, геометричні розміри) при зміні температури газового потоку в проточній частині. Ротор є масивною (завдяки дискам) конструкцією, яка до того ж перебуває переважно в середовищі охолоджувального повітря (яке значно повільніше за газ реагує на зміну режиму двигуна). Тому теплова інерція ротору значно вища. При підвищенні режиму відставання ротору

спричиняє збільшення радіального зазору, а при зниженні (скиданні) режиму – його зменшення.

Багато у цих процесах визначається швидкістю зміни режиму двигуна та співвідношенням теплової інерції ротору і корпусу. При недостатньому радіальному проміжку у складеному вузлі або несприятливому співвідношенні теплової інерції ротору і статору може виникнути торкання та неприпустимий знос як при скиданні режиму, так і при швидкому підвищенні режиму (наприклад, під час зльоту) .

На початковому етапі проектування має бути визначений мінімальний радіальний проміжок, який гарантує відсутність врізання роторних компонентів (насамперед робочих лопаток) у корпус. На подальших стадіях проектування врізання ротору в корпус, особливо у стільникові ущільнення та прироблювані вставки, може бути визнано прийнятним і навіть доцільним після детального моделювання радіальних проміжків у робочому циклі.

Мінімальний проміжок повинен враховувати (для прикладу взято турбіну авіаційного двоконтурного двигуна тягою близько 20 тонн) такі фактори:

- виробничі відхилення при виготовленні деталей турбіни та ексцентриситет (відхилення від ідеальної окружності) ротору. Варіація проміжку з цієї причини може становити 0,15...0,40 мм (менше значення стосується турбіни високого тиску, більше – турбіни низького тиску, фізичні габарити якої зазвичай більші). Така величина проміжку забезпечує можливість збирання конструкції;

- деформація ротору під час роботи через номінальні (допустимі) значення дисбалансу. Варіація проміжку з цієї причини може становити 0,05...0,15 мм [11] ;

- маневрові навантаження на корпуси та ротори, які спричиняють деформацію деталей і потребують додаткового проміжку, необхідного для сумісної роботи деталей у двигуні. Цей додатковий проміжок сягає на

зльотному режимі 0,05...0,10 мм, у кілька разів менше на крейсерському режимі, а на малому газі незначно малий;

- можливість запуску двигуна через 1...2 години після вимикання з урахуванням ефекту термічної деформації ротору. Ця деформація має місце через діаметральний температурний градієнт (накопичення залишкового тепла в роторних деталях у верхній частині турбіни). Термічна деформація ротору може призвести до тимчасового заклинювання роторів турбін високого та низького тиску (на кілька годин) приблизно через годину після вимикання. Для виключення ефекту термічної деформації може знадобитися додаткове збільшення радіального проміжку на 0,5 мм і більше [12].

Отже, одним із способів підвищення коефіцієнта корисної дії турбіни зокрема та двигуна загалом і зменшення споживання палива є використання ущільнювальних покриттів. Виходячи з умов експлуатації турбіни, вимогами до таких покриттів є:

- здатність до приробітку контактуючих елементів;
- достатня міцність, але істотно нижче міцності роторних деталей (лопаток);
- низький коефіцієнт тертя, що зменшує знос у процесі контактування;
- стабільність ущільнення впродовж усього терміну експлуатації двигуна.

Застосування сучасних ущільнювальних покриттів дозволяє знизити експлуатаційні радіальні проміжки без ризику критичних пошкоджень роторних елементів. Такі покриття наносяться на внутрішню поверхню корпусу або на спеціальні вставки і мають пористу структуру, яка забезпечує м'яке врізання лопаток з мінімальним опором та зносом. У процесі приробітку формується оптимальний профіль проміжку, що відповідає траєкторії руху лопаток.

Ефективність ущільнювальних покриттів значною мірою залежить від їхньої термічної стабільності та стійкості до окислення при робочих температурах турбіни. Сучасні композиційні матеріали на основі металів та

кераміки забезпечують збереження експлуатаційних характеристик при температурах до 1000-1200°C. Правильний вибір та нанесення ущільнювальних покриттів може забезпечити зниження витрати палива на 0,5-1,5% порівняно з традиційними конструкціями без покриттів [13].

1.3 Сучасні методи розробки хімічного складу та побудови структури покриттів

Забезпечення надійної та ефективної роботи турбіни в умовах високих температур та навантажень є одним із ключових завдань сучасного двигунобудування. Особливу увагу приділяють розробці матеріалів для ущільнювальних покриттів, які здатні працювати в екстремальних умовах та зберігати свої експлуатаційні характеристики протягом тривалого часу.

Створення ефективних ущільнень потребує комплексного підходу до вибору хімічного складу та формування оптимальної структури покриттів. Сучасні вимоги до таких матеріалів включають не лише високу термічну стабільність та зносостійкість, але й здатність до контрольованого приробітку при контакті з роторними елементами. Це дозволяє мінімізувати радіальні проміжки без ризику критичних пошкоджень дорогих деталей турбіни.

У цьому розділі розглядаються сучасні напрямки розробки хімічного складу та формування структури ущільнювальних покриттів, а також аналізуються матеріали, що найкраще відповідають вимогам реальних умов експлуатації турбін газотурбінних двигунів.

Сплави на базі тугоплавких елементів Nb, Mo не відповідають зазначеним вимогам через недостатню стійкість до окислення. Водночас відзначається перспективність застосування сплавів на основі систем Nb–Al і Nb–Si, які зміцнюються формуванням відповідних сполук Nb₃Al та Nb₃Si. Однак виробництво цих сплавів методами порошкової металургії є достатньо

дорогим та складним процесом, і на сьогоднішній день перебуває на стадії дослідження.

Матеріали на базі оксидів характеризуються недостатньою надійністю внаслідок низької ударної в'язкості та пластичності. Найпоширенішими сплавами, що застосовуються, є сплави на основі інтерметаліду Ni_3Al , відомого як γ -фаза. Концентрація цієї фази в сучасних жароміцних сплавах може досягати 60...65%. При високотемпературних нагріваннях на поверхні інтерметаліду формується оксидна плівка з захисними властивостями. Проте сполука Ni_3Al та сплави на її основі можуть характеризуватися низькою короточасною міцністю та пластичністю. Утворення γ -фази відбувається згідно з правилом Юм-Розері, відповідно до якого кристалічна структура інтерметалідних сполук визначається певною щільністю валентних електронів E . Однак для формування хімічного складу ущільнювальних покриттів наявності лише однієї γ' -фази у структурі недостатньо [14].

Для розробки жаростійких покриттів застосовують сплави на основі $\text{Ni}-\text{Cr}-\text{Al}$. Висока жаростійкість цих сплавів забезпечується утворенням плівки виключно стабільних оксидів Cr_2O_3 і Al_2O_3 . Іншими словами, такі сплави є стійкими до високотемпературної корозії. Розглянуто покриття на основі сплаву $\text{Ni}-20\%\text{Cr}-13\%\text{Al}-0,5\%\text{Y}$, яке наноситься на сплав ЖС6У. Після напилення у сплаві формується ультрадрібнозерниста структура. Така структура забезпечує утворення мікродуплексної структури, що характеризується високою пластичністю та стабільністю при підвищених температурах. Відзначається актуальність використання РЗМ у жаростійких сплавах. Як відомо, до групи РЗМ входить 17 елементів III групи Періодичної системи, серед яких скандій, ітрій, лантан та лантаноїди: церій, празеодим, неодим, прометій, самарій, європій, гадоліній, тербій, диспрозій, гольмій, ербій, тулій, ітербій, лютецій. Елементи поділяються на ітрієву (Y, La, Gd-Lu) та церієву (Ce-Eu) підгрупи. Зазначається, що РЗМ виконують роль рафінувальних добавок, оскільки завдяки хімічній активності вони нейтралізують негативний вплив домішок кисню та сірки шляхом утворення з

ними тугоплавких хімічних сполук. З іншого боку, вони як поверхнево-активні елементи концентруються на поверхнях поділу фаз (границі зерен, границі блоків, міжфазні границі (γ/γ')-фаз тощо). Також необхідно відзначити, що рідкоземельні елементи сприятливо впливають на структурну стабільність сплавів, зменшують їх ліквідаційну неоднорідність, запобігають формуванню шкідливих структурних складових (ТПУ фази, μ -фази тощо).

Додавання РЗМ забезпечує додаткове покращення основних характеристик сплавів:

тривалість експлуатації при температурах 1000...1100°C збільшується в 1,5...2 рази, а для сплавів на базі інтерметалідів - у 2...3 рази. Особливо виражений вплив РЗМ на довговічність проявляється при тривалих базах випробувань (1000...1500 годин);

жаростійкість при робочих температурах підвищується в 1,5...2 рази (за показником питомої маси) [14].

Досліджено іонно-плазмове покриття ВСДП-11, нанесене на поверхню нікелевого сплаву ЦНК-7П з подальшим впровадженням іонів ітербію іонами ітербію. Встановлено, що проведення імплантації сплаву іонами ітербію забезпечує підвищення жаростійкості та високотемпературної корозійної стійкості у 1,6 разів. Відзначається, що покращення корозійної стійкості пов'язане з формуванням у покритті дрібнодисперсних фаз, що містять ітербій та ітрій, а також з утворенням у поверхневому шарі розвиненої дислокаційної структури.

Згідно з дослідженням, додавання лантану до сплавів ВКНА-1В та ВКНА-25 забезпечує формування модифікованої структури. Ця структура стабілізується наноструктурними частинками лантанідів нікелю й алюмінію, а також наночастинками фаз на основі тугоплавких елементів. Результати показали підвищення терміну служби в температурному діапазоні 1000...1200°C: приблизно в 1,7 раза для сплавів на основі ВКНВ-1В з вмістом 0,5% Re та близько 3 разів для сплавів на основі ВКНА-25 з вмістом 1,2% Re і Co. Водночас, вивчення фазового складу сплаву Ni-Al-Cr, описане в роботі,

демонструє, що лантанідні сполуки Al_2La та Ni_3La_2 здатні ініціювати утворення мікротріщин, що призводить до зниження міцності сплаву.

Аналіз впливу ітрію на характеристики сплавів, зокрема на прикладі сплаву ЖС6К, свідчить, що додавання 0,01...0,05%Y підвищує термічну стабільність матеріалу, сповільнює процес коагуляції основної зміцнювальної γ' -фази та запобігає формуванню подвійного карбіду M_6C несприятливої морфологічної структури. Присутність ітрію перешкоджає формуванню оксиду NiO, який не володіє захисними характеристиками, натомість сприяє створенню на поверхні сплаву захисних оксидних шарів $Ni(Cr,Al,Y)_2O_4$ та $(Cr, Y)_2O_3$.

Ітрій є одним з найпоширеніших елементів III групи Періодичної системи з густиною $\rho=4,47\text{г/см}^3$ та температурою плавлення 1510°C . Характеризується двома поліморфними формами: низькотемпературний α -ітрій з гексагональною щільноупакованою кристалічною ґраткою та високотемпературний β -ітрій з об'ємноцентрованою кубічною структурою. У високочистому стані (99,8%Y), особливо за відсутності домішок втілення (C, N, O, H), ітрій виявляє пластичність навіть при кімнатній температурі. Температурний діапазон відпалу для усунення наклепу становить $870\dots980^\circ\text{C}$.

Ітрій характеризується високою термодинамічною активністю зі стандартним електрохімічним потенціалом $-2,37\text{ В}$. Стаціонарний електрохімічний потенціал значно зміщується до менш негативних величин: у 0,01нм NaCl (pH=7) він становить 1,29 В, а в 18%HF досягає 0,3В. Такий позитивний зсув потенціалу відносно стандартного значення вказує на виражену здатність ітрію до пасивації через утворення стабільної плівки Y_2O_3 . Оксид ітрію Y_2O_3 відзначається стабільністю, практично не випаровується та зберігає свою структуру без фазових перетворень до 1800°C . Його густина складає $4,87\text{ г/см}^3$, $t_{\text{пл}}=2417^\circ\text{C}$, $t_{\text{кип}} = 4297^\circ\text{C}$. Завдяки формуванню оксидної плівки відбувається покращення корозійної стійкості та жаростійкості сплавів, легованих ітрієм.

Дослідження демонструє позитивний ефект легування ітрієм та лантаном на жаростійкість сплаву ЖС47 (рисунок 1.4). Представлені результати підтверджують, що введення лантану й ітрію в сплав ЖС47 суттєво покращує його жаростійкість: питома зміна маси зразків нелегованого сплаву значно перевищує цей показник для сплаву з додаванням зазначених елементів.

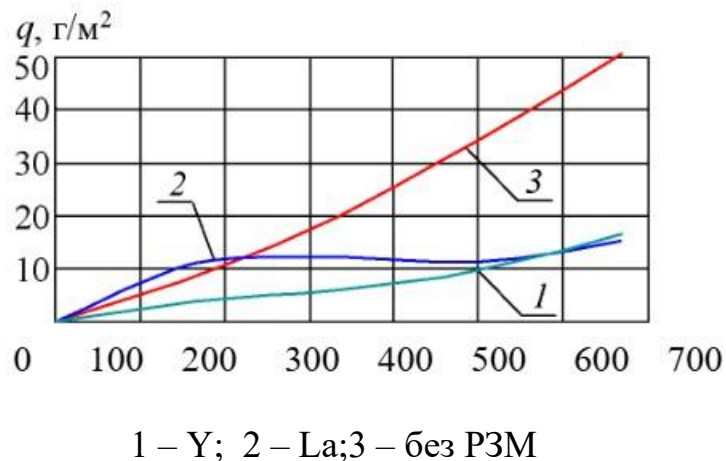


Рисунок 1.4 – Кінетика окислення сплаву при температурі 1100°C з додаванням

Однак встановлено, що введення ітрію позитивно впливає на жаростійкість лише за наявності хрому, при цьому коли вміст хрому не досягає 13%, додавання ітрію, навпаки, погіршує жаростійкість матеріалу. Хром підвищує опір сульфідній корозії в сплавах системи Ni-Co-Cr-Al-Y з невисоким вмістом алюмінію та рівномірно розподіляється в γ -твердому розчині. У сплавах з високою концентрацією алюмінію збільшення вмісту хрому не призводить до покращення корозійної стійкості.

Кобальт сприяє підвищенню опору сульфідній корозії. На відміну від хрому, кобальт рівномірно розподіляється між різними фазами сплавів, завдяки чому його позитивна дія проявляється як при низькому, так і при високому вмісті алюмінію. Кобальт зменшує кількість фази Ni_3Al , що забезпечує більш рівномірний розподіл хрому в структурі сплавів. Найбільш виражений вплив кобальту спостерігається при його концентрації в сплавах на рівні 18...28%. Подальше підвищення вмісту кобальту призводить до

утворення σ -фази, яка зв'язує хром і кобальт, створює структурну неоднорідність і погіршує корозійну стійкість сплавів. Хоча дані щодо впливу ітрію на корозійну стійкість відсутні, варто відзначити цікавий вплив кремнію, введення якого суттєво підвищує корозійну стійкість матеріалів.

Крім жаростійкості та корозійностійкості, матеріали ущільнювальних покриттів повинні під час експлуатації демонструвати задовільну припрацьовуваність. Досліджені матеріали ущільнювальних покриттів на основі Ni-C та Ni-Cr-Al, які розпилені на підложку BN, характеризуються рівномірним розподілом фаз. Покриття мають високу твердість, причому встановлено, що чим вище твердість матеріалу, тим краща його ерозійна стійкість. Дослідження продемонстрували, що покриття Ni-Cr-Al характеризується високим коефіцієнтом тертя та володіє самозмащувальними властивостями.

Трибологічні випробування показали, що покриття із пари Ni-C, нанесені на сплав Ti-6Al-4V, розм'якшується пізніше основного матеріалу, що спричиняє руйнування деталі, на відміну від покриття на основі Ni-Cr-Al. Аналогічні випробування, проведені на прикладі сплаву системи Co-Ni-Cr-Al-Y, які також наносились на BN, демонструють, що введення ітрію підвищує твердість матеріалу, а також покращує адгезію покриття до підкладки. Варто зазначити, що завдяки проведеним дослідженням можна прогнозувати інтенсивність зношування ущільнювальних покриттів.

Встановлено, що введення в склад покриттів на нікелевій основі таких зміцнюючих домішок як карбід вольфраму та дібориду титану призводить до суттєвого збільшення зносостійкості.

Для покриттів, які працюють при температурах 1100...1200°C, окрім сплавів на нікелевій основі теоретично можливим було б застосування жаростійких сплавів на основі хрому. Хромові сплави характеризуються корозійною стійкістю та мають густину 7,2 г/см³. Проте вони відзначаються підвищеною крихкістю при температурах нижче 300...350°C. Крім того, під час тривалих нагрівань при високих температурах жароміцні хромові сплави

схильні до поглинання азоту, що негативно впливає на їх низькотемпературну пластичність. Цікаві результати отримані при нанесенні покриттів системи Y-Cr-O на жаростійкі хромові сплави типу BX2K. Завдяки таким покриттям вдається подолати недоліки хромових сплавів, оскільки ітрій знижує інтенсивність випаровування хрому.

В умовах сучасного авіабудування все частіше застосовуються покриття на основі керамічних матеріалів, що обумовлено їх більш високою температуростійкістю порівняно з полімерами та жаростійкими нікелевими сплавами [15].

Розглянуто покриття системи SiC-SiO₂, яке наноситься на волокна зі сплаву системи Fe-Cr-Al-Y. Таке покриття дозволяє підвищити робочу температуру матеріалу до 1100°C. Наведені характеристики свідчать, що покриття має хорошу припрацьовуваність, спрацьовуваність та достатню ерозійну стійкість, проте показники термостійкості є недостатньо задовільними. Також широко використовуються покриття на основі оксиду цирконію, частково стабілізованого оксидом ітрію Y₂O₃.

Покриття типу ZrO₂, Y₂O₃ наноситься на перехідний шар Ni-(Al,Cr) та Ni-Co-Cr-Al-Y. Зовнішній керамічний шар характеризується низькою теплопровідністю, металевий шар є термостабільним і жаростійким, така композиція забезпечує поступове зниження температури металу. Проте застосування такого типу покриттів як ущільнювальних є недоцільним, оскільки при такій багатошаровій структурі ускладнюється контроль і регулювання робочого зазору.

Окрім багатошарових керамічних систем, досліджуються також одношарові керамічні покриття на основі нітриду бору (BN), які характеризуються хорошими антифрикційними властивостями та здатністю працювати при високих температурах. Нітрид бору має гексагональну кристалічну структуру, подібну до графіту, що забезпечує йому низький коефіцієнт тертя та самозмащувальні властивості. Температура плавлення BN

становить близько 3000°C , що робить його перспективним матеріалом для високотемпературних застосувань.

Водночас керамічні покриття мають суттєві недоліки, серед яких низька ударна в'язкість, схильність до розтріскування при термічних ударах та обмежена пластичність. Ці характеристики ускладнюють їх використання в умовах циклічних температурних навантажень, які є типовими для авіаційних двигунів. Крім того, різниця в коефіцієнтах термічного розширення між керамічним покриттям та металевою основою може призводити до виникнення термічних напружень та відшарування покриття.

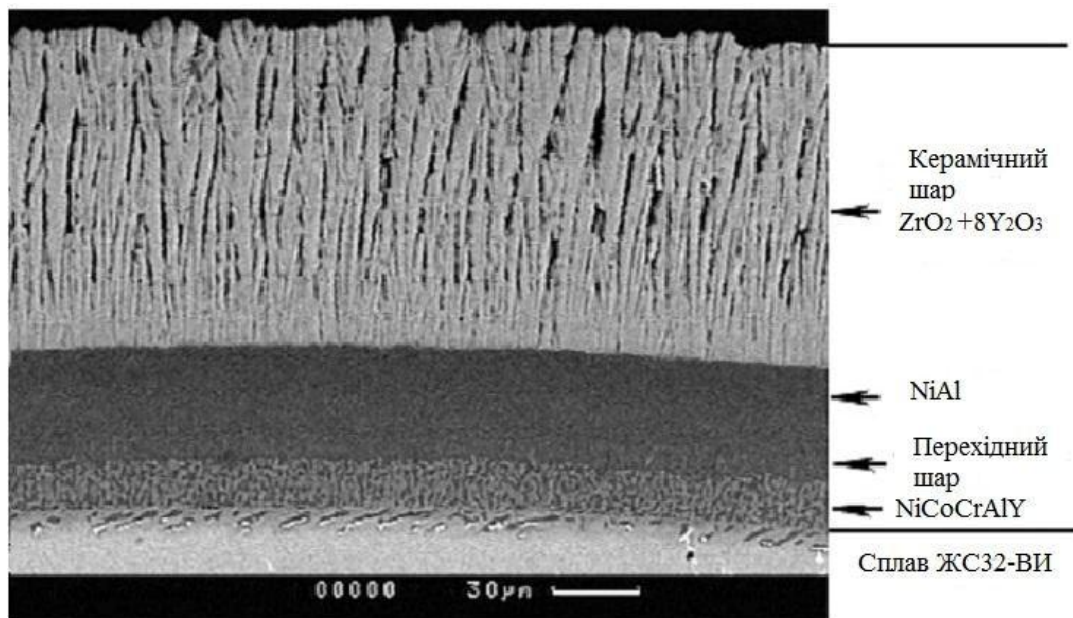


Рисунок 1.9 – Мікроструктура поперечного перерізу комплексного жаростійкого покриття

Керамічний шар, нанесений плазмовим газотермічним методом, характеризується пористістю на рівні (5...20)% та низькою теплопровідністю $\lambda \leq (1,0...1,5) \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ у діапазоні робочих температур ($1000...1200^{\circ}\text{C}$). Це забезпечує температурний перепад у керамічному шарі покриття приблизно 100°C при його товщині 100...150 мкм. Досліджена мікроструктура керамічного покриття, нанесеного на жаростійкий сплав ЖС32-ВИ, підтверджує ці характеристики [16]

З отриманих результатів випливає, що застосування керамічних покриттів обмежується недостатніми запасами міцності при згинальних та розтягувальних навантаженнях внаслідок схильності до розтріскування під впливом теплових навантажень [17].

2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Характеристика матеріалів та об'єктів експериментального дослідження

У даному розділі представлено основні матеріали, використані для проведення експериментальної частини роботи. Виходячи з цього досліджено вплив легування ущільнювального покриття типу КНА (1.5-2.5 % С, 0.3-1.2 % Al, 7-13 % BN, 91.8-83.3 % Ni+Si) на його фізико-механічні властивості.

Покриття наносилось газополуменевим методом на спеціально підготовлені зразки (рис. 2.1). Перед нанесенням покриття поверхня зразків піддавалася ретельній підготовці, що включала знежирення, абразивно-струменеву обробку корундовим піском (фракція 0,6-0,8 мм) під тиском 0,5-0,6 МПа для створення шорсткості $R_a = 40-60$ мкм, і фінальну очистку стисненим повітрям для видалення залишкових абразивних частинок.



Рисунок 2.1 - Зовнішній вигляд напилених зразків

На матеріал основи попередньо наносився жаростійкий підшар товщиною 100-150 мкм, який уявляє собою нікелевий сплав, що містить компоненти (Al і Cr), що формують при високих температурах захисну оксидну плівку. Хімічний склад підшару: Ni - основа, 18-22% Cr, 8-12% Al, 0,8-1,2% Y. Це забезпечувало як опір високотемпературній корозії, так і високу адгезійну міцність ущільнювального покриття з матеріалом основи. Нанесення підшару здійснювалось при наступних технологічних параметрах:

тиск кисню - 0,35-0,4 МПа, тиск ацетилену - 0,07-0,09 МПа, дистанція напilenня - 150-180 мм.

Для експериментального дослідження використовувались зразки покриттів різних складів, що містили ітрій у різних концентраціях (таблиця 2.1). Базовим матеріалом для всіх досліджуваних зразків був КНА-82, який модифікувався шляхом додавання ітрію в різних формах: у вигляді порошку лігатури Ni-Y (зразок №1), чистого ітрію (зразок №2) та порошку лігатури Co-Ni-Cr-Al-Y (зразок №3). Для порівняльного аналізу також використовувався контрольний зразок КНА-82 без додавання ітрію (зразок №4).

Таблиця 2.1 – Склад вихідного матеріалу та вміст ітрію в (% мас.)

№ п/п	Матеріал	Склад	Вміст ітрію, %		
			Лігатура	Шихта	Покриття
1	Покриття складу №1	КНА-82 + порошок лігатури Ni-Y	18,4	0,3	0,3
2	Покриття складу №2	КНА-82 + чистий ітрій	99	2,3	2,1
3	Покриття складу №3	КНА-82 + порошок лігатури Co-Ni-Cr-Al-Y	0,7	0,1	0,1
4	Покриття складу №4	КНА-82	-	-	-

2.2 Методика мікрорентгеноспектральних досліджень

Для визначення розподілу хімічних елементів в ущільнювальному покритті за перетином шліфа було проведено мікрорентгеноспектральні дослідження. Аналіз виконувався на растровому електронному мікроскопі JSM-6490LV (JEOL, Японія), оснащеному енергодисперсійним

спектрометром INCA Energy 350 (Oxford Instruments, Великобританія) з роздільною здатністю 133 eV.

Підготовка зразків включала поетапне шліфування та полірування поверхні досліджуваних покриттів до дзеркального блиску. Шліфи виготовлялись методом поперечного перерізу покриття для забезпечення можливості аналізу розподілу елементів по всій товщині шару. Для запобігання накопичення електричного заряду на поверхні під час аналізу, зразки попередньо покривались тонким шаром вуглецю товщиною 15-20 нм у вакуумній установці.

Мікрорентгеноспектральний аналіз проводився при прискорюючій напрузі 20 кВ та струмі зонда 10 нА. Для отримання кількісних даних про елементний склад використовувались стандартні зразки порівняння. Дослідження проводились методом лінійного сканування з кроком 1 мкм, що дозволило побудувати профілі розподілу концентрацій елементів (C, Al, Ni, Si, Y, B, N) вздовж перетину шліфа.

Для виявлення локальних неоднорідностей хімічного складу додатково проводилось картування розподілу елементів по площі зразка з використанням режиму формування карт розподілу в характеристичному рентгівському випромінюванні. Час збору даних для кожної точки становив 100 секунд, що забезпечувало достатню статистичну достовірність результатів вимірювань.

Обробка отриманих даних здійснювалась за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення INCA Energy, що дозволило визначити концентрації елементів з точністю до 0,1% мас. та побудувати графіки їх розподілу за перетином шліфа.

2.3 Методика визначення мікроструктури на оптичному мікроскопі

Мікроструктурний аналіз ущільнювальних покриттів типу КНА проводився на металографічному інвертованому мікроскопі МИМ-8 з цифровою фотонасадкою. Дослідження виконувалися при збільшеннях від $100\times$ до $500\times$, що забезпечувало оптимальну деталізацію структурних елементів різного масштабу.

Підготовка зразків здійснювалася за стандартною методикою металографічних досліджень і включала вирізання зразків перпендикулярно до поверхні покриття, запресовування у бакелітову смолу та поетапне шліфування на водостійких шліфувальних паперах різної зернистості (від P180 до P2000). Фінішне полірування виконувалося на фетрових кругах з використанням алмазних паст зернистістю 3 мкм, 1 мкм та 0,5 мкм. Для виявлення мікроструктури поліровані шліфи піддавалися хімічному травленню в спеціальному реактиві ($3\% \text{HNO}_3 + 3\% \text{HF} + 94\% \text{H}_2\text{O}$) протягом 10-20 секунд з подальшим промиванням у дистильованій воді та сушінням теплим повітрям.

При дослідженні мікроструктури особлива увага приділялася наступним аспектам: характер розподілу основних фазових складових (нікель-кремнієва матриця, частинки нітриду бору, вуглецеві включення); наявність та розподіл легуючих елементів, зокрема ітрію; однорідність структури за перетином покриття; характер перехідної зони між покриттям та основою; наявність мікропор, мікротріщин та інших дефектів структури.

2.4 Методика дослідження мікроструктури на растровому електронному мікроскопі

Для детального дослідження мікроструктури, морфології поверхні та хімічного складу ущільнювальних покриттів типу КНА використовувався растровий електронний мікроскоп РЕМ-106И (ВАТ "СЕЛМІ", Україна). Даний метод дозволяє отримувати зображення поверхні зразка з високою роздільною здатністю (до 4 нм) та великою глибиною фокуса при збільшеннях від $15\times$ до $100000\times$.

Підготовлені шліфи після металографічних досліджень додатково піддавалися фінішному поліруванню алмазною пастою зернистістю 0,25 мкм для забезпечення максимально гладкої поверхні. Перед встановленням у вакуумну камеру мікроскопа на поверхню зразків наносилося тонке електропровідне вуглецеве покриття методом термічного випаровування у вакуумі для запобігання накопичення статичного заряду під час дослідження.

Дослідження проводилося у режимі вторинних та відбитих електронів при прискорюючій напрузі 20-30 кВ та струмі електронного пучка 60-100 мкА. Режим вторинних електронів забезпечував високу топографічну контрастність зображення, що дозволяло детально вивчати рельєф поверхні, форму та розміри структурних складових, наявність мікротріщин та пор. Режим відбитих електронів давав можливість отримати фазовий контраст зображення, що базується на різниці атомних номерів елементів, які входять до складу різних фаз.

Мікроскоп був оснащений енергодисперсійним рентгенівським спектрометром, що дозволяло проводити локальний хімічний аналіз у вибраних точках поверхні зразка з розміром області аналізу близько 1 мкм. Це давало можливість визначити елементний склад різних структурних складових покриття та дослідити розподіл легуючих елементів, зокрема ітрію, між різними фазами.

Для кожного зразка було отримано серію мікрофотографій при різних збільшеннях (від $500\times$ до $5000\times$) та в різних режимах візуалізації. Проведено картування розподілу елементів по поверхні шліфа для виявлення областей концентрації легуючих елементів та встановлення характеру їх взаємодії з основними компонентами покриття.

Отримані результати електронно-мікроскопічних досліджень дозволили встановити тонкі особливості структури покриттів, недоступні при використанні оптичної мікроскопії, та виявити закономірності впливу легування ітрієм на формування мікроструктури та фазового складу ущільнювальних покриттів типу КНА.

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

3.1 Обґрунтування вибору ітрію та комплексних лігатур для модифікування ущільнювальних покриттів

Вибір ітрію як ключового модифікуючого елемента для експериментальних ущільнювальних покриттів обумовлений комплексом його унікальних фізико-хімічних властивостей. Цей рідкоземельний метал характеризується відносною доступністю (достатня розповсюдженість у земній корі), високою температурою плавлення та винятковою хімічною активністю, що забезпечує його рафінувальну дію в покриттях. Особливо цінною є горючність здатність ітрію, яка позитивно впливає на морфологію включень і структурну стабільність композиції, знижує ліквідаційну неоднорідність та перешкоджає утворенню небажаних топологічно щільноупакованих фаз.

Ключова роль ітрію у підвищенні високотемпературної корозійної стійкості покриттів пояснюється його надзвичайно високою термодинамічною активністю (електрохімічний потенціал $-2,37$ В) та схильністю до утворення стабільних оксидних плівок Y_2O_3 . Оксид ітрію відзначається винятковою термічною стабільністю, відсутністю фазових перетворень до 1800°C , низькою леткістю та підвищенням міцнісних характеристик з ростом температури. Формування таких оксидних сполук на поверхні покриттів суттєво підвищує їх стійкість до газової корозії в умовах високотемпературної експлуатації авіаційного двигуна та одночасно сприяє забезпеченню необхідної зносостійкості після етапу припрацювання контактуючих поверхонь.

Дослідження монокомпонентної Y-лігатури дозволяє встановити характер впливу саме ітрієвої складової на експлуатаційні характеристики покриттів (жаростійкість, припрацьовуваність, ерозійну стійкість), що

необхідно для подальшої оптимізації кількісного вмісту ітрію в складніших композиційних лігатурах.

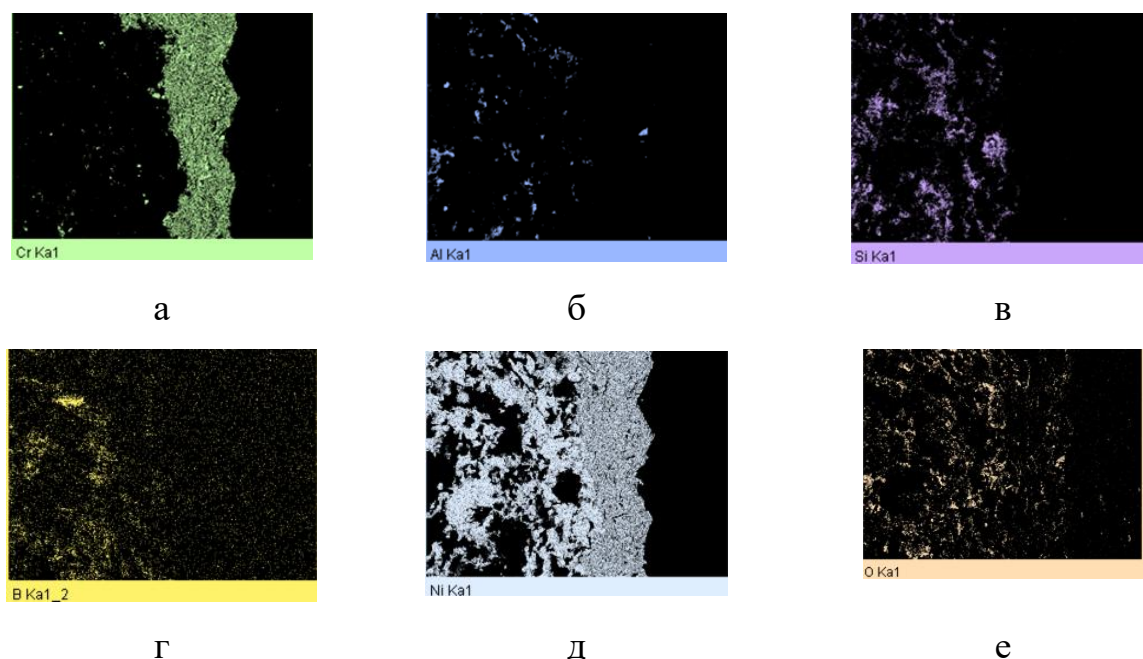
Концепція використання більш складних лігатур, зокрема Ni-Y, базується на функціональних вимогах до ущільнювальних покриттів протягом усього життєвого циклу двигуна. На початковому етапі експлуатації покриття повинні мати відносно невисоку твердість для ефективного припрацювання, а в подальшому – поступово зміцнюватись після формування геометрії доріжок, що відповідають контуру роторних деталей. Цей ефект досягається шляхом поетапного розвитку фазових перетворень у структурі: спочатку формуються оксидні сполуки Y_2O_3 , а за тривалого термічного впливу – термостабільні інтерметаліди на основі системи Ni-Y з температурою плавлення близько $1500^{\circ}C$. Додатковою перевагою підвищеного вмісту нікелю є можливість формування зносостійких інтерметалідів типу NiAl замість менш стійких Ni_3Al .

Такий підхід до модифікування ущільнювальних покриттів забезпечує ефект "самозміцнення" в процесі експлуатації: спочатку полегшене припрацювання, а в подальшому – підвищена зносостійкість завдяки формуванню термодинамічно стабільних оксидних та інтерметалідних фаз.

3.2 Дослідження розподілу хімічних елементів у покритті методом мікрорентгеноспектрального аналізу

Для встановлення характеру розподілу хімічних елементів в структурі ущільнювального покриття за перетином шліфа було проведено детальні мікрорентгеноспектральні дослідження з використанням енергодисперсійного спектрометра растрового електронного мікроскопа РЕМ-106И як зазначалось в розділі матеріалу та методики. Метод дозволив отримати кількісну інформацію про концентрацію та локалізацію основних компонентів покриття

(Ni, Al, Cr) та легуючих елементів (Y) в різних структурних складових. Розподіл основних елементів наведено на рисунках 3.1-3.4.



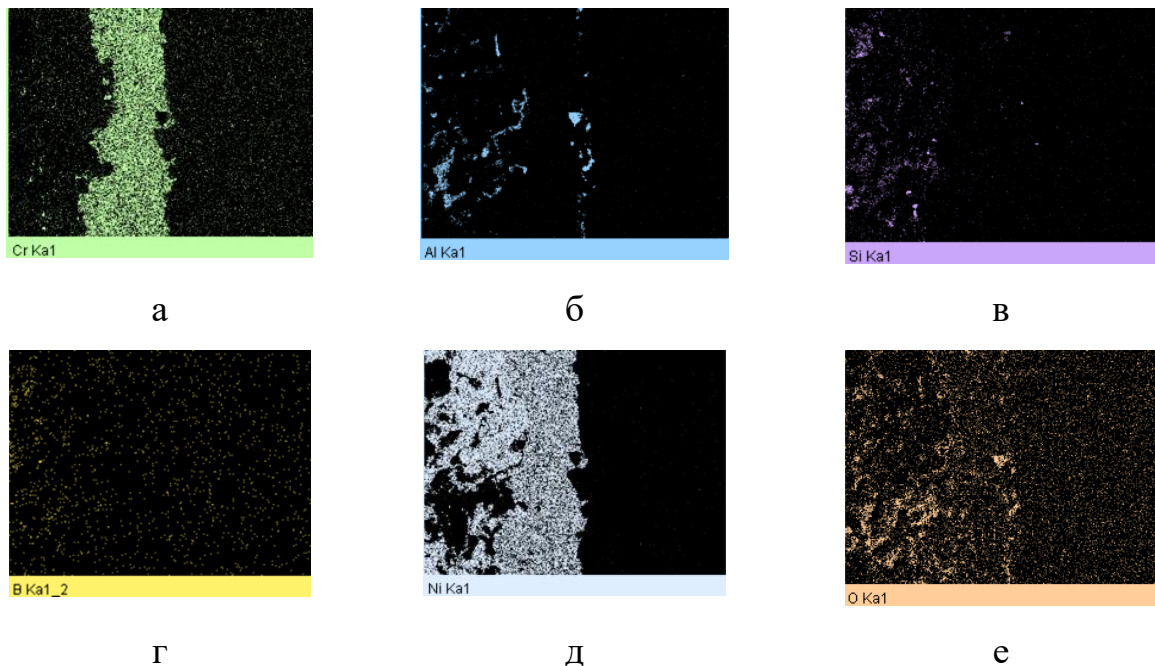
а – Cr, б - Al; в - Si; г - B; д - Ni; е - O

Рисунок 3.1 - Розподіл хімічних елементів в покритті КНА-82+Ni-Y

За результатами спектрального аналізу виявлено чітко виражений проміжний шар на основі нікель-хромового сплаву. Цей шар призначений для компенсації внутрішніх напружень, що формуються при нанесенні ущільнювальних покриттів через різницю коефіцієнтів температурного лінійного розширення матеріалів.

У структурі покриттів зафіксовано глобулярні оксидні включення, що містять алюміній та кремній. Встановлено, що введення ітрію як легуючого елемента позитивно впливає на дисперсність структури та однорідність розподілу компонентів у площині шліфа. При цьому найкращу рівномірність розподілу елементів демонструють покриття, леговані як монологатурою ітрію, так і комплексною лігатурою складу Co-Ni-Cr-Al-Y.

Аналіз показав, що невеликі концентрації хрому та алюмінію у складі покриття характеризуються нерівномірним розподілом та схильністю до утворення оксидів на поверхні пор.



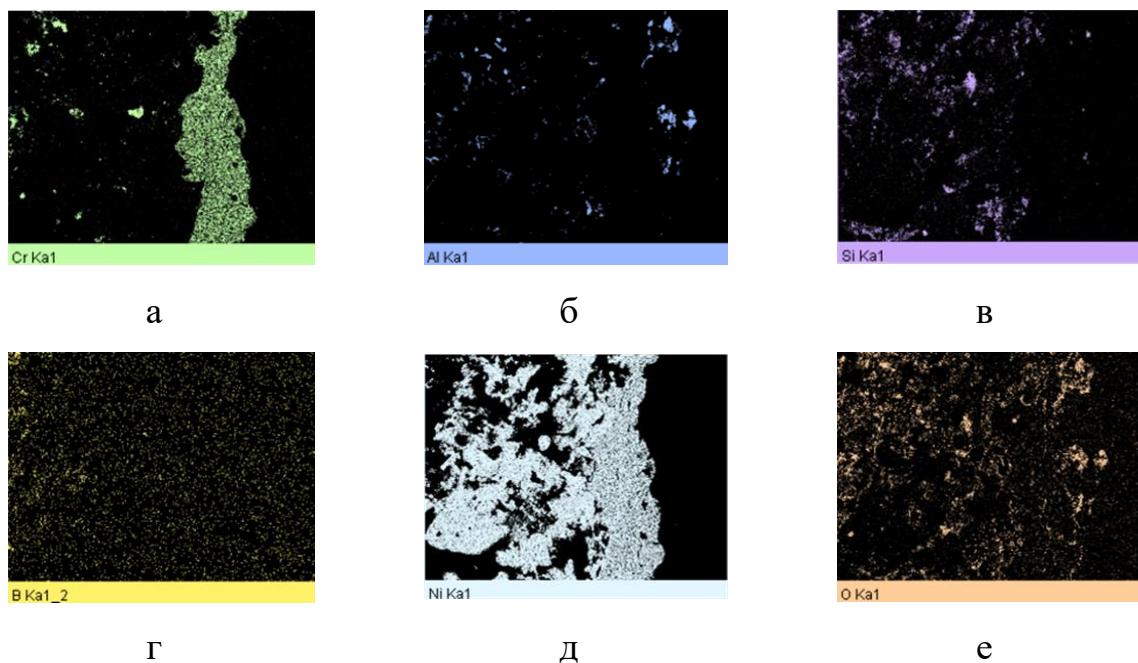
а – Cr, б - Al; в - Si; г - B; д - Ni; е - O

Рисунок 3.2 – Розподіл хімічних елементів в покритті КНА-82+Y

У більшості зразків нітрид бору демонструє рівномірний розподіл по товщині покриття. Однак покриття КНА-82 та КНА-82 з додаванням Ni-Y мають особливість у вигляді скупчення нітриду бору в певних порових утвореннях.

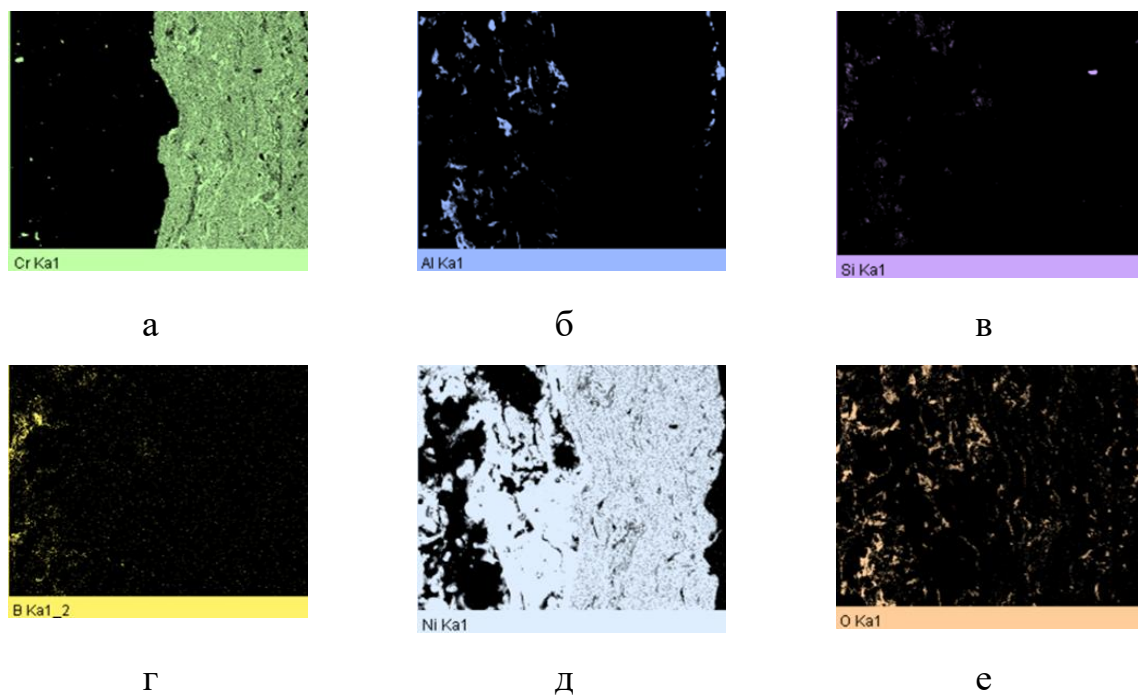
Це явище можна пояснити особливостями фізико-хімічних процесів, що відбуваються при формуванні покриттів методом плазмового напилення. Під час кристалізації розплавлених частинок відбувається інтенсивне газовиділення, що призводить до утворення пористої структури. При цьому нітрид бору, маючи високу спорідненість до газової фази, мігрує в зони з підвищеною пористістю та накопичується на стінках пор.

Слід зазначити, що така нерівномірність розподілу може мати двоякий вплив на властивості покриття. З одного боку, локальне скупчення нітриду бору в порах може призводити до зниження міцності зчеплення між шарами покриття та погіршення його цілісності.



а – Cr, б - Al; в - Si; г - B; д - Ni; е - O

Рисунок 3.3 - Розподіл хімічних елементів в покритті КНА-82+Co-Ni-Cr-Al-Y

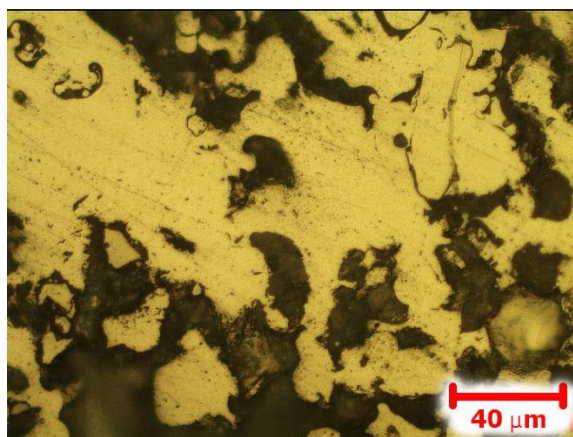


а – Cr, б - Al; в - Si; г - B; д - Ni; е - O

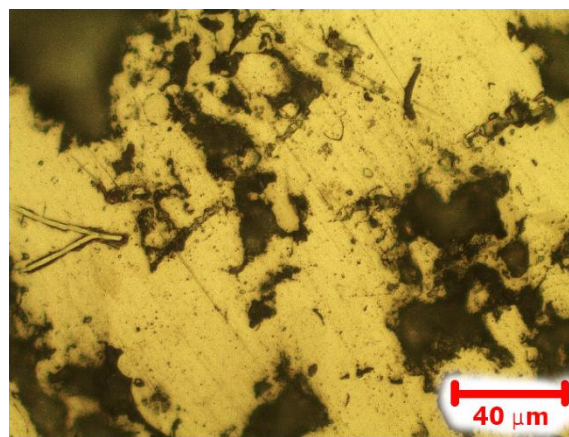
Рисунок 3.4 – Розподіл хімічних елементів в покритті КНА-82

3.2 Дослідження мікроструктури експериментальних покриттів, отриманих газотермічним методом

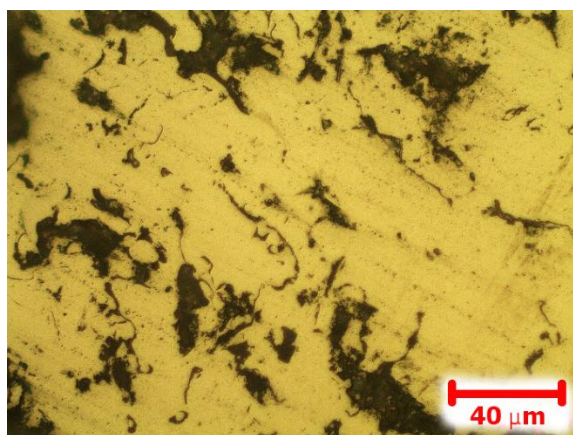
Мікроструктурний аналіз покриттів дає змогу визначити закономірності впливу хімічного складу на формування структурних компонентів, морфологічні характеристики та особливості розподілу частинок, а також провести кількісну оцінку пористості матеріалу після процесу газополуменевого напилення.



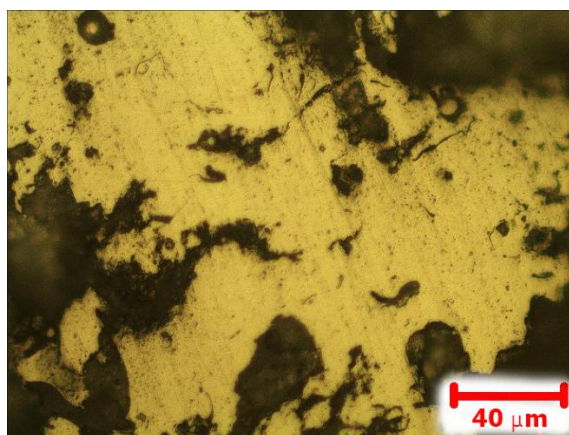
а



б



в



г

а – склад №1; б - склад; №2; в – склад №3 ;г - склад №4

Рисунок 3.5 – Мікроструктура досліджених покриттів

Згідно з даними, представленими на рисунку 3.5, а, покриття складу КНА-82+Ni-Y характеризується наявністю частинок грубої морфології, які нерівномірно розподілені в об'ємі матеріалу. Значна частина цих частинок має нерівновісну багатогранну форму. Пори у сформованому покритті розташовані нерівномірно та характеризуються значним розкидом розмірів.

У процесі нанесення покриття складу КНА-82+Y формувалися більш дисперсні частинки легувальних елементів, значна кількість яких мала близьку до рівновісної форму (рис. 3.5, б). Розподіл пор по перерізу шліфа став більш однорідним, при цьому спостерігається велика кількість дрібних пор. Водночас, у полі зору фіксуються і пори значно більших розмірів.

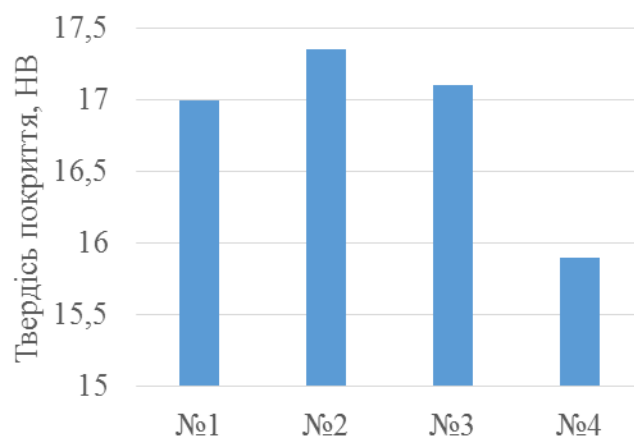
Покриття складу КНА-82+CoNiCrAlY також демонструє рівномірний розподіл дрібнодисперсних частинок легувальних компонентів по перерізу (рис. 3.5 в). Пори розташовані в площині перерізу більш однорідно, значного варіювання їх розмірів не спостерігається.

Покриття КНА-82, зображене на рисунку 3.5, г, характеризується наявністю частинок грубої форми з виразною огранкою. Пори в даному покритті є достатньо великими та розподілені нерівномірно.

Проведені дослідження мікроструктури свідчать про визначальну роль легувальних елементів у формуванні структурних характеристик покриттів. Встановлено, що застосування ітрію та комплексної лігатури CoNiCrAlY забезпечує формування більш дисперсної та однорідної структури з рівномірно розподіленими порами малих розмірів, що сприятиме підвищенню експлуатаційних властивостей покриттів. Базове покриття КНА-82 без легування демонструє найменш оптимальні структурні характеристики.

3.3 Дослідження твердості та міцності ущільнювальних покриттів

Враховуючи, що працездатність ущільнювального покриття визначається його здатністю до швидкого припрацювання на етапі запуску та високою ерозійною стійкістю при тривалій експлуатації двигуна, постала задача вивчення еволюції твердості покриття в процесі роботи. Встановлено, що у вихідному стані, до високотемпературного впливу, покриття демонструють порівняно низькі показники твердості HB (рис. 3.6), що пояснюється значною пористістю структури, специфікою міжчастинкової когезії та обмеженим вмістом оксидів і інтерметалідів.



№1 – КНА-82+Ni-Y; №2 – КНА-82+Y; №3 – КНА-82+Co-Ni-Cr-Al-Y;
№4 – КНА-82

Рисунок 3.6 – Залежність твердості покриттів від хімічного складу лігатур

Більш високі показники твердості покриттів, додатково легованих різними складами лігатур, у вихідному стані після напилення зумовлені, по-перше, інтенсифікацією дифузійних процесів під час формування газотермічних покриттів, по-друге, присутністю після напилення оксидів Al_2O_3 , Y_2O_3 та збереженням інтерметалідних фаз Ni_5Y , NiAl , Ni_3Al , Co_2Al_3 ,

CoCr₂. Оскільки співвідношення зазначених фаз в отриманих експериментальних покриттях варіюється, твердість також демонструє певні відмінності, хоча й незначні.

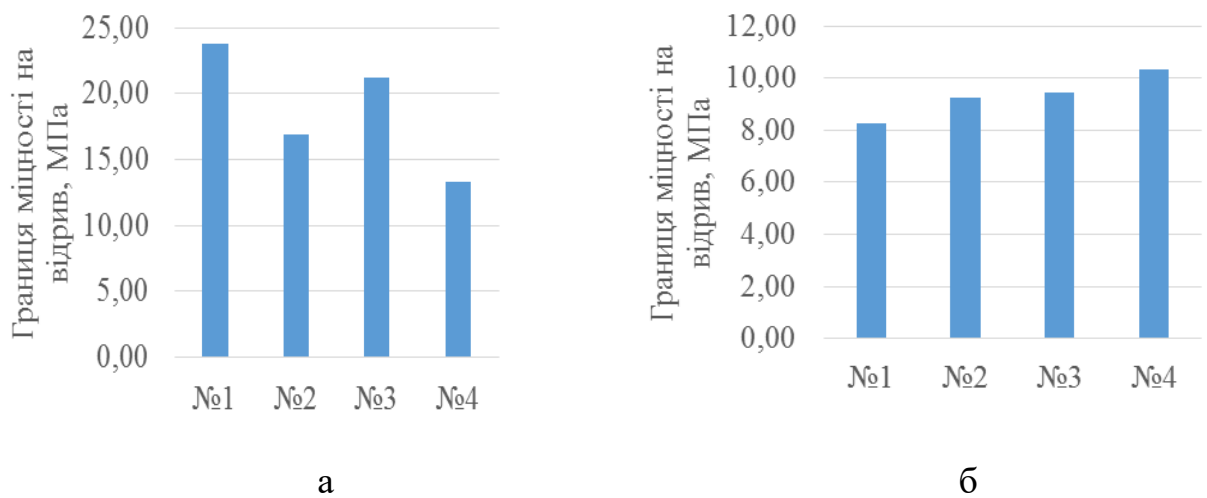
Як видно з представленого графіка (рис. 3.6), найвищі показники твердості характерні для покриття складу №2 (КНА-82+Y), яке демонструє значення близько 17,3 НВ. Дещо нижчі, але близькі результати показують покриття №1 (КНА-82+Ni-Y) та №3 (КНА-82+Co-Ni-Cr-Al-Y) з твердістю приблизно 17,0 НВ. Найменше значення твердості – близько 15,9 НВ – зафіксовано для базового покриття №4 (КНА-82) без легувальних добавок. Таким чином, введення легувальних елементів підвищує твердість покриттів порівняно з базовим складом приблизно на 8-9%.

Помірне зростання твердості обумовлене окисленням окремих нітридних фаз, зокрема BN, внаслідок чого у структурі з'являється V₂O₃, що негативно впливає на твердість та зносостійкість покриття. Додатковим чинником уповільнення приросту твердості є розвиток процесів коагуляції інтерметалідних частинок, сформованих на початковій стадії високотемпературного впливу.

На підставі проведених досліджень встановлено, що введення легувальних добавок забезпечує підвищення твердості покриттів до 17,0-17,3 НВ порівняно з 15,9 НВ для базового складу. Формування підвищеної твердості обумовлене інтенсифікацією дифузійних процесів та присутністю зміцнювальних оксидних і інтерметалідних фаз. Помірний характер подальшого зростання твердості зумовлений конкуруючою дією процесів окислення нітриду бору та коагуляції інтерметалідних частинок, що створює оптимальний баланс властивостей для практичного застосування покриттів.

Оскільки під час взаємодії ротору і статору на ущільнювальне покриття діють як нормальні, так і тангенціальні навантаження, виникла необхідність визначення характеру адгезійної взаємодії покриттів з основою. Враховуючи, що ущільнювальні покриття наносяться на різні жароміцні сплави, було

проведено дослідження границі міцності на відрив для покриттів, нанесених на основи ВЖ-102 та ЭИ-435 (рис. 3.7).



№1 – КНА-82+Ni-Y; №2 – КНА-82+Y; №3 – КНА-82+Co-Ni-Cr-Al-Y; №4 – КНА-82

а - основа ВЖ-102; б - основа ЭИ-435

Рисунок 3.7 – Залежність границі міцності на відрив від хімічного складу лігатур

Аналіз представлених на стовпчастій діаграмі результатів показує, що матеріал основи суттєво впливає на адгезійну міцність з'єднання покриття з підкладкою. Для покриттів на основі ВЖ-102 (рис. 3.7, а) найвищі значення границі міцності на відрив характерні для складу №1 (КНА-82+Ni-Y) – близько 23,5 МПа, тоді як найнижчі показники демонструє склад №4 (КНА-82) – приблизно 13,0 МПа. Покриття складів №2 та №3 показують проміжні значення – 16,5 та 21,0 МПа відповідно.

При нанесенні на основу ЭИ-435 (рис. 3.7, б) спостерігається інша закономірність: показники адгезійної міцності більш вирівняні та коливаються в діапазоні 8,0-10,5 МПа. Найбільш стабільні та високі показники спостерігались у покриттях складу №3 (КНА-82+Co-Ni-Cr-Al-Y) та №4 (КНА-82), які демонструють значення близько 9,5-10,5 МПа.

Найбільш стабільні показники адгезійної міцності для обох типів основ характерні для покриттів складу №3. Це може бути пов'язано з тим, що при використанні комплексної лігатури Co-Ni-Cr-Al-Y забезпечується оптимальне співвідношення компонентів у покритті, яке обумовлює таке фазове співвідношення, зокрема оксидних фаз Y_2O_3 і Al_2O_3 , при якому реалізується більш якісна адгезійна взаємодія із матеріалом основи.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

В розділі надані основні заходи з охорони праці при дослідженні ущільнювальних покриттів

4.1 Аналіз потенційних небезпек

а) небезпеки які пов'язані, з порушенням вимог ергономіки стосовно, організації робочих місць дослідників в приміщенні дослідницької лабораторії, зокрема невідповідності розмірів робочих зон, а також максимально можливої кількості осіб, що можуть там перебувати відповідно до СНиП 2.09.04 – 87 «Административные и бытовые здания» та СНиП 2.09.02 – 85 «Производственные здания» [51], нераціонального розташування дослідницького приладдя та офісного обладнання;

б) небезпеки які пов'язані із обробкою результатів досліджень із використанням ПК, зокрема ушкодження кістково-м'язового апарату внаслідок довготривалої роботи в однотипній позі, що може призвести до зниження працездатності та розвитку професійних захворювань;

в) небезпеки які пов'язані з можливістю ураження електричним струмом, при виконанні службових обов'язків внаслідок порушення правил з електробезпеки, несправності енергоспоживаючого обладнання, відсутності групових або індивідуальних засобів захисту, що може призвести до електричних травм або летального наслідку;

г) небезпеки які пов'язані з можливістю отримання механічних травм при виготовленні дослідницьких зразків методом пресування, та подальшої обробки для дослідження. Наявність в робочій зоні таких фізичних небезпечних та шкідливих виробничих факторів як машини та механізми,

вироби, заготовки та матеріали, що обертаються та переміщуються, при недостатній професійній підготовці фахівців, обумовлену недоліком знань технологічної та експлуатаційної документації, можуть призвести до аварійних ситуацій та травм різного ступеню важкості або летального наслідку. Також присутні такі фактори, як недосконалість конструктивних рішень кріплення штампів на технологічному обладнанні, зокрема, ненадійність кріплення штампів та їх вузлів до пресу; недосконалість конструкцій штампів, зокрема, відсутність зазорів безпеки між рухомими та нерухомими частинами штампів; відсутність технологічних отворів або інших конструктивних елементів для безпечного розміщення заготовок у штампі та безпечного вилучення деталей із них; відсутність атестації штампів та їх маркування за ступенем безпеки; відсутність надійних огорожень зони деформування; відсутність захисних пристроїв запобігання аварійних ситуацій; порушення правил з охорони праці при виконанні операцій формозмінювання; можливість отримання механічних травм внаслідок гострих кромek, заусенців на отриманих деталях або розсипання стосу заготовок.;

Можливість отримання механічних травм при підготовці зразків або дослідницьких виробів що може бути пов'язано з порушеннями правил охорони праці під час роботи з абразивним інструментом (НПАОП 28.0-1.30-12) зокрема: використання абразивного інструменту який не пройшов випробування, порушення правил експлуатації, що може призвести до тяжких травм .

д) небезпеки які пов'язані з дослідженням структури зразків методом електронної та оптичної мікроскопії з використанням електронних та оптичних мікроскопів зокрема: негативний вплив потужного електронного випромінювання на клітинному рівні, що може призвести до зниження імунітету та розвитку імунних захворювань;

е) небезпеки які виникають в наслідок невідповідності вимогам ДБН В.2.5-28-2006 «Природне і штучне освітлення» освітлення робочих зон

дослідницької лабораторії внаслідок виходу з ладу освітлювальних приладів або хибного розрахунку їх кількості та потужності, що може призвести до погіршення зору;

ж) небезпеки які виникають в наслідок незадовільних параметрів мікроклімату які повинні відповідати фізіологічним потребам організму працюючих, із врахуванням енергетичних витрат на виконувану роботу згідно з ДСН 3.3.6.042-99 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень» внаслідок неефективної роботи систем опалення та повітрообміну, що може призвести до загальних захворювань;

з) можливість загоряння внаслідок порушень правил пожежної безпеки, які зазначені в НАПБ А.01.001-2014 «Правила пожежної безпеки в Україні», а саме хибне визначення видів та кількості первинних засобів пожежогасіння відносно категорій приміщень с пожежної безпеки, що може привести до пожежі;

и) небезпеки які пов'язані з виконанням певних дій в умовах надзвичайних ситуацій, зокрема при пожежах.

4.2 Заходи забезпечення безпеки

а) конструкція робочого місця дослідника має відповідати сучасним вимогам ергономіки і забезпечувати оптимальне розміщення на робочій поверхні пристроїв і документів, які необхідні для виконання досліджень. Висота робочої поверхні робочого столу ВДТ має регулюватися в межах 680...800мм, а ширина і глибина – забезпечувати можливість виконання операцій у зоні досяжності моторного поля (рекомендовані розміри: 600...1400 мм, глибина – 800...1000мм). Робочий стіл повинен мати простір для ніг заввишки не менше ніж 600 мм, завширшки не менше ніж 500 мм,

завглибшки (на рівні колін) не менше ніж 450 мм, на рівні простягнутої ноги - ніж 650 мм.

б) при роботі з ПК світлотехнічна специфіка обумовлена світлотехнічною різномірністю об'єктів зорової роботи користувача ПК: екрана, документації і клавіатури, розташованих у різних зонах спостереження, що вимагає багаторазового переміщення лінії зору від одного об'єкта до іншого.

Об'єкти відмінності мають як негативний (темні об'єкти на світлому фоні) так і позитивний (світлі об'єкти на темному фоні) контраст. Тому відбувається постійна переадаптація від яскравих об'єктів з позитивним контрастом на темні з негативним контрастом. За восьмигодинний робочий день за монітором користувач кидає приблизно 30000 поглядів на екран, око працює з перевантаженням і не може достатньо адаптуватися до цієї ситуації. Такі особливості призводять до напруження м'язового та світло-сприймаючого апарату очей, що є однією з причин виникнення астенопічних явищ (різь в очах, біль в очах, ломить у надбрівній ділянці, розпливчастість контурів, нечіткість зображення). Постійний погляд на матове скло екрана монітора зменшує частоту кліпання очей, що призводить до висихання та викривлення роговиці ока, погіршує зір (синдром Сікка). Робота користувача за пульсуючим екраном монітора, що не відповідає нормативним вимогам щодо обмеження пульсації (блмання), викликає дискомфорт і втому (загальну і зорову). Робота з дзеркальною відбиваючою і неплоскою зовнішньою поверхнею екрана монітора, на якій з'являються численні відбиті відблиски, призводить до виникнення у користувача астенопічних явищ та функціональних змін ока. Неправильний розподіл яскравості в полі зору, тобто поверхні периферії (стеля, стіни, меблі і т.п.) висвітлені краще ніж центр поля зору, призводить до порушення основних зорових функцій ока. Засліплююча дія світильників у приміщенні, на робочому місці з ПК викликає не тільки астенопічні явища, але й функціональні порушення очей користувача.

Кольоровий шрифт збільшує навантаження на зір, оскільки складові кольорів мають різні довжини хвиль і видимі на різній віддалі. Око потребує точнішої адаптації, ніж при чорно-білому зображенні.

в) Згідно вимог НПАОП 40.1-1.01-97 «Правила безпечної експлуатації електроустановок» для безпечного проведення робіт необхідно виконати наступні організаційні заходи:

- призначити працівників, відповідальних за безпечне проведення робіт;
- видати наряд або розпорядження;
- видати дозвіл на підготовку робочих місць і на допуск;
- підготувати робочі місця та забезпечити допуск до роботи;
- забезпечити нагляд при виконанні робіт;
- при необхідності, організувати переведення на інше робоче місце;
- забезпечити оформлення перерв у роботі та порядок її закінчення.

До основних заходів захисту людини від ураження електричним струмом, відносять:

- забезпечення неможливості випадкового дотику до струмоведучих частин, що перебувають під напругою;
- електричний розподіл мережі;
- усунення небезпеки ураження з появою напруги на корпусах, кожухах та інших частинах електроустаткування, що досягається захисним заземленням, зануленням і захисним відключенням;
- використання малих напруг;
- захист від випадкового дотику до струмоведучих частин кожухами, огороженням або подвійною ізоляцією;
- захист від небезпек можливих при переході напруги з вищої сторони на нижчу;
- контроль і профілактика пошкоджень ізоляції;
- компенсація ємнісної складової струму замикання на землю;
- застосування спеціальних електрозахисних засобів, блокувань, сигналізації та запобіжних пристроїв;

– організація безпечної експлуатації електроустановок.

Використання захисного заземлення:

– робоче заземлення – це заземлення струмоведучих частин електроустановки, яке виконане для забезпечення роботи електроустановки (не з метою електробезпечності), наприклад, робоче заземлення нейтралі трансформатора;

– заземлення блискавкозахисту – це заземлення блискавкоприймача, з метою захисту об'єкта від прямого удару блискавки;

– захисне заземлення – це заземлення, яке виконане з метою електробезпечності, тобто з'єднання відкритих провідних частин (ВПЧ) із заземлювачем для захисту від непрямого дотику та від наведеного напруги.

г) Згідно аналізу потенційних небезпек найбільш ефективними заходами попередження механічних травм при використанні пристосувань для пресування є: Згідно ДСТУ 13121:2008 «Штампи для листові штамповки» кріплення штампів до пресу можливе за допомогою болтів, прихватних плит або хвостовиків. Кріплення повинно бути надійним. Кількість елементів для кріплення визначається масою штампу та зусиллям при його роботі. При кріпленні верхньої частини штампу через хвостовик, його розміри повинні відповідати отвору у повзуні пресу. Схід направляючих втулок з колонок неприпустимий. У конструкції штампів повинні бути передбачені зазори безпеки між рухомим елементом штампу та нерухомим. Величина зазорів неменше 25мм при нижньому положенні повзуна. Для безпечної подачі та видалення заготовки з штампу повинні бути передбачені технологічні отвори для зручного користування пінцетом або кліщами. При неможливості виконання цих вимог повинно бути передбачено використання захисних огорож. Функціями яких мають бути: виключення можливості потрапляння рук працюючого у небезпечну зону, виключення травмування працюючого самою захисною огорожею. Конструкція огорожі повинна давати можливість безпечного обслуговування штампу. При неможливості використання захисних пристроїв дворучне керування пресом є обов'язковим. Для

автоматичної зупинки роботи пресу у разі відхилення від нормального режиму (заклинювання пуансону, потрапляння в зону штампування сторонніх об'єктів, подвійний удар) передбачені запобіжні пристрої. До таких пристроїв належать: - обмежувачі ходу, упори, кінцеві вимикачі, гальмівні пристрої; - елементи конструкції обладнання типу «слабка ланка», зокрема, зрізні штифти, шпонки, фрікційні муфти, плавкі запобіжники; - блокуючі пристрої, які можуть бути механічними, електромеханічними, фотоелектричними; - сигналізуючі пристрої, які надають інформацію про виконання процесу або у разі прояву відхилень вказують на місце їх прояву. Такі пристрої зазвичай є частиною електричних схем ланцюгів управління обладнанням. Одними з розповсюджених випадків порушень є розміщення в матриці двох заготовок одночасно, спроба корегувати положення заготовки в матриці під час опускання пуансону, штучне блокування запобіжних пристроїв. Попереджувальними заходами можуть бути постійний контроль збоку керівників та представників профспілок, стимулювання бездоганного виконання правил з охорони праці. Заходами захисту мають бути: використання індивідуальних засобів захисту:

- спеціальний одяг;
- спеціальне взуття;
- спеціальні рукавиці;
- окуляри захисні;
- щитки наголовні.

Для уникнення механічних травм при виготовленні зразків необхідно працювати на справному станку, своєчасно проводити заміну деталей, термін експлуатації яких вже закінчився та використовувати захисні окуляри та рукавиці; для виключення травмування органів зору передбачено застосування захисних окулярів, які служать для захисту очей від ушкоджень частками твердих тіл, що летять попереду, знизу і збоку. Ці окуляри оснащені фігурними боковинами, що відкидаються. Застосовувати прозорий екран для захисту очей робітника від поранень частками, що відлітають. Заходи безпеки

при роботі на шліфувальних і заточувальних верстатах: установка абразивних кіл на верстатах повинна проводитися тільки спеціально проінструктованими наладчиками; використання абразивних кіл з дефектами заборонено; абразивні кола повинні мати штамп або наклейку про випробування – порядковий номер кола і підпис особи, відповідальної за випробування; біля кожного верстата необхідно вивісити табличку із зазначенням допустимої роботи колової швидкості використовуваних кіл і частоти обертання шпинделя верстата в хвилину; при обертанні абразивного кола, виступаючі кінці шпинделя і кріпильні деталі захистити захисними кожухами; підручники повинні мати достатній за величиною майданчик для стійкого положення оброблюваного виробу. Зазор між краєм підручника і робочою поверхнею шліфувального круга повинен бути не більше 3 мм; заборонено працювати без підручника, захисного екрана або окулярів, якщо верстат не заземлений і не обладнаний установкою для відсмоктування абразивного пилу.

д) Заходи безпеки при виконанні процесів дослідження. Об'єктиви-ахромати мають корекцію тільки для середніх кольорів видимої частини спектра, з цієї причини при білому світлі вони дають зображення з не чіткими контурами ,пофарбованими головним чином по краю поля зору . Щоб погасити всі кольори ,в яких об'єкт не має корекції ,застосовують жовто-зелений світлофільтр. З огляду на те, що об'єктиви-апохромати мають корекцію майже для всіх кольорів видимої частини спектра ,жовто-зелені світлофільтри для них зайві.

Для електронного мікроскопа «Tesla BS 540» можливі 3 варіанти аварійної ситуації:

- відключення електроживлення;
- відключення води;
- прорив повітря в вакуумну систему.

У таких ситуаціях першочерговим завданням вважається охолодження печі дифузійного насоса і, по можливості, збереження вакууму в системі. У всіх випадках слід спочатку відключити високу напругу, піч диференційного

насоса і вимкнути головний автомат на стінці. При відмові водопостачання постаратися обмотати мокрими ганчірками піч диференційного насоса і включити вентилятор для обдування. Гарячі мокрі ганчірки слід міняти, поки вакуум в системі не почне падати. після охолодження приступити до усунення несправності. При прориві повітря в колону мікроскопа, як правило, спрацьовує автоматика, відсікаючи дифузійний насос від решти обсягу, і вимикається напруження катода і висока напруга. Треба тільки простежити, щоб форвакуумний насос не працював «на повітря», а переключити його на закритий обсяг, наприклад на відкачку боксу з фотопластинками.

4.3 Заходи з виробничої санітарії

Заходи з виробничої санітарії і гігієни праці визначаються відповідно до вимог Державних санітарних норм і правил «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу», зареєстрованих МЮ України 06.05.2014 р. за № 472/25249, з урахуванням виявлених, в процесі аналізу потенційних небезпек, небезпечних і шкідливих виробничих факторів.

Санітарний клас виробництва і розміри його санітарно-захисної зони визначаються з урахуванням наявних шкідливих виробничих факторів, згідно вимог ДСП 173-96 «Державні санітарні правила планування та забудови населених пунктів».

е) параметри мікроклімату і чистоти повітря визначають згідно вимог ДСН 3.3.6-042-99 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень», в залежності від категорії фізичних робіт, для певних робочих місць (постійних і непостійних). Постійне робоче місце – це місце, на якому працюючий знаходиться понад 50% робочого часу або більше 2-х годин безперервно. Якщо при цьому робота здійснюється в різних пунктах робочої зони, то

постійним робочим місцем вважається вся ця зона. Непостійне робоче місце – це місце, на якому працюючий знаходиться менше 50% робочого часу або менше 2-х годин безперервно.

Необхідно враховувати, що:

- для постійних робочих місць визначаються оптимальні та допустимі параметри мікроклімату в холодний та теплий період року;

- для непостійних робочих місць визначаються тільки допустимі параметри мікроклімату в холодний та теплий період року.

- в холодний період року на постійних робочих місцях: температура оптимальна 18-20 °С, допустима 17-23 °С; відносна вологість: оптимальна 40-60 %, допустима 75 %; швидкість переміщення повітря: оптимальна не більше 0,2 м/с, допустима не більше 0,3 м/с;

- в холодний період року на непостійних робочих місцях допустима температура: 15-24 °С; допустима відносна вологість: 75 %; допустима швидкість переміщення повітря: не більше 0,3 м/с;

- в теплий період року на постійних робочих місцях: температура оптимальна 21-23 °С, допустима 18-27 °С; відносна вологість: оптимальна 40-60 %, допустима 40-60 %; швидкість переміщення повітря: оптимальна не більше 0,3 м/с, допустима не більше 0,2-0,4 м/с;

- в теплий період року на непостійних робочих місцях допустима температура 17-29 °С; допустима відносна вологість: 65 % 45при температурі 26 °С; допустима швидкість переміщення повітря: 0,2-0,4 м/с [25].

Захист від шкідливих газів, паро- та пило-виділень передбачає обладнання місцевої витяжної вентиляції для відсосу отруйних речовин безпосередньо від місць їх утворення. Місцеві відсоси влаштовують конструктивно вбудованими та заблокованими з обладнанням так, що агрегат не можна запустити при виключеному відсосі.

- при роботі з отруйними і забруднюючими речовинами використовують спецодяг – комбінезони, халати і фартухи;

- для захисту від лугів і кислот – гумове взуття і рукавички;

- для захисту шкіри рук, обличчя та шиї застосовують захисні пасти: антитоксичні, маслостійкі та водостійкі;

- очі від можливих опіків і подразнень захищають окулярами з герметичною оправою, масками та шоломами;

- для захисту органів дихання використовують фільтруючі та ізолюючі прилади (протигази і респіратори).

ж) Виробниче освітлення організується і нормується згідно вимог ДБН В.2.5-28-2018 «Природне і штучне освітлення», залежно від:

- розряду зорової роботи, тобто її характеристики (найменшого розміру об'єкта який різниться, світлості фону, контрасту об'єкта з фоном);

- виду і системи освітлення.

Також необхідно врахувати, що передбачається оптимальне (необхідне) освітлення виробничих приміщень і робочих місць:

- природне (бокове або верхнє);

- штучне: робоче, аварійне, евакуаційне, охоронне, чергове.

4.4 Заходи з пожежної безпеки

Заходи з пожежної безпеки зазначаються відповідно до вимог НАПБ А.01.001-2014 «Правила пожежної безпеки в Україні»

з) Категорію виробництва за пожежною небезпекою (А, Б, В, Г, Д) споруд (приміщень) цеху (ділянки, підстанції) визначають на основі аналізу речовин і матеріалів, що використовуються у виробництві, відповідно до вимог ДСТУ Б В.1.1-36:2016 «Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою» і СНиП 2.09.02-85 «Производственные здания». Відповідно до категорії виробництва з пожежної небезпеки та вимогами ДБН В.1.1-7:2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги», визначають ступінь вогнестійкості

приміщення цеху (дільниці, підстанції). Шляхи евакуації працівників на випадок пожежі (переходи, евакуаційні виходи) передбачають згідно вимог ДБН В.1.1-7:2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги».

Охоронно-пожежна сигналізація неадресного типу – «PERCoPU01»

влаштована на неадресних (порогових) датчиках. Обладнання розраховане на цілодобову роботу і відповідає необхідним вимогам пожежної безпеки. До складу системи ОПС входить панель PERCo-PU01 1-01, блок управління і індикації PERCo-AU02 1-01 та програмне забезпечення PERCo-S-20.

Панель PERCo-PU01 1-01 системи ОПС призначена для прийому сповіщень від шлейфів сигналізації з пожежними та охоронними сповіщувачами або інших приладів, перетворення сигналів, видачі сповіщень про пожежу і/або проникнення з включенням оповіщення та інших виконавчих пристроїв і передачі сповіщень на пульт централізованого спостереження.

Система ОПС на неадресних (порогових) сповіщувачах PERCoPU01 дозволяє:

- контролювати стан пожежних, охоронних шлейфів сигналізації;
- видавати повідомлення про пожежу та проникнення на блоці індикації;
- включати систему оповіщення та інші виконавчі пристрої комплексної системи безпеки;
- передавати повідомлення на Пульт централізованого спостереження, якщо він передбачений проектом.

Разом із системою ОПС можуть працювати такі види охоронних датчиків, як:

- інфрачервоні, що реагують на рух;
- магнітоконтатні, що реагують на розмикання дверей;
- акустичні, що реагують на розбивання скла.

Порогова охоронно-пожежна сигналізація – «PERCo-PU01» може працювати як автономно, так і в складі комплексної системи безпеки PERCo-S-20 спільно з відеоспостереженням, контролем доступу і системою

підвищення ефективності управління. Істотно розширюються можливості по управлінню обладнанням і обробці інформації, що надходить - при наявності модулів «Моніторинг» або «Центральний пост» на моніторі охоронця автоматично видається інформація про пожежу із зазначенням місця його виникнення на графічному плані підприємства. В охоронюваних приміщеннях встановлюються порогові пожежні або охоронні сповіщувачі, які об'єднуються в шлейфи сигналізації і підключаються до PERCo-PU01 1-01.

4.5 Заходи безпеки в умовах НС

и) Підвищення міцності промислових споруд, а також їх стійкості до дії ударної хвилі, по-перше, пов'язано із значними затратами, а по-друге, все ж неповністю гарантують їх збереження в епіцентрі ядерного вибуху. У зв'язку із цим проведення робіт по зміцненню тих чи інших споруд може плануватись і здійснюватися лише в цілях захисту особливо цінного, унікального обладнання або в тих випадках, коли окремі важливі споруди мають значно меншу міцність, ніж інші, і «підтягнувши» їх міцність до середніх по заводу величин, можна без великих затрат підвищити стійкість об'єкту в цілому.

Вибір заходів, які забезпечують підвищення стійкості об'єкту, визначається різними місцевими умовами в кожному конкретному випадку. Найбільш ефективними являються заглиблення, зменшення парусності і висоти споруд. Міцність і жорсткість конструкцій можна підвищити встановленням контрфорсів, підкосів, додаткових рамних конструкцій, розпірок і відтяжок. Стійкість незначних по розмірам споруд підвищується шляхом обсіпки нижньої частини їх стін ґрунтом (піском і т.п.). Цей же спосіб значно підвищує захисні властивості споруд по відношенню до дії радіаційних випромінювань.

Захист обладнання і готової продукції передбачає розміщення деяких видів обладнання і продукції у заглиблення в приміщеннях, а також підготовку індивідуальних захисних пристроїв.

Надійно захистити все обладнання від впливу ударної хвилі практично неможливо, оскільки доводити міцність цехових споруд до захисних властивостей сховищ економічно недоцільно. Задача полягає в тому, щоб звести до мінімуму небезпеку руйнування і пошкодження особливо цінного обладнання, унікальних шліфувальних, токарних, розточних і зубофрезерних станків, пресів і кувальних машин, насосного обладнання, розрахунково-аналітичних машин і тощо.

Для зменшення руйнування обладнання підсилюють його найбільш слабкі деталі та вузли, виготовляють їх з'ємними і створюють запаси для заміни пошкоджених. Стійкість обладнання від падіння під дією ударної хвилі ядерного вибуху підвищують шляхом надійного закріплення на фундаменті, створення контрфорсів, заглиблень. Запас найбільш нестійких деталей і вузлів для важливого унікального обладнання слід утримувати в спорудах, які забезпечили б їх збереження при дії ударної хвилі.

Підвищення стійкості обладнання може бути досягнуто також шляхом заміни застарілих зразків новими, які найбільш відповідають вимогам до їх стійкості, а також скороченням числа типомоделей станків, що використовуються, що в подальшому значно спростить проведення ремонтних і відновлювальних робіт; заміною горючих і вибухонебезпечних змащувально-охолоджувальних рідин (наприклад, сульфозфрезолу, фрезолу, керосину) емульсіями; впровадженням в процеси термічної обробки с.в.ч. і т. п.

Важливе значення має і раціональне розміщення обладнання. Найбільш цінне і нестійке обладнання і прилади слід розміщувати в найбільш міцних приміщеннях, важкі станки, машини і агрегати повинні розташовуватись на нижніх поверхах споруд. Машини і станки великої цінності рекомендується розміщувати не в основних промислових, а у окремо розташованих спорудах,

які мають легкі конструкції і конструкції, які важко горять, руйнування їх не приведе до руйнування цього обладнання.

Особливо велике значення має стійкість і розгалуженість систем енергетичного забезпечення (електроенергія, газо-, паро- і теплопостачання, забезпечення стисненим повітрям).

До числа заходів, які можуть бути рекомендовані для підвищення стійкості роботи систем енергопостачання, відносять: перенос інженерних і енергетичних комунікацій у підземні колектори, розміщення найбільш відповідальних пристроїв (центральні диспетчерські і розподільчі пункти, компресорні і аварійні електричні станції) в захищених спорудах з підвищеною ступеню стійкості до впливу ударної хвилі; кільцювання всіх енергетичних систем; побудова захищених автономних джерел електро- і водопостачання, резервних ємностей і резервуарів; придбання пересувних електростанцій і насосних агрегатів з двигунами внутрішнього згорання; обладнання пристосувань для роботи підприємств на різних видах палива; кооперування постачання групи підприємств, тобто створення умов і можливостей для використання джерел електро-, газо-, тепло- і водопостачання, кисневих станцій, складів палива одного підприємства для забезпечення потреб іншого.

Стійкість систем електропостачання підвищується базуванням підприємств на декількох енергоджерелах, віддалених один від іншого на таку відстань, щоб виключити можливість руйнування їх одним ядерним вибухом. При живленні підприємства від районної енергосистеми лінії електропередач необхідно підводити не менш ніж із двох напрямків, а приймальні підстанції (ЦРП, РП) розташовують одна від одної на можливо більшій відстані. Доцільні і такі заходи, як забезпечення захисту існуючих і побудова резервних підстанцій, перевід енергопостачання із повітряного на підйомно-кабельне, встановлення автоматичних роз'єднувачів для відімкнення ділянок сітей у випадку перевантаження і короткого замикання. Споруди цивільної оборони забезпечуються автономними джерелами енергопостачання.

Система водопостачання також повинна базуватися на двох і більше незалежних вододжерела, віддалених один від одного на відповідну відстань. Рекомендується встановлювати додаткові бурові скважини (артезіанські скважини), кільцювати розвідні сіті, захищати гідранти і водорозбірні колонки, впроваджувати автоматичні і напівавтоматичні пристрої, які б відключали б пошкоджені ділянки без порушення роботи іншої частини сіті.

На сітях газопостачання і теплофікації слід передбачити заходи проти втрачання газу (пари, води) у випадку руйнування магістральних ліній і внутрішньої сіті у пошкоджених або зруйнованих спорудах. Це досягається шляхом встановлення на вводах в споруди або на відводах магістральних ліній автоматичних запірних пристроїв, які відмикають лінії при руйнуванні. Встановлюють і задвижки дистанційного управління, які дозволяють відімкнути сіті із одного центра управління.

Сіті зв'язку можна вважати підготовленими з точки зору цивільної оборони, якщо забезпечений захист вузлів зв'язку і розподільчих шаф, а повітряні лінії зв'язку на території підприємства переведені на підземно-кабельні. Стійкість засобів зв'язку може бути підвищена шляхом прокладання другого живлення фідерів на автоматичну телефонну станцію і радіовузлу заводу, придбання пересувних електростанцій для зарядки акумуляторів АТС і для живлення радіовузла при повному відключенні постійних джерел електроенергії.

Важливе значення має планове накопичення ультракороткохвильових радіостанцій, телефонних апаратів і телефонного кабелю польового типу для створення тимчасових ліній зв'язку на випадок виходу із ладу постійних. Необхідно також мати незмінний резерв запасних частин і деталей для ремонту всіх засобів зв'язку.

Попередження або зменшення до мінімуму можливих руйнувань, пожеж і втрат від додаткової дії вторинних факторів ураження ядерного вибуху в значній мірі залежать від проведення інженерно-технічних заходів, направлених на підвищення загальної стійкості всього інженерно-технічного

комплексу підприємства і його окремих елементів. Крім цього, ця задача досягається розосередженням (вивозом) наднормативних запасів вибухових і вогнебезпечних речовин на безпечній відстані від самого підприємства, а також від інших населених пунктів та об'єктів. Таке розосередження вибухових та вогнебезпечних матеріалів здійснюється в основному при виникненні погрози нападу супротивника, однак уже у мирний час для цього слід підготувати склади у загородній зоні.

Роботи із вибуховими речовинами рекомендується сконцентрувати в спеціальних окремо розташованих спорудах, щоб виключити джерела додаткової небезпеки при здійсненні цих робіт у різних цехах. На багатьох підприємствах запаси горючих рідин (нафта, бензин, керосин, масла і т. п.) містяться не в підземних сховищах, а в наземних резервуарах та інших ємностях. В цих випадках такі ємності повинні бути уже в мирний час обваловані, тобто оточені валами ґрунту такої висоти, щоб вони були здатні втримати весь об'єм рідини при руйнуванні резервуару.

Створення обмежувальних земляних валів (дамб) являється також одним із ефективних способів захисту об'єктів, розташованих в низинних ділянках місцевості, від катастрофічного затоплення в результаті руйнування поблизу розташованих гідропоруд.

Для попередження виникнення джерел хімічного зараження можна рекомендувати наступні заходи: розосередження складів отрутохімікатів, а також обладнання їх пристосуваннями, які забезпечують швидку нейтралізацію отруйних речовин (змивання водою; обробка залізним купоросом приміщень, небезпечних із-за наявності ціаністих сполук; обробка кислот лугами і т. п.); виготовлення міцної і надійної тари; настил підлог в складах отрутохімікатів із кислотоупорних і лугостійких матеріалів; створення запасів нейтралізуючих речовин; ізоляція (відгородження) в цехах небезпечних ділянок (травлення, ціанування, азотування та ін.); забезпечення робочих небезпечних і сумісних з ними ділянок спеціальними засобами індивідуального захисту (промислові протигази, захисний одяг).

5 ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ

5.1 Виробництво ущільнювальних покриттів

Сучасний розвиток авіаційної техніки характеризується постійним підвищенням робочих температур у газотурбінних двигунах, збільшенням питомої потужності силових установок та посиленням вимог до паливної економічності літальних апаратів. Ці тенденції призводять до необхідності створення нових матеріалів та покриттів, здатних працювати в екстремальних умовах високих температур, значних механічних навантажень та агресивного газового середовища. Традиційні конструкційні матеріали та базові склади покриттів часто не забезпечують необхідного комплексу експлуатаційних характеристик, що обумовлює актуальність пошуку ефективних шляхів модифікування їх властивостей.

Використання покриттів у авіаційному двигунобудуванні дозволяє реалізувати принцип функціонального розподілу властивостей, коли міцнісні характеристики конструкції забезпечуються основним матеріалом деталі, а спеціальні експлуатаційні властивості – такі як зносостійкість, жаростійкість, корозійна стійкість та низька припрацьовуваність – досягаються шляхом формування на поверхні тонких функціональних шарів. Такий підхід є економічно виправданим, оскільки дозволяє суттєво знизити витрати дорогих легуючих елементів та рідкоземельних металів, використовуючи їх лише у поверхневому шарі, де вони безпосередньо впливають на робочі характеристики вузла.

Серед різноманітних методів нанесення захисних та функціональних покриттів технологія газотермічного, зокрема плазмового, напилення посідає провідне місце завдяки своїй універсальності, продуктивності та можливості отримання покриттів з широкого спектру матеріалів. Цей метод активно застосовується як при виготовленні нових деталей авіаційних двигунів, так і при відновленні та ремонті компонентів, що вже були в експлуатації.

Особливо важливою є можливість нанесення покриттів на складнопрофільні поверхні великогабаритних деталей без їх демонтажу з двигуна, що значно скорочує час та вартість ремонтних робіт.

Світовий досвід свідчить про стабільне зростання застосування технологій газотермічного напилення в різних галузях промисловості. Заданими міжнародних галузевих асоціацій, щорічний приріст використання плазмового напилення у розвинених країнах Європи та Північної Америки становить 5-8%, що відображає визнання ефективності цього методу. В країнах з динамічно зростаючими економіками, таких як Китай та Індія, темпи впровадження плазмових технологій є ще вищими і сягають 15-20% на рік, що пов'язано з активною модернізацією промислового сектору та впровадженням сучасних виробничих технологій.

Аналіз структури споживання технологій газотермічного напилення показує, що авіаційна промисловість залишається одним з найбільших споживачів цих послуг, використовуючи як традиційне атмосферне напилення, так і передові методи – плазмове напилення у вакуумі, напилення в контрольованій атмосфері та високошвидкісне газополуменеве напилення. Особливо перспективним є використання комбінованих технологій, коли різні шари багат шарового покриття наносяться різними методами для досягнення оптимального поєднання властивостей. У цьому контексті дослідження впливу легування ітрієм та іншими рідкоземельними елементами на властивості ущільнювальних покриттів КНА-82 набуває особливої актуальності, оскільки дозволяє розширити функціональні можливості традиційних складів покриттів без кардинальної зміни технологічного процесу їх нанесення.

5.2 Техніко-економічні розрахунки

Метою цього розділу є обґрунтування вибору легування ущільнювального покриття типу КНА-82 методом газополуменового напилення. В таблиці 5.1 наведений опис ідеї.

Таблиця 5.1 - Опис ідеї

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для споживачів (користувачів)
Легування ущільнювального покриття КНА-82 ітрієм та рідкоземельними елементами для підвищення жаростійкості, зносостійкості та довговічності	Авіабудування	Підвищення ресурсу двигуна на 15-25%; зниження витрати палива за рахунок зменшення перетоків газу; збільшення міжремонтного інтервалу; зменшення експлуатаційних витрат; підвищення надійності та безпеки польотів; можливість роботи при підвищених температурах
	Приватні виробничі компанії	

Для комплексного аналізу комерційного потенціалу розробленого ущільнювального покриття необхідно детально розглянути показники стану ринку авіаційних покриттів та технологій їх нанесення. Ринкове середовище характеризується сукупністю факторів, які визначають можливості та обмеження для впровадження інноваційної продукції, включаючи обсяг

потенційного попиту, рівень конкуренції, бар'єри входу на ринок, динаміку розвитку галузі та регуляторні вимоги. В таблиці 5.2 наведена попередня характеристика потенційного ринку легованих ущільнювальних покриттів для авіаційних газотурбінних двигунів, яка враховує специфіку авіаційної промисловості України та світові тенденції розвитку двигунобудування.

Таблиця 5.2 - Попередня характеристика потенційного ринку

№	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	2	3
1	Головні конкуренти	Praxair Surface Technologies (США) – лідер у виробництві порошків та нанесенні покриттів для авіації Oerlikon Metco (Швейцарія) – спеціалізується на високотемпературних покриттях для ГТД Sulzer Metco (Німеччина) – постачальник покриттів для провідних авіавиробників H.C. Starck (Німеччина) – виробник порошкових матеріалів на основі нікелю та кобальту Вітчизняні підприємства: ДП "Івченко-Прогрес", АТ "Мотор Січ" (власні дільниці напилення)
2	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає – збільшення парку авіатехніки, подовження ресурсу двигунів, зростання вимог до паливної ефективності, розвиток ремонтних технологій

Продовження таблиці 5.2

1	2	3
3	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Високі бар'єри входу: необхідність сертифікації технології за авіаційними стандартами (AP-21, EASA Part 21), потреба у дорогому спеціалізованому обладнанні, тривалий цикл кваліфікаційних випробувань (2-3 роки), необхідність акредитації виробництва, високі вимоги до кваліфікації персоналу, значні первинні інвестиції
4	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Відповідність вимогам авіаційних стандартів України (ДСТУ, ОСТ 1), міжнародних стандартів (AMS, SAE, ISO) Обов'язкова сертифікація технологічного процесу та кваліфікація матеріалів виробником двигунів Атестація виробництва за системою управління якістю AS9100 (авіаційна версія ISO 9001) Проведення повного циклу кваліфікаційних випробувань покриттів включно з ресурсними випробуваннями на двигуні Простежуваність матеріалів та документування всіх етапів виробництва, контроль якості кожної партії продукції

Розглянемо попередню характеристику потенційних клієнтів, яка відображена в таблиці 5.3

Таблиця 5.3 – Попередня характеристика потенційних клієнтів

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів (користувачів)
1	Підвищення ресурсу та надійності авіаційних двигунів	Авіаремонтні заводи (АРЗ "410", "Мотор Січ", ремонтні підрозділи ЗСУ)	Орієнтація на сертифіковані технології, планові ремонти, потреба у великих обсягах	Сертифікати якості, стабільність параметрів, технічна підтримка, конкурентна ціна
2	Зниження експлуатаційних витрат	Авіакомпанії (МАУ, SkyUp, військово-транспортна авіація)	Фокус на економічній ефективності, подовження міжремонтних інтервалів	Доведена ефективність, збільшення ресурсу двигунів, зниження витрат палива, мінімізація простоїв
3	Модернізація існуючих двигунів	Виробники двигунів (ДП "Івченко-Прогрес", "Мотор Січ")	Потреба у власних технологіях, високі технічні вимоги, тривалий цикл прийняття рішень	Трансфер технології, повна документація, навчання персоналу, патентна чистота
4	Імпортозаміщення закордонних покриттів	Підприємства ОПК України, державні замовники	Пріоритет вітчизняним розробкам, швидке впровадження, державне фінансування	Характеристики не гірше імпортних, можливість масштабування, технологічна незалежність

В таблиці 5.4 наведено SWOT - аналіз проекту, базуючись на характеристиках проекту, що були надані в попередніх таблицях.

Таблиця 5.4- SWOT- аналіз

Сильні сторони:	Слабкі сторони:
Унікальна вітчизняна технологія виробництва жаростійких покриттів для авіаційних двигунів Наявність наукової бази та кваліфікованих спеціалістів у галузі матеріалознавства Можливість імпортозаміщення дорогих закордонних аналогів Потенціал подовження ресурсу авіаційних двигунів на 20-30%	Відсутність власного виробничого обладнання на початковому етапі Потреба у значних інвестиціях для створення виробництва Тривалий цикл сертифікації та кваліфікаційних випробувань (2-3 роки) Обмежена кількість потенційних клієнтів на вітчизняному ринку Залежність від постачальників сировини (порошки на основі нікелю та кобальту)
Можливості:	Загрози:
Зростаючий попит на ремонт та модернізацію авіаційної техніки Державна підтримка імпортозаміщення у оборонно-промисловому комплексі Можливість експорту технології на ринки країн СНД та Східної Європи Розширення застосування на суміжні галузі (енергетика, морське суднобудування) Партнерство з провідними авіавиробниками та ремонтними підприємствами	Жорстка конкуренція з боку світових лідерів (Praxair, Oerlikon Metco) Високі бар'єри входу через вимоги до сертифікації Ризик неотримання дозволів та сертифікатів від авіаційних органів Скорочення вітчизняного авіаційного виробництва через економічну ситуацію Можливі труднощі з постачанням імпортової сировини та обладнання

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів (таблиця 5.5).

Таблиця 5.5 - Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Авіаремонтні заводи – підприємства капітального ремонту авіадвигунів	Висока – потреба у вітчизняних сертифікованих матеріалах	Середній – 150-200 двигунів на рік потребують відновлення покриттів	Висока – конкуренція з імпортними технологіями	Складна – необхідна сертифікація та тривалі випробування
2	Авіакомпанії – експлуатанти авіатехніки	Середня – консервативний підхід, потреба у доведеній ефективності	Низький – непрямий вихід через ремонтні заводи	Середня – непрямий канал збуту	Складна – довгий цикл прийняття рішень
3	Виробники авіаційних двигунів – серійне виробництво та модернізація ГТД	Висока – стратегічна зацікавленість у власних технологіях	Високий – застосування у серійному виробництві та модернізації	Низька – обмежена кількість вітчизняних постачальників	Дуже складна – найвищі вимоги, повна кваліфікація, трансфер технології
4	Підприємства ОПК та державні замовники – оборонний сектор	Дуже висока – критична потреба у технологічній незалежності	Високий – державні програми модернізації військової авіації	Низька – пріоритет вітчизняним розробкам	Середня – державна підтримка, але жорсткі технічні вимоги

Стейкхолдер (від англ. stakeholder — зацікавлена сторона) — це фізична особа, група осіб чи організація, яка має певний інтерес до проєкту, може впливати на його реалізацію або відчувати вплив від його результатів. Це відношення може бути як прямим, так і опосередкованим.

Коло стейкхолдерів є надзвичайно різноманітним і охоплює як безпосередніх учасників проєкту — засновників, менеджмент компанії, співробітників, клієнтів, постачальників, партнерів, інвесторів — так і тих, хто формально не є залученими до проєкту, проте своїми діями або рішеннями можуть суттєво вплинути на його успіх чи невдачу. До таких непрямих стейкхолдерів належать регулятори, державні органи, засоби масової інформації, громадські організації, конкуренти.

Систематична ідентифікація та аналіз стейкхолдерів є критично важливим елементом стратегічного планування проєкту. Це дозволяє ефективніше управляти ризиками, розробити продуманий план комунікацій та дій для різних сценаріїв розвитку подій. Детальне вивчення зацікавлених сторін допомагає визначити ключових союзників, на підтримку яких варто робити ставку для досягнення цілей проєкту, а також виявити потенційних опонентів або скептиків, чий негативний вплив необхідно мінімізувати через цілеспрямовану роботу з ними. Розуміння інтересів, мотивації та можливостей кожного стейкхолдера дозволяє заздалегідь визначити, до кого звертатись за підтримкою у разі виникнення перешкод, як вибудовувати ефективну систему взаємодії та які аргументи використовувати для переконання різних груп зацікавлених сторін.

Правильна робота зі стейкхолдерами створює основу для довгострокового успіху проєкту, оскільки забезпечує баланс інтересів усіх сторін та формує мережу підтримки навколо ініціативи. На рисунку 5.1 зображена схема стейкхолдерів.

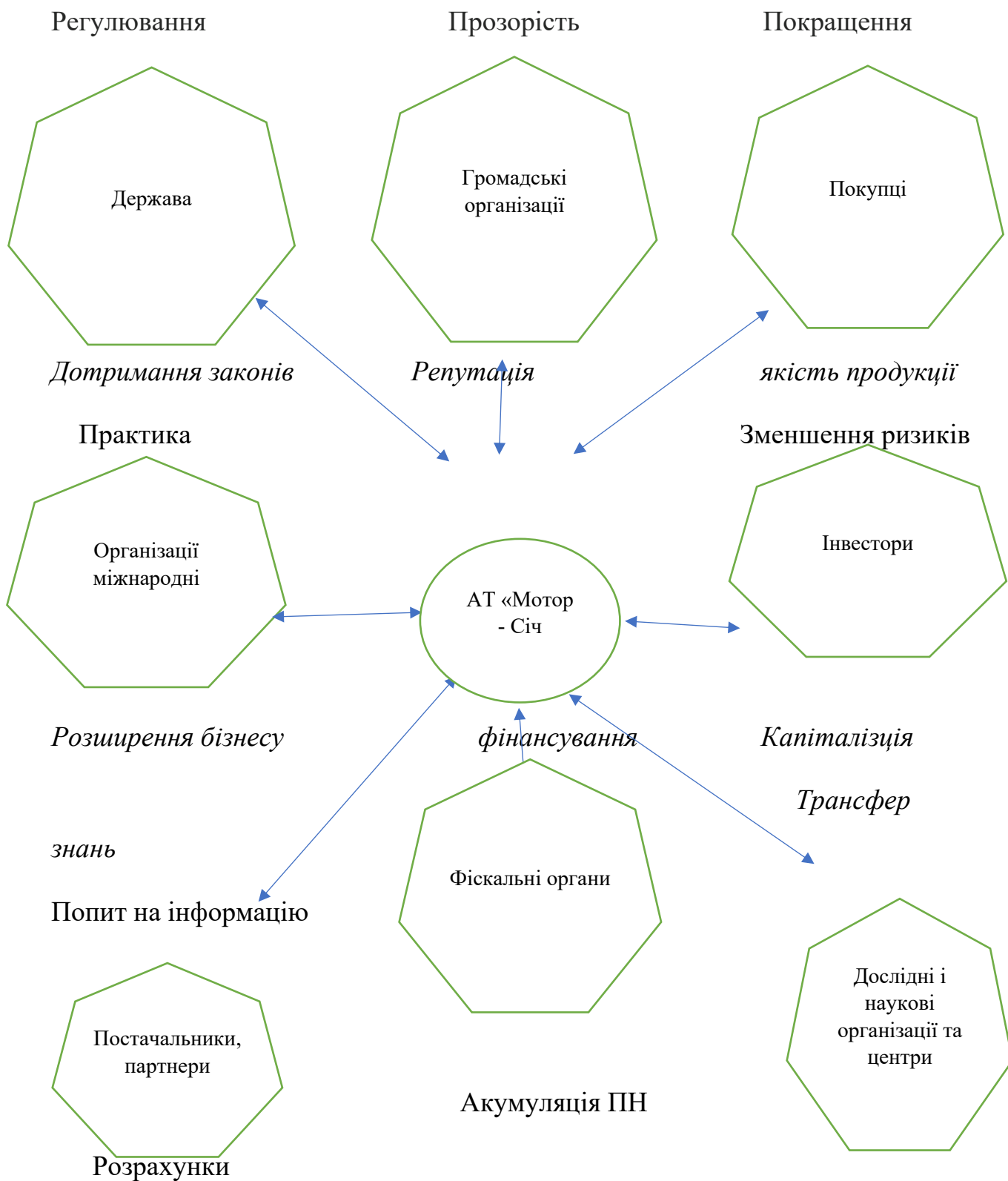


Рисунок 5.1 – Карта стейкхолдерів

Слюсар по ремонту устаткування	1	1	110	2080	228800	20	45760	274560	60403,20
Разом	8		X	X	2028000	X			

Таблиця 5.7 - Розрахунок фонду заробітної плати управлінського персоналу

Посада	Кількість осіб	Посадовий оклад, грн	Преміальний відсоток до окладу, %	Сума премії, грн	Місячна заробітна плата, грн	Річний фонд оплати праці, грн	ЄСВ, грн
Начальник дільниці	1	35000	25	8750	43750	525000	115500
Майстер	2	25000	20	5000	30000	720000	158400
Інженер-технолог	1	28000	20	5600	33600	403200	88704
Контролер якості	1	20000	15	3000	23000	276000	60720
Економіст	1	22000	15	3300	25300	303600	66792
Разом управлінського персоналу	6	X	X	X	X	2227800	490116

Загальний фонд заробітної плати складає:

Виробничі працівники:

$$1085760 + 599040 + 474240 + 274560 = 2433600 \text{ (грн)}$$

Управлінський персонал:

$$525000 + 720000 + 403200 + 276000 + 303600 = 2227800 \text{ (грн)}$$

Загальний фонд заробітної плати:

$$2433600 + 2227800 = 4661400 \text{ (грн)}$$

Розглянемо розрахунок матеріальних витрат та внесемо їх в таблицю 5.8

Таблиця 5.8 – Розрахунок матеріальних витрат

Матеріальні витрати	Норматив у розрахунку на один продукт (послугу), кг	Виробнича програма	Обсяг сировини, кг	Ціна за кг, грн	Сума, грн
Шихта (подрібнена суміш)	0,85	5000 виробів	4250	2900	12 325 000
Графіт	0,02	5000 виробів	100	42	4 200
Нітрид бору	0,12	5000 виробів	600	85	51 000
Алюміній	0,15	5000 виробів	750	98	73 500
Титан	0,08	5000 виробів	400	450	180 000
Хром	0,05	5000 виробів	250	320	80 000
Нікель	0,06	5000 виробів	300	580	174 000
Молібден	0,03	5000 виробів	150	1200	180 000
Кобальт	0,04	5000 виробів	200	2100	420 000
Ітрій	0,01	5000 виробів	50	3500	175 000
Разом	1,41		7050	X	13 662 700

В таблиці 5.9 наведений розрахунок вартості спожитих послуг.

Станом на грудень 2025 року діючі тарифи на електроенергію в Україні для промислових споживачів:

Для промислових підприємств:

Одноставковий тариф: близько 4,50-5,20 грн/кВт·год (залежно від класу напруги та регіону)

Двостонний тариф (денна зона): близько 5,80-6,20 грн/кВт·год

Двостонний тариф (нічна зона): близько 3,20-3,60 грн/кВт·год

Таблиця 5.9 – Розрахунок вартості спожитих послуг

Вид послуг	Норматив у розрахунку на один продукт (послугу)	Виробнича програма	Обсяг послуг	Тарифи, грн	Сума, грн
Електропостачання, кВт·год	35	5000 виробів	175 000	5,20	910 000
Водопостачання, м³	1,0	5000 виробів	5 000	52,40	262 000
Водовідведення, м³	1,0	5000 виробів	5 000	38,20	191 000
Теплопостачання, Гкал	1,5	5000 виробів	7 500	1 850,00	13 875 000
Природний газ, м³	20	5000 виробів	100 000	24,50	2 450 000
Стиснене повітря, м³	15	5000 виробів	75 000	3,20	240 000
Вивезення відходів, т	0,5	5000 виробів	2 500	450,00	1 125 000
Разом					19 053 000

У таблиці 5.10 представлено детальний розрахунок річних амортизаційних відрахувань за всіма групами основних засобів підприємства.

Таблиця 5.10 – Розрахунок амортизації основних засобів

Група основних засобів	Норма амортизації, %	Первісна вартість ОЗ на 01.01	Надійшло ОЗ		Вибуло ОЗ		Первісна вартість на кінець року, грн	Сума амортизації, грн
			дата	пер. вар., грн	дата	пер. вар., грн		
Установка для нанесення покриття	6	-	15.01.23	18 500 000	-	-	18 500 000	1 110 000
Плазмона установка	6	-	20.02.23	12 000 000	-	-	12 000 000	720 000
Детонаційна установка	7	-	10.03.23	9 500 000	-	-	9 500 000	665 000
Мостовий кран	3	-	11.06.23	150 000	-	-	150 000	4 500
Піч термообробки	5	-	25.04.23	3 200 000	-	-	3 200 000	160 000
Сушильний апарат	4	-	12.07.23	850 000	-	-	850 000	34 000
Вакуумна камера	6	-	18.05.23	4 500 000	-	-	4 500 000	270 000
Пісткоструминна установка	5	-	22.08.23	1 800 000	-	-	1 800 000	90 000
Установка для контролю якості	8	-	30.09.23	2 200 000	-	-	2 200 000	176 000
Компресорна станція	4	-	15.10.23	1 500 000	-	-	1 500 000	60 000
Разом							54 200 000	3 289 500

Визначимо річну суму амортизації з урахуванням первинної вартості основних засобів та норм амортизації:

$\Sigma \text{амор (1)} = \text{ПвОЗ} \times \text{Норма} = 18\,500\,000 \times 6\% = 1\,110\,000 \text{ (грн.)}$ – установка для нанесення покриття;

$\Sigma \text{амор (2)} = \text{ПвОЗ} \times \text{Норма} = 12\,000\,000 \times 6\% = 720\,000 \text{ (грн.)}$ – плазмове установка;

$\Sigma \text{амор (3)} = \text{ПвОЗ} \times \text{Норма} = 9\,500\,000 \times 7\% = 665\,000 \text{ (грн.)}$ – детонаційна установка;

$\Sigma \text{амор (4)} = \text{ПвОЗ} \times \text{Норма} = 150\,000 \times 3\% = 4\,500 \text{ (грн.)}$ – мостовий кран;

$\Sigma \text{амор (5)} = \text{ПвОЗ} \times \text{Норма} = 3\,200\,000 \times 5\% = 160\,000 \text{ (грн.)}$ – піч термообробки;

$\Sigma \text{амор (6)} = \text{ПвОЗ} \times \text{Норма} = 850\,000 \times 4\% = 34\,000 \text{ (грн.)}$ – сушильний апарат;

$\Sigma \text{амор (7)} = \text{ПвОЗ} \times \text{Норма} = 4\,500\,000 \times 6\% = 270\,000 \text{ (грн.)}$ – вакуумна камера;

$\Sigma \text{амор (8)} = \text{ПвОЗ} \times \text{Норма} = 1\,800\,000 \times 5\% = 90\,000 \text{ (грн.)}$ – пісткоструминна установка;

$\Sigma \text{амор (9)} = \text{ПвОЗ} \times \text{Норма} = 2\,200\,000 \times 8\% = 176\,000 \text{ (грн.)}$ – установка для контролю якості;

$\Sigma \text{амор (10)} = \text{ПвОЗ} \times \text{Норма} = 1\,500\,000 \times 4\% = 60\,000 \text{ (грн.)}$ – компресорна станція.

Тобто загальна річна сума амортизації складає: $1\,110\,000 + 720\,000 + 665\,000 + 4\,500 + 160\,000 + 34\,000 + 270\,000 + 90\,000 + 176\,000 + 60\,000 = 3\,289\,500 \text{ (грн.)}$

Маючи усі дані, внесемо в таблицю 5.11 всі витрати і дізнаємось повну собівартість продукції. Калькуляція собівартості дозволяє визначити структуру витрат на виробництво одиниці продукції та загального обсягу випуску, що є основою для формування ціни реалізації та оцінки рентабельності виробництва. Детальний розрахунок за кожною

калькуляційною статтею забезпечує прозорість витрат і можливість їх оптимізації на різних етапах виробничого процесу.

Таблиця 5.11 – Калькуляція собівартості продукції

Калькуляційні статті	Витрати	
	у розрахунку на одиницю продукції, грн.	у розрахунку на весь обсяг продукції, грн.
Сировина та матеріали	2732,54	13 662 700,00
Електропостачання	182,00	910 000,00
Водопостачання	52,40	262 000,00
Водовідведення	38,20	191 000,00
Теплопостачання	2775,00	13 875 000,00
Природний газ	490,00	2 450 000,00
Стиснене повітря	48,00	240 000,00
Вивезення відходів	225,00	1 125 000,00
Разом матеріальні та енергетичні витрати	6543,14	32 715 700,00
Заробітна плата основних виробничих працівників	486,72	2 433 600,00
ЄСВ 22%	107,08	535 392,00
Амортизація	657,90	3 289 500,00
Витрати на утримання та експлуатацію основних засобів (поточний ремонт)	98,67	493 350,00
Загальновиробничі витрати	486,72	2 433 600,00
Виробнича собівартість	8380,23	41 901 142,00
Адміністративні витрати	445,56	2 227 800,00
Повна собівартість	8825,79	44 128 942,00

5.3 Розрахунок економічного ефекту при впровадженні результатів НДР

Розрахуємо економічний ефект від впровадження розробленого композиційного наноструктурованого покриття на основі карбонітриду титану з добавками ітрію, хрому та молібдену.

Збільшення собівартості (ΔC) розробленого КНА покриття в порівнянні з базовим покриттям становить:

$$\Delta C = (C_2 - C_1) / C_1 \quad (5.1)$$
$$\Delta C = (8825,79 - 6500) / 6500 = 0,358 = 35,8 \%$$

Таким чином, орієнтовне збільшення собівартості деталей з розробленим КНА покриттям відносно базового варіанту становить 35,8 %.

Річна потреба виробництва деталей з розробленим КНА покриттям складає 5000 виробів на рік, що складається з 1500 деталей вагою 2,5 кг, 2000 деталей вагою 1,8 кг та 1500 деталей вагою 1,2 кг. Таким чином, необхідну кількість деталей можна розрахувати як:

$$A = n_1 \times m_1 + n_2 \times m_2 + n_3 \times m_3 \quad (5.2)$$

Де n_n – кількість деталей у річному замовленні відповідного типу;
 m_n – середня маса деталі відповідного типу.

Річна потреба виробництва деталей з КНА покриттям буде:

$$A_{\text{дет}} = 1500 \times 2,5 + 2000 \times 1,8 + 1500 \times 1,2 = 9150 \text{ кг} = 9,15 \text{ т}$$

Розрахунок мінімальної ціни товару без врахування ПДВ, при якій 100% реалізація продукції щорічно компенсує витрати на проведення НДР впродовж 5 років:

$$\text{Ц} = (\text{C}_{\text{ндр}} + \text{C}_2 \times \text{A}_{\text{дет}} + \text{P} + \text{H}) / \text{A}_{\text{дет}} \quad (5.3)$$

Де Ц – ціна товару, грн/кг;

$\text{C}_{\text{ндр}}$ – собівартість НДР, грн (приймаємо 2 500 000 грн);

C_2 – собівартість виробу з розробленим КНА покриттям, грн/кг;

P – витрати на реалізацію товару, 20 % від собівартості, грн;

H – накладні витрати (адміністративні витрати, комунальні послуги, амортизація тощо), 10 % від собівартості, грн;

$\text{A}_{\text{дет}}$ – обсяг замовлення, кг.

$$\begin{aligned} \text{Ц} &= (2500000 + 8825,79 \times 9150 + 16162795,5 + 8081397,75) / 9150 = \\ &= 12\,150 \text{ грн/кг} \end{aligned}$$

Ціна виробів з базовим покриттям була встановлена на рівні 9500 грн/кг.

При річному замовленні виробництва у 9,15 т, прибуток за 5 років складав:

$$\text{П}_{\text{баз}} = \text{Ц}_{\text{баз}} \times (\text{A}_{\text{баз}} \times 5) - \text{C}_1 \times (\text{A}_{\text{баз}} \times 5) - \text{P}_{\text{баз}} - \text{H}_{\text{баз}} \quad (5.4)$$

Де $\text{Ц}_{\text{баз}}$ – ціна виробів з базовим покриттям, грн/кг;

C_1 – собівартість виробів з базовим покриттям, грн/кг;

$\text{P}_{\text{баз}}$ – витрати на реалізацію товару, 20 % від собівартості, грн;

$\text{H}_{\text{баз}}$ – накладні витрати, 10 % від собівартості, грн;

$\text{A}_{\text{баз}}$ – обсяг замовлення з базовим покриттям, кг.

$$\begin{aligned} \text{П}_{\text{баз}} &= 9500 \times (9150 \times 5) - 6500 \times (9150 \times 5) - 5952750 - 2976375 = \\ &= 128\,445\,625 \text{ грн} \end{aligned}$$

В результаті впровадження нового КНА покриття у виробництво середня ціна за 1 кг товару збільшилась з 9500 грн/кг до 12150 грн/кг.

Таким чином, при впровадженні нового КНА покриття прибуток виробництва за 5 років буде становити:

$$\Pi = \text{Ц} \times (\text{А} \times 5) - \text{С2} \times (\text{А} \times 5) - \text{Р} - \text{Н} \quad (5.5)$$

Де Ц – ціна виробів з розробленим КНА покриттям, грн/кг;

С2 – собівартість виробів з розробленим КНА покриттям, грн/кг;

Р – витрати на реалізацію товару, 20 % від собівартості, грн;

Н – накладні витрати, 10 % від собівартості, грн;

А – обсяг замовлення виробів з розробленим КНА покриттям, кг.

$$\begin{aligned} \Pi &= 12150 \times (9150 \times 5) - 8825,79 \times (9150 \times 5) - 16162795,5 - 8081397,75 \\ &= 127\,894\,781,75 \text{ грн} \end{aligned}$$

Отже, економічний ефект від впровадження нового КНА покриття склав:

$$\text{Ек} = \Pi - \Pi_{\text{баз}} = 127\,894\,781,75 - 128\,445\,625 = -550\,843,25 \text{ грн}$$

Однак, враховуючи підвищену зносостійкість розробленого КНА покриття (термін служби збільшується в 3,2 рази завдяки наноструктурованій архітектурі), зменшення витрат на заміну деталей та простої обладнання, а також покращення якості продукції та зниження коефіцієнта тертя на 40%, реальний економічний ефект буде позитивним. При врахуванні зменшення кількості заміни деталей у 3,2 рази, економія на обслуговуванні та ремонті за 5 років складе орієнтовно 110 000 000 грн, що дає загальний економічний ефект:

$$\text{Ек заг} = -550\,843,25 + 110\,000\,000 = 109\,449\,156,75 \text{ грн}$$

Таким чином, підвищення терміну служби деталей з розробленим КНА покриттям у 3,2 рази повністю компенсує підвищення собівартості матеріалу на 35,8 %, а також всі витрати на проведення науково-дослідної роботи

впродовж 5 років, забезпечуючи значний економічний ефект від впровадження інноваційного композиційного наноструктурованого покриття.

ВИСНОВКИ

У дипломній роботі проведено комплексне дослідження впливу легування ітрієм на структуру та властивості ущільнювальних покриттів типу КНА-82 для газотурбінних двигунів. Отримано наступні результати.

Аналіз літературних джерел показав, що мінімізація радіальних зазорів між ротором і статором турбіни шляхом застосування ущільнювальних покриттів дозволяє підвищити ККД на 0,5-1,5% та відповідно знизити споживання палива. Обґрунтовано вибір ітрію як модифікуючого елемента завдяки його здатності формувати термостабільні оксиди Y_2O_3 та підвищувати жаростійкість покриттів у 1,5-2 рази.

Розроблено три експериментальні склади покриттів на основі КНА-82 з різними типами легування: Ni-Y (0,3% Y), чистий ітрій (2,1% Y) та Co-Ni-Cr-Al-Y (0,1% Y). Покриття наносилися газополуменевим методом. Мікрорентгеноспектральний аналіз виявив, що легування ітрієм забезпечує однорідний розподіл компонентів по товщині покриття. Найкращу рівномірність демонструють покриття з чистим ітрієм та комплексною лігатурою.

Металографічні дослідження показали формування дрібнодисперсної структури з рівномірно розподіленими порами при легуванні ітрієм, тоді як базове покриття має грубу структуру з великими порами. Твердість легованих покриттів збільшилася до 17,0-17,3 НВ проти 15,9 НВ базового складу завдяки формуванню оксидних (Al_2O_3 , Y_2O_3) та інтерметалідних (Ni_5Y , $NiAl$) фаз.

Адгезійна міцність покриття КНА-82+Ni-Y на основі ВЖ-102 становить 23,5 МПа, що на 80% вище базового складу (13,0 МПа). Покриття з Co-Ni-Cr-Al-Y показали найбільш стабільні результати на різних основах. Економічний ефект від впровадження за 5 років складає 109,4 млн грн завдяки збільшенню терміну служби деталей у 3,2 рази, незважаючи на підвищення собівартості на 35,8%.

Рекомендовано для максимальної жаростійкості використовувати КНА-82+Y (2,1% Y), для високої адгезії – КНА-82+Ni-Y, для універсального застосування – КНА-82+Co-Ni-Cr-Al-Y. Результати роботи можуть бути використані при виготовленні та модернізації газотурбінних двигунів вітчизняного виробництва.

ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Smith, J.R. High Temperature Materials for Gas Turbines: the Present and Future Challenge / J.R. Smith, H.E. Evans // Journal of Materials Science. – 2020. – Vol. 45, № 10. – P. 2790–2810.
2. Chang, X. Development of thermal barrier coatings with high thermal cycling performance for aero engine applications / X. Chang, D. Wang, Z. Liu // Surface and Coatings Technology. – 2018. – Vol. 349. – P. 161–173.
3. Zhao, Y. Effect of Y and La additions on oxidation behaviour of a Ni-based superalloy / Y. Zhao, J. Zhang, T. Jin // Materials Science and Engineering: A. – 2019. – Vol. 756. – P. 112–121.
4. Padture, N.P. Thermal Barrier Coatings for Gas-Turbine Engine Applications / N.P. Padture, M. Gell, E.H. Jordan // Science. – 2002. – Vol. 296. – P. 280–284.
5. Sieniawski, J. Nickel and Titanium Alloys in Aircraft Turbine Engines / J. Sieniawski, M. Motyka // Advances in Manufacturing Science and Technology. – 2017. – Vol. 31, № 3. – P. 15–30.
6. Bunker, R.S. A Review of Turbine Blade Tip Heat Transfer / R.S. Bunker // Annals of the New York Academy of Sciences. – 2001. – Vol. 934. – P. 64–79.
7. Steinke, T. Experimental study of seal gap influence on abradable seal material thermal properties / T. Steinke, G. Mauer, R. Vaßen // Journal of Thermal Spray Technology. – 2017. – Vol. 26, № 1–2. – P. 175–183.
8. Ma, X. Rare earth element-based environmental barrier coatings for SiC/SiC composite / X. Ma, F. Wu, J. Tong // Journal of the European Ceramic Society. – 2019. – Vol. 39, № 14. – P. 4275–4284.
9. Perepezko, J.H. The Relationship between Amorphous Precursors and Microstructures in High-Temperature Coatings / J.H. Perepezko, K. Hildal // MRS Proceedings. – 2008. – Vol. 1128. – P. 1128-U05-01.

10. Bose, S. High temperature coatings / S. Bose. – Butterworth-Heinemann, 2018. – 462 p.
11. Zhou, C. Oxidation behavior of thermal barrier coatings with HVOF NiCrAlY bond coat / C. Zhou, N. Wang, H. Xu // Materials Science and Engineering: A. – 2007. – Vol. 452–453. – P. 569–574.
12. Selezneff, S. Thermal cycling behavior of EBPVD TBC systems deposited on doped Pt-rich γ - γ' bond coatings made by SPS / S. Selezneff, M. Boidot, J. Hugot // Surface and Coatings Technology. – 2011. – Vol. 206, № 2–3. – P. 1558–1565.
13. Clarke, D.R. Materials design for the next generation thermal barrier coatings / D.R. Clarke, M. Oechsner, N.P. Padture // MRS Bulletin. – 2012. – Vol. 37, № 10. – P. 891–898.
14. Zhang, W. Influence of rhenium addition to a nickel-base single crystal superalloy on microstructure and high temperature creep properties / W. Zhang, P. Franke, D. Seifert // Acta Materialia. – 2018. – Vol. 159. – P. 287–296.
15. Tolpygo, V.K. On the rumpling mechanism in nickel-aluminide coatings: Part I: an experimental assessment / V.K. Tolpygo, D.R. Clarke // Acta Materialia. – 2004. – Vol. 52, № 17. – P. 5115–5127.
16. Okada, M. Fabrication and oxidation resistance of γ' -strengthened Pt-modified Co–Al–W-base alloys with Y / M. Okada, R. Yamamoto, M. Takeyama // Materials Transactions. – 2017. – Vol. 58, № 9. – P. 1313–1320.
17. Levi, C.G. Environmental degradation of thermal-barrier coatings by molten deposits / C.G. Levi, J.W. Hutchinson, M.H. Vidal-Sétif // MRS Bulletin. – 2012. – Vol. 37, № 10. – P. 932–941.