

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 режимів термічної обробки на структуру та властивості
ущільнювальних покриттів з добавками рідкоземельних металів

(назва теми)

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

Спеціальності 132 Матеріалознавство

(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)

Прикладне матеріалознавство

ТЕРЕЩЕНКО В.А

(ПРІЗВИЩЕ та ініціали)

Керівник ГРЕШТА В.Л

(ПРІЗВИЩЕ та ініціали)

Рецензент

(ПРІЗВИЩЕ та ініціали)

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)

ТЕРЕЩЕНКО Володимир Андрійович

(ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) Вплив режимів термічної обробки на структуру та властивості ущільнювальних покриттів з добавками рідкоземельних металів

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	прийняв 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	Аналіз сучасного стану проблеми підвищення експлуатаційної надійності та ефективності ущільнювальних покриттів		
2	Матеріали та методика досліджень		
3	Експериментальна частина		
4	Економіко-організаційна частина		
5	Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях		

Студент(ка)

_____ Володимир ТЕРЕЩЕНКО
(підпис) (Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

Керівник проєкту (роботи)

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

ЗМІСТ

Вступ.....	6
1 Аналіз сучасного стану проблеми підвищення експлуатаційної надійності та ефективності ущільнювальних покриттів	8
1.1 Аналіз умов експлуатації та основних причин відмов ущільнювальних елементів	8
1.2 Сучасні матеріали та методи нанесення ущільнювальних покриттів	10
1.3 Фундаментальні підходи до створення ущільнювальних покриттів.....	13
1.4 Вплив термічної обробки на формування структури та фізико-механічних властивостей ущільнювальних покриттів	16
1.5 Вплив термічної обробки на формування структури та фізико-механічних властивостей ущільнювальних покриттів	18
2 Матеріали та методика досліджень	23
3 Експериментальна частина	28
3.1 Вплив високотемпературної витримки на мікроструктуру ущільнювальних покриттів	28
4 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.....	38
4.1 Аналіз потенційних небезпек	38
4.2 Заходи забезпечення безпеки.....	40
4.3 Заходи з виробничої санітарії	46
4.4 Заходи з пожежної безпеки	48
4.5 Заходи безпеки в умовах НС.....	50
5 Економіко-організаційна частина.....	55
5.1 Актуальність теми з позиції маркетингу	55
5.2 Послідовний аналіз	56
5.3 Розрахунок економічного ефекту.....	68
Висновки	70
Перелік джерел посилань	71

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломної роботи бакалавра: 72 с., 15 табл., 12 рис., 15 джерел.

ГАЗОТУРБІННИЙ ДВИГУН, УЩІЛЬНЮВАЛЬНІ ПОКРИТТЯ, РІДКОЗЕМЕЛЬНІ МЕТАЛИ, ЦЕРІЙ, ЛАНТАН, ІТРІЙ, ТЕРМІЧНА ОБРОБКА, ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНА КОРОЗІЯ, МІКРОСТРУКТУРА, ЖАРОСТІЙКІСТЬ, ПОРИСТІСТЬ, ОКСИДНІ ФАЗИ, АДГЕЗІЙНА МІЦНІСТЬ, ЕКОНОМІЧНИЙ ЕФЕКТ

Об'єкт дослідження: Ущільнювальні покриття на основі нікелевих сплавів типу КНА з добавками рідкоземельних металів для газотурбінних двигунів.

Мета дослідження полягає у вивченні впливу термічної обробки та легування рідкоземельними металами (церієм, лантаном, ітрієм) на структуру та експлуатаційні властивості ущільнювальних покриттів, що працюють при температурах 1000-1200°C.

Дослідження включає аналіз чотирьох варіантів складів покриттів: з легуванням лігатурою Ni-Y, чистим ітрієм, багатокомпонентною лігатурою Co-Ni-Cr-Al-Y та еталонного зразка без добавок. Проведено систематичне вивчення мікроструктури покриттів після високотемпературної витримки при 1100°C протягом 50 та 100 годин.

Використано комплекс методів структурного аналізу: оптичну металографію, растрову електронну мікроскопію та енергодисперсійний рентгенівський мікроаналіз. Особлива увага приділена характеристиці оксидних плівок на поверхні покриттів, їх морфології та захисних властивостей проти високотемпературної газової корозії.

ВСТУП

Сучасний етап розвитку авіаційного двигунобудування та енергетичного машинобудування характеризується постійним підвищенням вимог до паливної економічності, тягових характеристик та надійності газотурбінних двигунів (ГТД). Основним шляхом досягнення цих показників є збільшення температури робочого газу перед турбіною до 1000-1200°C та мінімізація втрат робочого тіла через радіальні зазори між обертовими та статорними елементами. Критичну роль у забезпеченні ефективності турбомашин відіграють ущільнювальні покриття, що наносяться на статорні елементи та забезпечують мінімальні втрати газу при взаємодії з торцями робочих лопаток.

Ущільнювальні покриття повинні поєднувати суперечливі вимоги: високу жаростійкість та ерозійну стійкість в умовах агресивного високотемпературного газового середовища з одного боку, та достатню піддатливість (абразивність) при контакті з лопатками з іншого. Емпіричні дані свідчать, що збільшення радіального зазору лише на 1% від висоти лопатки призводить до зниження ККД ступеня турбіни на 2-3%, що безпосередньо впливає на економічність двигуна та його експлуатаційні витрати.

Традиційні ущільнювальні покриття на основі нікелевих сплавів з добавками нітриду бору або фториду кальцію, отримані методами газотермічного напilenня, у вихідному стані мають нерівноважну структуру з високою пористістю, оксидними включеннями на межах частинок та значними залишковими напруженнями. Експлуатація таких покриттів без попередньої термічної обробки при температурах 1000-1100°C призводить до неконтрольованих структурно-фазових перетворень, зміни геометричних параметрів та передчасного руйнування. Особливого значення набуває модифікація складу покриттів рідкоземельними металами (церій, лантан,

ітрій), які здатні формувати стабільні оксидні фази та підвищувати корозійну стійкість матеріалу.

1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ НАДІЙНОСТІ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ УЩІЛЬНЮВАЛЬНИХ ПОКРИТТІВ

1.1 Аналіз умов експлуатації та основних причин відмов ущільнювальних елементів

Підвищення паливної економічності та тягових характеристик сучасних авіаційних та енергетичних газотурбінних двигунів (ГТД) досягається переважно за рахунок збільшення температури газу перед турбіною та мінімізації втрат робочого тіла. Критичним фактором, що визначає ККД турбомашини, є величина радіального зазору між торцями робочих лопаток та статором.

Специфіка температурного навантаження. Ущільнювальні покриття (так звані стирані або *abradable* покриття) у зоні турбіни високого тиску експлуатуються в екстремальних умовах. Температура робочого газу в цій зоні часто перевищує 1000–1100 °С. При таких температурах матеріал покриття зазнає незворотних структурних змін:

Високотемпературне окислення. Інтенсивна дифузія кисню призводить до утворення крихких оксидних плівок, що знижує когезійну міцність покриття.

Спікання та ущільнення. Пористі структури, які необхідні для забезпечення податливості (стираності), при 1000°C схильні до доущільнення (спікання), що призводить до неконтрольованого зростання твердості.

Термічна втома. Циклічні зміни температури (режими «зліт», «крейсерський політ», «посадка») викликають напруження на межі «основа—покриття», що може призвести до відшарування (spallation).

Механізм взаємодії в системі «лопатка – ущільнення»

Головна вимога до ущільнювальних матеріалів ГТД — це баланс між ерозійною стійкістю та стираністю (abradability).

При контакті (врізанні) лопатки в покриття на високих швидкостях (до 300–400 м/с) матеріал ущільнення повинен локально руйнуватися в мікрооб'ємах, не пошкоджуючи при цьому матеріал лопатки (часто дороговартісні нікелеві суперсплави з монокристалічною структурою).

Однак, при температурі 1000°C твердість більшості матеріалів знижується, але через окислення може утворюватися тверда кірка («glazing»), яка діє як абразив проти лопатки.

Вплив на ККД двигуна. Збільшення радіального зазору внаслідок ерозійного вимивання покриття або його руйнування призводить до перетікання газу повз лопатки. Емпіричні дані свідчать, що збільшення зазору на 1% від висоти лопатки може призводити до зниження ККД ступеня турбіни на 2–3%. Саме тому стабільність властивостей покриття після термічної обробки є запорукою збереження мінімального зазору протягом усього ресурсу двигуна.

1.2 Сучасні матеріали та методи нанесення ущільнювальних покриттів

Величина радіальних зазорів між елементами ротора та статора газотурбінного агрегату суттєво впливає на його ККД та економічність. Оптимальна величина цього зазору повинна бути мінімальною, проте такою, щоб виключити можливість катастрофічного торкання поверхонь ротора і статора, що призводить до руйнування вузла. Оскільки конструкційно забезпечити стабільний мікронний зазор на діаметрах більше метра вкрай складно, виникає необхідність нанесення на статорну частину спеціальних ущільнювальних покриттів. З урахуванням умов експлуатації гарячого тракту ГТД (температури близько 1000°C), до таких покриттів висуваються суперечливі вимоги: вони повинні мати достатню жаростійкість та ерозійну стійкість, але водночас забезпечувати піддатливість (стираність) при можливому врізанні лопаток.

Згідно з аналізом літературних джерел, існуючі методи формування захисних та ущільнювальних шарів умовно поділяють на дифузійні та конденсаційні. До дифузійних відносять покриття, захисний шар яких формується в результаті взаємної дифузії елементів підкладки та насичуючого середовища при високих температурах. Більш широкі технологічні можливості мають конденсаційні методи, які дозволяють формувати на поверхні шар заданого хімічного складу, що може суттєво відрізнятися від матеріалу основи.

Серед вакуумних методів нанесення значного поширення набуло електронно-променеве випаровування (ЕВ-PVD). Цей метод базується на осадженні матеріалу у вакуумі, де потік електронів, прискорених електричним полем, бомбардує поверхню матеріалу, що випаровується. Кінетична енергія електронів перетворюється на теплову, викликаючи інтенсивне випаровування. Специфічною особливістю покриттів, отриманих цим методом, особливо керамічних (наприклад, на основі ZrO_2), є формування

стовбчастої структури з кристалітами, орієнтованими перпендикулярно до поверхні. Така структура дозволяє матеріалу «дихати» при термоциклічних навантаженнях, знижуючи напруження відриву, що робить цей метод перспективним для нанесення теплозахисних покриттів на лопатки турбін. Промислові установки типу Л-2 та Л-9 дозволяють осаджувати складні інтерметалідні сплави (Ni_3Al ; TiAl) та тугоплавкі сполуки.

Альтернативою випаровуванню є методи іонно-плазмового осадження, зокрема з використанням вакуумно-дугових джерел плазми (установки серії МАП). У цьому випадку матеріал катода випаровується в плямах вакуумної дуги і рухається до підкладки у вигляді високоіонізованого потоку плазми. Важливою перевагою методу є можливість подачі на деталь високого негативного потенціалу, що забезпечує бомбардування поверхні прискореними іонами. Це сприяє очищенню та активації поверхні, інтенсифікації дифузійних процесів та формуванню покриттів з високою адгезією. Такі технології дозволяють наносити багат шарові композиції, що включають жаростійкі підшари та зовнішні функціональні шари.

Проте, в умовах великосерійного виробництва та ремонту ГТД найбільш технологічними та економічно виправданими залишаються методи газотермічного напилення (ГТН). До цієї групи відносять полуменеве, плазмове, детонаційне та високошвидкісне газополуменеве (HVOF) напилення. Спільним для цих методів є нагрівання дисперсного матеріалу (порошку) та його прискорення газовим потоком. Формування покриття відбувається за рахунок кінетичної енергії удару частинок об підкладку. При зіткненні, яке триває близько 10^{-7} с, кінетична енергія переходить у теплову та роботу деформації. Частинки розтікаються по поверхні, заповнюючи мікронерівності, і миттєво кристалізуються, утворюючи характерну шарувату («лускату») структуру.

Найбільш універсальним методом для нанесення тугоплавких матеріалів є плазмове напилення. Воно дозволяє формувати складні теплозахисні композиції, що складаються з металевого підшару (системи MCrAlY , де М –

Ni, Co) та зовнішнього керамічного шару на основі діоксиду цирконію (ZrO_2), стабілізованого оксидом ітрію (Y_2O_3). Введення ітрію необхідне для стабілізації високотемпературних модифікацій цирконію і запобігання руйнівних фазових переходів (моноклінна-тетрагональна фаза), що супроводжуються зміною об'єму. Металевий підшар при цьому виконує функцію демпфера, компенсуючи різницю коефіцієнтів термічного лінійного розширення (ТКЛР) між керамікою та основним металом.

Для підвищення щільності та адгезійної міцності покриттів застосовують методи високошвидкісного газополуменового напилення (HVOF). Завдяки надзвуковій швидкості потоку частинки мають менший час перебування в зоні нагріву, що знижує їх окислення, але набувають величезної кінетичної енергії. Це дозволяє отримувати покриття з пористістю менше 1,5% та адгезією понад 70 МПа, наприклад, зносостійкі композиції карбиду вольфраму в кобальт-хромовій матриці (WC-Co-Cr). Однак, висока твердість таких покриттів часто є недоліком для ущільнювальних застосувань, де вимагається певна піддатливість матеріалу.

Незважаючи на різноманіття методів, отримані покриття часто мають ряд суттєвих недоліків, притаманних "as-sprayed" (свіжонапиленому) стану. До них відносяться наявність відкритої та закритої пористості, оксидних плівок на межах частинок, метастабільність фазового складу та високий рівень залишкових напружень розтягу. Наприклад, композиційні покриття на основі алюмінію та нітриду бору (Al-BN) мають чудову припрацьовуваність, але обмежену робочу температуру (до 450°C), що неприйнятно для турбін високого тиску. Жаростійкі ж покриття на основі нікелевих сплавів без додаткової обробки схильні до високотемпературного окислення та розтріскування в процесі експлуатації.

Для усунення цих недоліків та модифікації структури застосовують методи післянапилювальної обробки. Одним із перспективних напрямків є лазерна обробка, яка дозволяє переплавити поверхневий шар, усунути пористість та підвищити корозійну стійкість. Проте лазерна обробка є

локальною і складною для деталей складної форми. Більш універсальним методом, що дозволяє комплексно впливати на весь об'єм покриття та зону перехідного шару, є об'ємна термічна обробка у вакуумних печах. Саме вибір оптимальних режимів такої обробки дозволяє перевести структуру покриття в рівноважний стан, зняти напруження та забезпечити необхідний баланс між твердістю, міцністю та експлуатаційною надійністю при температурах 1000 °С.

1.3 Фундаментальні підходи до створення ущільнювальних покриттів

Як було зазначено раніше, ущільнювальні покриття застосовуються в компресорах авіаційних газотурбінних двигунів для мінімізації проміжку між корпусом статора і лопатями ротора, що дозволяє підвищити ефективність роботи турбіни та скоротити споживання палива. Ключовими факторами, що визначають характеристики покриття, є температурний режим і метод нанесення, матеріал елемента тертя (титанові, нікелеві або залізні сплави), а також геометричні параметри елемента розтирання.

Покриття на компонентах зазвичай формуються у вигляді двох шарів: металевої основи-підшару та власне робочого покриття. Залежно від температури газового потоку в ущільненні розроблені наступні типи покриттів: $\text{Al}(74\ldots 76\%)+\text{BN}(24\ldots 26\%)$; $\text{Ni}(83\ldots 85\%)+\text{BN}(17\ldots 15\%)$; $\text{X20H80}(74\ldots 76\%)+\text{BN}(26\ldots 24\%)$; $\text{X20H80}(81\ldots 83\%)+\text{CaF}_2(19\ldots 17\%)$. Ці покриття ефективно працюють у температурному діапазоні від 500 до 1200°С.

У якості підшару часто використовується нітрид бору BN, який існує у трьох поліморфних модифікаціях: α -BN (гексагональна структура), β -BN (кубічна структура), γ -BN (гексагональна щільноупакована структура). Нітрид бору є тугоплавкою сполукою, що плавиться під тиском азоту при 3000°С,

характеризується стійкістю до абразивного зношування, корозійною стійкістю та здатністю зберігати властивості у вакуумі до температури 1200°C.

Існують результати розробки трьох основних класів покриттів:

одношарові металеві покриття типу Me-Cr-Al-Y, Me-Cr-Al-Y-Hf-Si-Zr (рис. 1.1, а);

одношарові композиційні покриття мікрошарового типу з почерговим чергуванням шарів Me-Cr-Al-Y (Me-Cr-Al-Y-Hf-Si-Zr) / Me-Cr-Al-Y (Me-Cr-Al-Y-Hf-Si-Zr) + MeO, де MeO представлено Al_2O_3 або $\text{ZrO}_2 + (6-8\% \text{ мас}) \text{Y}_2\text{O}_3$ (рис. 1.1, б);

двошарові покриття з внутрішнім металевим шаром Me-Cr-Al-Y (Me-Cr-Al-Y-Hf-Si-Zr) і зовнішнім керамічним шаром (рис. 1.1, в);

двошарові покриття з внутрішнім композиційним шаром Me-Cr-Al-Y (Me-Cr-Al-Y-Hf-Si-Zr) + MeO дисперсійно-зміцненого або мікрошарового типів та зовнішнім керамічним ($\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$) шаром (рис. 1.1, г);

тришарові покриття з внутрішнім і проміжним металевими шарами на базі сплавів Me-Cr-Al-Y (Me-Cr-Al-Y-Hf-Si-Zr) та зовнішнім керамічним шаром на основі $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$ (рис. 1.1, д);

тришарові покриття з внутрішнім металевим шаром Me-Cr-Al-Y (Me-Cr-Al-Y-Hf-Si-Zr), проміжним композиційним шаром Me-Cr-Al-Y (Me-Cr-Al-Y-Hf-Si-Zr) + MeO дисперсійно-зміцненого або мікрошарового типів та зовнішнім керамічним ($\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$) шаром (рис. 1.1, ж).

Кожна з представлених структур покриттів має свої специфічні переваги та область застосування. Одношарові металеві покриття забезпечують хорошу адгезію до основи та термічну стабільність, проте мають обмежену зносостійкість. Композиційні мікрошарові структури поєднують пластичність металевої матриці з твердістю керамічних включень, що покращує експлуатаційні характеристики.

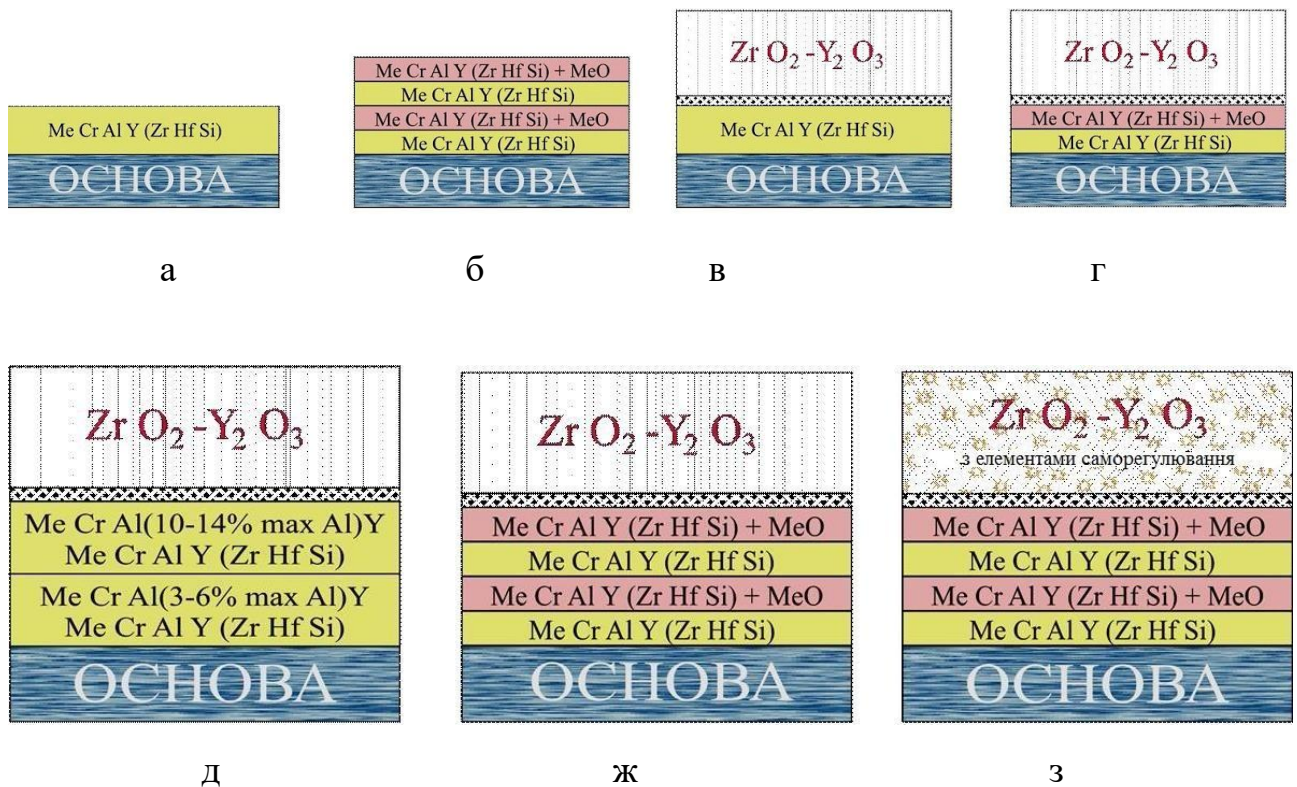


Рисунок 1.7 - Схеми жароміцних і теплозахисних покриттів

тришарові покриття з внутрішнім металевим шаром Me-Cr-Al-Y (Me-Cr-Al-Y-Hf-Si-Zr), проміжним композиційним шаром Me-Cr-Al-Y (Me-Cr-Al-Y-Hf-Si-Zr) + MeO дисперсійно-зміцненого або мікрошарового типів та зовнішнім керамічним шаром ($ZrO_2-Y_2O_3$) з елементами у вигляді дисперсних частинок боридів, які при окисленні здатні "залікувати" мікротріщини у зовнішньому керамічному шарі, що утворюються внаслідок термоцикування (рис. 1.1, з).

Перспективними є дослідження щодо застосування тришарового покриття, яке наносилось на сплав ВЖ-98. В якості підшару застосовувався NiAl для створення надійного зчеплення композиційного покриття з базовим металом. Проміжний шар складався з композиційного покриття ($ZrO_2 \cdot CaO + Ni$) + 30% AlNi. Його основне призначення полягає у забезпеченні плавного переходу коефіцієнта термічного розширення від металу до кераміки. Захисний шар представлений композиційним покриттям $ZrO_2 \cdot CaO + Ni$, що виконує термозахисні функції всієї системи покриття. Матеріали тришарового покриття підібрані таким чином, щоб забезпечити

поступовий перехід коефіцієнта термічного розширення від матеріалу основи до робочого покриття. У сучасних розробках прагнуть відмовитися від використання підшару завдяки застосуванню технології монокристалічного лиття, однак такі інноваційні рішення ще мають обмежене практичне застосування.

1.4 Вплив термічної обробки на формування структури та фізико-механічних властивостей ущільнювальних покриттів

Процес формування експлуатаційних властивостей газотермічних покриттів не завершується на етапі їх нанесення. Структура, отримана в результаті високошвидкісного удару та надшвидкого гартування (зі швидкостями охолодження порядку 10^4 - 10^6 K/c) розплавлених частинок на відносно холодній підкладці, є термодинамічно нерівноважною. Такий стан матеріалу, який в англомовній літературі класифікується терміном «as-sprayed», характеризується високою гетерогенністю хімічного складу, наявністю метастабільних фаз, значною відкритою пористістю та високим рівнем залишкових напружень розтягу. Експлуатація ущільнювальних вузлів ГТД при температурах робочого газу 1000–1100 °C без попередньої стабілізуючої термічної обробки призводить до неконтрольованих структурно-фазових перетворень, зміни геометричних розмірів (усадки або спучування) та передчасного руйнування покриття. Саме тому термічна обробка (ТО) у вакуумі є критично важливим технологічним етапом, що визначає кінцевий комплекс фізико-механічних властивостей системи «основа–покриття».

Фізична природа процесів зміцнення та гомогенізації Основним механізмом, що обумовлює зміни властивостей покриття при нагріванні, є активація дифузійних процесів. При досягненні температур, що становлять

0,6–0,8 від температури плавлення матеріалу ($T_{пл}$), амплітуда теплових коливань атомів кристалічної ґратки зростає настільки, що стає можливим їх перехід через потенційні бар'єри. Це ініціює об'ємну та поверхневу дифузію, яка протікає в декількох напрямках.

По-перше, відбувається гомогенізація хімічного складу. У вихідному стані покриття має яскраво виражену шарувату («splat») структуру, де кожна деформована частинка оточена тонкими оксидними плівками, що утворилися під час польоту в струмені плазми. Термічна обробка, особливо у глибокому вакуумі, сприяє дисоціації або коагуляції цих оксидів, що руйнує бар'єри для дифузії між окремими ламелями. В результаті відбувається «зрощування» частинок, а межі між ними стають розмитими. Механічне зачеплення, яке було основним фактором міцності напиленого шару, трансформується у міцний металічний (дифузійний) зв'язок. Це явище безпосередньо підвищує когезійну міцність покриття — його здатність протистояти розшаруванню під дією відцентрових сил та вібрацій.

По-друге, критично важливим є формування перехідної зони на межі з основою. В процесі витримки при високій температурі відбувається взаємна дифузія елементів покриття (наприклад, Al, Cr, Y) в основу та елементів основи (Ni, Ti, W) в покриття. Утворення розвиненої дифузійної зони шириною 10–30 мкм гарантує високу адгезійну міцність. Однак, вибір режимів ТО вимагає обережності: надмірна тривалість або температура можуть призвести до утворення в цій зоні крихких топологічно щільноупакованих (ТЩУ) фаз або так званих фаз Лавеса, які стають концентраторами напружень і можуть ініціювати відшарування.

1.5 Вплив термічної обробки на формування структури та фізико-механічних властивостей ущільнювальних покриттів

Процес формування експлуатаційних властивостей газотермічних покриттів не завершується на етапі їх нанесення. Структура, отримана в результаті високошвидкісного удару та надшвидкого гартування (зі швидкостями охолодження порядку $10^4 - 10^6$ K/c) розплавлених частинок на відносно холодній підкладці, є термодинамічно нерівноважною. Такий стан матеріалу, який в англomовній літературі класифікується терміном «as-sprayed», характеризується високою гетерогенністю хімічного складу, наявністю метастабільних фаз, значною відкритою пористістю та високим рівнем залишкових напружень розтягу. Експлуатація ущільнювальних вузлів ГТД при температурах робочого газу 1000 - 1100°C без попередньої стабілізуючої термічної обробки призводить до неконтрольованих структурно-фазових перетворень, зміни геометричних розмірів (усадки або спучування) та передчасного руйнування покриття. Саме тому термічна обробка (ТО) у вакуумі є критично важливим технологічним етапом, що визначає кінцевий комплекс фізико-механічних властивостей системи «основа–покриття».

Фізична природа процесів зміцнення та гомогенізації. Основним механізмом, що обумовлює зміни властивостей покриття при нагріванні, є активація дифузійних процесів. При досягненні температур, що становлять 0,6–0,8 від температури плавлення матеріалу ($T_{пл}$), амплітуда теплових коливань атомів кристалічної ґратки зростає настільки, що стає можливим їх перехід через потенційні бар'єри. Це ініціює об'ємну та поверхневу дифузію, яка протікає в декількох напрямках.

По-перше, відбувається гомогенізація хімічного складу. У вихідному стані покриття має яскраво виражену шарувату («splat») структуру, де кожна деформована частинка оточена тонкими оксидними плівками, що утворилися

під час польоту в струмені плазми. Термічна обробка, особливо у глибокому вакуумі, сприяє дисоціації або коагуляції цих оксидів, що руйнує бар'єри для дифузії між окремими ламелями. В результаті відбувається «зрощування» частинок, а межі між ними стають розмитими. Механічне зачеплення, яке було основним фактором міцності напиленого шару, трансформується у міцний металічний (дифузійний) зв'язок. Це явище безпосередньо підвищує когезійну міцність покриття — його здатність протистояти розшаруванню під дією відцентрових сил та вібрацій.

а) Стан після плазмового напилення: видно чіткі межі деформованих частинок, шаруватість, наявність мікротріщин вздовж меж ламелей;

б) Стан після вакуумного відпалу (1050 °C, 4 години): структура стала гомогенною, межі частинок зникли внаслідок рекристалізації, спостерігається коагуляція пор.

По-друге, критично важливим є формування перехідної зони на межі з основою. В процесі витримки при високій температурі відбувається взаємна дифузія елементів покриття (наприклад, Al, Cr, Y) в основу та елементів основи (Ni, Ti, W) в покриття. Утворення розвиненої дифузійної зони шириною 10–30 мкм гарантує високу адгезійну міцність. Однак, вибір режимів ТО вимагає обережності: надмірна тривалість або температура можуть призвести до утворення в цій зоні крихких топологічно щільноупакованих (ТЩУ) фаз або так званих фаз Лавеса, які стають концентраторами напружень і можуть ініціювати відшарування.

Еволюція пористої структури та спікання. Специфікою ущільнювальних (abradable) покриттів є необхідність збереження певної пористості для забезпечення їх піддатливості. Проте характер пористості після напилення є несприятливим: пори мають гострокутну, щілиноподібну форму і розташовані переважно між шарами напилених частинок. Така морфологія є джерелом зародження втомних тріщин.

Під час термічної обробки відбувається процес твердофазного спікання. Рушійною силою цього процесу є прагнення системи до зменшення вільної

поверхневої енергії. Під дією сил поверхневого натягу відбувається перенесення маси речовини, що призводить до:

Заліковування мікротріщин та дрібних пор.

Сфероїдизації великих пор — вони набувають округлої форми, яка є найбільш сприятливою з точки зору механіки руйнування, оскільки мінімізує концентрацію напружень.

Таким чином, загальна пористість може дещо знизитися (що призводить до усадки покриття на 1–3%), але якість структури та її втомна міцність суттєво зростають.

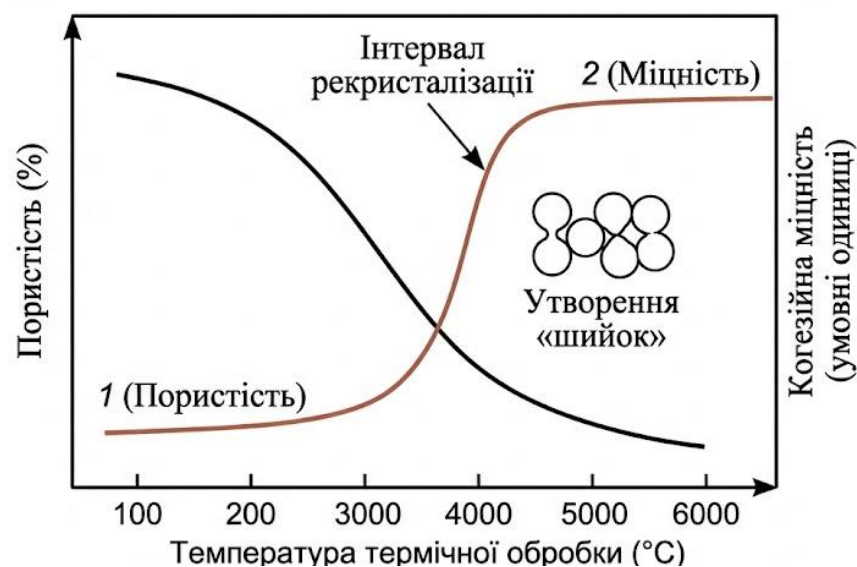


Рисунок 1.2 - Вплив температури термічної обробки на пористість та когезійну міцність покриття

Релаксація залишкових напружень Газотермічні покриття у вихідному стані знаходяться під дією значних розтягуючих напружень I роду (макронапружень), які виникають через обмеження усадки гарячих частинок холодною основою. Ці напруження сумуються з робочими напруженнями в деталі, що може призвести до перевищення границі міцності. Термічна обробка виступає як ефективний релаксаційний процес. При нагріванні границя плинності матеріалу покриття знижується, і матеріал отримує можливість пластично деформуватися в мікрооб'ємах, «скидаючи» накопичені

пружні деформації. Повне зняття напружень (відпал) зазвичай досягається при витримці, що дозволяє перевести структуру в стан, вільний від спотворень кристалічної ґратки.

Фазові перетворення та зміна твердості Вплив термічної обробки на мікротвердість та зносостійкість є неоднозначним і залежить від легування сплаву. Для нікелевих сплавів системи Ni-Cr-Al-Y характерним є процес дисперсійного твердіння. При охолодженні з температури гомогенізації (або при спеціальному старінні) з пересиченого твердого γ -розчину виділяється зміцнююча γ' -фаза (інтерметалід Ni_3Al) та дисперсні карбіди. Це може призвести до підвищення твердості покриття порівняно з вихідним станом. Проте, для ущільнювальних покриттів надмірна твердість є небажаною, оскільки це погіршує їх припрацьовуваність (abrability) і може викликати підвищений знос контртіла (лопаток турбіни). Тому режим термічної обробки підбирається як компроміс: температура повинна бути достатньо високою для завершення процесів спікання та гомогенізації, але охолодження має забезпечувати таку дисперсність фаз, яка гарантує оптимальне співвідношення «твердість/пластичність».

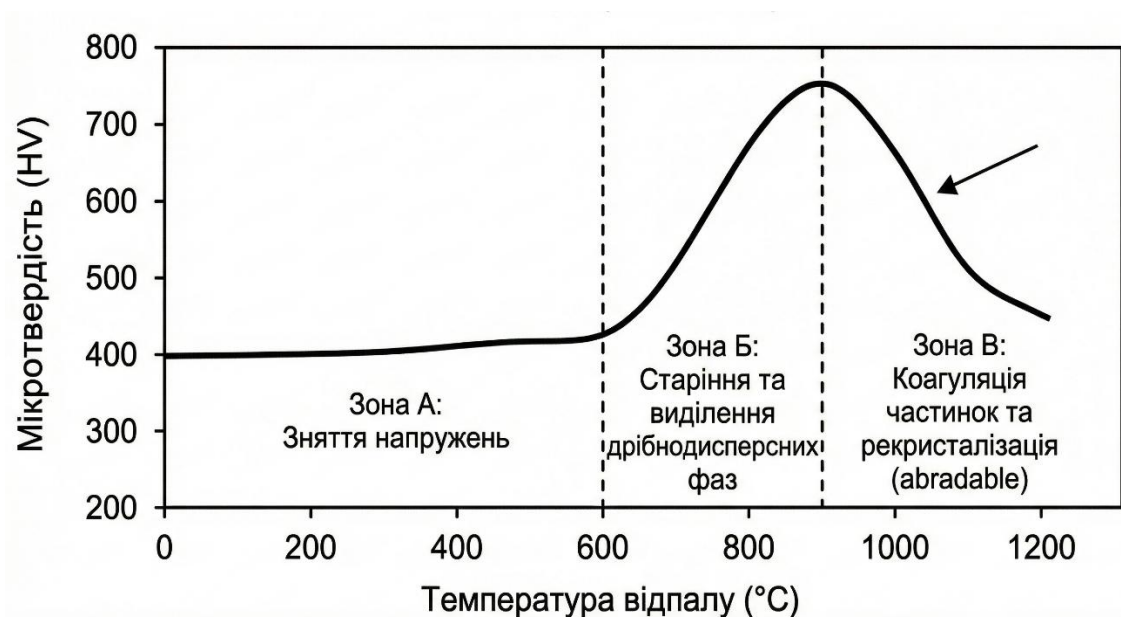


Рисунок 1.3 – Залежність мікротвердості (HV) ущільнювального покриття від температури відпалу

Підсумовуючи викладене, можна стверджувати, що вакуумна термічна обробка є безальтернативним методом модифікації структури покриттів для гарячого тракту ГТД. Вона дозволяє трансформувати механічно зв'язаний конгломерат частинок у цілісний конструкційний матеріал, забезпечуючи при цьому стабільність розмірів, високу адгезію, необхідну пористість та здатність працювати в умовах термоциклічних навантажень. Відсутність або некоректний вибір режимів ТО неминуче призведе до деградації покриття на ранніх стадіях експлуатації, що робить дослідження впливу режимів термообробки актуальним науково-практичним завданням.

2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

У цьому розділі наведено характеристику основних матеріалів, що використовувалися під час виконання експериментальних досліджень. На основі цього проаналізовано вплив легуючих елементів у складі ущільнювального покриття типу КНА (хімічний склад: 1,5-2,5 % С, 0,3-1,2 % Al, 7-13 % BN, 91,8-83,3 % Ni+Si) на його основні фізико-механічні характеристики.

Нанесення покриття здійснювалося газополуменевим напиленням на попередньо підготовлені зразки-підкладки. Підготовка поверхні зразків перед напиленням передбачала декілька послідовних етапів: первинне знежирення органічними розчинниками для видалення масляних забруднень, абразивно-струменева обробка електрокорундовим піском (фракція 0,6-0,8 мм) при робочому тиску 0,5-0,6 МПа з метою формування розвиненої шорсткої поверхні з параметром шорсткості $R_a = 40-60$ мкм, що забезпечує необхідну адгезійну міцність покриття, та завершальна продувка поверхні стисненим повітрям для повного видалення залишків абразивного матеріалу та пилу. Така комплексна підготовка поверхні є критично важливою для забезпечення високої якості зчеплення напиленого покриття з основою та формування однорідної структури покриття з мінімальною пористістю. Режимми напилення підбиралися експериментально з урахуванням властивостей матеріалу покриття та вимог до його експлуатаційних характеристик.

Перед нанесенням робочого шару на поверхню базового матеріалу формувався жаростійкий підшар товщиною 100-150 мкм. Цей підшар являв собою нікелеву композицію, леговану елементами (Al та Cr), які при експлуатації у високотемпературних умовах сприяють утворенню стабільної оксидної захисної плівки. Склад підшару включав: Ni як основу, 18-22% Cr, 8-12% Al, 0,8-1,2% Y. Така композиція забезпечувала подвійну функцію: захист від високотемпературної корозії та створення надійного адгезійного зв'язку

між основним матеріалом та ущільнювальним покриттям. Технологічні параметри процесу нанесення підшару включали: тиск кисню в діапазоні 0,35-0,4 МПа, тиск ацетилену 0,07-0,09 МПа, робоча відстань напилення становила 150-180 мм.

В рамках експериментального дослідження було виготовлено серію зразків з різним вмістом ітрію. За основу всіх модифікованих композицій було взято матеріал КНА-82, який легувався ітрієм у трьох варіантах: зразок №1 – з використанням лігатури Ni-Y у порошковій формі, зразок №2 – з додаванням чистого металевого ітрію, зразок №3 – із застосуванням багатокомпонентної лігатури Co-Ni-Cr-Al-Y. Додатково було підготовлено еталонний зразок №4 на основі немодифікованого КНА-82 для проведення порівняльних випробувань.

Дослідження мікроструктури отриманих покриттів проводилося з використанням комплексу методів оптичної та растрової електронної мікроскопії, що дозволило провести всебічну характеристику структурно-фазового стану матеріалу на різних масштабних рівнях.

Попередній аналіз мікроструктури покриттів здійснювався методом оптичної металографії з використанням мікроскопа при збільшеннях від 100× до 1000×. Для проведення металографічних досліджень зразки піддавалися спеціальній підготовці, яка включала наступні етапи: заливку зразків у протекторну масу на основі епоксидної смоли для забезпечення збереження цілісності покриття, механічне шліфування на абразивних папірцях послідовно зменшуваної зернистості (від P320 до P2000), полірування алмазними пастами з розміром зерна 3 мкм та 1 мкм до дзеркального блиску, та хімічне травлення реактивом відповідного складу для виявлення структурних складових.

Оптична мікроскопія дозволила оцінити загальну морфологію покриттів, виявити наявність макродефектів (тріщин, пор, відшарувань), визначити товщину функціональних шарів, дослідити характер границі поділу між підшаром та робочим покриттям, а також між покриттям та основою.

Виміри товщини покриттів проводилися у п'яти різних точках кожного зразка з подальшим усередненням результатів.

Детальне вивчення тонкої структури покриттів, морфології структурних складових та елементного розподілу проводилося на растровому електронному мікроскопі (РЕМ) при прискорюючій напрузі 15-20 кВ. Дослідження виконувалися в режимах вторинних та відбитих електронів, що забезпечило отримання інформації як про топографію поверхні, так і про фазовий контраст.

Підготовка зразків для РЕМ-досліджень включала аналогічні етапи шліфування та полірування, як для оптичної мікроскопії, з додатковим нанесенням провідного шару для запобігання накопиченню електричного заряду на поверхні діелектричних фаз. Досліджувалися як поперечні шліфи покриттів для аналізу послідовності шарів та їх структури, так і поверхні руйнування для вивчення характеру міжфазних зв'язків.

Для встановлення якісного та кількісного елементного складу окремих структурних складових та мікрообластей покриттів застосовувався енергодисперсійний рентгенівський мікроаналіз (ЕДС-аналіз) з використанням приставки. Аналіз проводився в точковому режимі для визначення складу окремих фаз, у режимі лінійного сканування для дослідження градієнтів концентрації елементів, та у режимі картування для побудови карт розподілу елементів на обраних ділянках структури. Розмір зонда становив близько 1-2 мкм, що забезпечувало достатню локальність аналізу при прийнятній інтенсивності аналітичного сигналу.

Нанесення ущільнювальних покриттів здійснювалося методом газополуменового. Цей метод забезпечує достатню температуру полум'я для плавлення порошкових частинок та їх прискорення до необхідної швидкості для формування щільного покриття з високою адгезією до підкладки.

Як горючий газ використовувався технічний ацетилен (C_2H_2), як окислювач – технічний кисень (O_2) чистотою не менше 99,5%. Співвідношення витрат кисню та ацетилену підбиралося таким чином, щоб забезпечити нейтральне

або злегка відновне полум'я, що запобігає надмірному окисненню напилюваного матеріалу в процесі нанесення.

Технологічні параметри процесу напилення робочого шару покриття підбиралися експериментально з урахуванням теплофізичних властивостей порошкового матеріалу, вимог до структури та властивостей покриття. Оптимальні режими напилення включали наступні параметри:

Тиск кисню: 0,4-0,45 МПа, що забезпечувало необхідну швидкість газового потоку та повноту згоряння ацетилену;

Тиск ацетилену: 0,08-0,10 МПа, підібраний для досягнення оптимальної температури полум'я;

Витрата порошку: 15-20 г/хв, що контролювалася дозуючим пристроєм;

Дистанція напилення: 150-200 мм від зрізу сопла до поверхні зразка, визначена як оптимальна для забезпечення достатнього нагріву частинок при мінімальному окисненні;

Кут напилення: 75-90° відносно поверхні підкладки для досягнення максимальної ефективності осадження;

Швидкість переміщення пальника: 80-100 мм/с, що забезпечувало рівномірний прогрів поверхні без перегріву;

Крок між проходами: 4-6 мм для формування однорідного покриття без пропусків.

Напилення проводилося в декілька проходів для досягнення заданої товщини покриття 250-350 мкм. Кожен наступний прохід виконувався перпендикулярно до попереднього для забезпечення рівномірності та однорідності структури покриття. Між проходами витримувалася пауза 10-15 секунд для запобігання надмірному перегріву підкладки, що могло б призвести до термічних деформацій або зміни структури базового матеріалу. Температура підкладки в процесі напилення контролювалася безконтактним інфрачервоним пірометром і підтримувалася в діапазоні 150-200°C. Така температура є оптимальною для забезпечення достатньої адгезії частинок без

ризик термічного пошкодження основи або формування небажаних фазових перетворень.

Для забезпечення стабільності параметрів процесу напилення всі зразки виготовлялися в один день при однакових умовах навколишнього середовища (температура 18-22°C, відносна вологість 45-60%). Порошкові матеріали перед напиленням піддавалися просушуванню при температурі 120°C протягом 2 годин для видалення адсорбованої вологи.

Якість отриманих покриттів оцінювалася візуально безпосередньо після напилення за відсутністю відшарувань, тріщин, локальних непропалів та інших видимих дефектів. Зразки з виявленими дефектами бракувалися і не використовувалися для подальших досліджень.

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

3.1 Вплив високотемпературної витримки на мікроструктуру ущільнювальних покриттів

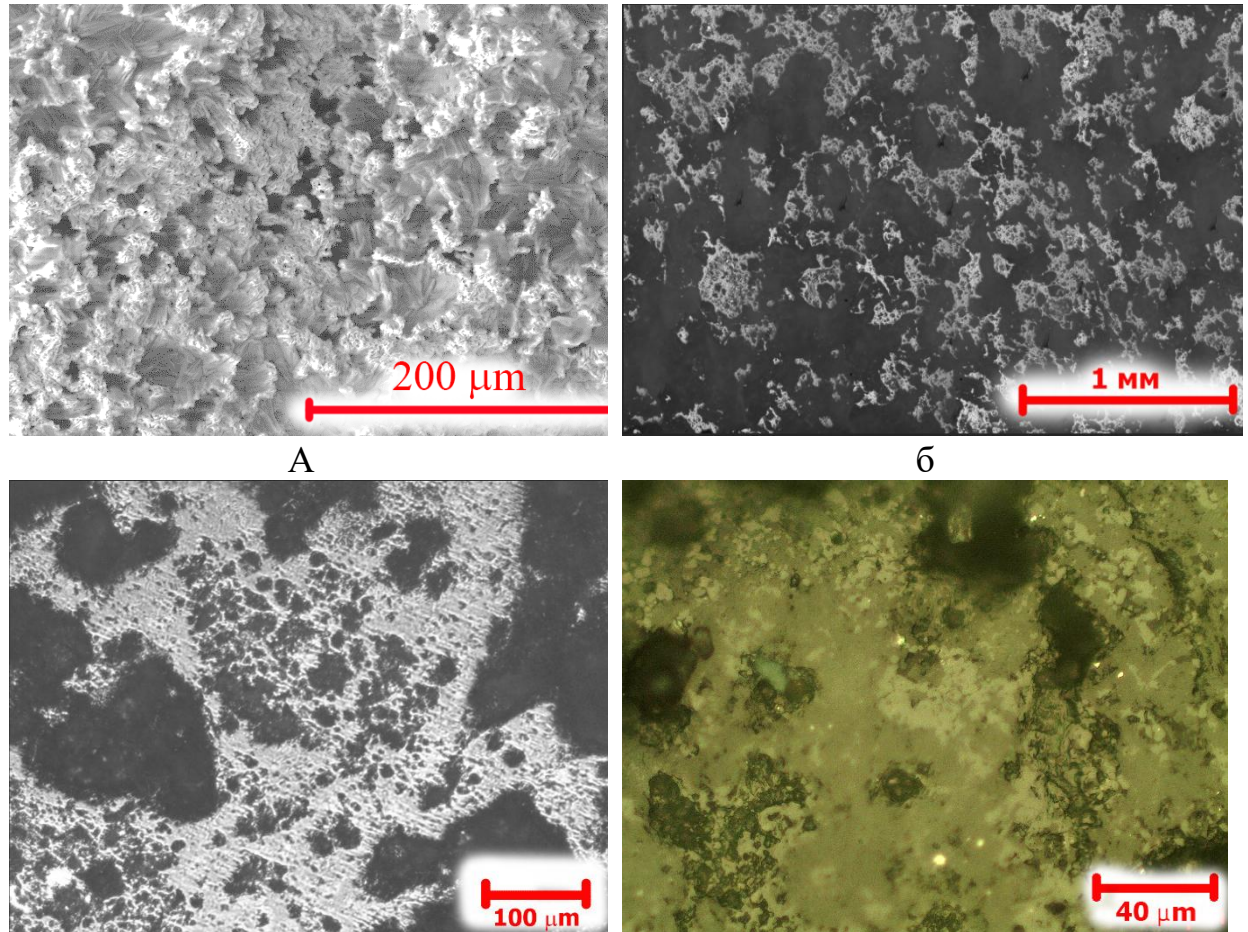
Дослідження структурних змін захисних покриттів після високотемпературної витримки є важливим етапом у оцінці їх працездатності та довговічності в екстремальних умовах експлуатації. Покриття, які застосовуються в енергетиці, авіаційній промисловості та інших галузях високотемпературної техніки, постійно піддаються впливу підвищених температур, що може досягати 1000...1200°C. За таких умов матеріали зазнають складних фізико-хімічних перетворень, включаючи процеси окислення, дифузії, рекристалізації та фазових перетворень.

Особливу увагу при аналізі високотемпературної деградації покриттів приділяють вивченню поверхневих шарів, оскільки саме вони першими взаємодіють з агресивним середовищем. Формування оксидних плівок на поверхні покриттів є закономірним процесом, який може як покращувати, так і погіршувати захисні властивості системи, залежно від складу, морфології та адгезії цих плівок. Структурні особливості оксидних шарів, їх товщина, щільність та характер росту визначають ефективність бар'єрної функції покриття.

Тривала витримка покриттів при температурі 1100 °C протягом 50 та 100 годин спричинила істотні структурні трансформації. Внаслідок термічного впливу на поверхні утворилася гомогенна структура, що можна пояснити формуванням захисного оксидного шару в процесі нагрівання та високотемпературної експозиції покриттів.

Поверхня покриття складу №1 демонструє характерну дендритну морфологію, що сформувалася в результаті росту оксидної плівки у напрямку, перпендикулярному до його поверхні (рис. 3.1, а). Термічний вплив спричинив перерозподіл розмірних параметрів та геометрії пор у структурі покриття. На

поверхні металографічного шліфа виявлено заглиблення, які, ймовірно, виникли через окиснення матеріалу, при цьому окремі ділянки поверхні могли бути втрачені в процесі металографічної підготовки зразка (рис. 3.1, б, в, г).

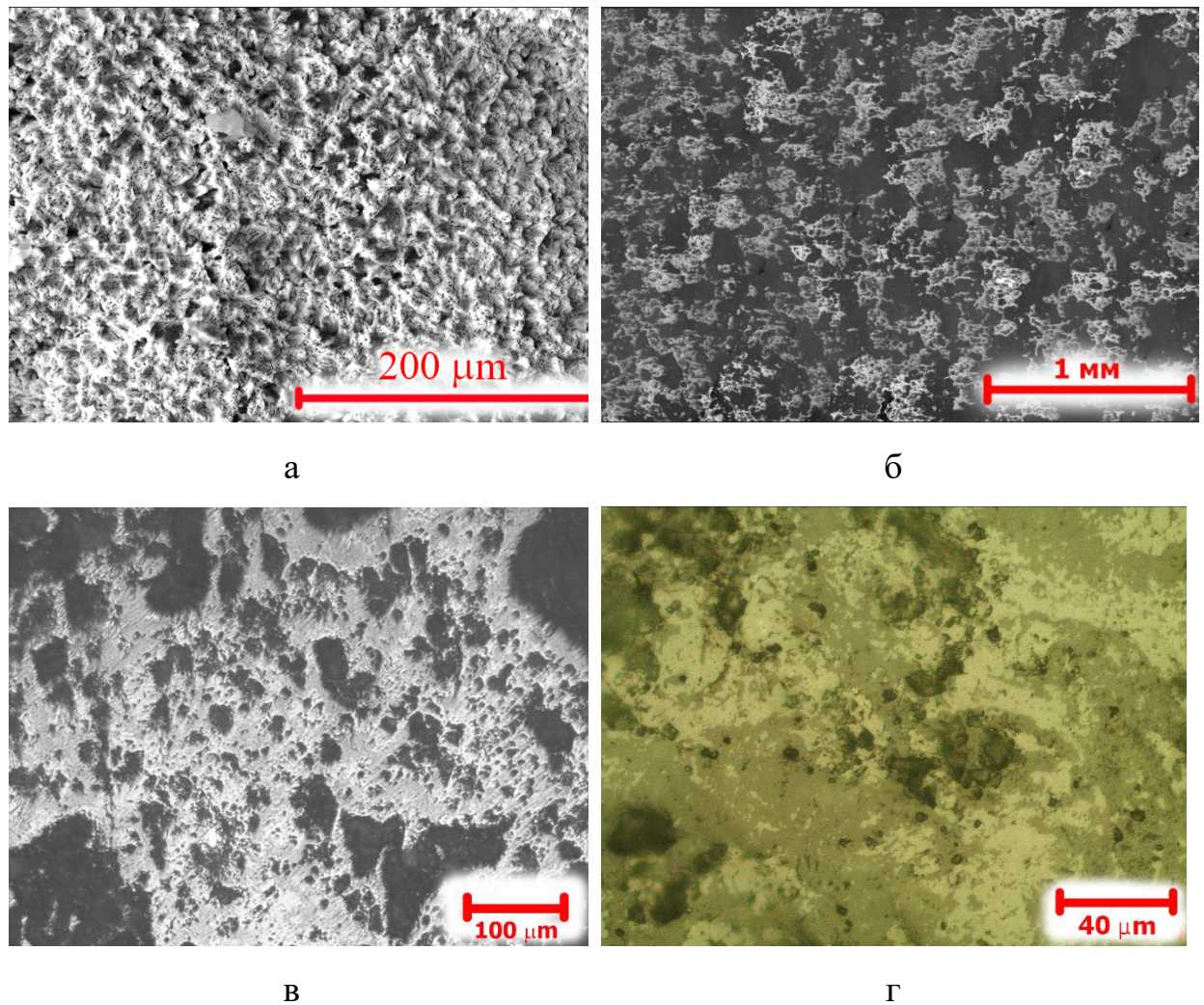


а – растровий електронний мікроскоп, б, в, г – оптичний мікроскоп

Рисунок 3.1 - Мікроструктура покриття складу №1 після термічного впливу при температурі 1100°C впродовж 50 годин

Металографічний аналіз поверхні покриття складу №2 виявив суттєві відмінності порівняно зі складом №1, зокрема формування більш дрібнодисперсної структури із меншими розмірами структурних складових. Утворена оксидна плівка характеризується однорідною дендритною морфологією в межах поля зору (рис. 3.2, а). Під час металографічної підготовки зразка зафіксовано руйнування поверхневих шарів матеріалу, що

свідчить про інтенсивне окислення як на зовнішній поверхні покриття, так і в його внутрішньому об'ємі. Це явище пояснюється високою пористістю матеріалу, яка забезпечує розвинену внутрішню поверхню з безпосереднім доступом кисню до значної площі матеріалу (рис. 3.2, б, в, г).

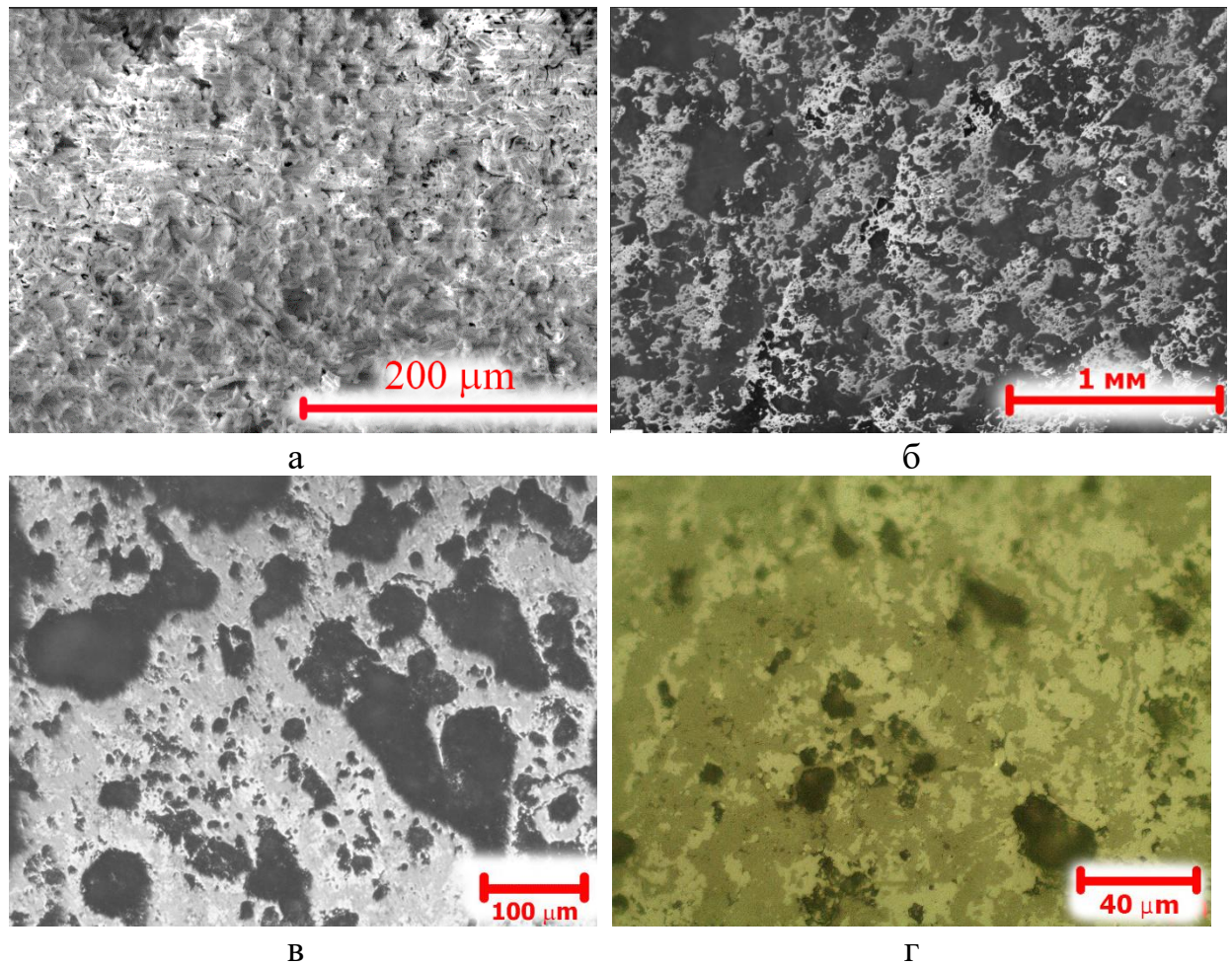


а – растровий електронний мікроскоп, б, в, г – оптичний мікроскоп

Рисунок 3.2 - Мікроструктура покриття складу №2 після термічного впливу при температурі 1100°C впродовж 50 годин

Структура поверхневої плівки покриття складу №3 демонструє певні морфологічні відмінності порівняно з покриттями складів №1 і №2 щодо розмірів та конфігурації частинок, що сформувалися в процесі тривалої витримки при високій температурі (рис. 3.3, а). Така особливість, очевидно,

пов'язана з пріоритетним формуванням оксидних сполук різного хімічного складу, що визначає зовнішній вигляд конгломератів частинок. На поверхні металографічного шліфа зафіксовані прояви високотемпературної газової корозії у вигляді заглиблень на твердофазних ділянках (рис. 3.3, б, в, г). Характерною особливістю є рівномірний розподіл співвідношення між пористою та твердою фазами по всьому перерізу шліфа за відсутності пор великого розміру.

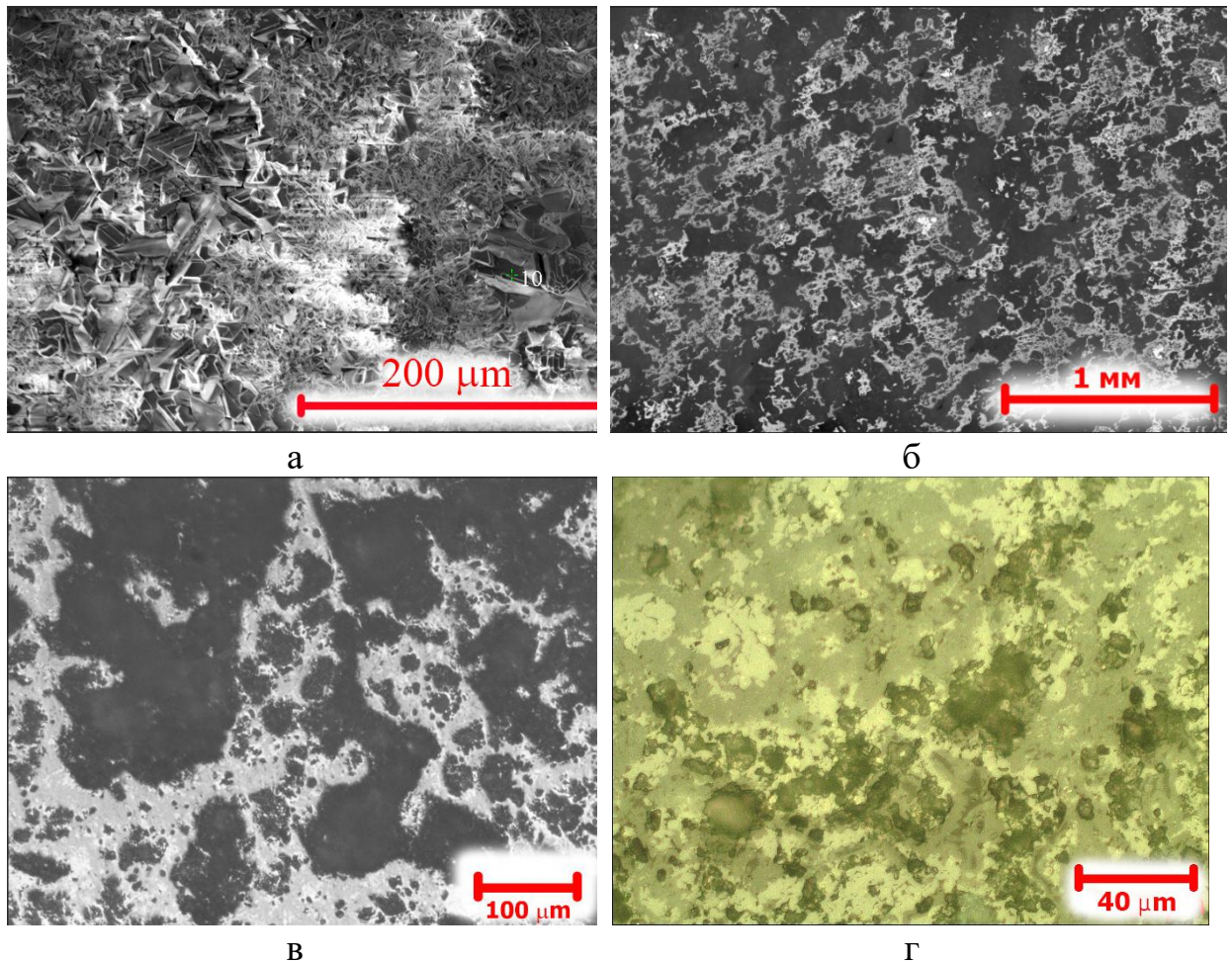


а – растровий електронний мікроскоп, б, в, г – оптичний мікроскоп

Рисунок 3.3 - Мікроструктура покриття складу №3 після термічного впливу при температурі 1100 °С впродовж 50 годин

Під час дослідження покриття складу №4 виявлено суттєві морфологічні відмінності форми оксидних частинок на поверхні порівняно з попередніми

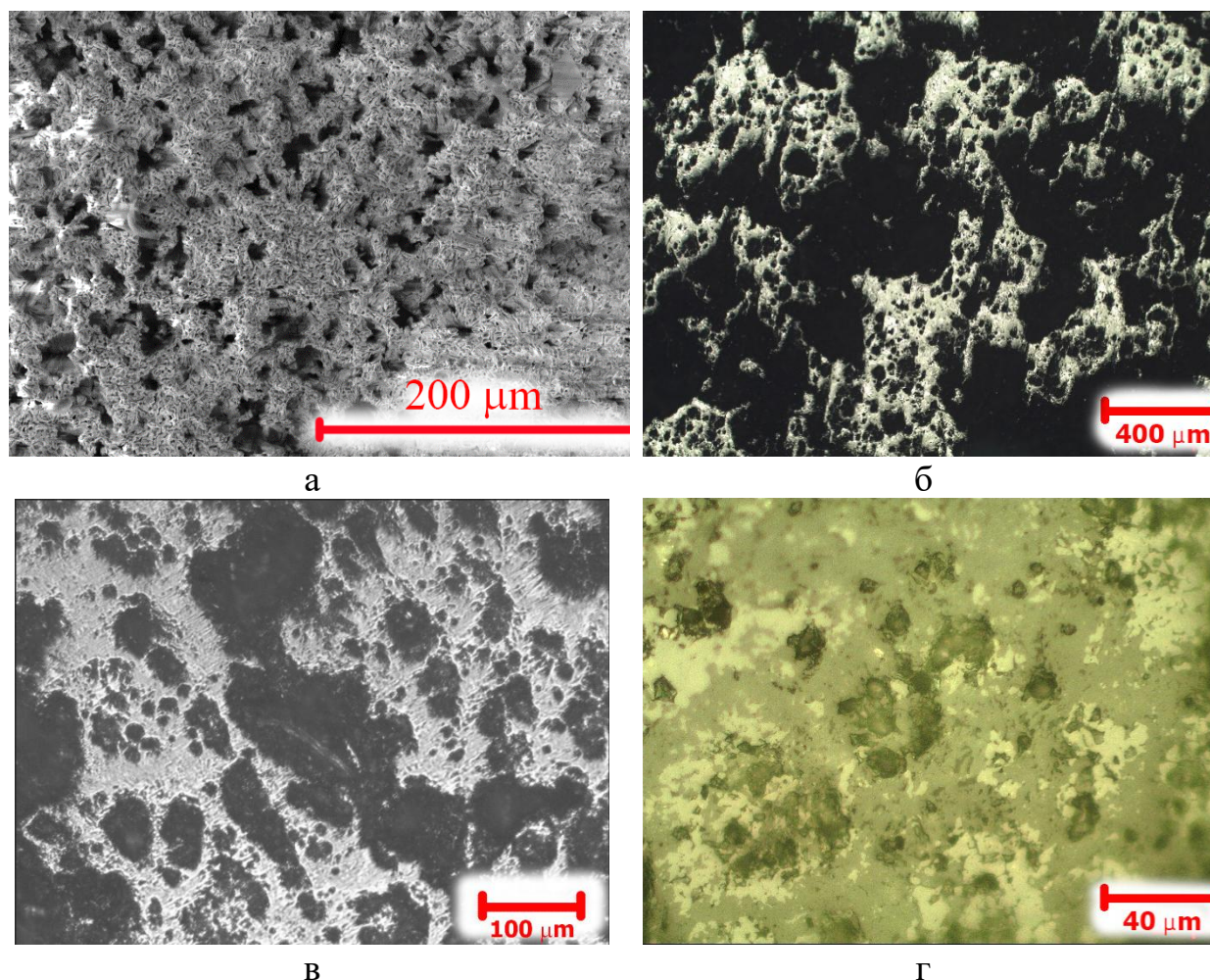
зразками (рис. 3.4, а). Мікроструктурний аналіз показав значну неоднорідність розмірів частинок, при цьому їх морфологія характеризується формою зрізаних конусів для великих частинок, тоді як дрібніші структурні елементи мають голчасту конфігурацію. Оптична мікроскопія дозволила зафіксувати ознаки деградації поверхні шліфа, спричиненої агресивним впливом високотемпературного окисного середовища (див. рис. 3.4, б, в), причому інтенсивність цих пошкоджень перевищує аналогічні прояви в покриттях складів №1-3. Додатково на поверхні металографічного шліфа ідентифіковано світліші включення, які демонструють істотно підвищені значення мікротвердості в порівнянні з основною матрицею матеріалу.



а – растровий електронний мікроскоп, б, в, г – оптичний мікроскоп

Рисунок 3.4 - Мікроструктура покриття складу №4 після термічного впливу при температурі 1100 °С впродовж 50 годин

Подовження тривалості високотемпературної витримки до 100 годин спричинило подальшу еволюцію мікроструктури поверхневих шарів покриттів. Згідно з даними, представленими на рисунку 3.5, а, на поверхні покриття складу №1 зафіксовано появу пор, що, ймовірно, вказує на часткову деструкцію оксидної плівки. Морфологія оксидних утворень зазнала трансформації – частинки набули більш дисперсного характеру та сформували щільнішу упаковку з тіснішим контактом між сусідніми елементами. При оптичній мікроскопії чітко виявлено ознаки інтенсивної газової корозії поверхні, причому масштаб корозійних пошкоджень значно перевищив рівень деградації після 50-годинної витримки (рис. 3.5, б, в).

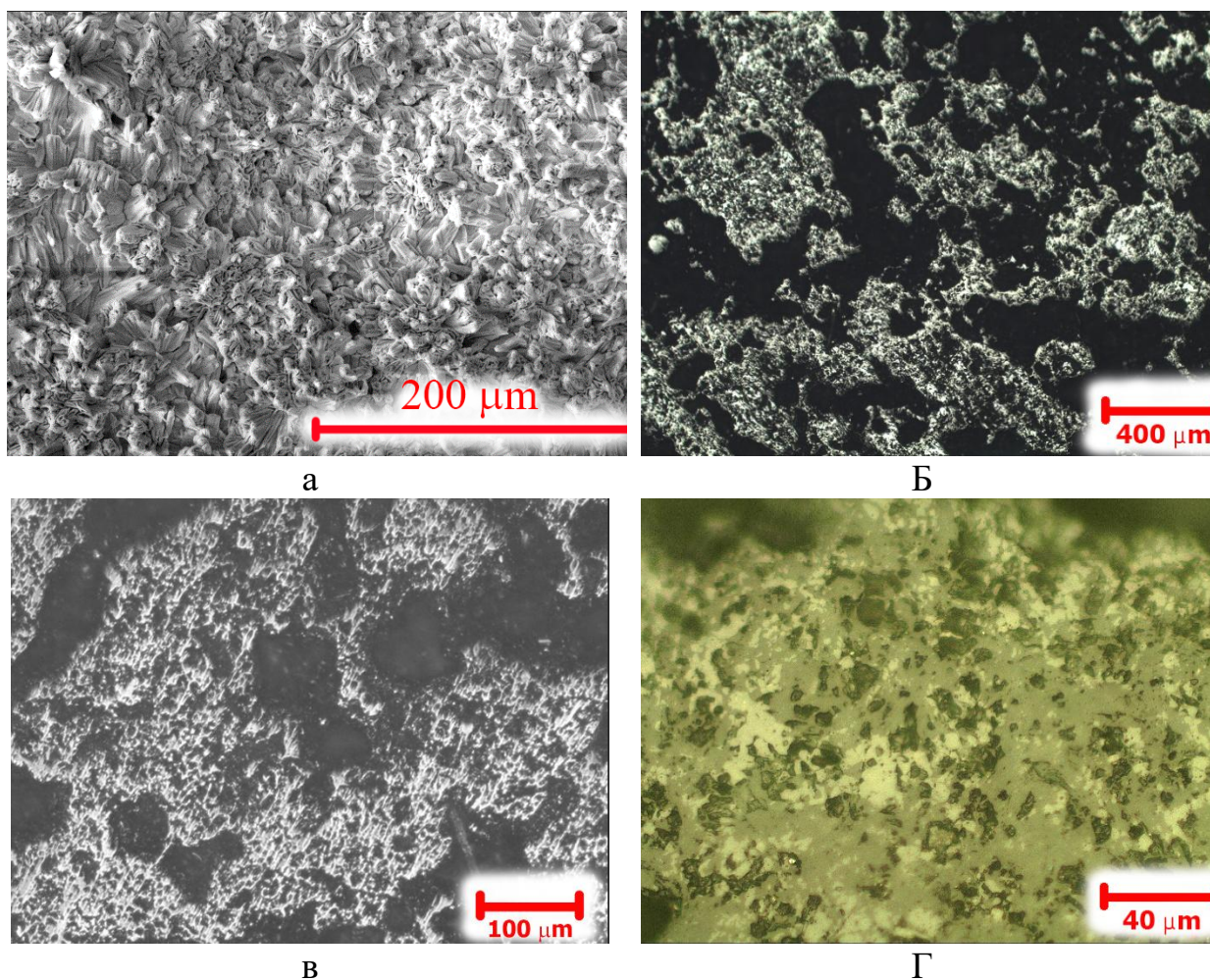


а – растровий електронний мікроскоп, б, в, г – оптичний мікроскоп

Рисунок 3.5 - Мікроструктура покриття складу №1 після термічного впливу при температурі 1100°C впродовж 100 годин

Встановлено істотне зростання пористості матеріалу, що проявляється як у збільшенні загального об'єму пор, так і в укрупненні індивідуальних пор, які коалесцюють, утворюючи значні за розмірами порожнини. На поверхні твердофазних ділянок виявлено плівки різного кольорового відтінку, що може свідчити про одночасне формування оксидних фаз різного стехіометричного складу.

Растрова електронна мікроскопія мікроструктури покриття №2 виявила продовження росту дендритних утворень в умовах подовженої витримки при температурі 1100°C. Характерною особливістю є формування щільної дендритної структури з тісним контактом між сусідніми дендритами, при цьому в межах поля спостереження пори практично відсутні (рис. 3.6, а).

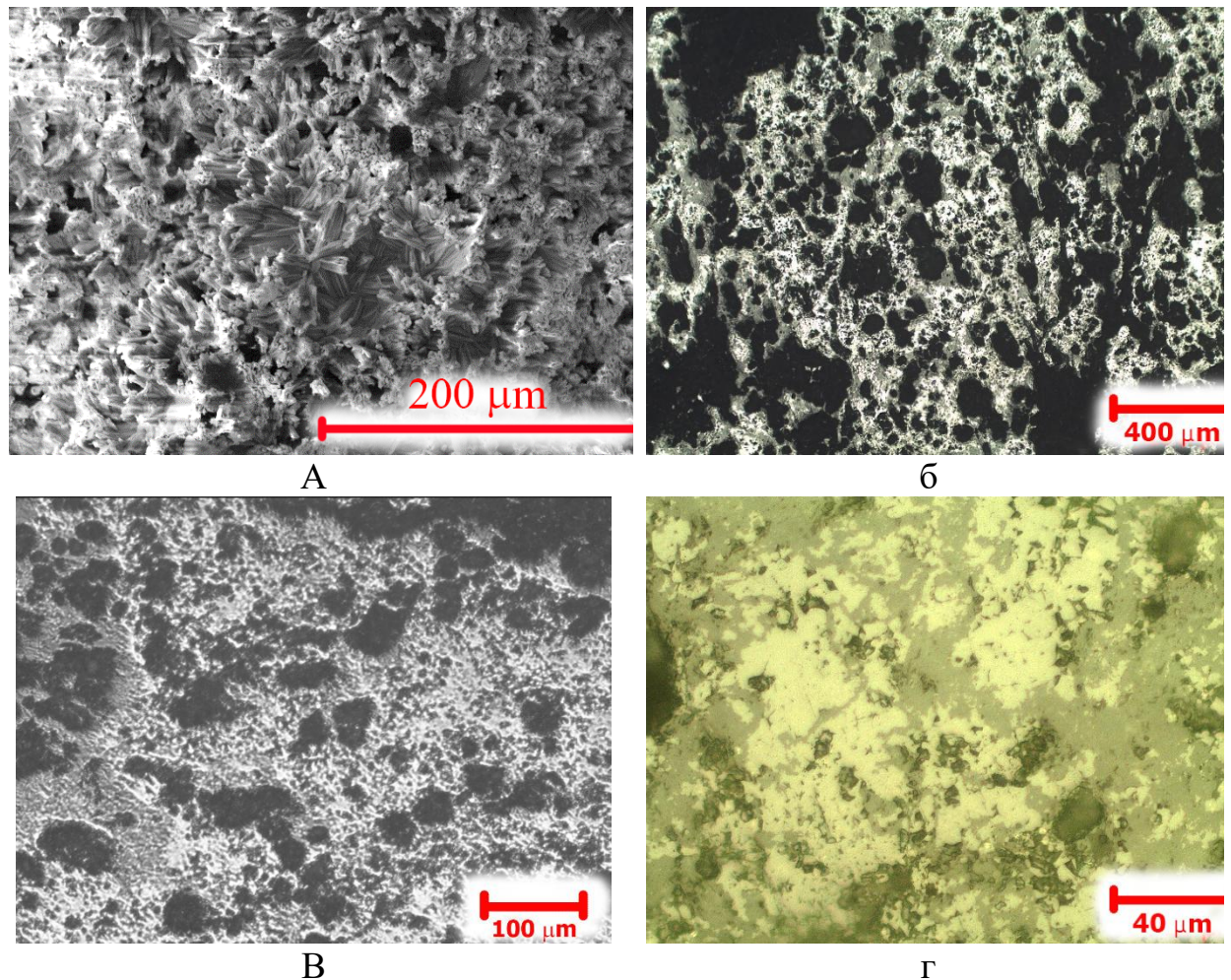


а – растровий електронний мікроскоп, б, в, г – оптичний мікроскоп

Рисунок 3.6 - Мікроструктура покриття складу №2 після термічного впливу при температурі 1100°C впродовж 100 годин

Аналіз зображень на рисунку 3.6, б, в свідчить про те, що пори в структурі покриття характеризуються меншими розмірами та більш гомогенним просторовим розподілом. На поверхні твердофазних ділянок зафіксовано численні заглиблення, які, ймовірно, виникли внаслідок деструкції оксидних фаз (див. рис. 3.6, б, в, г). Додатково на поверхні ідентифіковано присутність плівок з різними кольоровими відтінками.

Морфологія поверхні покриття №3 характеризується формуванням дендритної структури з частинками більших розмірів порівняно з тими, що утворилися після 50-годинної витримки.



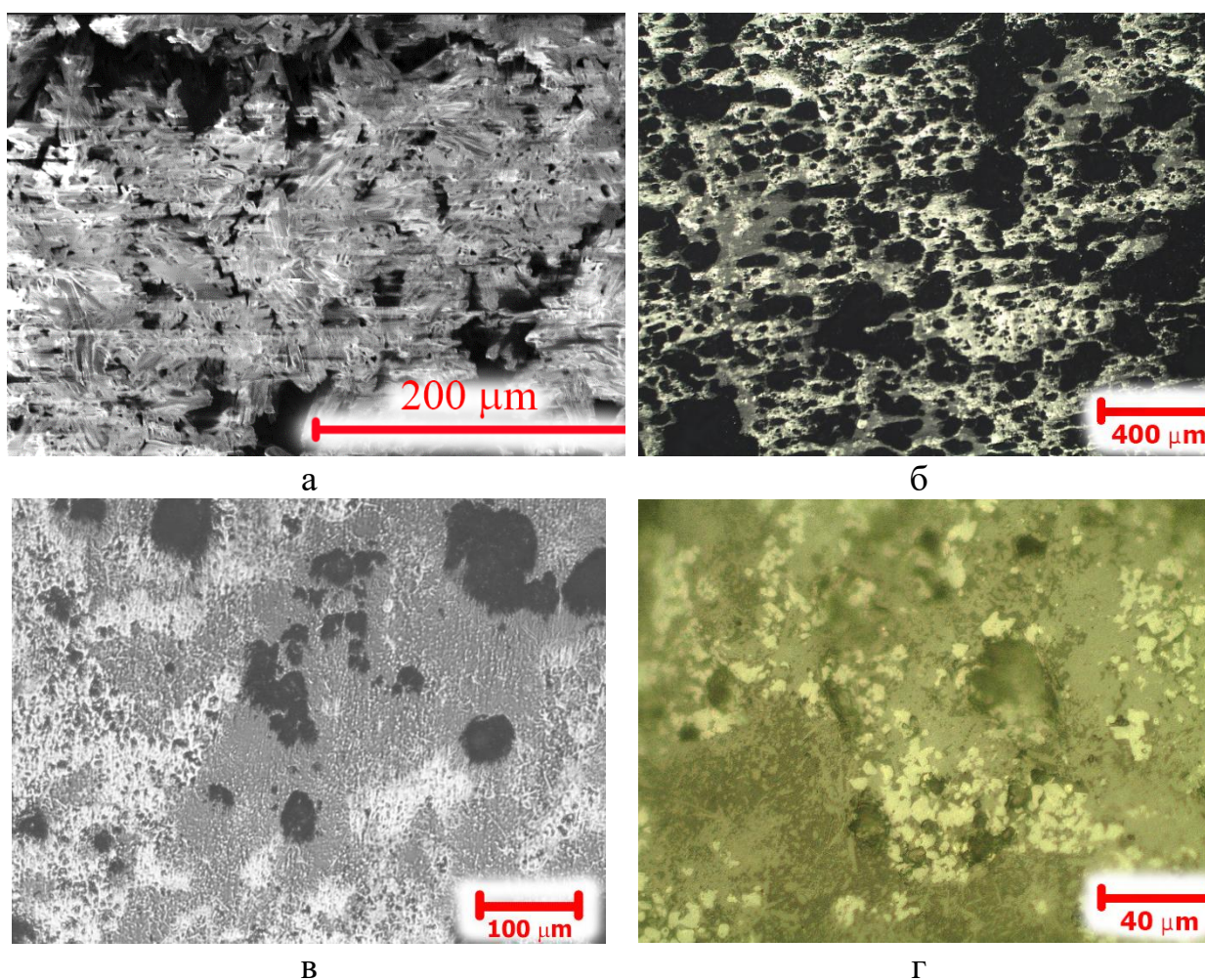
а – растровий електронний мікроскоп, б, в, г – оптичний мікроскоп

Рисунок 3.7 - Мікроструктура покриття складу №3 після термічного впливу при температурі 1100°C впродовж 100 годин

Дендритні утворення формують щільно упаковану структуру з тісним контактом між елементами, що може вказувати на задовільну стійкість до деградації в умовах високотемпературного газового середовища (рис. 3.7, а).

Оптичне мікроскопічне дослідження поверхні шліфа виявило прояви газової корозії, при цьому розміри пор є меншими в порівнянні з пористістю покриттів складів №1 і №2 (рис. 3.7, б, в). На поверхні зафіксовано різнокольорові ділянки, що, ймовірно, свідчить про присутність оксидних плівок різного складу, проте в основному об'ємі поля спостереження домінує плівка світло-сірого забарвлення з включеннями білого кольору (рис. 3.7, г).

Мікроструктура покриття складу №4 демонструє суттєві відмінності навіть після високотемпературної експозиції протягом 100 годин.



а – растровий електронний мікроскоп, б, в, г – оптичний мікроскоп

Рисунок 3.8 - Мікроструктура покриття складу №4 після термічного впливу при температурі 1100°C впродовж 100 годин

Згідно з даними рисунка 3.8, а, оксидні утворення набули морфології, наближеної до дендритної форми, при цьому на поверхні зафіксовано наявність тріщин і пор, що, ймовірно, вказує на недостатню стійкість матеріалу покриття до газової корозії за даного температурно-часового режиму. Ознаки деструктивного впливу високотемпературного газового середовища також чітко проявляються на рисунку 3.8, в, г – виявлено корозійні заглиблення значних розмірів, поверхня характеризується світлими та темно-сірими кольоровими відтінками, ідентифіковано сліди руйнування оксидних фаз поверхневого шару.

Мікроструктура сформованого покриття складу №3 відзначається гомогенним розподілом та прийнятним ступенем дисперсності твердофазних компонентів. Поверхня характеризується наявністю досить щільних оксидних плівок, які при механічному навантаженні піддаються руйнуванню з формуванням дрібних корозійних заглиблень без порушення загальної структурної цілісності покриття. Отже, за результатами мікроструктурного аналізу покриттів складів №1-4, отриманих методом газотермічного напилення, можна констатувати, що покриття складу №3 демонструє найкращу придатність для практичного застосування у виробках з позиції забезпечення необхідних експлуатаційних характеристик.

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 ЕКОНОМІКО-ОРГАНІЗАЦІЙНА ЧАСТИНА

5.1 Актуальність теми з позиції маркетингу

Дослідження впливу режимів термічної обробки на структуру та властивості ущільнювальних покриттів з добавками рідкоземельних металів має виняткову актуальність у сучасних ринкових умовах. На тлі стрімкого розвитку високотемпературної техніки в енергетиці, авіаційній та космічній промисловості зростає потреба у матеріалах, здатних надійно функціонувати в екстремальних умовах при температурах 1000-1200°C. Ці галузі формують преміальний сегмент ринку з високою маржинальністю, де інноваційні ущільнювальні покриття з підвищеною термічною стабільністю створюють значну додану вартість. Особливо цінними є покриття, що зберігають свої експлуатаційні характеристики протягом тривалого терміну під впливом високотемпературної газової корозії. Комерційна привабливість таких розробок підсилюється глобальною тенденцією до підвищення енергоефективності технологічних процесів, оскільки оптимізовані ущільнювальні покриття безпосередньо впливають на ККД енергетичних установок і турбін, знижуючи експлуатаційні витрати та підвищуючи конкурентоспроможність кінцевої продукції. Застосування рідкоземельних металів у складі покриттів має стратегічне значення з огляду на дефіцитність цих елементів на світовому ринку та їх унікальні властивості, що дозволяє створювати продукти з високим рівнем диференціації. Розробка власних технологій високотемпературних ущільнювальних покриттів також вирішує проблему імпортозаміщення та зменшує технологічну залежність від зовнішніх постачальників в умовах геополітичної нестабільності. Значний маркетинговий потенціал полягає у суттєвому продовженні життєвого циклу дороговартісного обладнання, що зменшує сукупну вартість володіння для кінцевих споживачів і скорочує витрати на технічне обслуговування. Не менш важливим є екологічний аспект, оскільки підвищення ресурсу деталей з

ущільнювальними покриттями сприяє зниженню матеріалоемності виробництва та зменшенню вуглецевого сліду протягом життєвого циклу обладнання, що повністю відповідає сучасним ESG-вимогам та формує позитивний імідж виробників на міжнародних ринках. Таким чином, комплексне дослідження структурних перетворень у ущільнювальних покриттях при високотемпературній витримці та оптимізація їх складу за рахунок добавок рідкоземельних металів представляє значну маркетингову цінність і має високий потенціал комерціалізації в умовах зростаючого попиту на високоефективні матеріали для екстремальних умов експлуатації.

5.2 Послідовний аналіз

У рамках проведеного дослідження було здійснено комплексний аналіз потенційних сфер практичного використання розроблених покриттів та визначено ключові переваги, які отримують кінцеві споживачі від їх впровадження. Отримані результати було впорядковано та структуровано у таблиці 5.1, яка містить систематизований перелік галузей застосування продукції з відповідними функціональними перевагами для різних категорій споживачів. Така систематизація дозволила чітко окреслити ринкову цінність розроблених ущільнювальних покриттів з добавками рідкоземельних металів та визначити їхні конкурентні переваги порівняно з існуючими аналогами.

Проведений маркетинговий аналіз дозволив виявити високий комерційний потенціал ущільнювальних покриттів з добавками рідкоземельних металів у таких стратегічних галузях як авіаційне двигунобудування, енергетичне машинобудування, газотурбінні установки та високотемпературні промислові агрегати. Особлива увага була приділена оцінці економічної ефективності впровадження розроблених покриттів з точки

зору зниження експлуатаційних витрат, збільшення міжремонтних інтервалів та загального підвищення енергоефективності обладнання.

Таблиця 5.1 - Опис ідеї

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для споживачів (користувачів)
Дослідження впливу режимів термічної обробки на структуру та властивості ущільнювальних покриттів з добавками рідкоземельних металів	Авіаційна промисловість	Підвищення ресурсу деталей гарячого тракту двигунів на 30-40%, збільшення міжремонтних інтервалів
	Енергетичне машинобудування	Підвищення ККД турбін, зниження витрат на технічне обслуговування до 25%
	Газотурбінні установки	Зменшення радіальних зазорів, підвищення ефективності згоряння палива, покращення екологічних показників
	Високотемпературні промислові агрегати	Збільшення терміну служби елементів конструкції, що працюють при температурах до 1200°C

У проведеному аналізі була розглянута характеристика потенційного ринку, яка була систематизована та представлена у таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Попередня характеристика потенційного ринку

Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
Головні конкуренти	1. Виробники покриттів для авіадвигунів (Praxair Surface Technologies, Oerlikon Metco) 2. Науково-виробничі підприємства у сфері газотермічних покриттів 3. Розробники спеціалізованих матеріалів для енергетики
Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростання 5-7% щорічно завдяки підвищенню вимог до енергоефективності та розширенню застосування високотемпературної техніки
Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Необхідність спеціалізованого обладнання для напилення, дефіцитність рідкоземельних металів, високі вимоги до якості покриттів
Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Відповідність стандартам ISO 9001, ASTM C633 (адгезійна міцність покриттів), галузеві стандарти для авіаційної та енергетичної промисловості

В рамках маркетингового дослідження було проведено сегментацію цільової аудиторії з виділенням ключових груп потенційних споживачів ущільнювальних покриттів. Для кожного ідентифікованого сегмента ринку були визначені специфічні характеристики та сформульовані їхні основні вимоги до продукту, що систематизовано представлено в таблиці 5.3. Здійснений аналіз допоміг сформувати чітке розуміння диференційованих потреб різних категорій клієнтів, що дозволяє розробити оптимальні стратегії

взаємодії з кожним сегментом. Виявлення унікальних вимог різних груп споживачів створює підґрунтя для адаптації технічних характеристик покриттів відповідно до специфічних умов їх використання у різних галузях промисловості, що підвищує комерційну привабливість розробки.

Таблиця 5.3 – Попередня характеристика потенційних клієнтів

Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів (користувачів)
Необхідність підвищення термічної стабільності та ресурсу ущільнювальних покриттів в умовах високих температур	1. Підприємства авіадвигунобудування 2. Виробники газотурбінних установок 3. Енергетичні компанії	1. Авіапідприємства потребують сертифіковані матеріали з підтвердженими характеристиками 2. Виробники ГТУ зацікавлені в підвищенні ККД та зменшенні витрат на обслуговування	1. Стабільність властивостей при 1000-1200° 2. Підвищена стійкість до високотемпературної корозії 3. Оптимальна пористість для забезпечення ущільнювальної функції 4. Технологічність нанесення покриття 5. Економічна обґрунтованість застосування РЗЕ

У проведеному аналізі було визначено SWOT-фактори для середовища реалізації інноваційного проекту, та їх результати подані у таблиці 5.4.

Таблиця 5.4 – SWOT-аналіз

Сильні сторони	Слабкі сторони
1. Підвищення термічної стабільності покриттів на 25-30% 2. Збільшення ресурсу роботи деталей при високих температурах 3. Оптимізована мікроструктура завдяки добавкам РЗЕ 4. Зниження кисневого потенціалу покриттів 5. Науково обґрунтовані режими термічної обробки	1. Висока вартість рідкоземельних металів 2. Складність точного дозування РЗЕ у покриттях 3. Необхідність спеціального обладнання для нанесення 4. Обмеженість результатів лабораторними випробуваннями
Можливості	Загрози
1. Зростання попиту на енергоефективні матеріали 2. Розширення сфер застосування в різних галузях 3. Потенціал імпортозаміщення 4. Інтеграція в міжнародні проекти з розробки високотемпературних матеріалів	1. Волатильність цін на РЗЕ на світовому ринку 2. Поява конкуруючих технологій 3. Зміна галузевих стандартів 4. Геополітичні ризики в доступі до сировини

При розробці ринкової стратегії перший етап передбачає визначення стратегії охоплення ринку, включаючи опис цільових груп потенційних споживачів, який відображений у таблиці 5.5.

Таблиця 5.5 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

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
Виробники газотурбінних двигунів	Висока через постійний пошук матеріалів з покращеними характеристиками	70-80% підприємств в зацікавлені у впровадженні	Висока, переважно міжнародні компанії	Складна через високі технічні вимоги та сертифікацію
Підприємства енергетичного сектору	Середня, потребує демонстрації економічної ефективності	40-50% компаній готові тестувати нові матеріали	Середня, наявність локальних та міжнародних гравців	Середня, співвідношення ціна/якість
Ремонтні підприємства	Висока для спец. авіаремонтних заводів	60-65% спец. підприємств в	Середня, фрагментований ринок	Відносно проста через менші масштаби впровадження
Науково-дослідні установи	Дуже висока через науковий інтерес	85-90% профільних установ	Низька, переважно співпраця, а не конкуренція	Проста, через налагоджені зв'язки

Проведено аналіз зацікавлених сторін інноваційного проекту з їх пріоритизацією та візуалізацією на Kartі стейкхолдерів (рис. 5.1). Стейкхолдери розподілені у три концентричні зони за рівнем впливу ініціатора проекту на них. Внутрішній круг містить прямо підпорядкованих ініціатору стейкхолдерів, що забезпечує ефективне управління їх діяльністю в рамках проекту.



Рисунок 5.1 - Карта стейкхолдерів

Для економічного обґрунтування дослідження впливу режимів термічної обробки на структуру та властивості ущільнювальних покриттів було проведено детальний розрахунок трудових витрат. У таблицях 5.6 і 5.7 представлено калькуляцію витрат на оплату праці дослідницького персоналу, залученого до процесів підготовки, нанесення та термічної обробки покриттів з добавками рідкоземельних металів. Розрахунки включають баланс робочого часу на кожному етапі дослідження та відповідні нарахування єдиного соціального внеску (ЄСВ), що дозволило визначити повну собівартість трудової складової науково-дослідної роботи.

Таблиця 5.6 – Склад, чисельність та фонд заробітної плати виробничих працівників

Категорії працівників	Найвна чисельність осіб	Тарифна ставка за розрядом виконуваних робіт, грн/год	Ефективний фонд робочого часу, год	Тарифний заробіток, грн	Преміальний відсоток до тарифного заробітку, %	Розмір премії, грн	Річний фонд заробітної плати, грн	ЄСВ, грн
Підготовка зразків та матеріалів								
1. Основні працівники								
Інженер-матеріалознавець	1	85,5	1872	160056	15,0	24008,4	184064,4	40494,2
Технік-лаборант	1	75,2	1872	140774,4	15,0	21116,2	161890,6	35615,9
Науковий керівник	1	95,8	1872	179337,6	15,0	26900,6	206238,2	45372,4
2. Допоміжні працівники								
Лаборант-аналітик	1	72,4	1872	135532,8	15,0	20329,9	155862,7	34289,8
Нанесення покриттів з РЗЕ								
Основні працівники								
Оператор установки напilenня	1	82,6	1872	154627,2	15,0	23194,1	177821,3	39120,7
Інженер-технолог	1	88,3	1872	165297,6	15,0	24794,6	190092,2	41820,3
2. Допоміжні працівники								
Контролер якості	1	74,5	1872	139464	15,0	20919,6	160383,6	35284,4
Термічна обробка покриттів								
Основні працівники								
Інженер-терміст	1	84,2	1872	157622,4	15,0	23643,4	181265,8	39878,5
Оператор вакуумної печі	1	79,9	1872	149572,8	15,0	22435,9	172008,7	37841,9
Допоміжні працівники								
Пірометрист	1	76,3	1872	142833,6	15,0	21425,0	164258,6	36136,9
Дослідження властивостей								
Основні працівники								
Інженер-дослідник	1	86,5	1872	161928	15,0	24289,2	186217,2	40967,8
Металограф	1	80,7	1872	151070,4	15,0	22660,6	173731,0	38220,8
Науковий співробітник	1	92,4	1872	172972,8	15,0	25945,9	198918,7	43762,1
Допоміжні працівники								
Технік з випробувань	1	74,8	1872	140025,6	15,0	21003,8	161029,4	35426,5
Разом виробничих працівників	14	-	-	-	-	323667,2	2473782,4	544232,2

Таблиця 5.7 – Склад, чисельність та фонд заробітної плати адмінперсоналу

Посада	Кількість осіб	Посадовий оклад, грн/ос	Преміальний відсоток до окладу, %	Сума премії, грн/ос	Місячна заробітна плата, грн/ос	Річний фонд оплати праці, грн	ЄСВ, грн
Керівник проекту	1	25200	15,0	3780	28980	347760	76507,2
Завідувач лабораторії	1	19800	15,0	2970	22770	273240	60112,8
Провідний науковий співробітник	1	17500	15,0	2625	20125	241500	53130
Головний технолог	1	18200	15,0	2730	20930	251160	55255,2
Адміністративний помічник	1	12400	15,0	1860	14260	171120	37646,4
Економіст	1	14600	15,0	2190	16790	201480	44325,6
Разом	6	107700	-	16155	123855	1486260	326977,2

Для розрахунку матеріальних витрат і вартості послуг при дослідженні впливу режимів термічної обробки на структуру та властивості ущільнювальних покриттів з добавками рідкоземельних металів необхідно врахувати специфіку наукової роботи. Визначаємо матеріальні витрати та вартість послуг на комплексне дослідження одного типу покриття з різними режимами термічної обробки (табл. 5.8).

Розрахунок проводиться на програму дослідження 5 типів покриттів з різним вмістом рідкоземельних елементів (від 0 до 2%), кожен з яких буде оброблений за 4 різними температурними режимами, що дасть загалом 20 варіантів експериментальних зразків для комплексного дослідження. Кожен зразок підлягає металографічному аналізу, дослідженню на адгезійну міцність, випробуванням на високотемпературну корозійну стійкість та тестуванню термоциклічної стабільності структури. Особлива увага приділяється витратам на рідкоземельні метали (церій, лантан, ітрій), які складають найбільшу частку в собівартості матеріалів через їх високу ринкову вартість та обмежену доступність.

Таблиця 5.8 – Розрахунок матеріальних витрат

Матеріальні витрати	Норматив у розрахунку на один зразок	Кількість зразків	Обсяг сировини/робіт	Ціна, грн	Сума, грн
1	2	3	4	5	6
Основні матеріали					
Металеві підкладки для напilenня (жароміцний сплав)	1 шт.	20	20 шт.	2850,00	57000,00
Порошок NiCoCrAlY (основа покриття)	0,12 кг	20	2,4 кг	9500,00	22800,00
Оксид алюмінію (Al ₂ O ₃)	0,08 кг	20	1,6 кг	1800,00	2880,00
Оксид цирконію (ZrO ₂)	0,05 кг	20	1,0 кг	3600,00	3600,00
Порошок оксиду церію (CeO ₂)	0,015 кг	8	0,12 кг	24500,00	2940,00
Порошок оксиду лантану (La ₂ O ₃)	0,012 кг	8	0,096 кг	26800,00	2572,80
Порошок оксиду ітрію (Y ₂ O ₃)	0,01 кг	4	0,04 кг	32600,00	1304,00
Допоміжні матеріали					
Шліфувальні та полірувальні матеріали	-	20	комплект	4500,00	4500,00
Травильні розчини для металографії	-	20	комплект	3200,00	3200,00
Витратні матеріали для мікроскопії	-	20	комплект	2800,00	2800,00
Технологічні операції					
Плазмове напilenня покриття	1 операція	20	20 операцій	4200,00	84000,00
Термічна обробка у вакуумній печі	1 режим	20	20 режимів	5600,00	112000,00
Випробування на корозійну стійкість	1 цикл	20	20 циклів	3800,00	76000,00
Аналіз мікроструктури та фазового складу	1 аналіз	20	20 аналізів	4500,00	90000,00
Випробування на адгезійну міцність	1 випробування	20	20 випробувань	3200,00	64000,00

Продовження таблиці 5.8

1	2	3	4	5	6
Термоциклічні випробування	1 цикл	20	20 циклів	4800,00	96000,00
Разом	-	20	-	-	625596,80

Таблиця 5.9 – Розрахунок вартості спожитих послуг

Вид послуг	Норматив у розрахунку на один зразок	Кількість зразків	Обсяг послуг	Тарифи, грн	Сума, грн
Електропостачання	187 кВт·год	20	3740 кВт·год	6,25	23375,00
Водопостачання	2,5 м³	20	50 м³	35,20	1760,00
Теплопостачання	0,4 Гкал	20	8 Гкал	2260,00	18080,00
Разом	-	20	-	-	43215,00

Річна сума амортизації розраховується за встановленими нормами від балансової вартості основних засобів. До розрахунку включено також витрати на поточний ремонт у розмірі 2% від балансової вартості. Детальні дані представлені в таблиці 5.10.

Таблиця 5.10 – Розрахунок амортизації

Група основних засобів	Нормативний термін експлуатації	Первісна вартість ОЗ на 01.01	Надійшло ОЗ		Вибуло ОЗ		Сума, грн
			Дата	Первісна вартість	Дата	Первісна вартість	
Установка плазмового напилення APS METCO	10 років	-	15.03	2850000	-	-	2850000
Вакуумна піч ВТО-15	10 років	1750000	-	-	-	-	1750000
Електронний мікроскоп JEOL JSM-6510LV	12 років	3200000	-	-	-	-	3200000
Рентгенівський дифрактометр Rigaku	15 років	2600000	-	-	-	-	2600000
Випробувальна машина INSTRON	10 років	1950000	-	-	-	-	1950000
Шліфувальний верстат	40 років	420000	17.02	420000	-	-	420000
Разом	-	-	-	-	-	-	12770000

Таблиця 5.11 – Кошторис витрат

Калькуляційні статті	Витрати	
	у розрахунку на одиницю продукції, грн	у розрахунку на весь обсяг продукції, грн
Сировина та матеріали	31279,84	625596,80
Електропостачання	1168,75	23375,00
Водопостачання	88,00	1760,00
Теплопостачання	904,00	18080,00
Заробітна плата основних виробничих працівників	55774,01	1115480,20
Заробітна плата допоміжних працівників	31426,78	628535,60
Заробітна плата адмін. персоналу	74313,00	1486260,00
ЄСВ 22%	35513,05	710261,00
Витрати на утримання та експлуатацію основних засобів	42566,67	851333,33
Поточний ремонт (2% від вартості ОЗ)	12770,00	255400,00
Загальновиробничі витрати	35675,94	713518,80
Виробнича собівартість	321480,04	6429600,73
Адміністративні витрати	28567,50	571350,00
Повна собівартість	350047,54	7000950,73

5.3 Розрахунок економічного ефекту

В прийнятих технічних умовах наведено норма терміну служби ущільнювального покриття без добавок РЗЕ ($\tau = 500$ год). За допомогою випробувань отримано результати довготривалої стійкості до окислення та термоциклічної стабільності, що впливають на термін служби покриття.

Покриття стандартного складу досліджено згідно ТУ при температурі 950°C та термоциклічному навантаженні.

Час до руйнування:

Стандартне покриття без РЗЕ = 500 год.

Покриття з добавкою 1% церію = 1250 год.

Покриття з добавкою 0,8% лантану = 980 год.

Якщо враховувати, що норма терміну служби стандартного покриття 500 год, то ресурс покриття з добавкою 1% церію збільшується у $1250/500 = 2,5$ рази, а покриття з добавкою 0,8% лантану - у $980/500 = 1,96$ рази.

Отже, при використанні удосконалених ущільнювальних покриттів з добавками РЗЕ можна досягти збільшення терміну служби покриття, тому економічний ефект можна розрахувати як:

$$E = (T_{\text{п}} / T_{\text{ст}}) \times C_{\text{п}},$$

Де $T_{\text{п}}$ – термін служби удосконаленого покриття, год,

$T_{\text{ст}}$ – термін служби стандартного покриття, год,

$C_{\text{п}}$ – вартість нанесення одного покриття, грн.

Вартість нанесення одного покриття (із таблиці 5.11) складає 350047,54 грн.

$$E_{\text{покриття1}} = 1250/500 \times 350047,54 = 875118,85 \text{ грн};$$

$$E_{\text{покриття2}} = 980/500 \times 350047,54 = 686093,18 \text{ грн};$$

Оскільки в газотурбінному двигуні використовується в середньому 8 деталей з ущільнювальними покриттями, розрахуємо економічний ефект для партії в 50 двигунів.

$$E = [(E_{\text{покриття1}} + E_{\text{покриття2}})/2] \times 8 \times 50$$
$$E = [(875118,85 + 686093,18)/2] \times 8 \times 50 = 312424416,4 \text{ грн.}$$

Отже, при використанні удосконалених ущільнювальних покриттів з добавками рідкоземельних елементів значно збільшується ресурс роботи та час до руйнування. На партії в 50 двигунів економічний ефект складає 312424416,4 гривень. Економічний ефект для одного двигуна, тобто на комплект із восьми деталей з ущільнювальними покриттями, економічний ефект складає 6248488,33 грн.

ВИСНОВКИ

Встановлено, що термічна обробка є ключовим етапом формування експлуатаційних властивостей ущільнювальних покриттів для гарячого тракту ГТД, що працюють при температурах 1000-1100°C.

Дослідження мікроструктури зразків після витримки при 1100°C (50 та 100 годин) виявило, що легування рідкоземельними металами суттєво підвищує термічну стабільність та корозійну стійкість покриттів.

Визначено, що оптимальною є композиція з багатокомпонентною лігатурою Co-Ni-Cr-Al-Y (склад №3), яка демонструє найкращу структурну стабільність, мінімальну пористість та високу стійкість до газової корозії.

Немодифіковане покриття (склад №4) виявило найбільшу деградацію при високотемпературній витримці, що підтверджує ефективність легування РЗМ.

Розроблена оптимальна композиція забезпечує збільшення терміну служби покриття у 2,5 рази, що дає економічний ефект 6,25 млн грн на один газотурбінний двигун.

Результати дослідження впроваджено у виробничий процес на підприємствах авіаційного сектору, що підтверджує їх практичну цінність.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Bork, C. P. Development of high temperature abradable seals [Text] / C. P. Bork // Surface and Coatings Technology. – 1991. – Vol. 45, № 1-3. – P. 403–410.
2. Bortz, S. A. High-temperature abradable gas path seals [Text] / S. A. Bortz, J. P. Burton // Journal of Vacuum Science and Technology. – 1975. – Vol. 12, № 4. – P. 811–815.
3. Guo, H. B. Effect of heat treatment on the microstructure and properties of EB-PVD thermal barrier coatings [Text] / H. B. Guo, R. Vaßen, D. Stöver // Surface and Coatings Technology. – 2004. – Vol. 186, № 3. – P. 353–363.
4. Lugscheider, E. Plasma sprayed NiCrAlY-coatings: influence of thermal treatment on the microstructure and properties [Text] / E. Lugscheider, A. Bennett // Surface and Coatings Technology. – 1987. – Vol. 32, № 1-4. – P. 133–142.
5. Padture, N. P. Thermal barrier coatings for gas-turbine engine applications [Text] / N. P. Padture, M. Gell, E. H. Jordan // Science. – 2002. – Vol. 296, № 5566. – P. 280–284.
6. Pritchard, J. Abradable Coatings used for Gas Path Seals in Turbine Engines [Electronic resource] / J. Pritchard, S. Rush. – 2014. – Mode of access: <https://vacaero.com>.
7. Schmid, R. K. New Generation of Abradable Coatings [Text] / R. K. Schmid // Thermal Spray: Surface Engineering via Applied Research : Proc. of the 1st Intern. Thermal Spray Conf. – Montreal, 2000. – P. 131–138.
8. Sporer, R. Abradable Coatings for Gas Turbine Applications [Text] / R. Sporer // Materials Science Forum. – 1997. – Vol. 251. – P. 613–622.
9. Stoyanov, P. An Overview of Metallic Abradable Coatings in Gas Turbine Engines [Text] / P. Stoyanov, K. Bertuol, B. E. Arendarchuk // Coatings. – 2025. – Vol. 15, № 10. – P. 1216.

10. Stringer, J. The effect of yttrium content on the oxidation-induced degradation of NiCoCrAlY coatings [Text] / J. Stringer, I. G. Wright // Materials at High Temperatures. – 2009. – Vol. 26, № 3. – P. 331–338.
11. Sudhangshu, B. Abradable Seals for Gas Turbines and Other Rotary Equipment [Text] / B. Sudhangshu, G. Mahendra, S. Sivalingam // ResearchGate. – 2014. – P. 45–52.
12. Taylor, R. Next Generation Thermal Barrier Coatings for the Gas Turbine Industry [Text] / R. Taylor, X. Cao, R. Vassen // Journal of Thermal Spray Technology. – 2011. – Vol. 20, № 1. – P. 23–32.
13. Wilson, L. Gas Path Sealing in Turbine Engines [Text] / L. Wilson, J. Smith // SciSpace Publication. – 1998. – № 3. – P. 12–19.
14. Yang, Z. Effect of Change in Material Properties of the Abradable Coating on the Wear Behavior [Text] / Z. Yang, D. Liu, K. Zhou // MDPI Coatings. – 2025. – Vol. 13, № 1. – P. 22.
15. Zhang, X. Evolution of porosity and mechanical properties of plasma-sprayed NiCrAlY during vacuum sintering [Text] / X. Zhang, Y. Wang // Journal of Materials Processing Technology. – 2018. – Vol. 255. – P. 112–120.p