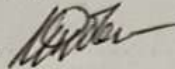


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
Кораблебудівний навчально-науковий інститут (факультет)

Кафедра матеріалознавства і технології металів

«Допущений до захисту»

Завідувач кафедри

Дубовий О.М. 

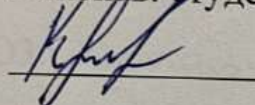
« 25 » 12 2024 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти «магістр»

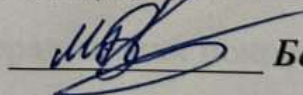
на тему : «Удосконалення технології нанесення плазмових порошкових
теплозахисних покриттів з $ZrO_2-7\%Y_2O_3$ »

Виконав: студент 5131М групи

 Кухарев О.В.

Керівник роботи:

к.т.н., доцент

 Бобров М.М.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Навчально-науковий інститут (факультет): Кораблебудівний

Кафедра: Матеріалознавства і технології металів

Спеціальність: 132 - Матеріалознавство

Освітня програма: «Композиційні та порошкові матеріали, покриття»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Гарант освітньої програми

_____ к.т.н., доц. Карпеченко А.А.

«___» _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
на здобуття ступеня вищої освіти «магістр»
Студенту Кухареву Олександру Володимировичу

1. Тема роботи: «Удосконалення технології нанесення плазмових порошкових теплозахисних покриттів з $ZrO_2-7\%Y_2O_3$ ».

Керівник роботи: к.т.н., доцент без вч. звання Бобров М.М.

Затверджені наказом ректора № _____ від “___” _____ 2024 року № _____

2. Термін подання роботи: “___” _____ 2024 року.

3. Вихідні дані по роботі: Дослідити технологію нанесення порошкових теплозахисних плазмових покриттів $ZrO_2-7\%Y_2O_3$; дослідити напилювані матеріали та використовуване обладнання, отримати плазмове градієнтне теплозахисне покриття з підшаром з суперсплаву; проаналізувати мікроструктуру отриманого покриття: ідентифікувати шари та визначити їх товщину та пористість; провести визначення оптимальних температуро-часових параметрів передрекристалізаційної термічної обробки сформованих покриттів, визначити вплив термічної обробки на коефіцієнт теплопровідності покриття; розробити заходи щодо охорони праці та охорони навколишнього середовища при нанесенні плазмових покриттів; розрахувати техніко-економічні показники отримання покриття.

4. Перелік питань, що належать до розробки (найменування розділів): 1. Аналіз сучасного стану і перспективи розвитку технології нанесення теплозахисних покриттів на лопатки газових турбін. 2. Обладнання та напилювані матеріали для формування теплозахисних покриттів. 3. Отримання теплозахисних плазмових покриттів з $ZrO_2-7\%Y_2O_3$ та їх передрекристалізаційна термічна обробка. 4. Розробка технологічних рекомендацій щодо нанесення теплозахисних плазмових покриттів з $ZrO_2-7\%Y_2O_3$ підвищеними фізико-механічними властивостями. 5. Розрахунок економічної ефективності нанесення плазмових теплозахисних покриттів із урахуванням розроблених рекомендацій. 6. Питання охорони праці, довкілля та техніки безпеки.

5. Перелік презентаційних матеріалів: 1. Модернізований плазмотрон (креслення).

Плакати: 1. Мета та постановка задачі дипломної роботи; 2. Актуальність теми дослідження. 3. Обладнання та напилювані матеріали. 4. Результати дослідження мікроструктури отриманих покриттів. 5. Вибір оптимальних температурно-часових параметрів передрекристалізаційної термічної обробки. 6. Результати визначення коефіцієнту теплопровідності покриттів. 7. Технологічні рекомендації процесу напилення покриттів; 8. Техніко-економічні показники та собівартість нанесення покриттів; 9. Загальні висновки по роботі.

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Бобров М.М., к.т.н., доцент		
2	Бобров М.М., к.т.н., доцент		
3	Бобров М.М., к.т.н., доцент		
4	Бобров М.М., к.т.н., доцент		
5	Бобров М.М., к.т.н., доцент		
6	Бобров М.М., к.т.н., доцент		

7. Дата видачі завдання: “___” _____ 2023 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Номер	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Аналіз сучасного стану і перспективи розвитку технології нанесення теплозахисних покриттів на лопатки газових турбін	21.11.2024	
2	Обладнання та напилювані матеріали для формування теплозахисних покриттів	28.11.2024	
3	Отримання теплозахисних плазмових покриттів з $ZrO_2-7\%Y_2O_3$ та їх передрекристалізаційна термічна обробка	04.12.2024	
4	Розробка технологічних рекомендацій щодо нанесення теплозахисних плазмових покриттів з $ZrO_2-7\%Y_2O_3$ підвищеними фізико-механічними властивостями	11.12.2024	
5	Розрахунок економічної ефективності нанесення плазмових теплозахисних покриттів із урахуванням розроблених рекомендацій	18.12.2024	
6	Питання охорони праці, довкілля та техніки безпеки.	23.12.2024	

Студент

_____ Кухарев О.В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ Бобров М.М.
(підпис) (прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

ЗМІСТ.....	2
АНОТАЦІЯ.....	4
ВСТУП.....	6
1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ І ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ТЕХНОЛОГІЇ НАНЕСЕННЯ ТЕПЛОЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ НА ЛОПАТКИ ГАЗОВИХ ТУРБІН.....	7
1.1 Аналіз умов роботи лопаток газових турбін та обґрунтування необхідності нанесення захисних покриттів.....	7
1.2 Порівняльний аналіз методів нанесення теплозахисних покриттів.....	13
1.3 Стан питання про формування наноструктурованих плазмових теплозахисних покриттів з підвищеними фізико-механічними властивостями.....	17
1.4 Мета та постановка задач дипломної роботи.....	22
2 ОБЛАДНАННЯ ТА НАПИЛЮВАНІ МАТЕРІАЛИ ДЛЯ ФОРМУВАННЯ ТЕПЛОЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ	23
2.1 Обладнання, що використовується для нанесення плазмових теплозахисних покриттів.....	23
2.2 Аналіз конструкції плазмотрону та його модернізація.....	25
2.3 Напилювані матеріали для нанесення плазмових теплозахисних покриттів...20	
2.3.1 Дослідження порошку сплаву Ni-Co-Cr-Al-Y.....	32
2.3.2 Дослідження порошку ZrO ₂ -7%Y ₂ O ₃	38
2.4 Висновки до розділу 2.....	42
3 ОТРИМАННЯ ТЕПЛОЗАХИСНИХ ПЛАЗМОВИХ ПОКРИТТІВ З ZrO ₂ - 7%Y ₂ O ₃ ТА ЇХ ПЕРЕДРЕКРИСТАЛІЗАЦІЙНА ТЕРМІЧНА ОБРОБКА.....	43
3.1 Плазмове напилення теплозахисних градієнтних покриттів та аналіз їх мікроструктури.....	43
3.2 Визначення оптимальних температурно-часових параметрів термічної обробки отриманих покриттів.....	48
3.3 Порівняльний аналіз фізико-механічних властивостей теплозахисних покриттів до та після термічної обробки.....	50

3.4 Висновки до розділу 3.....	51
4 РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНИХ РЕКОМЕНДАЦІЙ ЩОДО НАНЕСЕННЯ ТЕПЛОЗАХИСНИХ ПЛАЗМОВИХ ПОКРИТТІВ З $ZrO_2-7\%Y_2O_3$ З ПІДВИЩЕНИМИ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ.....	52
4.1 Вибір і підготовка матеріалів, які застосовуються при нанесенні газотермічних покриттів.....	54
4.2 Підготовка поверхні під нанесення газотермічного покриття.....	55
4.3 Напилення газотермічного покриття.....	57
4.4 Термічна обробка напилених покриттів для спікання кераміки.....	58
4.5 Передрекристиалізаційна термічна обробка покриттів.....	58
4.6 Визначення фізико-механічних властивостей напилених покриттів.....	59
4.7 Висновки до розділу.....	59
5 ПЛАНУВАННЯ ДІЛЬНИЦІ ДЛЯ ПЛАЗМОВОГО НАНЕСЕННЯ ТЕПЛОЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ.....	60
5.1 Технічні вимоги до ділянки.....	60
5.2 Компоновка і опис ділянки.....	62
5.3 Висновки до розділу.....	62
6 РОЗРАХУНОК ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ НАНЕСЕННЯ ПЛАЗМОВИХ ТЕПЛОЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ ІЗ УРАХУВАННЯМ РОЗРОБЛЕНИХ РЕКОМЕНДАЦІЙ.....	64
6.1 Вхідні дані.....	64
6.2 Розрахунок зміни собівартості.....	66
6.3 Розрахунок одночасних витрат на впровадження теплозахисних багатошарових покриттів, отриманих атмосферним плазмовим напиленням після передрекристиалізаційної термічної обробки.....	66
6.4 Розрахунок технологічної собівартості.....	67
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ.....	71
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	72
ДОДАТКИ.....	77

АНОТАЦІЯ

Дипломна робота містить: 78 аркушів, 6 частин, 21 рисуноків, 13 таблиць, 2 креслення, 11 плакатів, 35 джерел, додаток-специфікація.

Об'єкт дослідження – теплозахисне плазмове покриття із $\text{ZrO}_2\text{-7\%Y}_2\text{O}_3$

Мета дипломної роботи – отримання теплозахисних плазмових покриттів із $\text{ZrO}_2\text{-7\%Y}_2\text{O}_3$ з підвищеними властивостями та дослідження їх мікроструктури.

Методи дослідження – комп'ютерна металографія, механічні випробування.

Дослідження полягає в вивченні можливості підвищення фізико-механічних властивостей плазмових порошкових теплозахисних покриттів з $\text{ZrO}_2\text{ – 7\%Y}_2\text{O}_3$ передрекристиалізаційною термічною обробкою. Проаналізовано сучасні методи, що забезпечують підвищення властивостей цих покриттів, і виявлено необхідність покращення (ТЗП) $\text{ZrO}_2\text{ – 7\%Y}_2\text{O}_3$ більш доступним методом атмосферного плазмового напилення (APS). Проаналізовані та вивчені матеріали для нанесення (ТЗП). Сформовано метало-керамічне теплозахисне градієнтне покриття, досліджено його мікроструктуру методами комп'ютерної металографії за допомогою оптичного та електронного скануючого мікроскопу.

Встановлені оптимальні температурно-часові параметри термічної обробки, що забезпечують підвищення твердості на 13% та зниження теплопровідності керамічного шару на 15% у порівнянні зі станом після напилення за рахунок субструктурних змін. Виконано компонування виробничої ділянки методом атмосферного плазмового напилення з урахуванням удосконаленої технологічної схеми. Розрахована собівартість плазмових градієнтних теплозахисних покриттів за вдосконаленою технологією.

Ключові слова: діоксид цирконію; теплозахисне плазмове покриття; термічна обробка; теплопровідність.

ABSTRACT

The thesis contains: 78 sheets, 6 parts, 21 figures, 13 tables, 2 drawings, 11 posters, 35 sources, appendix-specification.

The object of the study is a heat-shielding plasma coating $\text{ZrO}_2\text{-7\%Y}_2\text{O}_3$.

The purpose of the thesis is to obtain heat-shielding plasma coatings $\text{ZrO}_2\text{-7\%Y}_2\text{O}_3$ with improved properties and study their microstructure.

Research methods are computer metallography, mechanical testing.

The purpose of the work is to study the possibility of improving the physical and mechanical properties of plasma powder heat-shielding coatings $\text{ZrO}_2 - 7\%\text{Y}_2\text{O}_3$ by pre-recrystallization heat treatment. Modern methods that provide an increase in the properties of these coatings are analyzed, and the need to improve $\text{ZrO}_2 - 7\%\text{Y}_2\text{O}_3$ by a more accessible method of atmospheric plasma spraying (APS) is determined.

Materials for coating application are analyzed and studied. A metal-ceramic heat-shielding gradient coating was formed, the microstructure of which was studied by computer metallography methods on optical and scanning electron microscopes.

The optimal temperature-time parameters of heat treatment were established, which provide an increase in hardness by 13% and a decrease in thermal conductivity of the ceramic layer by 15% compared to the state after spraying due to substructural changes. The layout of the production area was performed by the atmospheric-plasma spraying method taking into account the improved technological scheme. The cost of plasma-gradient heat-shielding coatings using the improved technology was calculated.

Keywords: zirconium dioxide; heat-shielding plasma coating; heat treatment; thermal conductivity.

ВСТУП

На сьогодні під час створення газотурбінних двигунів нового покоління визначальним фактором є забезпечення працездатності деталей (ГТД) в умовах високих температур (1200 ° С та вище). Використання охолоджуваних лопаток із серійними покриттями не може забезпечити їх достатнього ресурсу в таких умовах, а стандартні підходи до підвищення жароміцності таких виробів вичерпали себе. Процес експлуатації лопаток характеризуються інтенсивним впливом високих температура та втомних навантажень. У більшості випадків руйнування деталі починається з поверхні, тому економічно доцільно розробити технології отримання захисних та зміцнювальних покриттів, які дозволять збільшити ресурс та надійність газотурбінних двигунів. Таким чином, необхідно шукати способи захисту основного металу лопатки від перевищення їх робочих температур.

Одним із методів захисту деталей газотурбінних двигунів є напилення багат шарових теплозахисних покриттів (ТЗП), які на відміну від жаростійких покриттів не тільки захищають поверхню лопатки від високотемпературної корозії, а й забезпечують підвищення жаростійкості, витривалості та циклічної довговічності.

Розглянуто підходи до забезпечення жароміцності деталей газотурбінних двигунів, що працюють в умовах високих температур. Встановлено, що найбільш оптимальні результати отримують формуванням багат шарових теплозахисних покриттів. Запропоновано розробити підходи до конструювання багат шарових теплозахисних покриттів залежно від умов роботи конкретної деталі, що дозволить підвищити як термін служби цих деталей, так і КПД двигуна в цілому.

1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ І ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ТЕХНОЛОГІЇ НАНЕСЕННЯ ТЕПЛОЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ НА ЛОПАТКИ ГАЗОВИХ ТУРБІН

1.1 Аналіз умов роботи лопаток газових турбін та обґрунтування необхідності нанесення захисних покриттів

Газотурбінні установки та двигуни знаходять все ширше застосування в сучасній техніці: двигуни літаків і гелікоптерів, суднові газотурбінні двигуни, енергетичні ГТУ та газоперекачувальні агрегати. До основних деталей, що визначають надійність, економічність та ресурс їх роботи, належать робочі лопатки турбіни. Тривала експлуатація лопаткового апарату турбіни можлива лише за умови виготовлення робочих лопаток із жароміцних сплавів на нікелевій чи кобальтовій основі. У процесі експлуатації апарат робочих лопаток газотурбінних двигунів піддається впливу інтенсивних теплових і механічних навантажень в умовах високотемпературного корозійного руйнування поверхні агресивним зовнішнім середовищем [1, 2]. Вищі температури двигуна також створюють нові проблеми з матеріалами у керамічних верхніх покриттях, а саме деградацію 7YSZ через розплавлені силікатних відкладень, що утворюються при попаданні дрібних частинок із навколишнього середовища. Паливо є одним з головних негативних чинників в умовах роботи суднових ГТД. При згорянні сірка утворює сполуки SO_2 і SO_3 . Натрій, що міститься в паливі і надходить з морської води, взаємодіє з оксидами сірки і утворює сульфат Na_2SO_4 , що руйнує захисну оксидну плівку Cr_2O_3 . Хлор, який утворюється при взаємодії солі NaCl із оксидами сірки, ініціює процеси високотемпературної сольової корозії (ВСК).

Зазначені особливості умов роботи морських ГТД призводять до ВСК, яка руйнує лопатки турбін. Для забезпечення стійкості ЖНС проти ВСК сплави морських ГТД мають високу концентрацію хрому (18,0–24,0 %, мас.), який знижує високотемпературну працездатність ЖНС суднових ГТД. На відміну від суднових, авіаційні ГТД працюють на чистому паливі і ВСК відсутня. У той же час необхідність підвищення ефективності ГТД різного призначення тягне за

собою збільшення робочої температури, яка обмежена температурою плавлення жароміцних сплавів на основі нікелю [3-4].

Державним підприємством та науково-виробничим комплекс газотурбобудування у місті Миколаїв і Фізико-технологічним інститутом металів і сплавів НАН України (ФТІМС) розроблені нові перспективні сплави CM93-VI і CM96-VI. Жароміцні сплави CM93-VI і CM96-VI призначені для виготовлення лопаток суднових турбін нового покоління. Сплави застосовують для виготовлення лопаток з полікристалічною та спрямованою структурами. Високотемпературний диференціальний термічний аналіз (ВДТА) показав, що повне розплавлення сплаву CM93-VI відбувається при температурі 1340 °С, а кристалізація сплаву починається при температурі 1325 °С.

Сплави CM93-VI і CM96-VI леговані ренієм і танталом. Ці елементи зміцнюють твердий розчин і є більш ефективними ніж молібден і вольфрам та застосовуються в ЖНС авіаційних турбін. З розроблених сплавів виготовляють соплові та робочі лопатки суднових ГТД методом точного лиття з використанням моделей, які виплавляються

Лопатки турбіни – відповідальний механізм. Завдяки ньому забезпечується надійність роботи агрегату. Виділимо основні навантаження під час роботи турбіни: Великі окружні швидкості за умов високої температури у паровому чи газовому потоці, які розтягують лопатки приводять до високих втомних напруг і ударних навантажень;

Формуються значні статичні та динамічні температурні напруги. Втома лопаток є основним джерелом відмов парових та газових турбін. Втома викликається напругою, викликаною вібрацією та резонансом у робочому діапазоні обладнання;

Також важливе значення мають умови експлуатації (ГТД). Крім того, матеріал лопатки суднових газотурбінних двигунів повинен мати високий опір корозії та ерозії. Температура у турбіні досягає 1000-1700 градусів. Все це зумовлює застосування високоякісних жароміцних та нержавіючих сталей для виробництва лопаток турбін.

Постійна потреба у підвищеній робочій температурі в газотурбінних двигунах спочатку задовольнялася повітряним охолодженням турбінних лопаток та розробкою надміцних сплавів для виготовлення турбінних лопаток та турбінних лопатей, обидві ці характеристики продовжували їх строк служби. Подальші підвищення температури призвели до необхідності розробки матеріалів керамічного покриття оскільки їх застосування дозволяє значно (на 100°C і більше) знизити робочу температуру пера лопатки, або підняти температуру робочого газу турбіни. Для ізолювання з їх допомогою турбінних лопаток і турбінних лопатей від тепла, що міститься в газах, що випускаються з камер згоряння, знову продовжуючи термін служби лопаток турбін та лопатей турбін.

Застосування теплозахисних багатошарових покриттів дозволить вирішити проблему зниження температури деталей ГТД в умовах високих температур.

Одиним із методів захисту деталей газотурбінних двигунів є напилення багатошарових теплозахисних покриттів (ТЗП), які на відміну від жаростійких покриттів не тільки захищають поверхню лопатки від високотемпературної корозії, а й запобігають знеміцненню матеріалу робочих лопаток внаслідок розвитку процесів повзучості [5]. (рис. 1.1.1).

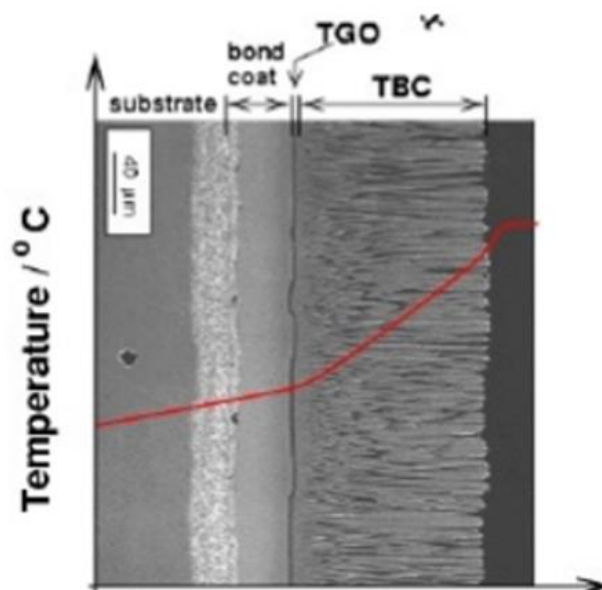


Рисунок 1.1.1 - Вплив теплозахисного покриття на зниження температури на поверхні металу основи лопатки ГТД [5].

Це з дуже низькою теплопровідністю кераміки (наприклад ZrO_2), що дозволяє ефективно ізолювати компоненти турбіни двигуна від температур, що перевищують критичні для конкретного жароміцного сплаву. Отже, це дозволить або збільшити час роботи деталей ГТД за даних температурах, або підняти температуру газу перед турбіною, що підвищить коефіцієнт її корисної дії.

Прагнення поліпшити теплозахист за рахунок нарощування товщини покриття безперспективно (Рис. 1.1.2), тому що при цьому зростатиме згинальний момент від дії відцентрових сил і відбуватиметься прискорене розтріскування покриття.

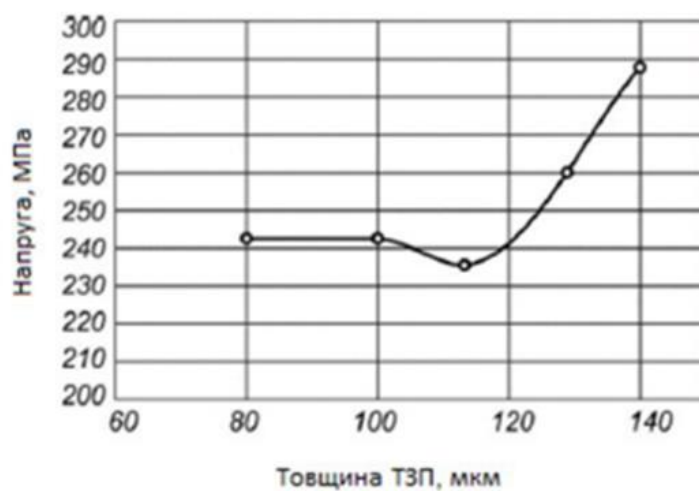


Рисунок 1.1.2 - Залежність максимальних згинальних напруг у ТЗП лопаток ГТД від товщини покриття [7].

Зазвичай у покритті є невелика залишкова напруга. При швидкому нагріванні в покритті виникають термічні напруги через різницю між температурою на його поверхні ТП і на кордоні з підкладкою, яка дорівнює кімнатній T_0 . Зовнішні шари прагнуть розтягнутися, а внутрішні, холодніші, жорстко їх стискають.

На початку нагріву частина покриття, яка відшарувалася від підложки, нагрівається швидше за іншу частину, прагне розширитися, але, будучи обмежена холоднішою, не втратила контакт з підкладкою областю покриття, спучується і лущиться.

При високій температурі в системі покриття-підкладка відбуваються термічно активовані процеси: дифузійні, фазові перетворення, пластична

деформація і окислення, в результаті дифузійних процесів, обумовлених переважним окисленням алюмінію і хрому і дифузійним обміном між сполучним і підложкою, змінюється концентрація легуючих елементів у сполучному покритті.

Як було зазначено в дослідженнях, руйнація ТЗП починається з розшарування керамічного шару. Тріщина виникає поблизу поверхні сполучного покриття і спочатку поширюється паралельно їй. Потім відбувається розширення тріщини і лущення покриття. Встановлено, що:

1. Виникнення поздовжніх тріщин у кераміці обумовлено дією біаксіальних стискаючих напруг, що виникають при охолодженні покриття. Під час нагрівання напруги, що розтягують, досягають найбільшої величини.

2. У процесі роботи при високій температурі відбувається накопичення ушкоджень і ослаблення покриттів. Цей процес пов'язаний як з окисленням сполучного покриття, так і з циклічною зміною температури.

3. Окислення сполучного покриття грає визначальну роль ослабленні ТЗП. [7].

Однак при нанесенні таких покриттів необхідно забезпечити високу адгезію теплозахисного покриття та матеріалу лопатки, тому при їх конструюванні застосовують нанесення декількох шарів (керамічного та металевого) які забезпечують захист від газової корозії та гарне зчеплення матеріалів (Рис. 1.1.3 та Рис. 1.1.4).

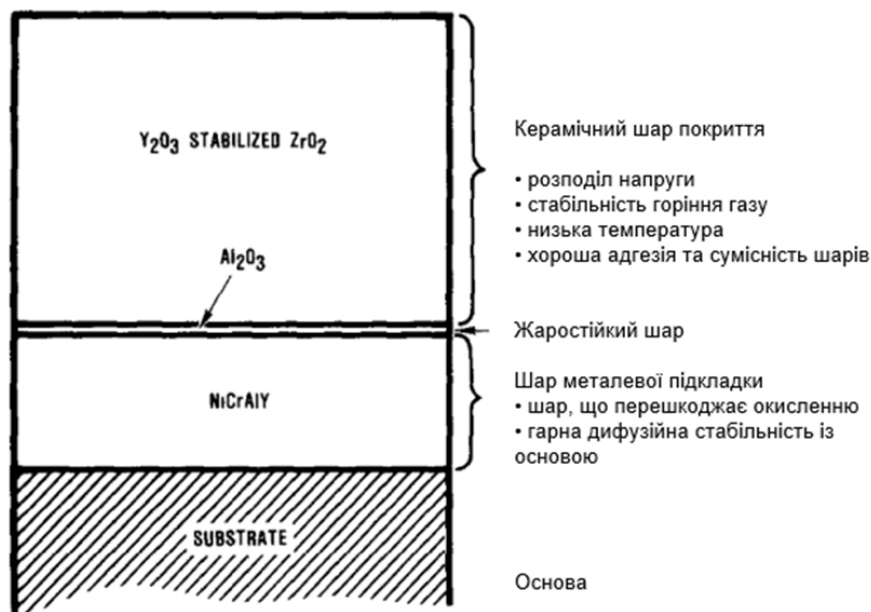


Рис. 1.1.3 Варіант конструкції теплозахисного покриття [5].

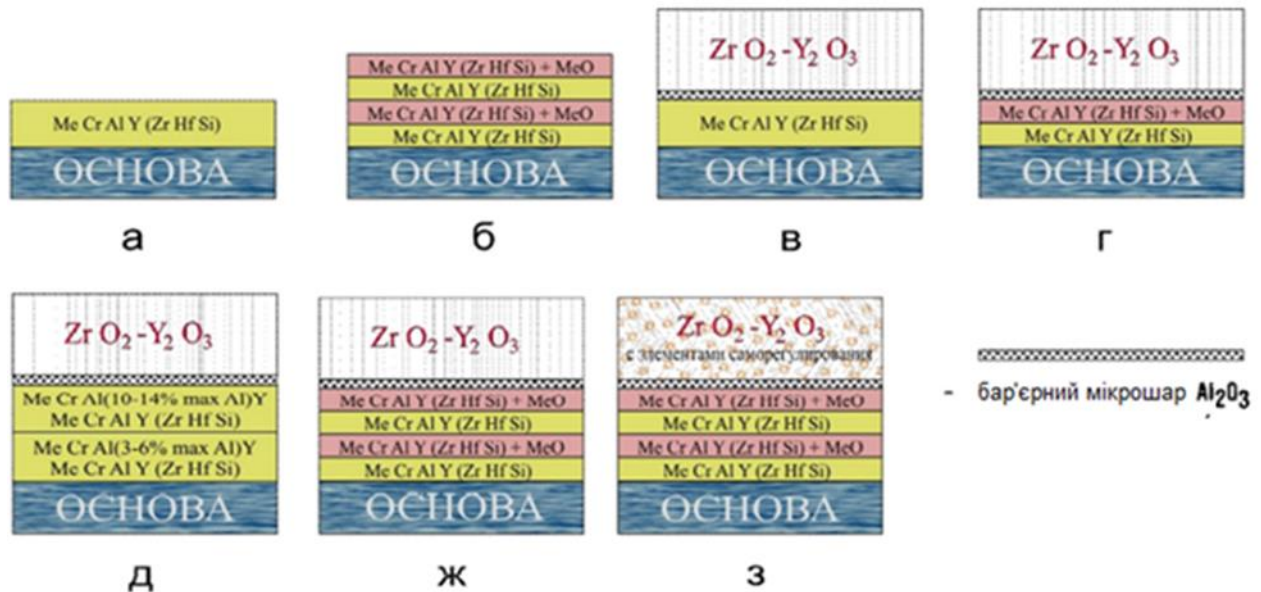


Рис. 1.1.4 [5]. Схеми жароміцних та теплозахисних покриттів, одержуваних електронно-променевим осадженням ($ZrO_2 \cdot Y_2O_3$) [5, 6], а як нижній підшар рекомендується використовувати жаростійкий матеріал.

У зв'язку із значним відмінністю між коефіцієнтами термічного лінійного розширення кераміки та жароміцного сплаву, що може призводити до сколювання верхнього шару, розв'язання даної задачі є дуже актуальним.

Прийнято вважати, що як верхній шар ТЗП доцільно застосовувати кераміку на основі цирконію, стабілізованого оксидом ітрію [5].

На сьогодні найбільш дослідженими вважають такі види покриттів розроблені різними дослідниками:

1. Розроблене у ВВІА ім. Жуковського двошарове покриття: перший шар - хромоалітування; другий шар - $ZrO_2 \cdot Y_2O_3$.
2. Розроблене в ІЕС ім. Патона тришарове покриття: перший шар - Me-Cr-Al-Y; другий шар - Me-Co-Cr-Al-Y; третій шар - $ZrO_2 \cdot Y_2O_3$.
3. Розроблене в НВО ВІАМ тришарове покриття: перший шар - Me-Ni-Cr-Al-Y; другий шар - Me-Ni-Cr-Al-Y + $ZrO_2 \cdot Y_2O_3$; третій шар - $ZrO_2 \cdot Y_2O_3$ (розробник).

1.2 Порівняльний аналіз методів нанесення теплозахисних покриттів

Для отримання покриттів спеціального призначення (жаростійких, теплоізоляційних, корозієстійких тощо) застосовують вакуумно-конденсаційні та

плазмовий способи напилення як найбільш поширені. Процес атмосферного плазмового напилення (APS) дозволяє наносит найширший спектр матеріалів покриття, безумовно, з усіх термічних процесів напилення для необмеженої кількості застосувань на металевих підкладках, виконуючи роботу там, де інші процеси неспроможні або потребують більших витрат складніших технологічних підходів. В державному науково-виробничому комплексі газотурбобудування у (м. Миколаїв) широко використовують різні способи (плазмовий, електронно-променевий) для нанесення теплозахисних покриттів на лопатки турбін.

Плазмовий спосіб нанесення покриттів полягає в формуванні на поверхні деталі (виробу, конструкції) шару з частинок порошку, що володіють певним запасом теплової і кінетичної енергії, отриманої в результаті взаємодії з плазмовим струменем. Температура плазмового струменя досягає 5000...10000 °С, а швидкість витікання — 1000...1500 м/с. У плазмовому струмені частинки порошку нагріваються і набувають швидкість 50...200 м/с. Швидкість польоту частинок порошку залежить від їх розміру, щільності матеріалу, струму дуги, природи і витрати плазмоутворюючого газу. Незважаючи на високі температури в зоні горіння дуги поверхня, що обробляється, не відчуває сильного нагріву, так як при виході з області дуги температура різко падає[8].

Плазмовим напиленням отримують покриття з нікелевих і залізних сплавів, карбідів, нітридів, боридів. Надзвичайно висока температура плазми дозволяє напилюють даними способом вогнетривкі кераміки, що містять оксиди алюмінію і цирконію, і інші тугоплавкі матеріали, що не піддаються розпиленню іншими способами.

До переваг плазмового розпилення відносяться також гнучкість процесу, можливість регулювання фізико-механічних властивостей одержуваного покриття і універсальність, що дозволяє напилюють практично будь-які матеріали та їх поєднання, в тому числі і багатошарові композиційні покриття.

Перевагами плазмового способу є можливість: отримання покриттів з більшості матеріалів, що плавляться без розпаду та обмеження по температурі плавлення; використання для утворення плазмового струменя газів різного роду:

інертних (аргону, гелію), відновлювальних (водню), окислювальних (повітря, азоту), а також аміаку, природного газу, водяної пари, що в поєднанні із застосуванням камер із захисним середовищем (вакуумом) або захисних насадок дозволяє регулювати властивості середовища, в якій нагріваються і рухаються частинки порошку; гнучкого регулювання електричного і газового режимів роботи плазмотрона, у тому числі в процесі нанесення покриття, що дозволяє управляти енергетичними характеристиками частинок, що напилюють, і умовами формування покриття, а також досить: висока продуктивність процесу (3...20 кг/год) для плазмотронів з електричною потужністю 30...40 кВт; високий коефіцієнт використання порошку (0,5...0,7), що залежить в основному від виду матеріалу, що напилюється, і геометричних розмірів деталі. Необхідну товщину покриття отримують багаторазовим переміщенням плазмотрону і лопатки відносно один одного. Товщина покриття, отримувана за один прохід — 0,04...0,06 мм

Для покращення механічних властивостей покриття застосовується термодифузійний відпал. Режими відпалу вибирають у відповідності з матеріалом деталі і покриття. Проведення процесу в атмосфері інертного газу виключає взаємодію розпилюємого матеріалу з киснем, що дає можливість напилювати хімічно активні матеріали, наприклад, дисиліцида молібдену, інтерметаліди. Такі покриття можуть володіти високою твердістю і хімічну стійкістю при підвищених температурах .

Ще однією перспективною модифікацією плазмового методу є процес, при якому струмінь напилюваного матеріалу оточується струменем інертного газу з метою виключення взаємодії напилюються частинок з киснем. Переваги даного методу ті ж, що і при проведенні процесу в інертній атмосфері [9].

Недоліками плазмового способу нанесення покриттів у відкритій атмосфері є низька для ряду умов експлуатації міцність зчеплення покриттів з підкладкою (10...50 МПа при випробуваннях на нормальний відрив); висока пористість одержуваних покриттів (2...15 %), що перешкоджає їх застосуванню в корозійних середовищах без додаткової обробки; невисокий коефіцієнт

корисного використання енергії плазмового струменя на нагрів порошку (2...8 %); високий рівень шуму (110...130 дБ) і світлового випромінювання.

За даними ITSA у США у 2009 році практично третина галузей промисловості використовувала плазмове напилення, причому 25% з цієї третини використовували плазмове напилення в динамічному вакуумі і в контрольованій атмосфері. Практично всі процеси газотермічного напилення використовуються при виготовленні і відновленні деталей авіаційних, газових та гідротурбін.

Електронно-променеве випаровування та наступна конденсація в вакуумі металевих та неметалевих матеріалів - найбільш прецизійний спосіб конструювання подібних матеріалів на атомарному та молекулярному рівні. Змінюючи температуру осадження концентрації фаз, що вводяться, швидкість обертання виробів, які напиляються - легко отримати покриття з градієнтом концентрацій фаз, що вводяться, мікропористі або багатошарові покриття. Природно, що для нанесення подібних покриттів на деталі із складною конфігурацією, в тому числі лопатки газових турбін, необхідні відповідні електронно-променеві агрегати.

Установка для електронно-променевого нанесення покриттів, яка має технологічну камеру з розташованими в ній електронними гарматами, тигельними пристроями з матеріалами, які випаровуються, механізмами з встановленими на них касетами з виробами, що покриваються, шлюзовими камерами для завантаження-розвантаження касет.

Досвід експлуатації вказаних установок дозволив виявити ряд конструктивних недоліків. Недоцільним виявилось попереднє нагрівання лопаток у форкамерах. Через постійне завантаження-розвантаження у форкамерах накопичується конденсат із повітря, який після того при нагріванні лопаток призводить до утворення оксидних плівок на їх поверхнях. При наступному нанесенні захисного покриття наявність подібного розподільного шару неминуче призводить до відшарування покриття при експлуатації лопаток.

Тому до конструкції установки що випускається серійно в Україні УЭ-175, УЭ-187 було внесено ряд суттєвих змін, а більш пізні її модифікації (установки УЭ-187, УЭ-187А) оснащені тигельним пристроєм, який складається з 4-х циліндричних тиглів, розташованих в один ряд. Однак, при лінійному розташуванні тиглів важко забезпечити рівномірний розподіл компонентів в покритті по довжині пера лопатки; наприклад, при реалізації наступної технологічної схеми випаровування: сплав MeCrAlY - випаровування із центрального тигля; легуюча добавка – гафній - з правого та з лівого, сусідніх з центральним тиглем. У випадку необхідності одночасного вводу в покриття ще однієї добавки, наприклад кремнію, подібну технологічну схему взагалі неможливо реалізувати, оскільки при випаровуванні трьох різних матеріалів із трьох незалежних тиглів, ні про яку хімічну однорідність хімічного складу покриття не може бути мови. При використанні вказаної технологічної схеми, неможливе осаджування двохшарових теплозахисних покриттів типу MeCrAlYHfSi/MeO за один технологічний цикл, оскільки попередньо, щонайменше у три тиглі необхідно завантажити компоненти металевого шару покриття й лише після того, ці ж тиглі використати для осадження керамічного шару.

Розглянуті конструкції електронно-променевих установок, однак, не дозволяють здійснювати промислове осадження покриттів із силіцидів на деталі по таких причинах. Як відомо, Si , Ti , Zr , Nb , W , Cr суттєво відрізняються за пружністю парів. Тому випаровування сполук типу MeSi_2 із одного джерела (тигля) не є можливим. В промислових електронно-променевих установках з багатотигельним випаровуванням і лінійним розташуванням тиглів існує принципова можливість синтезувати подібні сполуки в паровій фазі. Однак, в цьому випадку, виникає значна неоднорідність хімічного складу силіцидного покриття по довжині виробу, що покривається, наприклад при випаровуванні Ti та Si з двох лінійно-розташованих тиглів. Осадження більш складних силіцидних покриттів із чотирьох лінійно-розташованих тиглів - взагалі не є можливим. Силіцидні покриття можуть бути синтезовані в електронно-променевих установках з багатотигельним випаровувачем із круговим розташуванням тиглів.

Також легко, використовуючи дану технологічну схему, сформувати двошарові покриття типу MeSi_2/MeO . Однак, вказана установка дозволяє здійснювати лише одностороннє осадження покриттів на вироби. З іншої сторони вона має дуже низьку продуктивність, оскільки після нанесення покриття необхідний час для охолодження виробів та завантаження головної технологічної камери новою партією виробів, що покриваються. Конструкцію промислових установок для електронно-променевих покриттів постійно допрацьовують, проте це ускладнює та подорожчає як саме обладнання, так і процес отримання покриття.

1.3 Стан питання про формування наноструктурованих плазмових теплозахисних покриттів з підвищеними фізико-механічними властивостями

В даний час в літературі опубліковано велику кількість робіт, присвячених нанесенню на конструкційні та інструментальні матеріали наноструктурних покриттів. У таких покриттях вдається отримати високі значення твердості, що досягають 80-90 ГПа, які наближаються до твердості алмазних покриттів. При цьому дослідники вирішують двоєдину проблему: як створити у покритті наноструктуру та як її зберегти в екстремальних умовах навантаження. Якщо у вирішенні першого завдання досягнуто чималих успіхів, то друга частина проблеми перебуває лише у початковій стадії свого наукового обґрунтування.

Складність проблеми полягає в тому, що термодинамічна рівновага будь-якого кристала визначається його трансляційною симетрією, яка стабілізована електронно-енергетичним спектром. Класична теорія твердого тіла, включаючи теорію всіх типів деформаційних дефектів (дислокацій, дисклінацій, тріщин та ін.) розроблена для кристалів з трансляційною симетрією. Вне такої постановки не можна визначити вектор Бюргерса дислокації та дисклінаційного заряду, що необхідне використання теорії деформаційних дефектів. Ці умови в наноструктурних матеріалах при їх навантаженні у різних полях зовнішніх впливів не виконуються.

В екстремальних умовах навантаження наноструктурні покриття піддаються впливу високих температур, динамічних навантажень, локальних

концентраторів напруг, стрес-корозії та ін. Перший чинник пов'язані з термодинамікою поведінки сильнонеравновесних наноструктурних покриттів за умов високих температур і неоднорідного розподілу напруг. Другий фактор відноситься до галузі фізичної мезомеханіки гетерогенних матеріалів, що розглядає навантажене тверде тіло як багаторівневу систему. Поверхневі шари та всі внутрішні межі розділу в гетерогенному матеріалі класифікуються як самостійні функціональні 2D-підсистеми. З ними пов'язаний ефект «шахової дошки» у розподілі розтягуючих і стискаючих нормальних і дотичних напруг. В локальних зонах розтягуючих нормальних напруг (зонах гідростатичного розтягування) розвиваються структурно-фазові перетворення, зароджуються пластичні зрушення та тріщини, формуються твдові структури, які викликають локальні відшаровування покриття. Всі зазначені ефекти залежать не тільки від фізико-механічних характеристик наноструктурного покриття, але і від структурно-фазового стану підкладки.

Вагома відмінність термодинамічного стану, характеристик пружності, міцності та пластичності, коефіцієнтів термічного розширення основного матеріалу і покриття, що наноситься на нього, вимагає вирішення наступних ключових питань:

- забезпечення спільності структурно-фазового стану та високої адгезії на межі розділу основного матеріалу та покриття;
- розрахунок внутрішніх напруг на інтерфейса багатошарових покриттів;
- обґрунтування необхідності наноструктурування окремих шарів покриття;

«матеріал – багатошарове покриття» у різних полях зовнішніх впливів.

Вирішення цих питань потребує спільних підходів нерівноважної термодинаміки, фізичної мезомеханіки та сучасного наноматеріалознавства.

Найменш розробленим у літературі є питання про наукові засади адгезії покриття до основного матеріалу. Зазвичай, обмежуються експериментальною оцінкою рівня адгезії при механічному відриві покриття від основного матеріалу

без відповідного аналізу її природи. Насправді природа адгезії є багатоплановою і потребує мультидисциплінарного аналізу.

Зрештою, дуже важливо правильно сконструювати зовнішній шар покриття, який сприймає поле зовнішнього впливу. У теплозахисних покриттях зовнішній шар покриття повинен бути термобар'єрним, у зносостійких покриттях мати високу зносостійкість. Нижчі шари повинні забезпечувати високу здатність, що несе, мати високі демпфуючі характеристики при механічному або термічному впливі. «Шаховий» розподіл розтягуючих та стискаючих дотичних напруг на інтерфейсах різнорідних середовищ викликає розвиток на межах розділу вихрової деформації. Для її опису необхідний облік моментних напруг.

У наноструктурних матеріалах істотну роль відіграють поверхні границь зерен внаслідок значного збільшення їх об'ємної частки. Це призводить до нових фізичних явищ і унікальним властивостям, притаманним наномасштабу. Роботи в області отримання надтвердих ($H \geq 40$ ГПа) і ультратвердих ($H \geq 70$ ГПа) наноструктурних тонких плівок показали, що твердість матеріалу може практично досягати твердості природного алмазу за умови отримання матеріалу, що складається з декількох фазових компонентів з розміром зерен до 5 нм і міцними енергіями зв'язку на їхніх границях.

Одним з напрямків поліпшення властивостей покриттів полягає у легуванні ZrO_2 рідкоземельними оксидами. Ці оксиди забезпечують формування кластерів легуючої речовини, які, в свою чергу, знижують питому теплопровідність, однак їх вміст негативно позначається на термоциклічній довговічності покриття [10].

Фірмою General Electric Corp. пропонується застосовувати при створенні ТЗП два керамічні шари [11]. Причому внутрішній шар має меншу пористість, ніж зовнішній (до 15%). Таке саме рішення запропоновано у роботі [12]. Автори пропонують наносити дво- або багат шарові покриття, де шар YSZ з задовільними механічними властивостями знаходиться в контакті з металевою основою, тоді як верхній шар нового складу (наприклад, $La_2Zr_2O_7$, $Gd_2Zr_2O_7$, $SrZrO_3$ або $La_2Hf_2O_7$) захищає покриття. Вказано [12], що такі покриття

показали значно більшу довговічність, ніж покриття на основі YSZ при термоциклюванні з температурою 1300°C.

У роботі [13] описані склади $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ та $\text{LaSmZr}_2\text{O}_7$ та проведено дослідження їх характеристик. Зокрема, показано, що з'єднання $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ має коефіцієнт теплопровідності на 30% нижче, ніж покриття YSZ ($\lambda = 1,56 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$) при 1000°C, більш високу фазову стабільність і нижчий модуль пружності (175 ДПа).

У роботі [14] пропонується склад $\text{La}_2\text{Ce}_2\text{O}_7$, нанесений плазмовим напиленням, що має коефіцієнт теплопровідності $\lambda = 1,6 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ при 1000°C. Склад стабільний 240 год під час термічних випробувань за температури 1400°C. У роботі [15] порівнюються коефіцієнти теплопровідності керамічних шарів стандартного складу 7YSZ та нових складів $\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$, $\text{Sm}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$, $\text{Dy}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ та $\text{Yb}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$. Результати показують, що найнижчим $\lambda = 0,88 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ при 800°C має склад $\text{Sm}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$. Інші склади мають теплопровідність від 1,15 до 1,5 Вт/(м·К). Залежність коефіцієнта теплопровідності від температури даних матеріалів представлена на рис. 1.3, а.

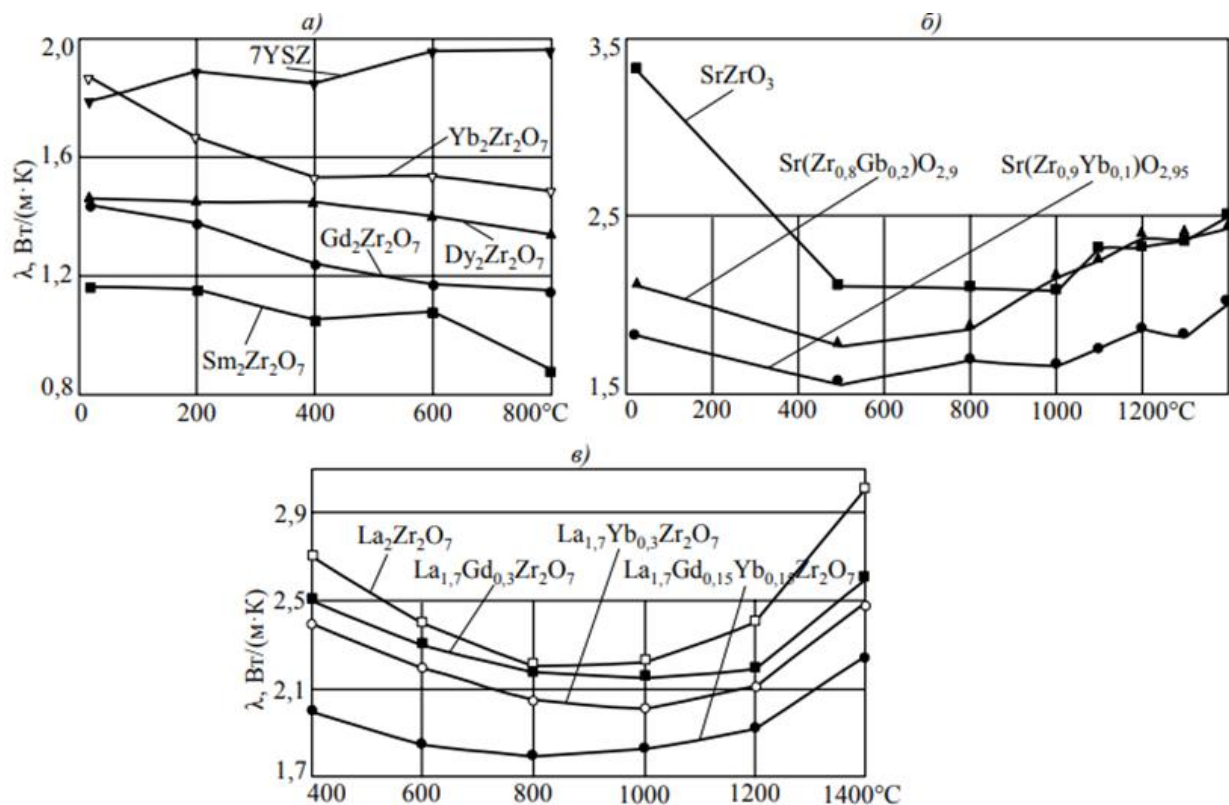


Рис. 1.3. Залежність коефіцієнта теплопровідності (λ) керамічних матеріалів різного складу від температури

У роботі [16] порівнюються традиційне покриття YSZ з покриттями на основі гафнію систем (в % за масою): HfO_2 –27% Y_2O_3 та HfO_2 –40% ZrO_2 –20% Y_2O_3 , нанесені електронно-променевим методом (EB- PVD) за 1000°C . Показано, що покриття даних систем мають λ : 1,1 та 1,3 Вт/(м·К) відповідно. У роботі також представлено фазовий аналіз покриттів на основі гафнію, який показує кристалографічну текстуру за високих температур нанесення.

У роботі [17] розглядаються склади SrZrO_3 , $\text{Sr}(\text{Zr}_{0,9}\text{Yb}_{0,1})\text{O}_{2,95}$ та $\text{Sr}(\text{Zr}_{0,8}\text{Gd}_{0,2})\text{O}_{2,9}$, нанесені методом плазмового напилення як безпосередньо на жаростійкий шар, так і при нанесенні двошарової кераміки (перший шар - YSZ). За даними авторів [17], найнижчий коефіцієнт теплопровідності λ показав склад $\text{Sr}(\text{Zr}_{0,9}\text{Yb}_{0,1})\text{O}_{2,95}$ (результати вимірювань представлені на рис. 1.3, б). Цей склад витримав 806 циклів під час термоциклічних випробувань за температури 1240°C .

У роботі [18] автори розглядають склад $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$, а також даний склад з додаванням рідкісноземельних елементів $\text{La}_{1,7}\text{Gd}_{0,3}\text{Zr}_2\text{O}_7$, $\text{La}_{1,7}\text{Yb}_{0,3}\text{Zr}_2\text{O}_7$ та $\text{La}_{1,7}\text{Gd}_{0,15}\text{Yb}_{0,15}\text{Zr}_2\text{O}_7$. Результати вимірювання теплопровідності цих складів представлені на рис.1.3, в.

З представлених матеріалів видно, що останніми роками за кордоном активно досліджуються нові керамічні матеріали для зниження теплопровідності та збільшення робочої температури теплозахисних покриттів. На даний момент існують два напрямки у пошуку нових матеріалів для керамічного шару:

1. Удосконалення існуючої системи покриття на основі YSZ шляхом додавання одного і більше рідкісноземельних елементів, що дозволяє знизити коефіцієнт теплопровідності λ до значень 1,1–1,5 Вт/(м·К) та збільшити робочу температуру до $\sim 1300^\circ\text{C}$.
2. Розробка покриттів на основі гафнію або церію, що в перспективі дозволить збільшити робочу температуру до 1500°C і більше і знизити значення λ до 0,9–1,2 Вт/(м·К).

Подальшого підвищення функціональних властивостей покриттів можна досягти наноструктуруванням. Відомо [19], що наноструктуровані YSZ покриття

мають теплопровідність на 40 % нижче та характеризуються підвищеною термоциклічною довговічністю.

Один із можливих підходів заснований на термічному напиленні пористих наноструктурованих агломерованих порошків $\text{ZrO}_2\text{-7-8\%Y}_2\text{O}_3$ (YSZ), в яких окремі наноструктуровані частинки YSZ агломеруються за допомогою сушіння розпилювання в мікроскопічні кластери.

Подача ультрадисперсних порошків до плазмового струменя здійснюється у вигляді агломератів [20] або суспензії [21], що пов'язано з трудомісткою підготовкою напилюваних матеріалів.

Ще одним з методів підвищення стійкості керамічного покриття фінішна обробка верхнього шару лазером. Лазерний вплив на зразки з теплозахисними покриттями призводить до зміни структури оксидного шару $\text{ZrO}_2 - \text{Y}_2\text{O}_3$. При цьому його вихідна поверхня, що характеризується розвиненим рельєфом, в результаті обробки істотно вирівнюється і покривається растрескивається, розділяючись на фрагменти. Так як оксидне покриття володіє низькою теплопровідністю, а час впливу лазера порядку 10–3 с, тепловий потік не встигає розпространитися на більшу глибину. В результаті поверхнєве покриття набуває вигляд застигаючого розплаву. Покриття, отримане з порошку $\text{ZrO}_2 - 7\% \text{Y}_2\text{O}_3$ за розробленою авторською технологією, витримує в 1,5 рази більше циклів нагрівання – охолодження, ніж подібне покриття, виготовлене раніше. Запропонований спосіб дозволяє шляхом зміни властивостей поверхнєвого шару підвищити стійкість покриття до термоциклування при температурі 1100° С.

А також розроблено спосіб поверхнєве зміцнення шляхом деформаційно-термічної обробки (передрекристалізаційна термічна обробка) напилених покриттів із металів та сплавів при температурі близькій до температурного порогу рекристалізації [35], що забезпечує підвищення твердості на 30...70% та зниження теплопровідності на 30%. Однак відсутні дослідження щодо впливу згаданої термічної обробки на фізико-механічні властивості теплозахисних покриттів з $\text{ZrO}_2\text{-7\%Y}_2\text{O}_3$ що найбільш поширені у газотурбобудуванні.

Для проведеного дослідження та опису роботи термобар'єрного покриття був використаний склад кобальт-хром алюмінієвого покриття (CoCrAlY) завтовшки 100-200мкм, а в якості керамічного шару, що найбільше зарекомендував себе протягом 20 років використання в авіаційній промисловості – діоксид цирконію (ZrO_2), стабілізований 7% оксиду ітрію (Y_2O_3), завтовшки 200 -300мкм.

Проведеними практичними дослідженнями було підтверджено теоретичні припущення про основні причини руйнування термобар'єрних покриттів, а також підтверджено можливість підвищення фізико-механічних властивостей плазових порошкових теплозахисних покриттів з $ZrO_2 - 7\%Y_2O_3$ оптимізації технологічного процесу атмосферного плазового напилення (APS).

1.4 Мета та постановка задач дипломної роботи

Виходячи з проведеного аналізу науково-технічної літератури стосовно сучасного стану та шляхів розвитку процесів газотермічного нанесення теплозахисних покриттів встановлено, що найбільш перспективним при виготовленні та відновленні деталей авіаційних, газових та гідротурбін є плазовий метод напилення. Що стосується керамічних покриттів, то для їх одержання застосовують в основному атмосферне плазове та електронно-променево напилення з використанням порошків і механічних сумішей.

Мета роботи: отримання теплозахисних плазових покриттів із ZrO_2 -7% Y_2O_3 та їх передрекristалізаційна термічна обробка.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Розглянути обладнання для отримання теплозахисних плазових покриттів.
2. Дослідити матеріали для нанесення плазових теплозахисних покриттів.
3. Отримання теплозахисних плазових покриттів із ZrO_2 -7% Y_2O_3 та їх передрекristалізаційна термічна обробка.
4. Розглянути ефект економічної ефективності нанесення плазових теплозахисних покриттів із урахуванням розроблених рекомендацій.

2 ОБЛАДНАННЯ ТА НАПИЛЮВАНІ МАТЕРІАЛИ ДЛЯ ФОРМУВАННЯ ТЕПЛОЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ

2.1 Обладнання, що використовується для нанесення плазмових теплозахисних покриттів

Плазмотрон є пристроєм, який визначає якісні показники роботи установки для напилення у відкритій атмосфері (на повітрі) при високих показниках надійності та мінімізації енерго та ресурсозатрат [22]. Досвід експлуатації плазмотрона однією з найбільш поширених конструкцій плазмотронів ПН-14М при напиленні теплозахисних покриттів показав, що він не забезпечує необхідної (заданої) потужності дуги (До 40 кВт) і має ряд конструктивних недоліків: канали для подачі порошку часто забиваються; великий опір проходженню охолоджувальної води; низька стійкість ущільнювальних елементів; у конструкції плазмотрона не передбачено його кріплення до вакуумної камери. Слід особливо відзначити, що збільшення потужності процесу без цілеспрямованої зміни його конструкції для більш інтенсивного нагрівання напилюваних частинок призводить до зниження часу експлуатації плазмотрону. Результати досліджень складу плазмових покриттів, а також досвід експлуатації плазмотрону ПН-14М з елементами модернізації, показали, що вони мають не достатні когезійні та адгезійні властивості, а це знижує стійкість і ресурс покриття. Одна з причин цього явища це все ще низький ступінь проплавлення частинок порошку, спричинена недостатньою потужністю застосовуваного плазмотрону. Особливо виразно проявляється цей ефект при напиленні в розрідженій контрольованій атмосфері і у випадку, коли до складу порошкової композиції входять тугоплавкі добавки ZrO_2 [23].

Компанія Prahaig дає можливість використовувати повний асортимент необхідного обладнання для процесу атмосферного плазмового напилення.

До них відносяться матеріал покриття що наноситься, тобто система подачі порошку до атмосферного плазмового розпилювача. Система управління, яка точно контролює вимоги до газу, електрики та охолоджувальної води, а також джерело живлення для перетворення вхідної потужності змінного струму у відповідну потужність постійного струму, необхідну плазмовим розпилювачам.

Для забезпечення ефективного охолодження плазматрона також потрібний теплообмінник. Обладнання яке точно контролює рух розпилювача та заготівлі, а також їх відносне положення. Звуконепроникна кабіна, а також система фільтрації та витяжки повітря захищають персонал, обладнання камери та навколишнє середовище.

2.2 Аналіз конструкції плазматрона та його модернізація

Найкращим і широко використовуваним за конструкцією атмосферним плазмовим розпилювачам з одним катодом Praxair є Model SG-100 Gun плазмовий розпилювач на (рис 2.2.1) котрій має кілька модифікацій-режимів роботи включаючи дозвуковий, Mach I і Mach II, а простота конструкції має можливість до модернізації.

Особливості та переваги плазменного розпилювача SG-100:

- Потужністьдо 80 кВт
- Гибкая інжекція порошку; внутрення або зовнішня
- Широкий вибір анодних, катодних і газових інжекторів для відповідності вимогам застосування
- Простота обслуговування - самовирівнююча збірка катода.
- Вузький факел забезпечує щільне, добре структуроване покриття
- Швидкість частинок..... до 340 м/с або 680 м/с

Технічна характеристика плазматрона SG-100

Плазмоутворюючі гази Аргон, водень, азот, гелій

Тиск на вході, МПа:

аргон 0,5

водень..... 0,7

азот 0,5

Охолодження Водяне,

витрата води, л/хвдо 15

Струм дуги плазми, А.....до 800

Продуктивність напилення, кг/год.....до 8

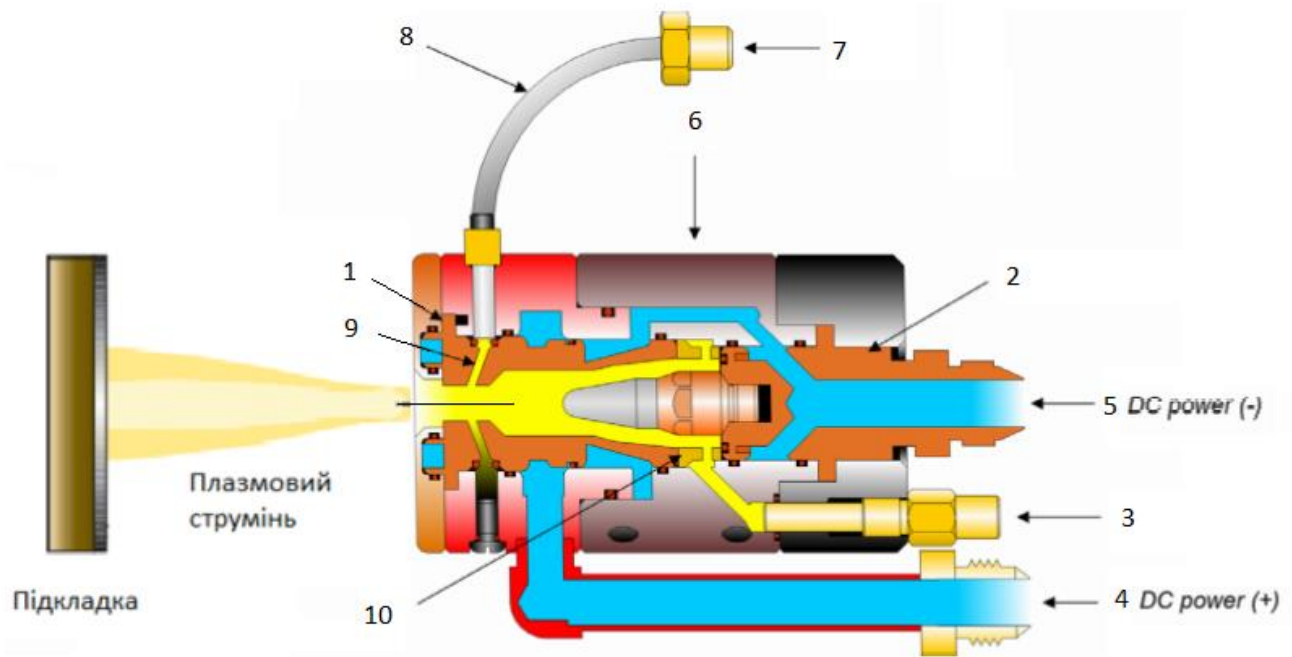


Рисунок 2.2.1 - Model SG-100 Gun плазмовий розпилювач: 1 - анод (мідна насадка); 2 - катодотримач; 3 - подача плазмотвірного газу; 4- вхід охолодження; 5- вихід охолодження; 6- ізолятор; 7- місце подачі порошків; 8- знімна трубка; 9- порошковий канал; 10- газовий інжектор

Сильна електрична дуга утворюється між позитивно зарядженим полюсом (анодом) та негативно зарядженим полюсом (катодом). Це іонізує технологічні гази, що протікають, в плазмовий стан. Зазвичай використовувані технологічні гази – це аргон, водень, азот і гелій, або окремо, або в сумішах двох чи навіть трьох із цих газів. Вихідний порошковий матеріал упорскується в плазмовий струмінь, розплавляючи частинки порошку і виштовхуючи їх на поверхню заготовки.

Гази, що використовуються у поєднанні зі струмом, що подається на електрод, контролюють кількість енергії, що виробляється. Оскільки потоки газу та струм, що прикладається, можна точно регулювати, можна отримувати повторювані і передбачувані результати покриття. Крім того, також контролюються форма та розмір отвору сопла, точка та кут, під яким матеріал упорскується в шлейф, а також відстань від пістолета до цільової поверхні. Це

забезпечує високу ступінь гнучкості для розробки відтворюваних параметрів для матеріалів з температурами плавлення в дуже широкому діапазоні.

Багатоцільовий плазмовий розпилювач SG-100 підходить як для крупносерійного виробництва, так і для малосерійного, де потрібна гнучкість системи.

Унікальна конструкція SG-100 допускає внутрішню або зовнішню інжекцію порошку. Внутрішня інжекція забезпечує захоплення частинок порошку в точці найвищої енергії в плазменному потоці, забезпечуючи максимальну оптимальну передачу енергії та швидкість частинок, що в сукупності забезпечує високу ефективність осаджування покриття. Два внутрішніх порту вприска порошку SG-100 можуть використовуватися по окремої, одночасно для високої швидкості розпилення або для змішування матеріалів у плазменному потоці.

В якості опцій доступні зовнішні порти вприска порошку. Зовнішні порти можуть бути використані замість внутрішніх портів або в поєднанні з внутрішніми портами. Як внутрішня, так і зовнішня вприска порошку забезпечує різні угли вприски. Сочетание подвійної внутрішньої і зовнішнього вприску порошку робить SG-100 самим універсальним і ефективним інструментом для плазменного напилення. Завдяки різним запропонованим апаратним опціям SG-100 швидко наносить однородні та змішані покриття плазмовим напиленням на різні матеріали, та може працювати в широкому діапазоні швидкостей розпилення або режимів, включаючи дозвуковий, Mach I і Mach II, при рівні потужності до 80 кВт.

Плазмовий розпилювач SG-100, призначений для стаціонарного монтажу або робота-маніпулятора, використовує різні водоохолоджувані самовирівнювані аноди, призначені для певних операцій розпилення. Для нормальної роботи плазмової горілки SG-100 потрібен мінімальний потік охолоджуючої води 8 галлонів на хвилину (15,2 літра на хвилину)

Спосіб і місце введення порошку, що напилюється, є однією з найважливіших конструктивних особливостей плазмотронів. Теоретичні розрахунки показали, що кільцеве введення порошку в струмінь плазми дозволяє

збільшити ефективність нагрівання, проплавлення частинок і підвищити продуктивність напилення більш як на порядок.

Теплофізичні дослідження включали вимірювання параметрів (швидкість, температура одиночних частинок та їх статистичні розподілу) порошку Al_2O_3 фракції $34 + 6$ мкм в струмені напилювального плазмотрона для випадку кільцевого розподіленого в термічної плазми [24]. При кільцевому введенні частин, що напиляються, на всіх режимах основна частка напилюваного матеріалу проходить через високотемпературну і високошвидкісну осьову область плазмового струменя. Тому за достатньої частки розплавлених частинок збільшення їх швидкості веде до зниження пористості покриттів і товщини складових його мікрошарів. Пористість основного шару при оптимальних режимних параметрах у разі кільцевого введення порошку становить менше 1%. Зазвичай, за даними різних авторів, пористість керамічних покриттів становить 8—15%. Тому у разі кільцевої інжекції, зносостійкість керамічних покриттів продовжує зростати. Тут необхідно зазначити, що потрібні додаткові дослідження для більш повного вивчення мікроструктури покриттів.

В цілому порівняльні дослідження покриттів, отриманих за різних умов введення порошків у потік плазми, показали, що кільцеве транспортування забезпечує стабільність, надійність та висока якість процесу напилення. І це дуже важливий момент для використання даної технології у виробничих умовах. Однак необхідно враховувати і збільшення витрати газів при кільцевому введенні матеріалів, що напиляються.

Для виконання роботи дослідження можливостей підвищення фізико-механічних властивостей плазмових порошкових теплозахисних покриттів з $\text{ZrO}_2 - 7\% \text{Y}_2\text{O}_3$ використовували наступне обладнання:

Ситова класифікація порошків - лабораторна установка модель 029, сітка номерів 004 і 008 по ГОСТу 6613-86.

Термообробка порошків - електрична піч типу СНОЛ-1.6.2.0.08 / 9-М; шафа ШСВ 3,5.3,5.6/3,5.

Лабораторні ваги загального призначення – ГОСТ 24104, що забезпечують зважування з похибкою не більше 0,05 г.

Установка струменево-абразивної обробки марки 026-7 "Ремдеталь".

Термічну обробку покриттів: вакуумна піч радіаційного нагрівання СНО-1-3-1/16Н1, карбідкремнієвий нагрівач типу КЕНА – ВТ.

Обладнання, що використовується для дослідження:

- Металографічний мікроскоп ММУ - 3.
- Цифрова камера - HDCE-20C 2MP.
- Об'єкт мікрометр.
- Шліфи порошків.
- Програми для комп'ютерного аналізу і обробки цифрового зображення – МЕГРАН (розроблений на базі кафедри матеріалознавства і технології металів Національного Університету Кораблебудування імені адмірала Макарова), CoralDRAW, Photoshop.

Мікротвердість H_n визначалася на приладі ПМТ-3.

Для нанесення покриття доцільно використовувати установку плазмового напилення УПУ-3Д (рис. 2.2.2), укомплектовану плазмотроном ПН-14М. Установка призначена для механізованого напилення покриттів з порошкових металевих і керамічних матеріалів, а також для наплавлення самофлюсуючих твердих сплавів.

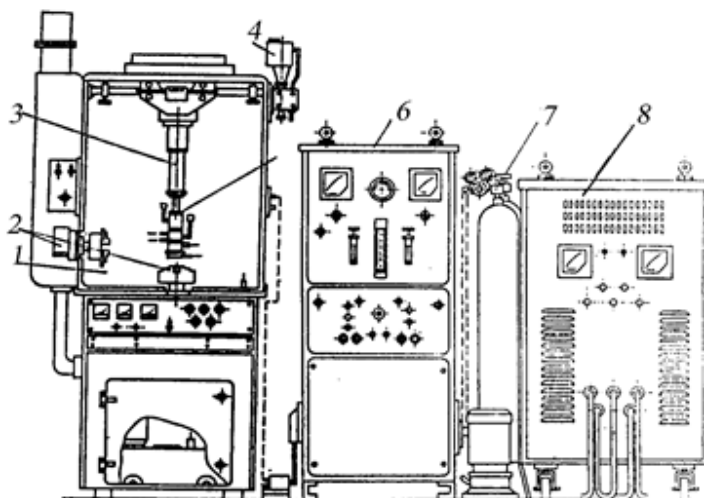


Рисунок 2.2.2 Схема установки УПУ – 3Д:

1 – шафа для напилювання; 2 – механізм обертання виробу; 3 – маніпулятор плазмотрона; 4 – порошковий дозатор; 5 – плазмовий розпилювач; 6 – шафа управління; 7 – балон з газом; 8 – джерело живлення

Універсальна плазмова установка УПУ-3Д призначена для нанесення зносостійких, фрикційних, ізоляційних та інших спеціальних покриттів на поверхні деталей методом плазмового напилення порошкових матеріалів, а також матеріалів у вигляді дроту за схемою "дріт нейтральна". Як плазмоутворюючих газів можуть застосовуватися азот, аргон, гелій і суміші аргону або азоту з воднем.

Технічні характеристики установки УПУ – 3Д вказані у таблиці 2.2.1

Таблиця 2.2.1 Технічні характеристики установки УПУ – 3Д

Напруга мережі живлення, В (частота, Гц)	3х380 (50)
Максимальний струм дуги плазмотрона, А	400
Плазмоутворюючі гази та суміші	Суміш аргону і водню
Витрата газів і сумішей м3/с	0,00025 - 0,0017
Продуктивність напилення, кг/г	до 0,00033
Ресурси роботи сопла і електродів, г.,	4
Тривалість включення установки (ПВ),%	60
Габаритні розміри, мм, не менше	2620х1250х1700
Маса установки, кг, не більше	1100

2.3 Напилювані матеріали для нанесення плазмових теплозахисних покриттів

Тип покриття вибирають за умови експлуатації напилюваного виробу та інших специфічних вимог. За функціональним призначенням їх поділяють на захисні, конструкційні, технологічні і декоративні. Найбільшу групу складають захисні покриття.

Теплозахисні покриття напильють із матеріалів з низьким коефіцієнтом теплопровідності. У багатьох випадках до них ставлять високі вимоги щодо термоциклічної стійкості. Наявність розгалуженої пористості у теплозахисних покриттях підвищує їх ефективність.

Оскільки турбінні лопатки, виготовлені з ливарних жароміцних сплавів працюють при високих температурах та в агресивному середовищі, виникає потреба у їхньому захисті від гарячої корозії. Для цього він використовують дифузійні покриття двох типів, т. зв. пакетна цементація та покриття, що наносяться в газовій фазі. У процесі покриття відбувається збагачення поверхневого шару алюмінієм і утворення нікелю алюмінію, як матриці покриття.

Більш сучасною технологією захисту лопаток є плазмове напильня термобар'єрних покриттів. Як правило, термобар'єрне покриття складається з кількох шарів - підшар, шар MeCrAlY, шар кераміки (часто застосовують оксид цирконію, стабілізований ітрієм). Для різних двигунів атестовано вакуумне або атмосферне плазмове напильня, проте всі сучасні розробки виконуються на атмосферній плазмі як дешевшій в експлуатації.

Традиційні теплозахисні покриття (YSZ) продовжують активно експлуатуватися в аерокосмічній промисловості для збільшення терміну служби та ККД двигуна, оскільки впровадження нових, альтернативних високотемпературних конструкційних матеріалів – кераміки, керамічних композитів, інтерметалідних та жароміцних металевих сплавів на стадії наукових досліджень [25].

Покриття на основі YSZ має комплекс властивостей, які в даний час роблять цей матеріал найкращим для нанесення керамічного шару ТЗП. Покриття має один із найнижчих з усіх керамічних матеріалів коефіцієнт питомої теплопровідності при підвищеній температурі ($\lambda \leq 2,3$ Вт/(м·К) при 1000°C – для плавленого матеріалу) через високу концентрацію точкових дефектів – вакансій кисню та заміщених атомів розчиненої речовини. Покриття YSZ також має відносно високий температурний коефіцієнт лінійного розширення (ТКЛР:

11·10⁻⁶ К⁻¹), що сприяє зниженню напруги, що є результатом неузгодженості термічного розширення між керамічним покриттям та металом лопатки [26].

Максимальна робоча температура поверхні покриття на основі YSZ під час експлуатації не повинна тривало перевищувати 1200°C [27] для запобігання спіканню кераміки, що веде до збільшення коефіцієнта питомої теплопровідності.

Необхідно також відзначити, що для досягнення теплозахисного ефекту 100°C необхідно нанести шар кераміки на основі YSZ товщиною ~150 мкм. При цьому маса робочих лопаток ГТД підвищується на ~1 кг на кожен м² трактової поверхні. Зниження маси лопаток з ТЗП і збільшення прохідного перерізу газоповітряного тракту двигуна по перерізу ТВД можна досягти за рахунок зменшення товщини керамічного шару ТЗП, що можливо тільки шляхом зниження коефіцієнта теплопровідності керамічного шару ТЗП. У зв'язку з цим нині ведеться активний пошук нових керамічних матеріалів, які б замінити покриття на основі YSZ у сфері високих температур.

2.3.1 Дослідження порошку сплаву Ni-Co-Cr-Al-Y

Для підвищення якості покриттів напильюють підшари (проміжні шари) . Необхідність у цьому виникає при незадовільній сумісності матеріалів покриття з напильованим виробом. Найчастіше несумісність виявляється у низькій адгезійній міцності; утворенні на межі поділу проміжних фаз, що знижують експлуатаційні властивості напилених виробів; великій різниці у температурних коефіцієнтах лінійного розширення (КТР) матеріалу покриття і виробу. Виходячи з цього вибирають матеріал проміжного шару (підшару) і способи його створення.

В усіх випадках під час вибору матеріалу проміжного шару необхідно, щоб його КТР займав проміжне значення у системі виріб– покриття. Різниця між КТР підшару і зовнішнього шару, що забезпечує достатню довготривалість, становить 2,0...2,5·10⁻⁶ К⁻¹. Завдяки цьому зменшується напружений стан на межі їх поділу. Вірно підібраний матеріал підшару значно підвищує термоциклічну стійкість напилених покриттів [28].

Іншим важливим показником підшару є ентальпія напилюваних частинок.

Зі збільшенням ентальпії, як відомо, підвищується контактна температура і, відповідно, адгезійна міцність.

Суперсплави на основі нікелю часто застосовуються для деталей, які працюють у гарячому та корозійному середовищі, таких як робочі та напрямні лопатки газових турбін, які піддаються дії гарячих та корозійних газоподібних продуктів згоряння (робочих газів), що приводять у дію турбіну. У таких середовищах необхідні висока міцність та сильний опір хімічним корозійним впливам за високих температур.

Для захисту жароміцних сплавів на основі нікелю широке застосування отримали покриття типу overlay на основі сплаву Ni-Cr-Al. Висока жаростійкість цих покриттів в окисному середовищі обумовлена утворенням суцільної плівки виключно стабільних оксидів Cr_2O_3 і Al_2O_3 . При відповідному виборі складу покриття можна домогтися захисту сплаву та від високотемпературної корозії. Однак у процесі експлуатації внаслідок взаємної дифузії компонентів сплаву склад та структура покриття змінюються, що призводить до зниження його захисних властивостей. Вивчення закономірностей деградації структури покриття має важливе значення для розробки оптимальних систем захисту та методів їх нанесення. Крім того, істотний інтерес представляє вивчення впливу покриттів на механічні властивості жароміцних сплавів.

При розробці жаростійкого плазмового покриття, призначеного для захисту турбінних лопаток газотурбінних двигунів від високотемпературної газової корозії, була обрана порошкова суміш марки ПНХ20К20Ю13-7 з дисперсністю частинок 40/80 мкм, хімічний склад якої наведено у табл.2.3.1.1.

Таблиця 2.3.1.1 – Хімічний склад порошку марки ПНХ20К20Ю13-7

Елемент	Ni	Cr	Co	Al	Fe	Y	Ca	Nb	Mn	C	S	Si
Кількість мас. %	Осн.	18,9	22,4	14,0	0,15	0,09	0,06	0,14	0,01	0,15	0,006	0,51

Цей матеріал відноситься до системи «Ni-Al» і відрізняється від класу термореагуючих порошків тим, що отримано методом порошкової металургії з

використанням вакуумного спікання та подальшого дроблення та тому у своєму складі вже має сформовану інтерметалідну фазу. Методом рентгеноструктурного аналізу встановлено, що основною фазою в порошковому матеріалі суміші є інтерметалідна сполука $\beta - (\text{Ni}, \text{Me})\text{Al}$. Легуючі елементи (кобальт і хром), що входять до складу сплаву, зазвичай знаходяться в твердому розчині і не дають на дифрактограмах окремих рефлексів. Тому у випадку кількох легуючих елементів β -фазу позначають як $(\text{Ni}, \text{Me})\text{Al}$, де «Me» узагальнено позначає легуючі елементи металів, що утворюють тверді розчини заміщення [29].

Покриття, отримане за стандартною технологією, має двофазний склад, а саме, інтерметалідні сполуки $\beta - (\text{Ni}, \text{Me})\text{Al}$ та $\gamma' - (\text{Ni}, \text{Me})_3\text{Al}$ [29].

Утворення

γ' -фази в покритті є результатом перебігу фазового перетворення $\beta \rightarrow \gamma'$ внаслідок температурного впливу плазмового потоку.

Дериватографічні дослідження показали, що цей фазовий перехід починається за 900°C . При використанні плазмотрона удосконаленої конструкції формується покриття з двофазним складом: $\beta + \gamma'$ – тобто. $(\text{Ni}, \text{Me})\text{Al} + (\text{Ni}, \text{Me})_3\text{Al}$. При цьому збільшення температури нагрівання порошкової суміші призводить до збільшення вмісту γ' -фази у покритті та більш щільної структури.

Результати розробок становлять інтерес для стаціонарних ГТД з турбінними лопатками, що не охолоджуються, з метою підвищення їх надійності та ресурсу. На рис. 2.3.1 показана структура інтерметалідного покриття, отриманого методом плазмового напилення на модернізованому устаткуванні. На поверхню підкладки матеріал, що напилюється, надходить у диспергованому стані у вигляді дрібних розплавлених або пластифікованих частинок, які, ударяючись об неї, деформуються і, закріплюючись, накладаються один на одного, утворюючи покриття з шаруватою мікроструктурою. Витягнута форма зерен обумовлена високою кінетичною енергією частинок, що беруть в облогу на підкладку при впливі високоенергетичної плазми. У покритті є частинки округлої форми, які затверділи до падіння на підкладку та впровадилися у покриття за рахунок високої кінетичної енергії.

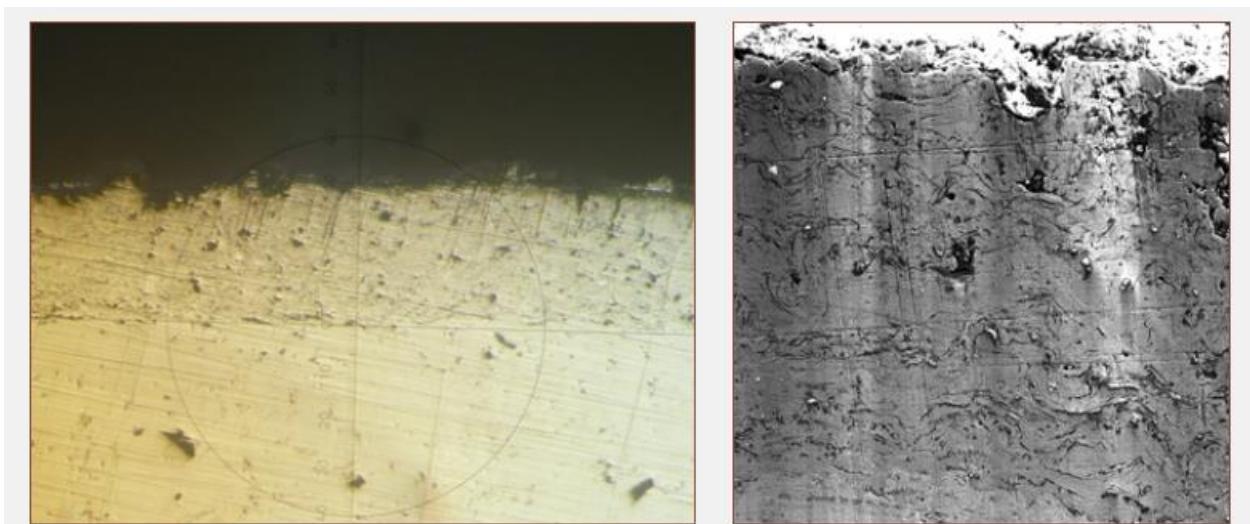


Рисунок 2.3.1.1 - Газоплазмове інтерметалідне покриття «Ni-Co-Cr-Al-Y»

Товщина покриття складає 200-240 мкм (рис. 2.3.1). Розмір пор знаходиться в межах 5-10 мкм, наскрізної пористості немає. На межі розділу «підкладка-покриття» відсутні дефекти у вигляді сколів, несплошностей та відшарувань. Методом електронної мікроскопії встановлено, що межі зерен облямовані включеннями оксидної фази. Аналіз розподілу елементного складу показав, що у межах зерен спостерігається синхронний сплеск інтенсивності рефлексів кисню, алюмінію і хрому. Цей факт свідчить про перебіг окислювальних процесів, супутніх формуванню інтерметалідного покриття з утворенням оксидів алюмінію та хрому. Випробування цього покриття методом мікроіндентування показали його задовільну адгезійну міцність

Порівняльні показники фізико-механічних властивостей інтерметалідних покриттів "Ni-Co-Cr-Al-Y", отриманих на різному устаткуванні, наведені в табл. 2.3.1.2

Таблиця 2.3.1.2 - Фізико-механічні властивості інтерметалідних покриттів "Ni-Co-Cr-Al-Y", отриманих на стандартному та модифікованому устаткуванні

Фізико-механічні властивості покриттів	Стандартна технологія	Модифікована технологія
Загальна пористість Π , %	7,3	5,7
Закрита пористість Π_0 , %	6,6	5,1
Відкрита пористість Π_0 , %	0,7	0,6
Щільність ρ , г/см ³	7,3	7,9
Мікротвердість H_{μ} , кгс/мм ²	300	770

Слід зазначити, що зростання вмісту γ' -фази – $(\text{Ni},\text{Me})_3\text{Al}$ – при плазмовому напиленні неоднозначно впливає на експлуатаційні властивості жароміцних покриттів. З одного боку, збільшення її кількості сприяє підвищенню жорсткості. З іншого сторони відомо, що вичерпання захисних властивостей жаростійкого покриття при експлуатації в умовах високих температур відбувається за механізмом: $\beta \rightarrow \beta + \gamma \rightarrow \gamma \rightarrow \gamma$ - твердий розчин Ni + оксиди [29]. Тому збільшення кількості γ' - фази при модифікованому методі плазмового напилення має призводити до скорочення ресурсу покриття. Проте визначальним чинником з погляду надійності покриття є пористість. Її зменшення сприятиме зниженню агресивного доступу середовища та запобігання передчасному руйнуванню покриття. Оскільки температура плазмового потоку є важко контрольованим параметром, тобто $(\text{Ni},\text{Me})_3\text{Al}$ - фази в покритті на сучасному етапі розробки керувати достатньо складно.

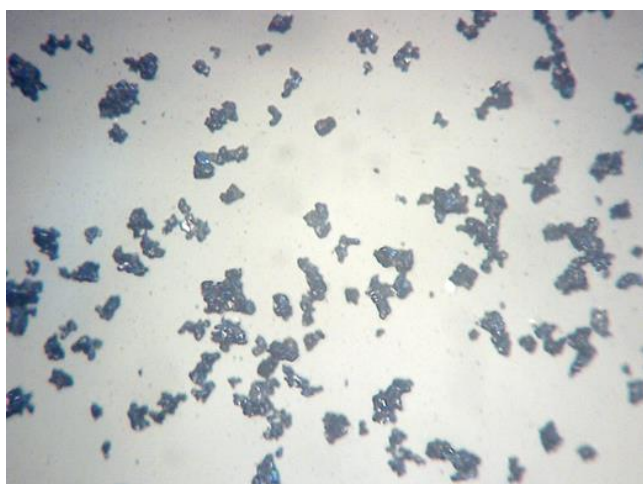
Модифікований метод плазмового напилення дозволив одержати інтерметалідне покриття зі зниженою пористістю та вищими показниками щільності, мікротвердості та жаростійкості.

Найбільш широко застосовуються Ni-Cr-Al-Y і Co-Cr-Al-Y, які володіють високими експлуатаційними характеристиками. Недоліком покриття Ni-Cr-Al-Y є його більш низька стійкість до сульфідної корозії. Покриття типу Co-Cr-Al-Y напроти, володіючи високим опором сульфідної корозії, відрізняються меншій, ніж покриття типу Ni-Cr-Al-Y жаростійкістю на повітрі і недостатньо стабільні. Крім того, недостатня пластичність покриттів Ni-Cr-Al-Y і Co-Cr-Al-Y стає причиною їх розтріскування в умовах значних циклічних навантажень. Для покриття Co-Cr-Al-Y значення пластичності найнижчі.

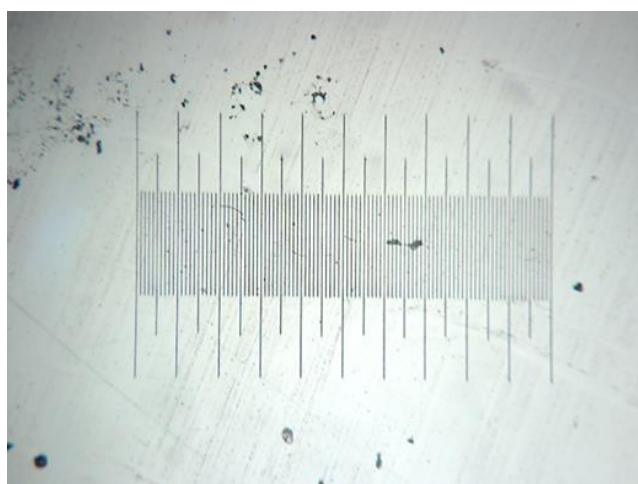
Нанесення покриттів типу Ni-Co-Cr-Al-Y дозволяє добитися отримання високої пластичності захисного шару з високим опором окисленню і сульфідній корозії.

Порошок сплаву Co-Cr-Al-Y має високу стійкість проти газоабразивного зносу при підвищених температурах. Робочі температури 850 ... 870 °C.

Температурний коефіцієнт лінійного розширення (ТКЛР) для порошкової суміші, що складається з 90% (мас.) Co-Cr-Al-Y-Si і 10% (мас.) ZrO₂ в інтервалі температур 70 ... 1400 ° С становить $13,3 \cdot 10^{-6}$ град-1. На малюнках 2.3.1.2 представлені мікрофотографії: порошку сплаву Co-Cr-Al-Y, зроблені за допомогою металографічного мікроскопа ММУ-3.



а



б

Рисунок 2.3.1.2 – Мікрофотографія порошку Co-Cr-Al-Y-Si та об'єкт мікрометру

Гранулометричний склад порошку визначали за допомогою металографічного аналізу за рахунок використання цифрової камери - HDCE-20C 2MP та програмного забезпечення Scope image. Результати наведено на рис. 2.3.1.3 а

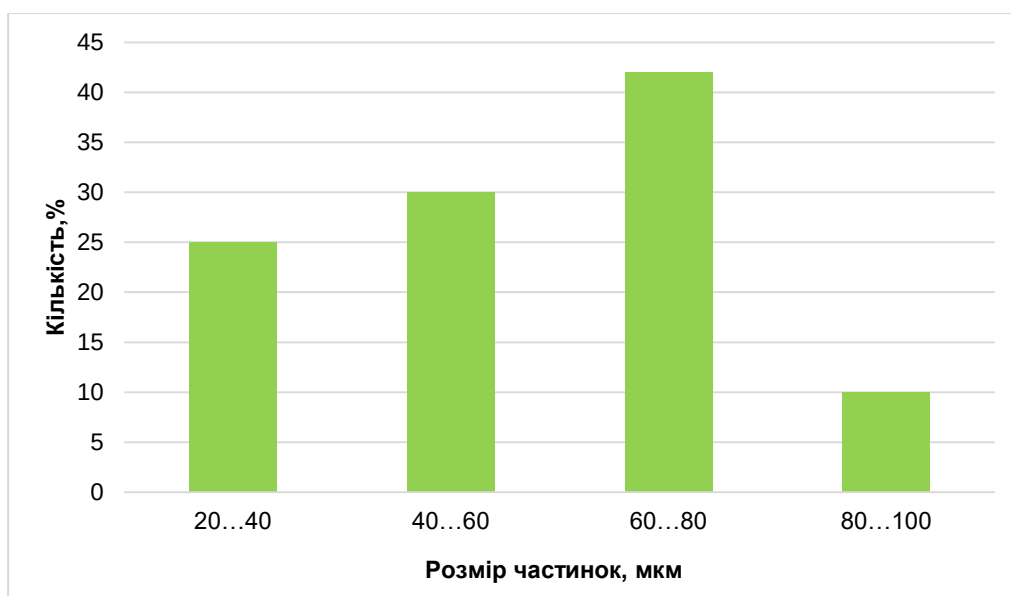


Рисунок 2.3.1.3 – Гранулометричний склад порошку Co-Cr-Al-Y-Si

Результати, представлені на рис. 2.3.1.3 показують, що згідно наведених даних порошок характеризується малим розміром частинок, який коливається у діапазоні від 20 до 100 мкм. Основна частина порошку має розмір частинок до 60 мкм. Середній зважений розмір частинок складає 50 мкм.

2.3.2 Дослідження порошку $\text{ZrO}_2\text{-7\%Y}_2\text{O}_3$

В даний час проводяться дослідження в області створення керамічної основи композиційних матеріалів на тугоплавких з'єднаннях з метою отримання наноструктурних матеріалів з механічною міцністю, твердістю, термостійкістю. Кераміка на основі діоксиду цирконію володіє хорошою механічною міцністю і трещиностійкістю. Висока міцність і в'язкість руйнування кераміки на основі діоксиду цирконію обумовлена наявністю в кераміці тетрагональної фази, здатної перешкоджати перевершенню в моноклінній під дією механічних напруг (деформаційне укріплення) [30]. При цьому найбільш високими значеннями механічної міцності та трещиностійкості при збереженні стійкості кераміки до корозії та розміру характеризується діоксид цирконію, частково стабілізований оксидом ітрію. Діоксид цирконію, стабілізований оксид, ітрій являє собою багатофункціональний матеріал із широким спектром застосування, до якого відносяться: іонні провідники, тверді оксидні елементи, датчики кисню, різні катализатори. Плотно спечений кубічний діоксид цирконію використовується для виготовлення нагрівачів електричних печей з камерами, що працюють у повітряному середовищі при температурі до 2000 °С.

Порошки для отримання плотноспеченої кераміки з діоксиду цирконію можуть бути синтезовані гідротермальним або сольватермічним синтезом, за допомогою розпилювальної сушки, повітряно-плазмовим розпиленням, синтезом горіння (розпилювальний піроліз), полімеризацією золь-геля та шлікерне лиття.

До основних технологічних параметрів порошкового матеріалу при напиленні відносять гранулометричний склад та ступінь сферичності. Фізико-хімічні властивості порошкового матеріалу, такі як хімічний склад, коефіцієнт температуропровідності, температури плавлення і кипіння, є індивідуальними і незмінними для речовини, з якої виготовлений порошковий матеріал.

На даний час стоїть завдання подальшого збільшення ресурсу теплозахисних плазмових покриттів із $\text{ZrO}_2\text{-7\%Y}_2\text{O}_3$ на соплові та робочі лопатки ГТД, та йде подальше вивчення методів отримання даного керамічного матеріалу та технологія його нанесення.

$\text{ZrO}_2\text{-7\%Y}_2\text{O}_3$: має високу міцність на вигин-до 850МПа, що робить його одним з найміцніших керамічних матеріалів. ця властивість робить його ідеальним для застосування, де потрібне поєднання міцності та стійкості до поширення тріщин. Тетрагональна кристалічна структура забезпечує йому високий рівень жорсткості, дозволяючи поглинати та розсіювати енергію від ударів та інших навантажень. Ця властивість робить її придатною для застосування в тих областях, де зносостійкість має вирішальне значення.

Відмінне теплові властивості має низький коефіцієнт теплового розширення ($10,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), що дозволяє зберігати стабільність розмірів навіть при екстремальних змінах температури.

Було проведено визначення властивостей сфероїдизованих порошків $\text{ZrO}_2\text{-7\%Y}_2\text{O}_3$, призначених для плазмового напилення, які відрізнялися між собою значеннями насипної густини: № 1 - 1,54 г/см³; № 2 - 2,00 г/см³ та № 3 - 2,54 г/см³. При цьому ставилося завдання: визначити, чи існує залежність між насипною густиною порошків та їх іншими характеристиками.

Рентгенофазовий аналіз, зроблений на дифрактометрі XPert PRO у мідном випромінюванні з нікелевим фільтром, показав, що всі порошки мають 100%-ву тетрагональну кристалічну решітку. Графік залежності середніх розмірів частинок за фракціями представлений за результатами аналізу порошків н лазерний гранулометричний аналізатор Fritsch-22

Для всіх порошків фракції 20-30, 30-40, 40-50, 50-60 та 60-70 мкм становлять від 10 до 19%. Вихід об'єднаної фракції 20-70 мкм помітно зростає зі збільшенням насипної щільності. Так, для порошку № 1 (1,54 г/см³) він становить 62,3 %, для порошків № 2 (2,00 г/см³) 70,6 % та № 3 (2,54 г/см³) 75,7% відповідно. Для плазмового напилення краще використовувати порошки розміром частинок 40-60 мкм. У досліджуваних зразках вихід такий «корисної»

фракції теж росте в міру збільшення насипної щільності та відповідно дорівнює 27,4, 31 та 32,7 %. Крім цього було визначено, що чим вище насипна щільність порошків, тим нижчою є їх плинність: 48, 37 і 26 с. Таким чином, можна зробити висновок, що порошки ZrO_2 -7% Y_2O_3 з більшою насипною щільністю мають кращу плинність і більший вихід придатний для напилення фракції.

Досягнутий комплекс фізико-механічних властивостей забезпечує підвищення ерозійної стійкості та жаростійкості робочої поверхні турбінних лопаток, що охолоджуються, газотурбінних двигунів (ГТД), що виготовляються з жароміцних нікелевих сплавів. Результати розробок запроваджено на підприємствах газової, енергетичної та авіаційної галузей промисловості для підвищення надійності та ресурсу турбінних лопаток газотурбінних двигунів.

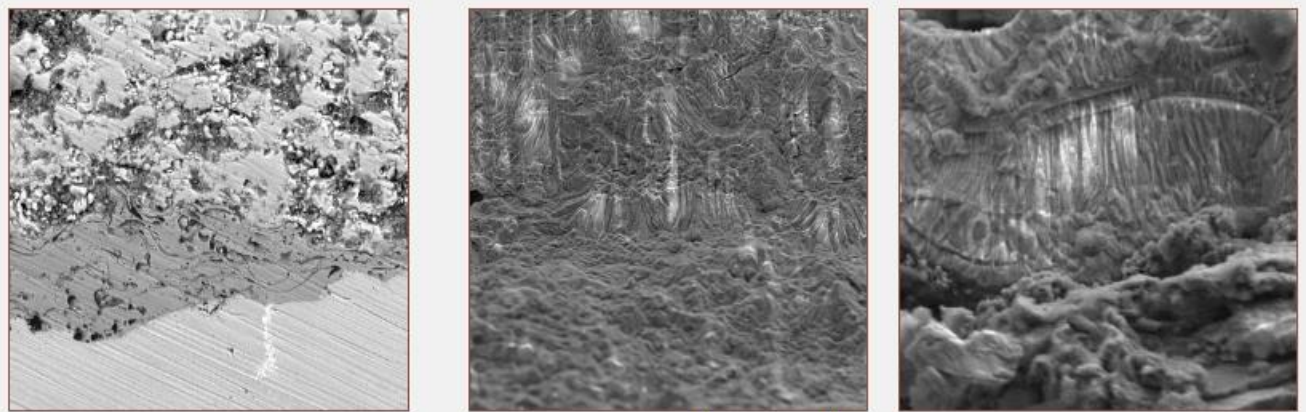


Рисунок 2.3.2.1 - Стовпчаста субструктура зерен ZrO_2 "Ni-Co-Cr-Al-Y + ZrO_2 "

Теплозахисне керамічне покриття на основі діоксиду цирконію, стабілізованого оксидом ітрію поєднання тетрагональної та кубічної фаз ZrO_2 має сфероїдальну форму зерен на поверхні та стовпчасту субструктуру зерен внутрішніх шарів, має низькі значення загальної та відкритої пористості ($P=4,3$ % $P_o=1$ % відповідно), високі показники щільності ($\sim 7,6$ г/см³) та твердості ($HV=980$ кгс/мм²), гарною адгезією шарів. Ефективність теплозахисту жароміцного сплаву розробленим теплозахисним покриттям за показником зниження температури становить $125\pm 5^\circ\text{C}$.

В даний час для отримання теплозахисних покриттів використовують в основному оксид цирконію, стабілізований оксидом ітрію (ZrO_2 -(6-9%)

Y₂O₃), який має високу жаростійкість, низьку теплопровідність та хімічну інертність.

При розробці теплозахисного покриття методом високоенергетичного плазмового напилення була обрана порошкова суміш марки ЦрОИ-7 з різною дисперсністю часток (40/90 і 40 мкм). Дану суміш виготовляють з ZrO₂ з добавкою суміші оксидів ітрію, кремнію і титану, що забезпечують підвищення високотемпературної міцності. Фазовий склад порошку є діоксид цирконію ZrO₂ з тетрагональним типом кристалічної решітки і невеликою кількістю залишкової моноклінної фази. На рис. 2.3.2.2 зображена мікрофотографія стабілізованого ітрієм оксиду цирконію

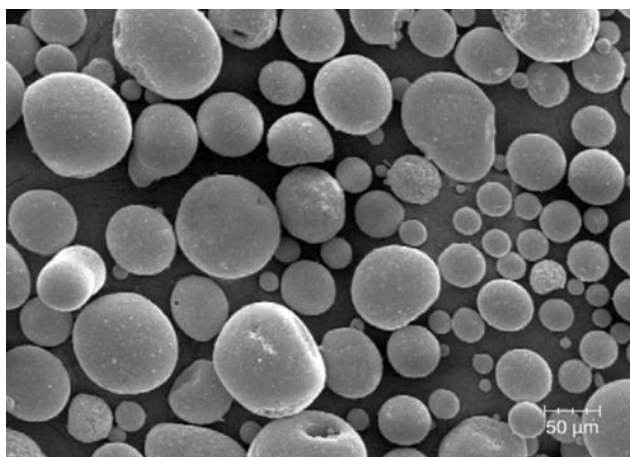


Рисунок 2.3.2.2 – Мікрофотографія порошку ZrO₂-7%Y₂O₃ марки Metco 204-NS
Гранулометричний склад порошку визначали за допомогою металографічного аналізу за рахунок використання цифрової камери - HDCE-20C 2MP та програмного забезпечення Score image. Результати наведено на рис. 2.3.2.3

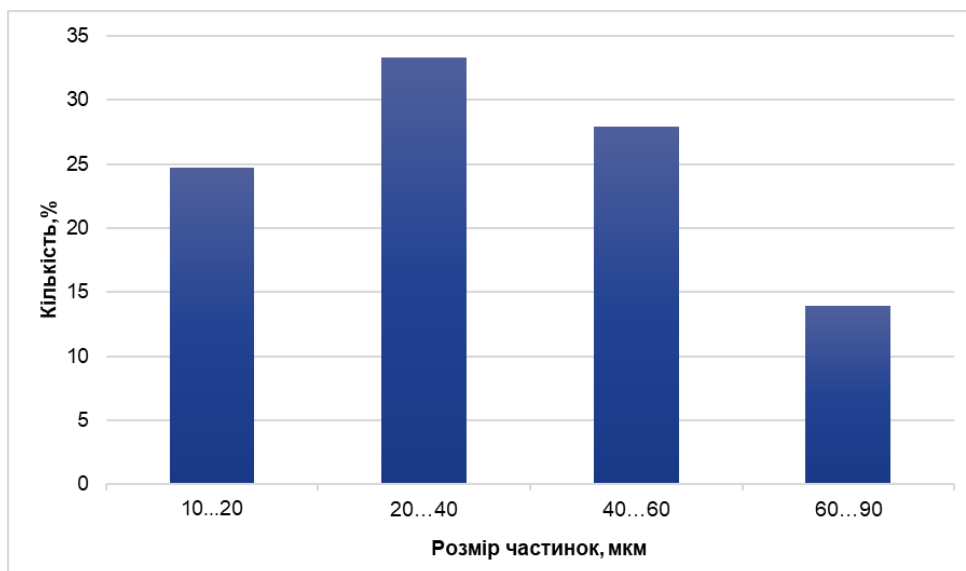


Рисунок 2.3.2.3 – Гранулометричний склад порошку $ZrO_2-7\%Y_2O_3$ марки Metco 204-NS

Результати, представлені на рис. 2.3.2.3 показують, що згідно наведених даних порошок характеризується малим розміром частинок, який коливається у діапазоні від 10 до 90 мкм. Основна частина порошку має розмір частинок до 50 мкм. Середній зважений розмір частинок складає 45 мкм.

2.4 Висновки до розділу 2

Жаростійкі покриття складу $Ni-Co-Cr-Al-Y$ отримані методом порошкового газоплазмового напилення, модифікованого за допомогою використання плазмотрона з підвищеними енергетичними характеристиками, забезпечує підвищення ерозійної стійкості та жаростійкості ($\sim$ у 2-3 рази) робочої поверхні турбінних лопаток газотурбінних двигунів (ГТД), що виготовляються з жароміцних нікелевих сплавів.

Жаростійке покриття має інтерметалідний фазовий склад ($\beta-NiAl + \gamma'-Ni_3Al$), шарувату мікроструктуру зерен; характеризується низькою пористістю (загальна пористість $P=5,7\%$), високими значеннями густини ($\rho = 8 \text{ г/см}^3$) та мікротвердості ($H_{\mu} = 770 \text{ кгс/мм}^2$).

Інтерметалідні покриття системи " $Ni-Co-Cr-Al-Y$ " рекомендуються для захисту від високотемпературної газової корозії та підвищення ресурсу роботи турбінних лопаток газотурбінних двигунів різного призначення. Для теплозахисних покриттів на основі керамік типу $ZrO_2-(7-8\% \text{ (за масою)}) Y_2O_3$ з підшаром " $Ni-Co-Cr-Al-Y$ " коефіцієнту теплопровідності $\lambda = 1,95-2,44 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ [31] у робочому діапазоні температур $1200-1250^\circ\text{C}$ відповідає коефіцієнт лінійного теплового розширення $\alpha = (8-10)10^{-6} \text{ К}^{-1}$ [32], що можна порівняти з аналогічною характеристикою матеріалу підкладки. При цьому дана керамічна система стабільна як за своєю структурою, так і фазовим складом, що дозволяє на практиці при товщині теплозахисного шару 70-200 мкм гарантовано одержувати градієнт температури товщиною керамічного шару до $50-150^\circ\text{C}$. Але при перевищенні порога температури в 1250°C дана кераміка схильна до фазових переходів, спікання та зміни обсягу, що в свою чергу призводить до

збільшення ймовірності скола через зростання термостимульованої оксидної зони.

Проаналізовано матеріали для нанесення плазмових теплозахисних покриттів. За необхідним хімічним складом обрано порошки марки: Metco 204-NS, ПНХ20К20Ю13-7. Досліджено мікроструктуру порошків та зроблено заміри частинок порошку, виведена кількість згідно розподілу за фракцією. Обрано в якості плазмотвірного газу аргон (вищий сорт), електрокорунд ГОСТ 3647-80, стиснене повітря ГОСТ 9010-84.

3. ОТРИМАННЯ ТЕПЛОЗАХИСНИХ ПЛАЗМОВИХ ПОКРИТТІВ З ZrO_2 -7% Y_2O_3 ТА ЇХ ПЕРЕДРЕКРИСТАЛІЗАЦІЙНА ТЕРМІЧНА ОБРОБКА

3.1 Плазмове напилення теплозахисних градієнтних покриттів та аналіз їх мікроструктури

Існує постійна потреба у розробці матеріалів та стратегій підвищення продуктивності теплозахисних покриття (ТВС). Для досягнення цієї мети використовувалися різні підходи. Один із можливих підходів заснований на термічному напиленні пористих наноструктурованих агломерованих порошків ZrO_2 -7-8% Y_2O_3 (YSZ), в яких окремі наноструктуровані частинки YSZ агломеруються за допомогою сушіння розпилювання в мікроскопічні кластери. Попередні високотемпературні оцінки цього типу наноструктурованого YSZ-покриття (отриманого з агломерованих порошків) були багатообіцяючими. Liang and Ding [33]. оцінили термостійкість нано- та звичайних YSZ-покриттів, нанесених за допомогою повітряно-плазмового розпилення (APS).

Незважаючи на ці цікаві попередні результати, все ще залишаються відкритими питання щодо стабільності цих покриттів за високих температур. Грунтуючись на принципах спікання, часто висувається гіпотеза, що ці наноструктуровані покриття YSZ демонструватимуть надмірні швидкості спікання при температурах вище 1200 С, тим самим перешкоджаючи застосування цих покриттів як ТВС через значне збільшення значень теплопровідності та модуля пружності (жорсткості), що призведе до передчасного руйнування покриття.

На (Рис. 3.1.1 та 3.1.2) представлені структури різних покриттів.

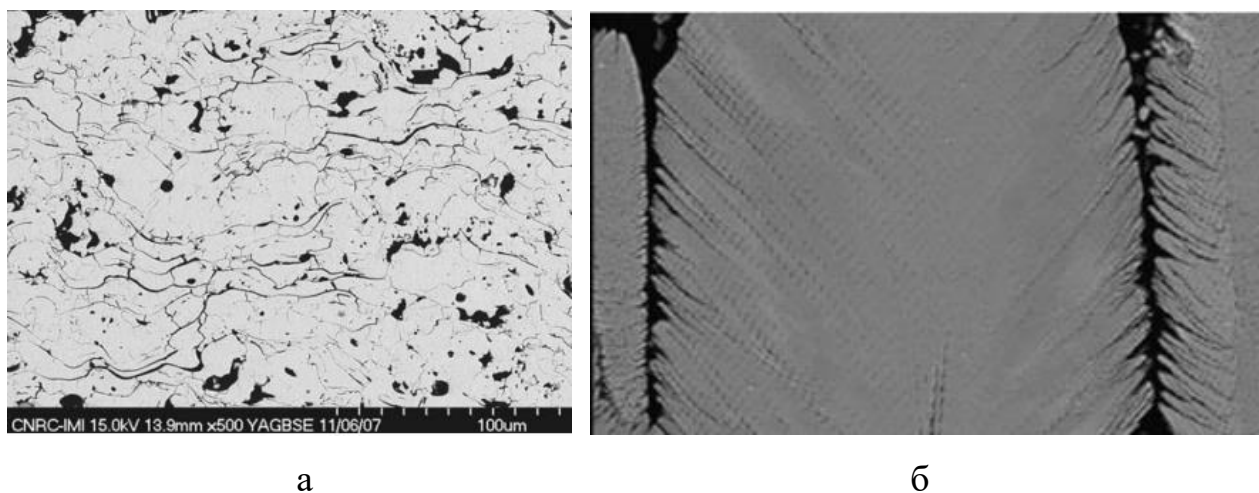


Рисунок 3.1.1 Зображення APS-покриттів (а), та EB-PVD-покриттів (б)

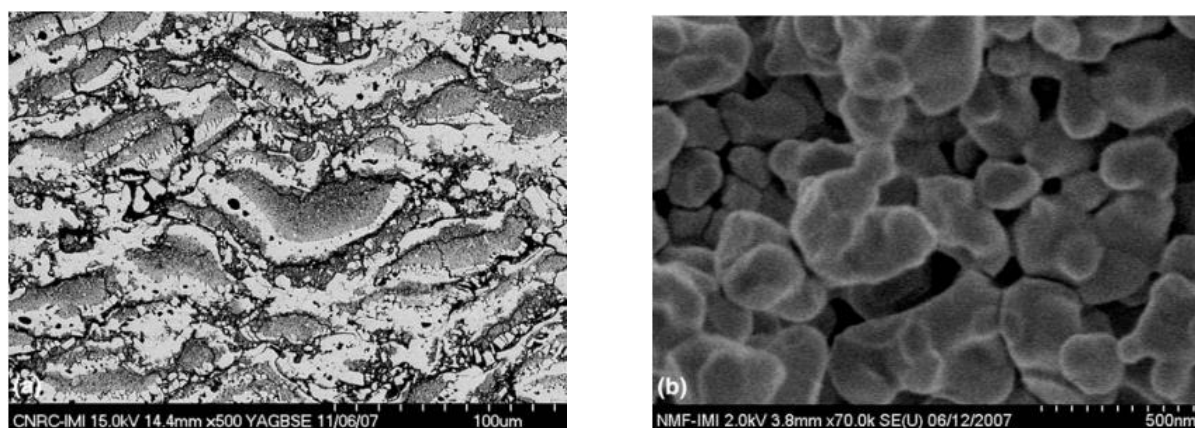


Рисунок 3.1.2 Наноструктуроване покриття YSZ після напылення
звичайне мале (а) і велике збільшення (б)

Мікроструктура звичайного покриття YSZ показана на рис. 3.1.1.а демонструє типові пластинчасті характеристики та пористу структуру покриттів YSZ, нанесених методом APS для цілей TBC. Мікроструктура EB-PVD-покриттів (рис. 3.1.1.б.) має стовпчасту структуру з великою кількістю вертикальних макротріщин призводять до збільшення покриття щільність між тріщинами і, отже, багато більш висока теплопровідність порівняно з типовою шаруваті APS покриття. Мікроструктура наноструктурованого покриття YSZ містить відмінні риси. Можна спостерігати бімодальну мікроструктуру, що складається з світліших (щільних) і темніших областей (рис. 3.1.2.а.). При спостереженні темніших зон мікроструктури при більшому збільшенні можна

розрізнити надтонку пористу структуру (рис. 3.1.2.б.), схожу на структуру наноструктурованої сировини. Отже, ці області являють собою напіврозплавлені пористі агломеровані наноструктуровані частинки, які були впроваджені в мікроструктуру покриття (тобто пористі нанозони) під час термічного напилення. Світліші (щільні) зони на рис. 3.1.2.а. є раніше повністю розплавлені наноструктуровані частинки YSZ, які утворюють матрицю мікроструктури покриття. Відсоток пористих нанозон (у площі поперечного перерізу), впроваджених у мікроструктуру покриття була оцінена в 35%.

У зв'язку з цим плазмові ТЗП досить широко застосовуються для захисту деталей гарячого тракту промислових та енергетичних газотурбінних установок, включаючи соплові та робочі лопатки турбін, завдяки зниженим робочим температурам, температурним градієнтам та меншій кількості теплових циклів. Однак, величина продовження терміну служби була обмежена, оскільки керамічні покриття страждають через недостатнє прилипання до підкладки з надміцного сплаву.

Однією причиною цього є невідповідність коефіцієнтів теплового розширення між підкладкою з надміцного сплаву та керамічним покриттям. Прилипання покриття було покращено за допомогою розробки різних типів сполучних покриттів які містять алюмінієві сплави, які термічно напилюють або наносять іншим способом на підкладку надміцного сплаву до застосування керамічного покриття. Такі сполучні покриття зазвичай бувають так званого алюмінієвого (дифузійного) типу або типу "MCrAlY", де М означає один або більше компонентів кобальту, заліза або нікелю.

При пікових експлуатаційних умовах температура сполучного покриття в газотурбінних двигунах зазвичай перевищує 700 °С, приводячи до окислення сполучного покриття і неминучому формуванню третього шару - термічно вирощеного оксиду (TGO; товщина 5-15 мкм) - дивись мал. 5, між сполучним покриттям та керамічним поверхневим покриттям. Наскрізна пористість, яка завжди існує в поверхневому керамічному покритті, дозволяє кисню легко проникати з експлуатаційного середовища до зв'язуючого покриття. Крім того,

навіть якщо поверхнєве покриття було щільним, надзвичайно висока дифузійна здатність кисню в керамічному поверхневому покритті на базі ZrO_2 робить його «кислородопрозорим»

Дифузійний бар'єр, сповільнює подальше окислення сполучного покриття. Для підвищення жаростійкості покриттів лопаток турбін підвищують запас алюмінію в покриттях, напильюють шари з високим.

вмістом алюмінію, одношарову або багатшарову кераміку на основі ZrO_2 - Y_2O_3 з підпиленням Al_2O_3 , Si, Al для зниження її пористості, обумовленої стовпчастою будовою.

Керамічне поверхнєве покриття може перебувати в трьох різних поліморфних модифікаціях - моноклінній, тетрагональній або кубічній, залежно від композиції та температури. Додавання 7-8% за масою Y_2O_3 стабілізує γ' фазу - найбажанішу фазу для застосування в ТЗП. Це - варіація тетрагональної фази, але, на відміну від неї, більш стабільна, тому що не піддається мартенситному перетворенню Рис 3.1.3.

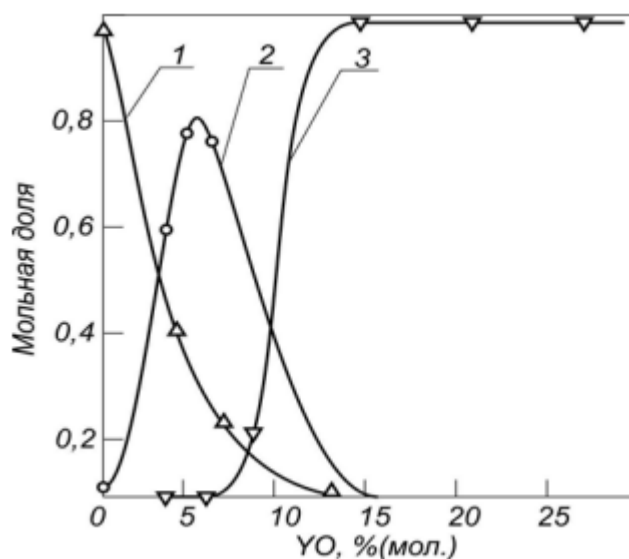
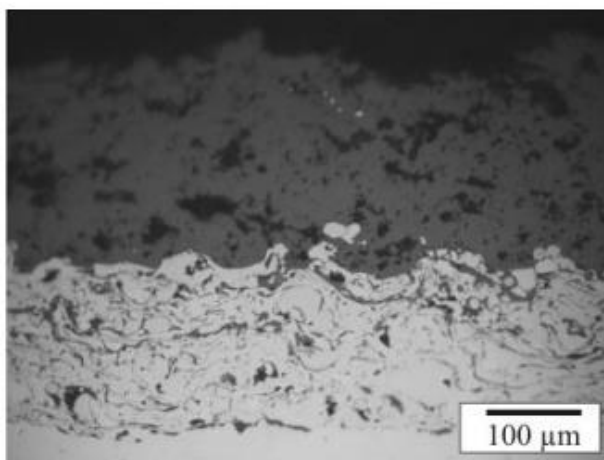


Рисунок 3.1.3 – Залежність кількості моноклінної (1), тетрагональної (2), кубічної (3) фаз від вмісту оксиду ітрію в покритті

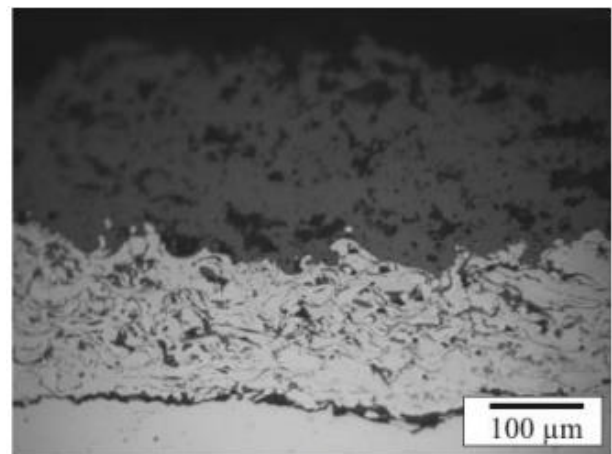
Максимальна довговічність ТЗП відповідає максимальному вмісту тетрагональної фази в структурі покриття, що містить невеликі кількості моноклінної фази. Невеликою довговічністю характеризуються покриття, що мають кубічні структури.

Для вивчення мікроструктури теплозахисного градієнтного покриття обране тришарове $ZrO_2 - 7\% Y_2O_3$ нанесених плазмовим методом (APS) Рис. 3.1.4.

Найбільш перспективним матеріалом для формування теплозахисного шару ТЗП є кераміка на основі діоксиду цирконію, стабілізованого оксидом ітрію ($ZrO_2 - Y_2O_3$). Для забезпечення адгезії керамічного шару та захисту основного матеріалу деталі від окислення, ТЗП має жаростійкий підшар. Технічний результат досягається тим, що в способі отримання теплозахисного покриття, переважно для робочих лопаток турбін газотурбінних двигунів і енергетичних установок, що включає формування на поверхні, що захищається лопатки металевого підшару, перехідного металокерамічного шару і зовнішнього керамічного шару, при формуванні за його товщиною проводять покрокову зміну співвідношення вмісту металу до кераміки, в діапазоні від 10% до 20% вагових на крок, при величині кроку від 4 до 8 мкм, при товщині перехідного шару від 40 до 150 мкм. Технічний результат досягається також тим, що в способі отримання теплозахисного покриття як матеріал металевого підшару використовують жаростійкий сплав. Підшар і проміжний шари слабо диференціюються, мають лускату будову, що пов'язано з достатнім проплавленням металевої складової покриття. У проміжному шарі проглядається сіра фаза $ZrO_2 - 7\% Y_2O_3$. Пористість керамічного шару у обох випадках складає близько 10%. Величина деформації керамічних частинок складає 76% [36].



a



б

Рис. 3.1.4. [34].- Мікроструктури теплозахисного градієнтного покриття: а – після напилення; б – після оптимальної передрекристалізаційної термічної обробки

Порівняльний аналіз мікроструктур показав, що змін у структурі покриттів до і після термообробки не спостерігається. Це свідчить про те, що зміцнювальний ефект забезпечують структурні елементи, розмір яких менший за 0,5 мкм, що пояснюється роздільною здатністю людського ока та оптичного мікроскопу.

3.2 Визначення оптимальних температурно-часових параметрів термічної обробки отриманих покриттів

При напиленні дисперсні частинки матеріалу підлітають до основи у різних агрегатних станах зі швидкістю до 200м/с, що призводить до їх значної деформації (близько 80-95%) під час удару об основу. Розплавлені частинки деформуються і набувають форму луски. Як відомо, великі ступені деформації (більше 70-80%) призводять до подрібнення зерен через ковзання, яке відбулося на значні відстані. При нагріванні пластично деформованого матеріалу починає протікати процес усунення слідів наклепу, що складається з двох стадій: повернення та рекристалізації. Повернення проходить при відносно низьких температурах (нижче 0,3Тпл), рекристалізація - при більш високих (0,3-0,8Тпл). Формування нових зерен при рекристалізації проходить на ділянках з найбільшою щільністю дислокацій, насамперед на межах деформованих зерен. Чим вище ступінь деформації, тим більше центрів рекристалізації формується, а розмір сформованих центрів залежить від їх кількості. Отже під час напилення покриттів відбувається деформація дисперсних частинок і подрібнення зерен. При наступному нагріванні до температурного порогу рекристалізації відбувається формування нових більш дрібних зародків первинної рекристалізації.

Такі фізико-механічні властивості матеріалів, як твердість та теплопровідність суттєво залежать від розміру зерен. Тому одним зі способів покращення цих показників є зменшення розмірів зерен, що досягається появою нових дрібних зерен рекристалізації у деформованому матеріалі.

Дослідження проводили при нагріванні до 1100 °С, 1200 °С та 1300 °С з витримкою 10, 20, 30 хв і швидкістю охолодження 34 °С/с. Було з'ясовано що не має ефекту зміцнення при показниках температури нагріву 1100 °С, тому у подальшому застосовували вищі показники температури для нагріву.

За результатами впливу тривалості витримки на мікротвердість покриттів при температурі 1200 °С та 1300 °С з охолодженням до кімнатної температури зі швидкістю 34 °С/с було побудовано графіки представлені на рис. 3.2.1

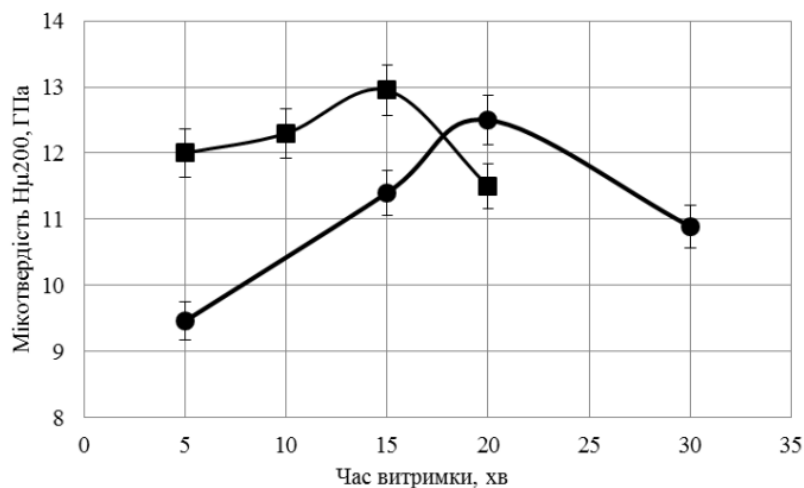


Рис. 3.2.1. [34] - Залежність мікротвердості плазових теплозахисних покриттів з $ZrO_2 + 7\% Y_2O_3$ від тривалості витримки при передрекristалізаційній термічній обробці: ● – температура 1200 °С; ■ – температура 1300 °С

При нагріванні напиленого покриття до температури початку рекристалізації матеріалу покриття у деформованому матеріалі покриття починає проходити процес первинної рекристалізації. Завдяки великій кількості дислокацій та меж деформованих зерен утворюється велика кількість зародків нових рекристалізаційних зерен, що призводить до здрібнення зерна у структурі покриття. Створені центри нових зерен збільшують свої розміри, відбувається повне заміщення новими зернами всього об'єму деформованого матеріалу після чого, починає проходити ріст утворених зерен при збільшенні температури або часу витримки.

Отримання дрібнозернистої структури з розмірами зерен, які забезпечують проявлення наномасштабного ефекту, що дає змогу підвищити фізико-механічні властивостям необхідно зафіксувати момент появи найбільшої кількості

центрів первинної рекристалізації, розмір яких буде найменшим. Досягти такого ефекту можливо за умови, якщо швидкість формування нових центрів буде значно перевищувати швидкість їх росту. Реалізувати це можливо при припиненні процесу первинної рекристалізації в момент досягнення зародками розмірів, що забезпечать проявлення наномасштабного ефекту, шляхом достатньо швидкого охолодження матеріалу покриття до температури навколишнього середовища. Швидкість охолодження вибирається такою, що не викликає подальшого росту зерен. Дуже важливо щоб час витримки був незначний і складав не більше 0,5-10 хвилин. Саме в цей період нагрівання і відбувається формування нових центрів первинної рекристалізації.

3.3 Порівняльний аналіз фізико-механічних властивостей теплозахисних покриттів до та після термічної обробки

Розглянуті серійні плазмові ТЗП за експлуатаційними властивостями (термостійкості, ерозійної стійкості) поступаються електронно-променевим, тому що не мають стовпчастої структури. Внаслідок швидкого збільшення мікроструктурних дефектів у вигляді мікротріщин, паралельних поверхні підкладки, а також високої шорсткості поверхні розділу «кераміка-метал», ТЗП, нанесені APS-методом, в цілому мають більш короткі терміни служби, ніж покриття, отримані EB-PVD-методом.

Однак більш низька питома теплопровідність ($0,5-1,4 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$), універсальність, низька вартість обладнання та виробництва плазмових покриттів (порівняно з електронно-променевими ТЗП) роблять їх комерційно привабливими для розробників та виробників ГТД.

Коефіцієнт теплопровідності ТЗП, нанесеного EB-PVD-методом, у вихідному стані знаходиться в діапазоні $1,5-1,9 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, але в процесі експлуатації зростає до $2-2,4 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, що пов'язано зі спіканням кристалітів при високих температурах і, відповідно, зниженням пористості керамічного шару. В результаті, величина теплозахисного ефекту від застосування ТЗП знижується з $80-100$ до $20-40^\circ\text{C}$.

Аналіз приведених результатів показує, що передрекристалізаційна термічна обробка забезпечує зниження коефіцієнта теплопровідності на 15 %. Оскільки пористість покриття не змінилася при термічній обробці (рис. 3.1.3.), то дане зниження теплопровідності забезпечується лише за рахунок субструктурних змін.

Для визначення теплопровідності виготовляли зразки лише керамічного шару без підкладки та проміжних шарів товщиною 0,5...0,8 мм діаметром 15 мм. Температура випробувань – 25 °С. Результати досліджень наведені на рис. 3.3.1.

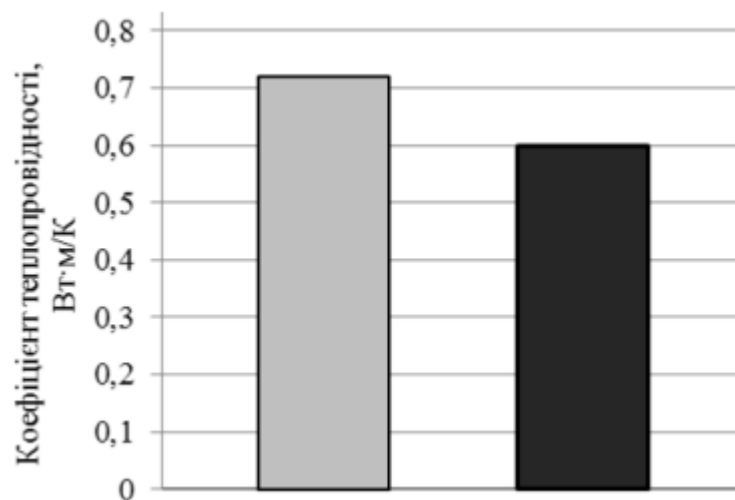


рис. 3.3.1. [34]- Результати визначення коефіцієнта теплопровідності плазових теплозахисних покриттів з $ZrO_2 - 7\% Y_2O_3$: □ – після напилення, ■ – після оптимальної передрекристалізаційної термічної обробки

3.4 Висновки до розділу 3

Використання різних технологій формування структури керамічного шару дозволяє забезпечити необхідний рівень термічної стійкості зовнішнього шару залежно від умов роботи у процесі швидкої зміни температур на поверхні деталей ГТД в сукупності з жаростійким підшаром. З технологічного і економічного погляду процес плазового напилення в контрольованій атмосфері є найбільш оптимальним і економічно вигідним процесом для нанесення теплозахисних покриттів на соплові лопатки газотурбінних установок

Також необхідно враховувати, що жаростійкий підшар можна формувати різними методами, що в свою чергу впливатиме як на міцність зв'язку, так і на рівень захисних властивостей покриття та опір механічної втоми.

Дослідження на стійкість до теплових змін плазмових покриттів показали, що найбільшою стійкістю володіють тришарові покриття: підшар Co-Cr-Al-Y-Si, проміжний шар – Co-Cr-Al-Y-Si+10-15% ZrO₂, робочий шар – ZrO₂; - найбільшу мікротвердість мають тришарові плазмові покриття; - згідно з результатами досліджень теплопровідності покриттів можна зазначити, що найбільшого зниження температури лопатки можна досягти, застосовуючи тришарові плазмові покриття.

Таким чином, необхідно розробити підходи до конструювання багатшарових теплозахисних покриттів, залежно від призначення деталі ГТД та конкретних умов її роботи. Це дозволить підвищити ККД двигуна та збільшити ресурс роботи деталей. Причому необхідно враховувати не лише склад та товщину покриття, а також технологію його нанесення на поверхню деталі, т.к. це значно впливає на поведінку ТЗП у реальних умовах експлуатації. [10] та економічну складову його отримання.

За результатами дослідження визначено оптимальний режим передрекристалізації термічної обробки теплозахисного градієнтного плазмового покриття з ZrO₂ – 7%Y₂O₃ що забезпечує підвищення твердості на 13% та зниження теплопровідності керамічного шару на 15% у порівнянні зі станом після напилення за рахунок субструктурних змін. Режим полягає у нагріванні до температури 1300 °C, витримці протягом 15 хв та охолодженні на повітрі [36].

4 РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНИХ РЕКОМЕНДАЦІЙ ЩОДО НАНЕСЕННЯ ТЕПЛОЗАХИСНИХ ПЛАЗМОВИХ ПОКРИТТІВ З ZrO₂- 7%Y₂O₃ З ПІДВИЩЕНИМИ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ

При розробці технологічних рекомендацій щодо напилення газотермічних покриттів використовували ГОСТ 28844-90. Технологічний процес отримання газотермічних покриттів з використанням плазмового струменя та наступної термічної обробки складається з наступних послідовних робіт:
– підготовка поверхні під нанесення газотермічного покриття;

- вибір режиму напилення газотермічного покриття;
- напилення газотермічного покриття;
- обробка напилених покриттів;
- визначення фізико-механічних властивостей напилених покриттів.

Технологічна схема процесу наведено на рис. 4.1.

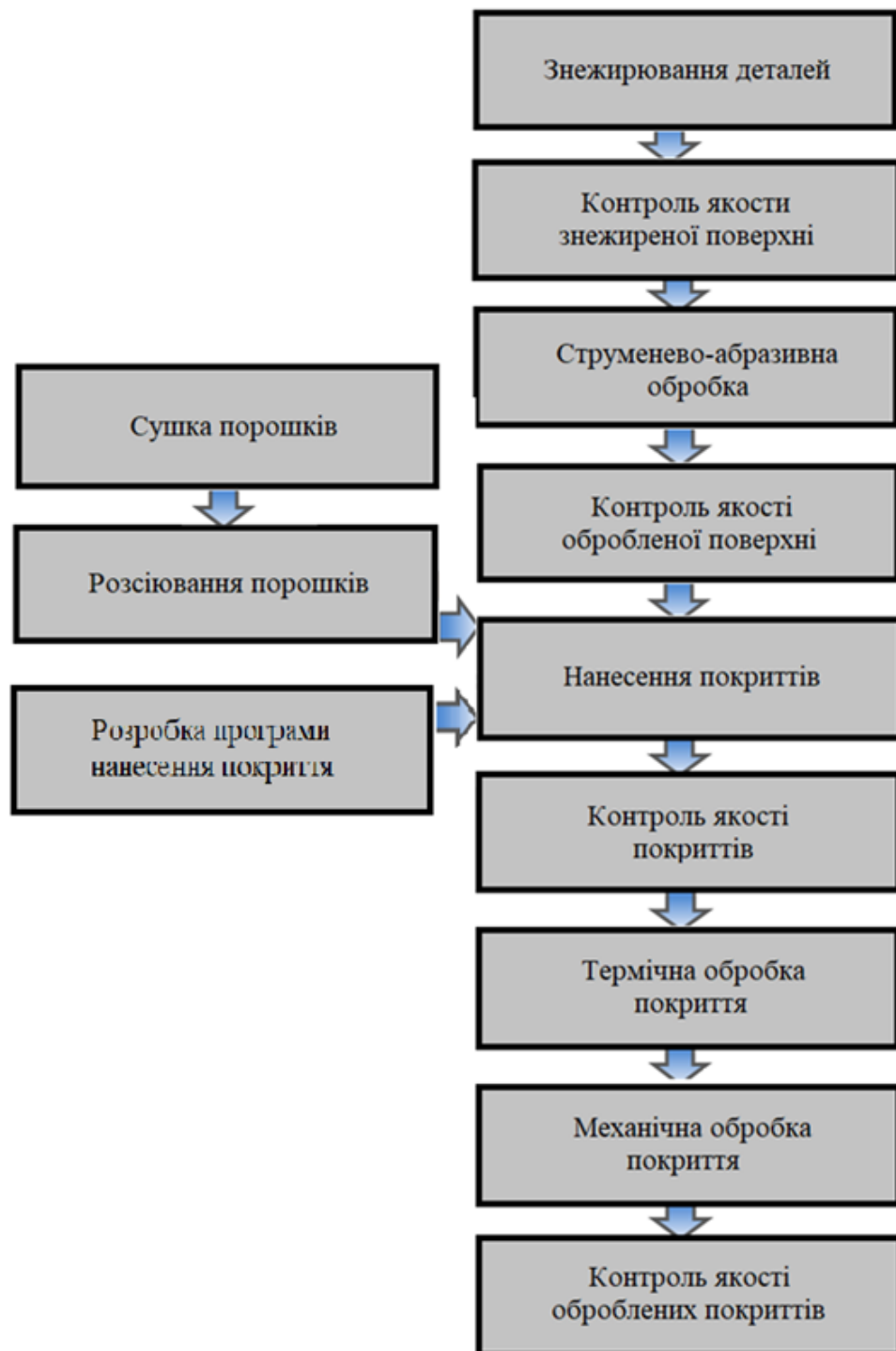


Рисунок 4.1 – Технологічна схема нанесення теплозахисних плазмових покриттів.

4.1 Вибір і підготовка матеріалів, які застосовуються при нанесенні газотермічних покриттів

Вихідні матеріали повинні відповідати державним стандартам і технічним умовам на поставку.

Матеріали, які застосовуються при струменево-абразивній обробці, повинні бути сухими, без масляних та інших забруднень.

Стиснуте повітря, яке застосовується при підготовці поверхні під нанесення покриття, не повинно містити вологи і масла. Очистку стисненого повітря слід проводити шляхом пропускання через вологомастиловідділювач відповідно до ОСТ 5.9829-81. Клас забрудненості стисненого повітря повинен бути непарним по ГОСТ 17433-84.

Визначення ваги порошків слід здійснювати на лабораторних вагах загального призначення – ГОСТ 24104, що забезпечують зважування з похибкою не більше 0,05 г.

Підготовку порошку сплаву Co-Cr-Al-Y-Si перед напиленням нагрівали у сушильній шафі ШСВ 3,5.3,5.6/3,5 при температурі 150 °С протягом 5 годин. Керамічний порошок ZrO₂–7%Y₂O₃ марки ЦрОИ-7 перед напиленням висушували у сушильній шафі типу СНОЛ-3,5.3,5.3,5/3,5-ІІМ при температурі 700 °С протягом 5 годин. При зберіганні порошків в сушильній шафі при температурі 70...90 °С термін зберігання необмежений, в герметичній тарі з водопоглинаючими реагентами – не більше 90 діб. У коморах (при температурі повітря не нижче 18 °С і відносній вологості не більше 50%) в тарі з полімерної плівки – не більше 5 діб.

Після сушіння порошок треба просіяти для виділення фракції 40...80 мкм (використовують прилад для визначення зернового складу моделі 029, використовуючи сітку номерів 004 і 008.).

Вагу порошків для отримання механічної суміші здійснювали на лабораторних вагах загального призначення, що забезпечують зважування з похибкою не більше 0,05 г за ДСТУ 7270: 2012. В результаті отримана механічна порошкова суміш, що складається з 90% (мас.) Co-Cr-Al-Y-Si і 10% (мас.)

ZrO₂–7% Y₂O₃.

4.2 Підготовка поверхні під нанесення газотермічного покриття

Підготовка поверхні під нанесення газотермічного покриття складається з наступних операцій:

- знежирення;
- захист поверхні, що не підлягає струменево-абразивній обробці;
- струменево-абразивна обробка;
- захист поверхні, що не підлягає нанесенню покриття.

Знежирення поверхні слід проводити по ОСТУ 5.9582-81 із застосуванням зазначених в стандарті водних лужних розчинів.

Струменево-абразивну обробку слід проводити відповідно до ОСТ 5.9829-81. Поверхні, що не підлягають обробці, повинні бути захищені від впливу абразивних частинок екранами з металу або іншого абразивно-стійкого матеріалу (наприклад, гуми, фторопласту і т.д.). Струменево-абразивна обробка — обов'язкова операція в підготовці лопаток до напилювання. Струменево-абразивній обробці піддають поверхні, що напилюються з метою додання їм шорсткості і активації в стаціонарних камерах, в яких не допускається обробка лиття або інших деталей для зняття будь-яких забруднень. Розрив у часі між підготовкою поверхні і напиленням не повинен перевищувати 4-х год. Після обробки поверхню лопатки обдувають стисненим повітрям для видалення частинок абразиву.

Для струменево-абразивної обробки слід застосовувати установку марки 026-7 "Ремдеталь" або інший тип обладнання для струменево-абразивної підготовки поверхні з використанням в якості абразива електрокорунд білий 25A10. Параметр шорсткості поверхневого шару Ra оброблених лопаток знаходиться в діапазоні 1,15-1,17 мкм, що відповідає 7 класу чистоти поверхні. Струменево-абразивну обробку поверхні необхідно проводити на наступному режимі:

Тиск стисненого повітря, МПа 0,2...0,6;

Відстань від зрізу сопла до оброблюваної поверхні, мм 50...120;

Діаметр сопла, мм 8...12;

Кут падіння струменя на оброблювану поверхню, град 60...90;

Лінійна швидкість переміщення пістолета, мм/хв 50...400.

Обробка ведеться в кілька проходів. Зона струменево-абразивної обробки повинна бути більше зони напилення на ширину не менше 5 мм з кожного боку. Після струменево-абразивної обробки необхідно видалити металевий пил з обробленої поверхні. Пил слід видаляти пилососом промислового призначення. На підготовленій до нанесення покриття поверхні не допускається наявності мастила, вологи, пилу, плям від захоплення руками та інших забруднень. Підготовлена поверхня повинна мати сірувато-матовий відтінок. Значення параметрів шорсткості за ГОСТом 9.304-84. Після закінчення процесу підготовки поверхні під напилення категорично забороняється торкатися до підготовленої поверхні руками і брудним інструментом.

При підготовці та транспортуванні, підготовлених до нанесення покриттів деталей, необхідно користуватися знежиреними, чистими інструментами і пристосуваннями, а також чистими брезентовими або бавовняними рукавичками ГОСТ 10354-82.

У разі неможливості нанесення покриття безпосередньо після підготовки, оброблену поверхню необхідно покрити чистою поліетиленовою плівкою для запобігання потрапляння на неї масла, вологи, пилу.

Підготовлені заготовки до нанесення покриття слід зберігати у виробничих приміщеннях при температурі повітря не нижче 15 °С і відносній вологості не вище 70%. Вміст у повітрі корозійно-активних реагентів не допускається.

Термін зберігання заготовок, підготовлених до напилення покриття, тобто перерва між закінченням струменево-абразивної обробки і початком нанесення покриття, не повинен перевищувати 5 годин.

У разі порушення вимог до процесу підготовки, транспортування і зберігання заготівок з обробленою поверхнею рекомендується повторити всю послідовність операцій підготовки.

4.3 Напилення газотермічного покриття

До складу установки для нанесення покриттів також входить роботизована система, що забезпечує рівномірне переміщення плазмотрона відносно трактової поверхні лопаток.

Напилення на підкладку теплозахисного градієнтного покриття здійснювали в три етапи:

1. Напилення підшару з порошку Co-Cr-Al-Y-Si товщина шару 110 мкм;
2. Нанесення проміжного шару з порошкової механічної суміші Co-Cr-Al-Y-Si + +10% (мас.) ZrO_2 –7% Y_2O_3 товщина шару 90 мкм;
3. Напилення керамічного шару з порошку ZrO_2 – 7% Y_2O_3 товщиною 280 мкм.

Безпосередньо після нанесення підшару і проміжного шару заданої товщини напилювали керамічний шар з ZrO_2 –7% Y_2O_3 у наступному режимі [36]:

Сила струму, А.....305

Напруга, В.....115

Плазмотвірний газ.....аргон

Тиск плазмотвірного газу, МПа.....0,15

Транспортуючий газ.....стиснене повітря

Дистанція напилення, мм80

При нанесенні покриття нагрів підкладки не повинен перевищувати 100 – 150 °С.

При напиленні необхідно, щоб встановлені значення параметрів режиму напилення не змінювалися. Необхідну товщину покриття отримують багаторазовим переміщенням плазмотрону і лопатки відносно один одного. Товщина покриття, отримувана за один прохід — 0,04...0,06 мм. Горіння плазмового струменя повинно бути стійким без пульсацій, подача порошку в потік має відбуватися рівномірно, без закупорки отворів для подачі порошку і без потрапляння на напилювану поверхню каплеподібних частинок.

У процесі напилення і по його закінченню контролювати стан напилюваної поверхні щодо відсутності сторонніх включень, тріщин, сколів, відшарувань,

здуття, не проплавлених частинок, місць перегріву. При виявленні ділянок з перерахованими дефектами необхідно визначити можливість відновлення поверхні. Потім провести підготовку поверхні оброблених ділянок та нанести покриття заново.

Товщину нанесеного покриття визначають вимірами лінійних розмірів до і після напилення.

Контроль оброблених покриттів за зовнішнім виглядом проводиться з метою виявлення зовнішніх дефектів – сколів, здуття, відшарувань, тріщин, раковин. Огляд здійснюється за допомогою лупи 10-кратного збільшення ЛІ-3, ЛІ-4 по ГОСТу 25706-83 при коефіцієнті природної освітленості на поверхні виробу не менше 1,5. При висвітленні лампами розжарювання освітленість на рівні робочого місця повинна бути не менше 150 лк, при висвітленні люмінесцентними лампами по ГОСТу 1182-77 не менше 300 лк. При наявності одного із згаданих дефектів виріб бракується.

4.4 Термічна обробка напилених покриттів для спікання кераміки

Для покращення механічних властивостей покриття застосовується термодифузійний відпал.

Режими відпалу вибирають у відповідності з матеріалом деталі і покриття. Термічну обробку за прийнятою технологією здійснювали у вакуумній печі радіаційного нагрівання СНО-1-3-1/16Н1 у наступних режимах: вакуум $2 \cdot 10^{-2}$ Па; температура витримки 1050 ± 5 °С; час витримки 2 години; охолодження разом з піччю у вакуумі до температури навколишнього середовища зі швидкістю $\approx 0,02$ °С/с.

Фазовий аналіз керамічного шару після термічної обробки, здійснений на дифрактометрі ДРОН-3 показав наступний вміст фаз, %: моноклінної – 5; тетрагональної – 25; кубічної – 70.

4.5 Передрекristалізаційна термічна обробка покриттів

Для підвищення функціональних властивостей напиленого покриття.

Зроблено деформаційно-термічна обробка (передрекristалізаційна термічна обробка) напиленого покриття із керамічного шару з порошку $ZrO_2 - 7\% Y_2O_3$

при температурі близькій до температурного порогу рекристалізації. У якості джерела нагрівання застосовували піч з карбідкремнієвим нагрівачем типу КЕНА – ВТ з робочою температурою на поверхні нагрівача до 1450 °С. Для контролю температури використовували ППТ термопару типS (платина - 10% родій/платина). Нагрівання поверхні покриття здійснювати до температури 1300°С з охолодженням, до кімнатної температури зі швидкістю не менше ніж 34°С/с.

4.6 Визначення фізико-механічних властивостей напилених покриттів

Мікротвердість H_{μ} визначалася на приладі ПМТ-3 при навантаженні на індентор 200 г.

Мікротвердість керамічного шару після напилення складала 11,5 Гпа після деформаційно-термічної обробки 13 Гпа.

Знімки мікроструктур отримували за допомогою цифрової камери Delta Optical HDCE-20C, що укомплектована програмним забезпеченням для обробки зображень Score Image 9.0, на оптичному металографічному мікроскопі ММУ-3. вміст тетрагональної фази підвищуються з 25% до 40%, а вміст моноклінної – зменшується та не фіксується.

Пористість визначали за допомогою металографії планіметричним методом. Пористість керамічного шару до і після деформаційно-термічної обробки та складає близько 10%.

Дослідження теплопровідності покриттів проводили за допомогою вимірювача ИТ-λ-400, похибка вимірювань якого становить $\pm 10\%$.

Теплопровідність після передрекристалізації термічної обробки має значення 0.6 Втм/К

4.7 Висновки до розділу 4

Розроблені технологічні рекомендації та технологічна схема процесу щодо напилення плазмових порошкових теплозахисних покриттів $ZrO_2 - 7\%Y_2O_3$ з підвищеними фізико-механічними властивостями

5 ПЛАНУВАННЯ ДІЛЬНИЦІ ДЛЯ ПЛАЗМОВОГО НАНЕСЕННЯ ТЕПЛОЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ

Підведення живлення до установки плазмового напилення покриттів повинно відповідати "Правилам технічної експлуатації електроустановок споживачами і правилам техніки безпеки при експлуатації електроустановок споживачем"; транспортування, збереження та експлуатація балонів з робочими газами – "Правилам улаштування і безпечної експлуатації ємностей, які перебувають під тиском".

5.1 Технічні вимоги до дільниці

Дільниця для плазмового напилення повинна розміщуватися в ізольованих приміщеннях, як правило, на першому поверсі. Проведення повітряних силових і енергетичних магістралей над виробничим приміщенням забороняється. Будівля повинна бути одноповерховою, без горища і підвальних приміщень і мати легку покрівлю вагою не більше 120 кг/м³.

Виробнича дільниця плазмового напилення покриттів повинна мати виробничі і технологічні приміщення:

- Виробниче приміщення (звукоізолюваний бокс, де розміщується джерело живлення, електрометалізатор та інше необхідне обладнання);
- Технологічні приміщення (для збереження і підготовки порошків; для підготовки робочої поверхні під напилювання виробів; розміщення обладнання для експрес-аналізу покриттів).

Для плазмового напилення допускається об'єднання виробничих та технологічних приміщень. Розміщення дільниць у підвальних приміщеннях забороняється.

Вибирати місця розміщення виробничих дільниць треба згідно з санітарними вимогами і ГОСТ 12.1.010-76.

Приміщення повинно мати форму, яка не утворює застійних зон, де накопичуються пил, аерозолі і газ.

Стіни і стеля повинні бути оздоблені звукопоглинаючим матеріалом; матеріал покриття підлоги не повинен утруднювати вологе прибирання. Штучне освітлення бажано люмінесцентне. Висота стелі не менше 3,4 м.

Відповідно до нормативно-технічної документації визначаються основні технічні вимоги до проектування ділянки для плазмового напилювання покриттів.

Під час проектування та організації ділянки для плазмового напилювання необхідно визначити:

- номенклатуру і об'єм напилюваних деталей;
- структуру і організацію виробництва;
- економічну доцільність напилювання, склад працівників, площу і планування ділянки, потребу в електроенергії, стиснутому повітрі і т. ін.

У результаті розрахунку та відповідно до нормативно-технічної документації визначаються основні технічні вимоги до проектування ділянки для електродугового напилювання покриттів.

Просторова організація кожного робочого місця ділянки повинна передбачати оптимальне розміщення технологічного обладнання, оснастки, технологічної документації, інструменту і матеріалів, необхідних для виконання основного процесу.

Мінімальні значення відстаней між робочими майданчиками, робочими місцями, установками і елементами будівель наведені у табл. 5.2.

Найменування	Відстань, м
Прохід між штабелями матеріалів, деталей і <u>т.ін.</u> висотою не більше 1 м	1,0
Проходи між обладнанням	1,5
Відстань між стіною (колоною) та обладнанням	1,0
Проходи навколо робочого місця	1,0
Відстань від стіни (колони) до бокової або тильної сторони верстата	0,8
Ширина проходу між боковими сторонами верстатів:	
при односторонньому русі	1,1
при двосторонньому русі	1,6

При будівництві ділянок з нанесення плазмових покриттів (з підвищеними рівнями шуму) повинні бути передбачені засоби по захисту від шуму і вібрації відповідно до вимог ДГСТ "ССБТ. Шум. Загальні вимоги безпеки", "Санітарних норм проектування промислових підприємств" і СНіП по проектуванню захисту від шуму.

5.2 Компонівка і опис дільниці

Для нанесення таких покриттів необхідне наступне обладнання:

- 1 – камера звукоізоляційна з системою вентиляції (1 шт.);
- 2 – робот маніпулятор IRB2400(1 шт.);
- 3 – поворотний стіл (1 шт.);
- 4 – плазмотрон SG-100(1 шт.);
- 5 – консоль управління моделі 6600XL (1 шт.);
- 6 – шафа управління PLC (1 шт.);
- 7 – джерело живлення PPC-2002 (1 шт.);
- 8 – чиллер - теплообмінник VWK-270/1-S (1 шт.);
- 9 – балони с газам (Аргон, Азот, Водень) ;
- 10 – компресор (1 шт.);
- 11 – ресівер (1 шт.);
- 12 – шафа газоподготовки APS;
- 13 – пристрої подачі порошку Model 1264WL(1 шт.);
- 14 – контролер S4C;
- 15 – уловлювач пилу (циклон) (1 шт.);
- 16 – вентилятор (1 шт.);
- 17 – камера для струминно-корундової обробки (1 шт.);
- 18 – вакумна піч (1 шт.);
- 19 – муфельна піч BR-14S-5 (1 шт.);
- 20 – шафи для зберігання матеріалів та інструменту (1 шт.);
- 21 – стелаж для металізованих виробів (1 шт.);
- 22 – стелаж для деталей (1 шт.);
- 23 – монтажний стіл (1 шт.);

Для проведення робіт на ділянці плазмового напилення покриттів необхідна присутність двох операторів та помічника. Отже, кількість робочих місць повинно бути три.

Проведемо компоновку ділянки.

Схематично зобразимо ділянку для напилення з розміщенням на ній вище вказаного необхідного обладнання (рис. 5.3).

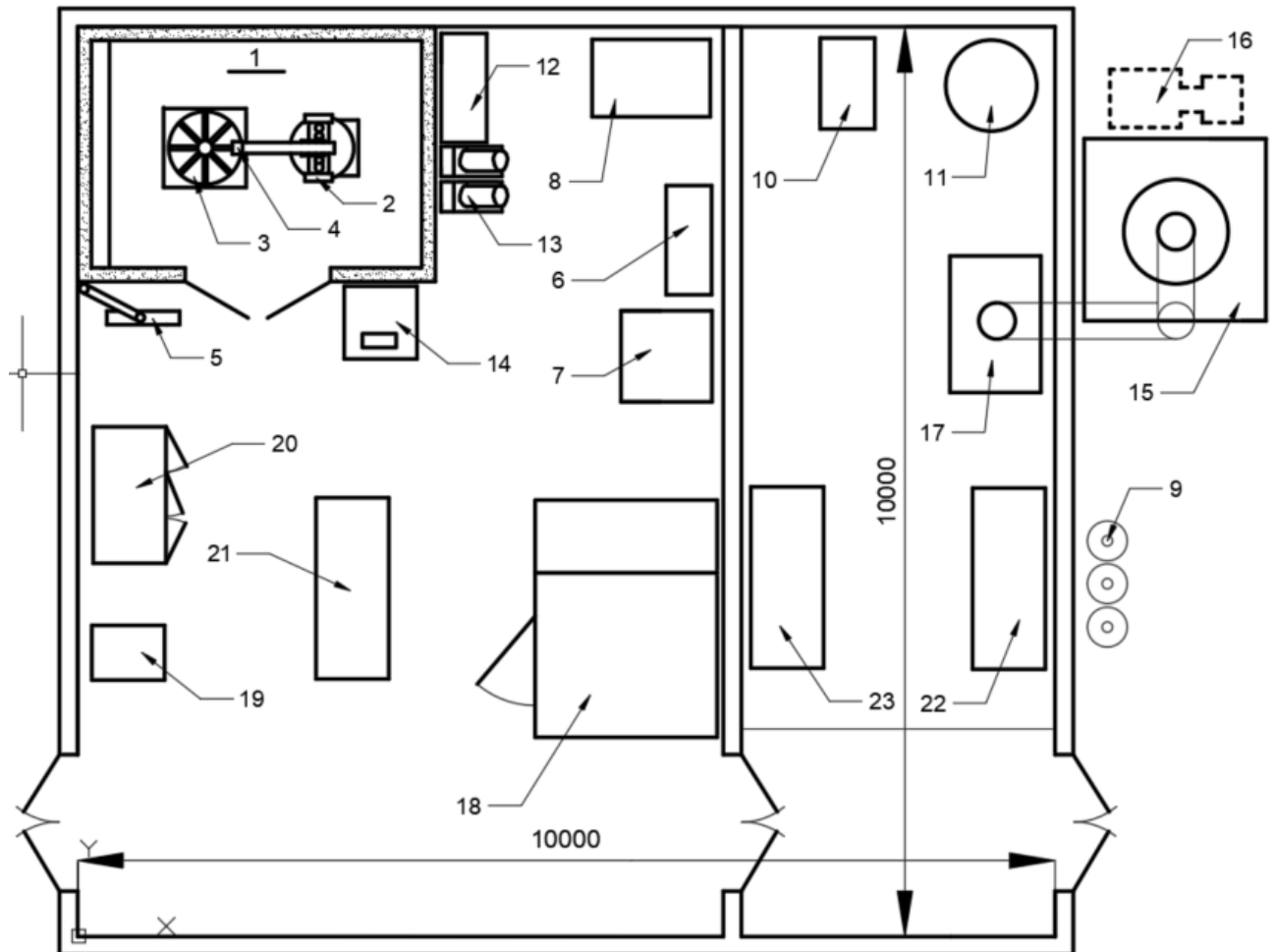


Рисунок 5.3 – Ділянка для плазмового напилення композиційних покриттів.

5.3 Висновки до розділу 5

Таким чином, у даному розділі було смодельовано ділянку для напилення багат шарових теплозахисних покриттів з $ZrO_2 - 7\%Y_2O_3$ та можливістю передрекristалізаційної термічної обробки за річної програми по виготовленню виробів у кількості 1500-2000 шт.

6 РОЗРАХУНОК ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ НАНЕСЕННЯ ПЛАЗМОВИХ ТЕПЛОЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ ІЗ УРАХУВАННЯМ РОЗРОБЛЕНИХ РЕКОМЕНДАЦІЙ

Перспективним напрямком підвищення терміну служби виробів є передрекристалізаційна термічна обробка поверхневого шару покриття, що контактує з зовнішнім середовищем, із поліпшеними властивостями. Одним з інтенсивно розвинутих напрямків є процес атмосферного плазмового напилення (APS) теплозахисних покриттів.

6.1 Вхідні дані

Вхідні дані наведені в таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 – Вхідні дані для проведення розрахунку

Тиск газів на вході в установку:	
аргон, ГОСТ10157-79	0,5 МПа
водень, ГОСТ 3022-80(А)	0,7 МПа
азот, ГОСТ9293-74	0,5 МПа
стиснене повітря, (вимоги за якістю згідно DIN ISO 8573-1 відповідно до класів: залишковий пил 1кл, залишкова вода 4кл, залишкова олія 2кл)	0,5-0,6 МПа
Витрата плазмоутворюючих газів та повітря:	
аргон	до 100 л/хв
водень	до 20 л/хв
азот	до 100 л/хв
стиснене повітря (визначається вимогами технології)	2 - 4м3/год
Транспортуючий газ:	
аргон, витрата на 2 колби	до 30 л/хв
Порошки	металеві, композитні, керамічні
порошкова суміш марки ЦрОИ-7	1700 грн/кг

порошкова суміш ПНХ20К20Ю13-1	900 грн/кг
Фракційний склад порошків	40 – 190 мкм.
Кількість та об'єм колб для порошку	2х1,5 л
Продуктивність (для плазмотрона SG-100):	
при напиленні оксидів та карбідів	3 - 5 кг/год.
при напиленні металів та сплавів	1,5 - 3 кг/год.
Пористість покриття	0,5 - 8%
Адгезія понад	50 МПа
Товщина шару, що напилюється,	від 0,03 мм.
Потужність плазмотронів	до 80 кВт
Теплознімання системи охолодження плазмотрону	35 кВт
Струм дуги плазмотрону	10-950 А, плавно регульований
Напруга на дузі плазмотрону	40-80 В, плавно регульована
Напруга холостого ходу	150 В
Електроживлення установки	3х380В/50Гц
Потужність устаткування:	кВт
- плазмової установки	до 150 кВт
- теплообмінник VWK-270/1-S	до 13 кВт
- робот маніпулятор IRB2400	до 8 кВт
- струменево-абразивної обробки	2 кВт
- компресор	15 кВт
- вакуумна піч	30 кВт
- муфельна піч	4 кВт
Ціна за 1 кВт/год	8,4 грн
Рівень додаткової заробітної плати %	30
Норма амортизації %	20
Норма витрат на поточний ремонт %	5

6.2 Розрахунок зміни собівартості

Розрахунок зміни собівартості проводять на річний обсяг продукції за всіма статтями витрат, які підлягають зміні в результаті нового технологічного процесу. Розрахунок робиться за наступними статтями витрат:

- матеріали для нанесення покриттів;
- витрати на електроенергію;
- основна заробітна плата;
- додаткова заробітна плата;
- відрахування від заробітної плати;
- амортизаційні витрати;
- витрати на поточний ремонт.

6.3 Розрахунок одночасних витрат на впровадження теплозахисних багат шарових покриттів, отриманих атмосферним плазмовим напиленням після передрекristалізаційній термічної обробки.

До одночасних витрат відносяться:

- додаткове оснащення, яке необхідно для впровадження нової технології.

Вартість додаткового устаткування наведено в таблиці 6.2.

Таблиця 6.2 – Найменування й вартість додаткового оснащення

Найменування устаткування	Одиниці виміру	Ціна одніці Обладнення	Кількість одиниць устаткування	Ціна Обладнення
Обладнення для струменево-абразивної обробки	грн.	20000	1	18000
Обладнення для плазмового напилювання покриттів	грн.	6000000	1	6000000
Компресор + ресівер	грн.	55000	1	55000
Вакумна піч	грн.	2000000	1	2000000
Муфельна піч	грн.	20000	1	20000

Витрати на покупку устаткування складають:

$$18000 + 6000000 + 55000 + 2000000 + 20000 = 6093000 \text{ грн.}$$

6.4 Розрахунок технологічної собівартості

Технологічна собівартість містить у собі витрати на основні матеріали, електроенергію, амортизацію, основну та додаткову заробітну плату, нарахування на основну й додаткову заробітну плату.

Вартість основних матеріалів наведена в таблиці 6.3.

Таблиця 6.3 – Вартість матеріалів

Найменування матеріалів	Маса матеріалу на один виріб, кг	Річна програма, шт.	Маса матеріалу для виготовлення річної програми, кг	Ціна 1 кг матеріалу, грн.	Ціна матеріалу на виготовлення річної програми, грн.
Гази для наплення	0,25	1500-2000	375-500	200	87500
Порошок ПНХ20К20Ю13-7	0,02	1500-2000	30-40	900	31500
Порошок ЦрОІ-7	0,005	1500-2000	7,5-10	1700	15000

Витрати матеріалів становлять $87500 + 31500 + 15000 = 134000$ грн.

Розрахунок заробітної плати основним робітникам

На ділянці для плазмового наплення покриттів установлена почасово-преміальна система оплати. Розрахунок річної суми тарифної заробітної плати при цій системі наведений у таблиці 6.4.

Таблиця 6.4 – Розрахунок основної заробітної плати

Необхідний персонал	Розряд	Кількість працівників	Оклад по тарифу грн.	Робочих Днів у році	Річна заробітна плата на робітників грн.
Інженер – технолог/оператор	5	1	18000	250	216000

Оператор	5	1	15000	250	180000
Технік наладчик устаткування	4	1	13000	250	156000
Терміст	4	1	12000	250	144000
Підсобний робітник	3	1	9000	250	108000

Витрати на заробітну плату складають:

$(216 + 180 + 156 + 144 + 108) \times 1000 = 804000$ грн.

Розрахунок витрат на основну й додаткову заробітну плату

Розрахунок витрат основної й додаткової заробітної плати згідно з формулою:

$$\text{ДодатковаЗП} = \frac{\% \text{ДЗП}}{100\%} \times \text{Основний фондЗП}$$

Сума додаткової заробітної плати складе 241200 (грн).

Розрахунок відрахувань від заробітної плати

Таблиця 6.5 – Розрахунок відрахувань від заробітної плати

Сума витрат на основну та додаткову ЗП, грн	Рівень відрахувань, %	Сума відрахувань, грн
804000	45	361800

Відрахування від заробітної плати становлять 361800 грн.

Розрахунок витрат на амортизацію

Таблиця 6.6 – Витрати на амортизацію

Найменування устаткування	Кількість одиниць, шт	Ціна однієї обладнання	Норма Амортизації, %	Сума витрат на амортизацію, грн.
Обладнання для струменево-абразивної обробки	1	20000	20	18000
Обладнання для плазмового напилювання покриттів	1	6000000	20	1200000
Компресор + ресівер	1	55000	20	11000
Вакумна піч	1	2000000	20	400000
Муфельна піч	1	20000	40	8000

Витрати на амортизацію становлять:

$$18000 + 1200000 + 11000 + 400000 + 8000 = 1637000 \text{ грн.}$$

Розрахунок витрат на потоковий ремонт

Таблиця 6.7 – Розрахунок витрат на потоковий ремонт

Найменування устаткування	Кількість одиниць, шт	Ціна однієї обладнання	Норма витрат на ремонт, %	Сума витрат на ремонт, грн.
Обладнання для струменево-абразивної обробки	1	20000	5	1000
Обладнання для плазмового напилювання покриттів	1	6000000	5	300000
Компресор + ресівер	1	55000	5	2750
Вакумна піч	1	2000000	5	100000
Муфельна піч	1	20000	5	1000

З розрахунку видно, що на ремонт устаткування необхідно

$$1000 + 300000 + 2750 + 100000 + 1000 = 404750 \text{ грн.}$$

Розрахунок витрат на електроенергію

Таблиця 6.8 – Витрати на електроенергію

Найменування споживача електроенергії	Одиниці виміру	Витрати на одиницю устаткування	Кількість устаткування	Тривалість включення за зміну, година	Витрати на добу	Ціна електроенергії за добу, грн.	Витрати на річну програму, грн.
1	2	3	4	5	$6 = 3 \cdot 4 \cdot 5$	$7 = 6 \cdot 8,4$	$8 = 7 \cdot 250$
Обладнання для струменево-абразивної обробки	кВт	2	1	4	8	67,20	24528
Обладнання для плазмового напилювання	кВт	150	1	2	300	2520	919800
Компресор	кВт	15	1	4	60	504	183960

Робот маніпулятор	кВт	8	1	4	32	268,8	98112
Теплообмінник	кВт	13	1	4	52	436	159432
Вакумна піч	кВт	30	1	4	120	1008	367920
Муфельна піч	кВт	4	1	2	8	67,2	24528

Загальні витрати на електроенергію становлять:

$$24528 + 919800 + 183960 + 98112 + 159432 + 367920 + 24528 = 1778280 \text{ (грн)}$$

7.5 Техніко-економічні показники нанесення композиційних покриттів

плазмовим методом та передрекристиалізаційна термічна обробка поверхневого шару покриття

Таблиця 6.9 – Технологічна собівартість продукції

№ п.п.	Найменування статей витрат	Витрати на одиницю виробу, грн. (традиційна технологія)	Витрати на одиницю виробу, грн. (удосконалена технологія)
1	Використовувані матеріали: гази(Аргон, Азот, Водень)	50	50
2	Використовувані матеріали: порошки для напилення	26,5	26,5
3	Устаткування	3470	3481
4	Електроенергія	1002	1016
5	Основна заробітна плата	459,4	459,4
6	Додаткова заробітна плата	137,8	137,8
7	Відрахування від заробітної плати	206,7	206,7
8	Витрати на амортизацію	930	935
9	Витрати на поточний ремонт	230,7	231

Собівартість плазмових градієнтних теплозахисних покриттів за вдосконаленою технологією без урахування закупівлі обладнання та витрат на поточний ремонт та амортизацію становить 1896,4 грн, та за звичайної технології 1882,4 грн. Економічний ефект від впровадження розробки слід очікувати за рахунок підвищення зносостійкості покриттів та збільшення ресурсу роботи лопаток з плазмовим покриттям метал/кераміка.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

1. У результаті аналізу науково-технічної літератури стосовно сучасного стану та шляхів розвитку процесу плазмового напилення встановлено, що в останні роки за кордоном активно досліджуються нові керамічні матеріали для зниження теплопровідності та збільшення робочої температури теплозахисних покриттів. На даний момент існує два напрямки у пошуку нових матеріалів керамічного шару. Удосконалення існуючої системи покриття на основі YSZ шляхом додавання одного і більше рідкісноземельних елементів, що дозволяє знизити коефіцієнт теплопровідності λ до значень 1,1–1,5 Вт/(м·К) та збільшити робочу температуру до $\sim 1300^\circ\text{C}$. Та розробка покриттів на основі гафнію або церію, що в перспективі дозволить збільшити робочу температуру до 1500°C і більше і знизити значення λ до 0,9–1,2 Вт/(м·К)..
2. Метод підвищення фізико-механічних властивостей плазмових порошкових теплозахисних покриттів з $\text{ZrO}_2 - 7\%\text{Y}_2\text{O}_3$ передрекristалізаційною термічною обробкою являє собою одним з цих напрямків. Метою даного винаходу є отримання дрібнозернистої структури з розмірами зерен, які забезпечують проявлення наномасштабного ефекту, що дає змогу підвищити фізико-механічні властивості напилених газотермічних покриттів, також зафіксовано зміну фазового складу та зріст терроганальної у структурі покриття, що забезпечує максимальну довговічність ТЗП.
3. Проаналізовано фізико-механічні властивості порошкових матеріалів покриттів, що забезпечують підвищення ерозійної стійкості та жаростійкості робочої поверхні лопаток газотурбінних двигунів.
4. Було досліджено та встановлено оптимальний режим передрекristалізаційної термічної обробки теплозахисного градієнтного плазмового покриття з $\text{ZrO}_2 - 7\%\text{Y}_2\text{O}_3$ що забезпечує підвищення твердості на 13% та зниження теплопровідності керамічного шару на 15% у порівнянні зі станом після напилення за рахунок субструктурних змін. Режим полягає у нагріванні до температури 1300°C , витримці протягом 15 хв та швидкому охолодженні на повітрі.

5. Розроблені технологічні рекомендації та технологічна схема процесу щодо нанесення плазмових градієнтних теплозахисних покриттів $ZrO_2 - 7\%Y_2O_3$ з додатковою передрекристалізаційною термічною обробкою. Розроблено ділянку з використанням передових розробок та обладнання з нанесення плазмових градієнтних теплозахисних покриттів.
8. Розрахована собівартість плазмових градієнтних теплозахисних покриттів за вдосконаленою технологією складає 1896,4 грн та без неї 1882,4 . Встановлено, що собівартість покриття з удосконаленою технологією практично не впливає на собівартість покриттів, що наносяться, але може мати позитивний ефект на збільшення ресурсу лопаток газотурбінних двигунів.

Джерела інформації:

1. Современные теплозащитные покрытия для лопаток газотурбинных двигателей и оборудование для их получения / Н. И. Гречанюк, О. П. Кучеренко, И. Н. Гречанюк, О. П. Василега, Р. В. Минакова. Наукові нотатки, 22330 / №530 / С.92–99
2. Фазово-структурна стабільність жароміцного корозійностійкого сплаву для литих робочих лопаток ГТУ / А.Н. Верхулюк, І.І. Максютя, Ю.Г. Квасницька, Г.П. Мьяльниця, О.В. Михнян // Металознавство та обробка металів – 2016 – № 3. – С. 3 –9.
3. Вибір легуючого комплексу нового корозійностійкого сплаву для соплових лопаток ГТД / Г.П. Мьяльниця, І.І. Максютя, Ю.Г. Квасницька, О.В. Михнян // Металознавство та обробка металів – 2013 – № 2. – С. 29 – 34.
4. Muboyadzhyan S.A., Kablov E.N. Vacuum plasma technique of protective coatings production of complex alloys //МиТОМ. 1995. №2. С. 15–18.
5. Запорізький національний технічний університет Науковий журнал "Вісник двигунобудування" № 1/2015 Стаття : Грешта В.Л. Застосування керамічних

покрытій для захисту деталей ГТД, працюючих в умовах екстремально високих температур

6. Beele, W., Marijnissen, G., Van Lieshout, A. (1999) The evolution of thermal barrier coatings — status and upcoming solutions for today's key issues. *Surface and Coatings Technology*, 120–121, 61–67.
7. V. P. Pankov, A. L. Babayan, M. V. Kulikov, V. A. Kossoy, B. S. Varlamov. Teplozashchitnye pokrytiya lopatok turbin aviacionnyh gazoturbinnih dvigatelej. *Polzunovskiy vestnik*. 2021;1: 161–172
8. Анциферов, В. Н. Порошковая металлургия и напыленные покрытия [Текст] / В. Н. Анциферов, Г. В. Бобров, Л. К. Дружинин и др. // – М.: Металлургия, 1987. – 792 с.
9. Дубовий, О. М. Технологія напilenня покриттів [Текст] / О. М. Дубовий,
10. Zhong, X. Thermal shock behaviour of toughened gadolinium zirconate/YSZ double-layered thermal barrier coating / X. Zhong, H. Zhao, X. Zhou et al. // *J. of alloy and compounds*. – 2014. – № 593. – P. 50 – 55. doi: 10.1016/j.jallcom.2014.01.060
11. Thermal Barrier Coatings With High Fracture Toughness Underlayer For Improved Impact Resistance: pat. 7255940 US. 26.06.2004.
12. Vaben R., Mack D.-E. New Thermal Barrier Coatings (TBC), Forschungszentrum Jülich Online. 10.11.2006 URL: <http://www.fz-juelich.de/ief/ief-1/>
13. Xu Qiang, Pan Wei, Wan Chunlei, Qi Longhao, Miao Hezhao, Wang Fuchi. Promising LaSmZr₂O₇ Ceramic with Pyrochlore Structure for Thermal Barrier Coatings // *Key Engineering Materials Vols*. 2008. V. 368–372. P. 1328–1330.
14. Wen Ma, Yue Ma, Shengkai Gong, Huibin Xu and Xueqiang Cao. Thermal Cycling Behavior of Lanthanum-Cerium Oxide Thermal Barrier Coatings Prepared by Air Plasma Spraying // *Key Engineering Materials Vols*. 2007. V. 336–338. P. 1759–1761.
15. Jingdong Wang, Wei Pan, Qiang Xu, Kazutaka Mori, Taiji Torigoe. Thermal Conductivity of the New Candidate Materials for Thermal Barrier Coatings // *Key Engineering Materials Vols*. 2005. V. 280–283. P. 1503–1506.

16. Jogender Singh, Douglas E. Wolfe, Robert Miller, Jeff Eldridge, Dong-Ming Zhu. Thermal Conductivity and Thermal Stability of Zirconia and Hafnia Based Thermal barrier Coatings by EB-PVD For High Temperature Applications //Materials Science Forum Vols. 2004. V. 455–456. P. 579–586.
17. Ma W., Mack D., Malzbender J., Vaßen R., Stöver D. Yb₂O₃ and Gd₂O₃ doped strontium zirconate for thermal barrier coatings //Journal of the European Ceramic Society. 2008. V. 28. P. 3071–3081.
18. Bansal N.P., Dongming Zhu, Maryam Eslamloo-Grami. Effects of Doping on Thermal Conductivity of Pyrochlore Oxides for Advanced Thermal Barrier Coatings. NASA/TM–2006- 214483.
19. Jing, W. Microstructure and thermal properties of plasma sprayed thermal barrier coatings from nanostructured YSZ / W. Jing, G. Hong, Z. Le, L. Wang, G. Sheng // Journal of Thermal Spray Technology. – 2010. – № 19 (6). – P. 1186 –1194. doi: 10.1007/s11666-010-9535-7
20. Diez, P. The influence of powder agglomeration methods on plasma sprayed yttria coatings / P. Diez, R.W. Smith // Journal of Thermal Spray Technology. – 1993. – № 2 (2). –P. 165 – 172. doi: 10.1007/BF02652025
21. Tingaud, O. Al₂O₃-ZrO₂ finely structured multilayer architectures from suspension plasma spraying / O. Tingaud, A. Denoirjean, J-F. Coudert, P. Fauchais // Journal of Thermal Spray Technology. – 2010. – № 19. – P. 207 – 218. doi: 10.1007/s11666-009-9436-9
22. Kuzmin, V. I., Kartaev, E. V., Vachenko, S. P., Sergachëv, D. V., Kornienko, E. E. Povyishenie effektivnosti plazmennogo napyileniya poroshkovyih pokryitij [Improving the efficiency of plasma spraying of powder coatings]. Vestnik yugorskogo gosudarstvennogo universiteta, 2014, 2 (33), 7–14.
23. Ignatik, A. V., Ivanov, A. I., Smirnov, A. N., Shorikov, V. S. Plazmennyye ustroystva dlya naneseniya pokryitij raznogo funktsionalnogo naznacheniya [Plasma devices for coating various functional purposes]. Aktualnyie problemy aviatsii i kosmonavтики. Tehnicheskie nauki, 2010, 10-11.

24. Kuzmin V. I, Mikhal'chenko A. A., Kovalev O. B., Kartaev E. V., and Rudenskaya N. A. The Technique of Formation of the Axisymmetric Heterogeneous Flow for Thermal Spraying of Powder Materials// J. of Thermal Spray Technology. — 2012 (21), no. 1, 159—168
25. Tsipas S. Thermophysical properties of Plasma Sprayed thermal Barrier Coatings. University of Cambridge. 2005. P. 1–25.
26. Мерчев С. Термобарьерные покрытия. ЗАО «Плакарт». 2011.
<http://www.rusnanonet.ru/articles/53958/>.
27. Miller R.A., Smialek J.L., Garlick R.G. Phase stability in plasmasprayed, partially stabilized zirconia–yttria / In: Science and technology of zirconia. Advances in ceramics. The American Ceramic Society. 1981. V. 3.
P. 241–253.
28. Дубовий О.М. Технологія газотермічного і вакуумно-конденсаційного нанесення покриттів : Підручник /О.М. Дубовий, А.А. Карпеченко, М.М. Бобров. — Миколаїв : видавець Торубара В.В., – 2018. — 202 с.
29. Liang T., Guo H., Peng H. Precipitation phases in the nickel-based superalloy DZ125 with YSZ/CoCrAlY thermal barrier coating // J. Alloy Comp. - 2011. - 509. - P.8542-8548.
30. Sun J., Huang C., Wang J., Liu H. Mechanical properties and microstructure of ZrO₂ – TiN - Al₂O₃ composite ceramics // Materials Science And Engineering: A, 2006. - V. 416, N 1 - 2. - P. 104-108.
31. 2. Sun J., Huang C., Wang J., Liu H. Mechanical properties and microstructure of ZrO₂— TiN—Al₂O₃ composite ceramics // Materials Science And Engineering: A, 2006. — V. 416, N 1—2. — P. 104—108.
32. Kablov E.N., Karachevtsev F.N. Vaporization and thermodynamics of ceramics based on the La₂O₃–Y₂O₃–HfO₂ system studied by the high-temperature mass spectrometric method // Rapid Communications in Mass Spectrometry. 2018. Vol. 32. No. 9. P. 686–694.

33. B. Liang and C. Ding, Thermal Shock Resistances of Nanostructured and Conventional Zirconia Coatings Deposited by Atmospheric Plasma Spraying, Surf. Coat. Technol., 2005, 197, p 185-192
34. Дубовий, О. М. Дослідження можливості підвищення фізико-механічних властивостей плазмових порошкових теплозахисних покриттів з $ZrO_2-7\%Y_2O_3$ передрекристалізаційною термічною обробкою / О. М. Дубовий, А. А. Карпеченко, С. І. Шкурят, М. М. Бобров, Є. Ю. Неделько // Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2017. – № 7 (1229). – С. 49-54. – doi:10.20998/2413-4295.2017.07.07
35. Пат. 88755 Україна, МПК С 23 С 4/18. Спосіб нанесення покриттів / О. М. Дубовий, Т. А. Янковець, А. А. Карпеченко, О. О. Жданов; заявник и патентовласник Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова. – № а 2009 02658, заявл. 23.03.2009; опубл. 10.11.2009, Бюл. № 21.

