

ХЕРСОНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

(повне найменування вищого навчального закладу)

ФАКУЛЬТЕТ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ТРАНСПОРТУ

(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Транспортних систем і технічного сервісу

(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи магістра

магістр

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему: **ТЕХНОЛОГІЇ СТВОРЕННЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ
ДЛЯ ГАЗОТЕРМІЧНИХ ПОКРИТТІВ**

Виконала: студентка 6 курсу, групи 6МА

Спеціальності 132 – Матеріалознавство

(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності)

Тарасенко В.О.

(прізвище та ініціали)

Керівник Проценко В.О.

(прізвище та ініціали)

Рецензент Русанов С.А.

(прізвище та ініціали)

Херсон - 2025 року

ХЕРСОНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ.

(повне найменування вищого навчального закладу)

Інститут, факультет, відділення Інженерії та транспорту
 Кафедра, циклова комісія Транспортних систем і технічного сервісу
 Рівня вищої освіти магістр.
 спеціальність 132 Матеріалознавство
 (шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри _____

П.В. Луб'яний

“ _____ ” _____ 20__ року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА
СТУДЕНТУ

Тарасенко Вікторії Олегівні

1. Тема проекту (роботи) Технології створення композиційних матеріалів для газотермічних покриттів.

керівник проекту (роботи) д.т.н., професор Проценко В.О.,

затверджені наказом вищого навчального закладу від 28.08 2025 року № 351-с.

2 Строк подання студентом проекту (роботи) 10.12.2020 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) технології виготовлення композиційних порошків та їх застосування

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ, 1 Літературний огляд, 2 Методи отримання композиційних порошків 3. Практичне застосування композиційних порошків, отриманих механохімічним легуванням, Висновки, Список використаної літератури.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) матеріали демонстраційної графічної частини формату А4.

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада Консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання _____.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Вступ	02.11.2025	
2	Літературний огляд	10.11.2025	
3	Методи отримання композиційних порошків	16.11.2025	
4	Практичне застосування композиційних порошків, отриманих механохімічним легуванням	23.11.2025	
5	Висновки	03.12.2025	
		10.12.2025	

Студент _____ Тарасенко В.О.
(підпис)Керівник проекту (роботи) _____ Проценко В.О.
(підпис)

РЕФЕРАТ

Актуальність теми. Газотермічні покриття є одним із ключових інженерних інструментів підвищення експлуатаційної надійності деталей, що працюють в умовах інтенсивного зношування, високих температур, корозійного та ерозійного середовищ. Зростання вимог до довговічності та енергоефективності машинобудівної, авіаційної, енергетичної та нафтогазової техніки обумовлює необхідність застосування покриттів із заданими фізико-хімічними властивостями. Саме тому вибір та оптимізація методів виготовлення порошкових матеріалів для газотермічного напилення набувають особливої важливості.

Сучасний розвиток технологій HVOF, плазмового напилення, детонаційного напилення та холодного газодинамічного напилення висуває високі вимоги до структури, гранулометрії, чистоти та фазового складу порошків. Від цих параметрів безпосередньо залежить адгезія, щільність, пористість, термостійкість і зносостійкість отриманих покриттів. Традиційні методи виробництва порошків доповнюються новими підходами — газоатомізацією, плазмовим розпиленням, механічним легуванням, селективним спіканням, що забезпечують контрольовану мікроструктуру та можливість створення композиційних матеріалів із заданими характеристиками.

Глобальна тенденція до підвищення ресурсу деталей, мінімізації витрат на ремонт та впровадження адитивних і поверхнево-інженерних технологій робить дослідження методів виготовлення матеріалів для газотермічних покриттів стратегічно значущим. Особливої ваги набувають питання розроблення нових композиційних порошків, здатних забезпечувати високу зносостійкість, корозійну стійкість і стабільність властивостей при екстремальних температурах.

Отже, вивчення та вдосконалення методів виготовлення матеріалів для газотермічних покриттів є актуальним завданням сучасного матеріалознавства, оскільки дозволяє створювати високоефективні покриття з прогнозованими

експлуатаційними властивостями та забезпечує підвищення надійності критичних елементів технічних систем.

Методи і завдання дослідження. У роботі застосовано комплекс сучасних методів матеріалознавчого аналізу, спрямованих на вивчення процесів отримання порошкових матеріалів та оцінку їх придатності для газотермічного напилення:

1. Аналітичні методи – вивчення наукових публікацій, стандартів та технологічних регламентів щодо виготовлення металевих і композиційних порошків.
2. Порівняльний аналіз технологій – систематизація та порівняння основних методів виробництва порошків (механічні, хімічні, фізичні, комбіновані) за показниками продуктивності, вартості, гранулометрії та властивостей порошку.
3. Металографічні дослідження – аналіз мікроструктури порошків (оптична та електронна мікроскопія) для оцінювання форми частинок, гомогенності та дефектності.
4. Енергодисперсійні дослідження (EDS) для визначення хімічного складу та ступеня легування.
5. Гранулометричний аналіз – визначення розподілу частинок за розмірами та морфологією залежно від обраного методу виготовлення.
6. Фізико-механічні випробування – оцінювання властивостей порошкових матеріалів і напилених покриттів (мікротвердість, адгезія, пористість).

Об’єкт дослідження – Процеси отримання та властивості порошкових матеріалів, що застосовуються для формування газотермічних покриттів.

Предмет дослідження – Методи виготовлення металевих і композиційних порошкових матеріалів, їх структурно-фазові характеристики та вплив цих параметрів на якість і експлуатаційні

властивості газотермічних покриттів.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

Систематизовано та порівняно комплекс сучасних методів виготовлення порошкових матеріалів для газотермічних покриттів з позиції їхнього впливу на морфологію частинок, фазовий склад та придатність до конкретних видів напилення (HVOF, APS, детонаційне, холодне газодинамічне напилення).

Встановлено нові закономірності між технологічними параметрами отримання порошків (швидкість розпилення, температура газу/плазми, швидкість охолодження, енерговитрати механічного легування) та кінцевою структурно-фазовою організацією частинок.

Уточнено вплив морфологічних характеристик порошку (сферичність, пористість, розподіл частинок за розміром, ступінь агломерації) на формування мікроструктури та експлуатаційних властивостей газотермічних покриттів.

Запропоновано критерії вибору оптимальних методів виготовлення порошків залежно від призначення покриття (зносостійкі, корозійно-стійкі, жаростійкі, теплозахисні).

Розроблено узагальнену модель впливу способу отримання порошкового матеріалу на процеси розплавлення, прискорення та формування покриття в газотермічному струмені.

Практичне значення одержаних результатів.

Удосконалені підходи до вибору методів виготовлення порошкових матеріалів зі стабільними властивостями, оптимізованих під конкретні методи газотермічного напилення.

Розроблені критерії оцінювання морфології та фазового складу порошків дають можливість підвищити якість формованих покриттів, зменшити їхню пористість, збільшити адгезію та покращити зносостійкість деталей.

Запропоновані рекомендації щодо структурно-фазових параметрів порошків дають змогу підбирати матеріали для покриттів тепло- та корозійно-стійкого призначення, що збільшує ресурс відповідальних вузлів обладнання.

Отримані результати можуть бути використані в навчальних

дисциплінах з матеріалознавства, інженерії поверхні, технологій напилення та адитивних методів, розширюючи навчально-методичну базу.

Практичні висновки сприяють зниженню собівартості покриттів, оскільки дозволяють обґрунтовано вибирати метод отримання порошку з оптимальною продуктивністю та мінімальними втратами матеріалу.

Магістерська робота представлена: розрахунково-пояснювальна записка та графічної частини. Розрахунково-пояснювальна записка складається з реферату, двох частин, висновків, 19 переліку посилань. Обсяг 90 арк. формату А4.

Ключові слова: газотермічне покриття, композиційний порошок, наноструктурні компоненти, адгезія, пористість, механічні властивості.

ABSTRACT

Relevance of the topic. Thermal spray coatings are one of the key engineering tools for increasing the operational reliability of components that operate under conditions of intensive wear, high temperatures, and corrosive or erosive environments. The growing demands for durability and energy efficiency in mechanical engineering, aviation, power engineering, and the oil and gas industry determine the need for coatings with specified physicochemical properties. Therefore, the selection and optimization of methods for producing powder materials for thermal spraying are of particular importance.

The modern development of HVOF, plasma spraying, detonation spraying, and cold gas-dynamic spraying technologies imposes stringent requirements on the structure, granulometry, purity, and phase composition of powders. Adhesion, density, porosity, thermal resistance, and wear resistance of the resulting coatings directly depend on these parameters. Traditional powder production methods are being supplemented by new approaches—gas atomization, plasma spraying, mechanical alloying, and selective sintering—which ensure controlled microstructure and enable the creation of composite materials with tailored properties.

The global trend toward increasing the service life of components, reducing maintenance costs, and implementing additive and surface-engineering technologies makes the study of methods for producing materials for thermal spray coatings strategically important. The development of new composite powders capable of providing high wear resistance, corrosion resistance, and property stability at extreme temperatures is of particular significance.

Thus, the study and improvement of methods for producing materials for thermal spray coatings represent a relevant task of modern materials science, as they allow the creation of highly efficient coatings with predictable performance characteristics and ensure increased reliability of critical engineering components.

Methods and research objectives

The study employs a set of modern materials science analysis methods aimed at investigating the processes of obtaining powder materials and assessing their suitability for thermal spraying:

1. **Analytical methods** – analysis of scientific publications, standards, and technological regulations on the production of metallic and composite powders.
2. **Comparative analysis of technologies** – systematization and comparison of the main powder production methods (mechanical, chemical, physical, and combined) in terms of productivity, cost, granulometry, and powder properties.
3. **Metallographic studies** – analysis of powder microstructure (optical and electron microscopy) to evaluate particle shape, homogeneity, and defects.
4. **Chemical analysis** – (EDS) researches to determine phase composition and degree of alloying.
5. **Granulometric analysis** – determination of particle size distribution and morphology depending on the selected production method.
6. **Physico-mechanical testing** – evaluation of the properties of powder materials and deposited coatings (microhardness, adhesion, porosity).

Object of the study – Processes of obtaining and properties of powder materials used for forming thermal spray coatings.

Subject of the study – Methods of producing metallic and composite powder materials, their structural and phase characteristics, and their influence on the quality and performance properties of thermal spray coatings.

Scientific novelty of the obtained results

- A comprehensive set of modern methods for producing powder materials for thermal spray coatings has been systematized and compared in terms of their

influence on particle morphology, phase composition, and suitability for various spraying methods (HVOF, APS, detonation, cold gas-dynamic spraying).

- New relationships have been identified between the technological parameters of powder production (spraying rate, gas/plasma temperature, cooling rate, energy consumption during mechanical alloying) and the resulting structural-phase organization of particles.
- The influence of powder morphological characteristics (sphericity, porosity, particle size distribution, degree of agglomeration) on the formation of coating microstructure and performance properties has been clarified.
- Criteria for selecting optimal powder production methods depending on the coating's intended purpose (wear-resistant, corrosion-resistant, heat-resistant, thermal-barrier) have been proposed.
- A generalized model has been developed to describe the influence of powder production methods on melting, acceleration, and coating formation processes in the thermal spray jet.

Practical significance of the obtained results

- Improved approaches to selecting powder production methods with stable properties optimized for specific thermal spraying techniques.
- Developed criteria for evaluating powder morphology and phase composition enable improving coating quality, reducing porosity, increasing adhesion, and enhancing wear resistance of components.
- Recommendations regarding structural-phase parameters of powders allow selecting materials for heat- and corrosion-resistant coatings, thereby extending the service life of critical equipment components.
- The results can be applied in educational disciplines on materials science,

surface engineering, thermal spraying technologies, and additive manufacturing, expanding the teaching and methodological base.

- The practical findings contribute to reducing coating production costs by enabling a justified choice of powder production methods with optimal productivity and minimal material losses.

The **Master's thesis** includes an explanatory note and a graphical section. The explanatory note consists of an abstract, two chapters, conclusions, 19 references, and appendices. The total volume is 90 pages of A4 format.

Keywords: thermal spray coating, composite powder, nanostructured components, adhesion, porosity, mechanical properties.

ЗМІСТ

ВСТУП	10
ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД	
1.1. Призначення газотермічних покриттів	12
1.2. Загальні принципи газотермічного напилення .	
1.3. Методи газотермічного напилення та їх вплив на вибір матеріалу	12
1.4. Класифікація матеріалів для газотермічних покриттів	14
1.5. Перспективні напрями розвитку матеріалів для газотермічних покриттів	15
2. МЕТОДИ ОТРИМАННЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ ПОРОШКІВ	
2.1. Механічні методи	18
2.2. Немеханічні методи	20
2.3. PVD-методи для отримання композиційних порошків	26
3. ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ ПОРОШКІВ, ОТРИМАНИХ МЕХАНОХІМІЧНИМ ЛЕГУВАННЯМ	
3.1. Нанопорошкові матеріали і досвід їх застосування при зміцненні поверхонь наплавленням і напиленням	33
3.2. Розробка плазмотрону для напилення порошкових сумішей з наночастками	34
3.3. Вибір нанопорошкових матеріалів	41
3.4. Підготовка порошкової суміші методом механохімічного легування	46
3.5. Методики випробувань на зношування	47
3.6. Методики випробувань на адгезійну міцність покриттів	50
3.7. Металографічні дослідження	52
3.8. Методика визначення мікротвердості наплавленого металу	54
3.9. Методики електронної мікроскопії та енергодисперсійного аналізу	55
3.10. Формування плазмових покриттів із застосуванням нанорозмірних порошків	55
ВИСНОВКИ	88
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	90

ВСТУП

Сучасний розвиток машинобудування, авіаційної техніки, енергетики та нафтогазового комплексу висуває підвищені вимоги до надійності й довговічності деталей, що працюють в умовах інтенсивного зношування, високих температур, агресивних середовищ та ударно-динамічних навантажень. Одним із найбільш ефективних шляхів підвищення експлуатаційної стійкості таких елементів є застосування газотермічних покриттів. Ці покриття дозволяють суттєво продовжити термін служби обладнання, знизити витрати на ремонт і забезпечити стабільність роботи конструкцій у складних умовах.

Вирішальне значення у формуванні структури та властивостей газотермічних покриттів має вибір порошкових матеріалів. Якість покриття — його адгезія, пористість, мікроструктура, зносостійкість і термостійкість — значною мірою визначається характеристиками порошку: гранулометричним складом, морфологією частинок, чистотою, фазовим складом і однорідністю. Саме тому дослідження методів виготовлення порошкових матеріалів, здатних забезпечити оптимальні властивості покриттів, є актуальною науковою та технічною задачею.

На сьогодні застосовуються різні технології отримання металевих та композиційних порошоків, зокрема газова та плазмова атомізація, механічне легування, хімічні методи осадження, а також комбіновані підходи. Кожен метод формує специфічну структуру порошку, що впливає на поведінку матеріалу під час розпилення, ступінь плавлення та формування покриття. Інтенсивний розвиток газотермічних технологій, зокрема високошвидкісного напилення HVOF, плазмового APS, детонаційного та холодного газодинамічного напилення, вимагає створення порошоків із чітко регульованими властивостями та наноструктурними компонентами.

Отже, дослідження методів виготовлення матеріалів для газотермічних покриттів є важливою складовою розвитку сучасного матеріалознавства та поверхневого інженерінгу. Воно дозволяє оптимізувати процеси формування покриттів, підвищити їх якість і забезпечити надійність роботи критично важливих вузлів і деталей технічних систем.