

УДК 621.7

DOI [https://doi.org/10.15589/znп2025.2\(500\).10](https://doi.org/10.15589/znп2025.2(500).10)

DEPOSITION OF PLASMA ALUMINUM MATRIX COMPOSITE COATINGS

НАНЕСЕННЯ ПЛАЗМОВИХ АЛЮМОМАТРИЧНИХ
КОМПОЗИЦІЙНИХ ПОКРИТТІВ**Yurii O. Yaros**

yaros.amity.mk.ua@gmail.com

ORCID: 0000-0002-5274-3514

Anton A. Karpechenko

anton.karpechenko@nuos.edu.ua

ORCID: 0000-0002-7543-4159

Maksym M. Bobrov

maksym.bobrov@nuos.edu.ua

ORCID: 0000-0002-9098-6912

Anna A. Kondratieva

kondratevaanna633@gmail.com

ORCID: 0000-0002-8470-2813

Aleksandr V. Labartkava

oleksandr.labartkava@nuos.edu.ua

ORCID: 0000-0002-9825-0192

Vira V. Savochkina

vira.savochkina@nuos.edu.ua

ORCID: 0000-0001-7700-4921

Ю. О. Ярослав,

канд. техн. наук, доцент

А. А. Карпеченко,

канд. техн. наук, доцент

М. М. Бобров,

канд. техн. наук, доцент

А. А. Кондратьєва,

аспірантка

О. В. Лабарткава

канд. техн. наук, доцент

В. В. Савочкіна

асистент

*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv**Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв*

Abstract. Purpose. The study aims to develop a technology for depositing aluminum matrix composite coatings using a combined wire and powder plasma spraying method with cost-effective fillers (α -Al₂O₃, γ -Al₂O₃, and kaolin). The primary goal is to enhance the coatings' physical-mechanical and operational properties, such as wear resistance, hardness, and adhesive strength, while maintaining process cost-efficiency.

Method. Coatings were formed using a PU-1 plasma torch. The technological process included: surface preparation via grit blasting; coating deposition by the combined method (ER5356 aluminum wire and powder fillers); heat treatment of some samples at 900 °C to study phase transformations; microstructure analysis, phase composition (X-ray diffraction), and mechanical property evaluation (microhardness, porosity).

Results. Coatings with α -Al₂O₃ exhibited the best properties: microhardness – 18.9 GPa, low porosity (6–8 %), and high corundum content (71.3 %). Using γ -Al₂O₃ required additional heat treatment for the α -phase transition, increasing microhardness to 4.2 GPa. Kaolin as a filler raised microhardness to 820 MPa but caused agglomerate formation and higher porosity. The combined spraying method ensured uniform filler distribution and cost-effectiveness.

Scientific novelty. An innovative approach to forming composite coatings by combining wire and powder plasma spraying is proposed. The influence of filler type (α -Al₂O₃, γ -Al₂O₃, kaolin) on microstructure and coating properties was established. The effectiveness of heat treatment in improving γ -Al₂O₃-based coatings was demonstrated.

Practical importance. The technology enables cost-effective coatings with enhanced performance, suitable for high-wear, high-temperature, and aggressive environments. The results can be applied in shipbuilding, aerospace, and other industries requiring surface protection. A promising direction is optimizing natural fillers (e.g., kaolin) to further reduce costs.

Key words: composite coatings; plasma spraying; porosity; microstructure; microhardness.

Анотація. Мета. Дослідження спрямоване на розробку технології нанесення композиційних алюмоматричних покриттів методом комбінованого дрітного та порошкового плазмового напилення з використанням доступних наповнювачів (α -Al₂O₃, γ -Al₂O₃ та каоліну). Основна мета полягає у покращенні фізико-механічних та експлуатаційних властивостей покриттів, таких як зносостійкість, твердість та адгезійна міцність, при збереженні економічної ефективності процесу.

Методика. Для формування покриттів використовували плазмотрон марки ПУН-1. Технологічний процес включав: підготовку поверхні зразків струменево-абразивною обробкою; нанесення покриття комбінованим методом (алюмінієвий дріт марки ER5356 та порошкові наповнювачі); термічну обробку частини зразків при 900 °С для дослідження фазових перетворень; аналіз мікроструктури, фазового складу (рентгенофазовий аналіз) та механічних властивостей (мікротвердість, пористість).

Результати. Покриття з $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ показали найкращі характеристики: мікротвердість – 18,9 ГПа, низька пористість (6–8 %), високий вміст корунду (71,3 %). Використання $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ потребувало додаткової термічної обробки для переходу в α -фазу, що підвищило мікротвердість до 4,2 ГПа. Каолін як наповнювач збільшив мікротвердість до 820 МПа, але спричинив утворення агломератів та підвищену пористість. Комбінований метод напилення забезпечив рівномірний розподіл наповнювача та економічну ефективність.

Наукова новизна. Запропоновано інноваційний підхід до формування композиційних покриттів шляхом поєднання дрітного та порошкового плазмового напилення. Встановлено вплив типу наповнювача ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, каолін) на мікроструктуру та властивості покриттів. Доведено ефективність термічної обробки для покращення властивостей $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ -покриттів.

Практична значимість. Технологія дозволяє створювати економічно вигідні покриття з покращеними експлуатаційними характеристиками, придатними для застосування в умовах підвищеного зношування, високих температур та агресивних середовищ. Результати можуть бути використані у суднобудуванні, авіаційній промисловості та інших галузях, де потрібне захищення поверхонь деталей. Перспективним напрямом є оптимізація використання природних наповнювачів (наприклад, каоліну) для подальшого зниження собівартості.

Ключові слова: композиційні покриття; плазмове напилення; пористість; мікроструктура; мікротвердість.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Найбільш вразливим елементом у системі «деталь-робоче середовище», що визначає допустимі умови експлуатації, є поверхня деталі. Використання виробів зі спеціальними покриттями, нанесеними методами газотермічного напилення, є економічно доцільним. Однак такі покриття не завжди забезпечують достатній рівень фізико-механічних та експлуатаційних властивостей, зокрема необхідну твердість, міцність зчеплення та стійкість до зносу. Сучасні напрями у розвитку технології газотермічного напилення здебільшого орієнтовані на покращення властивостей покриттів шляхом застосування високошвидкісних методів. Використання надзвукових високотемпературних струменів дозволяє отримувати покриття з високими показниками властивостей завдяки наданню частинкам напилювального матеріалу великої кінетичної енергії. Проте недоліками таких покриттів є їхня висока собівартість через використання горючих та інертних газів, необхідність у дорогому обладнанні для нанесення, а також підвищені вимоги до кваліфікації персоналу. Більш ефективним є підхід, спрямований на покращення комплексу фізико-механічних та експлуатаційних властивостей поверхні шляхом створення композиційних покриттів, що складаються з металевої основи та частинок зміцнювальної фази, здебільшого оксидів, карбідів, боридів тощо.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Для їх нанесення застосовують як традиційні технології електродугового [1, с. 142; 2, с. 310], газополуменевого [3, с. 2], так і атмосферного плазмового напилення [4, с. 1712; 5, с. 2167]. Так у роботах [1, с. 143; 2, с. 312] для нанесення електродугових композиційних покриттів використовують спеціальний порошковий дріт. При застосуванні таких дрітів

спостерігається підвищення пористості, зниження адгезійної та когезійної міцності напилених покриттів з одночасним підвищенням їх вартості у порівнянні з покриттями з суцільного дроту. Газополуменеві композиційні покриття характеризуються високою пористістю та низьким рівнем механічних властивостей, що пояснюється недостатньою температурою струменя для плавлення керамічних частинок зміцнювальної фази. Одним з найперспективніших є застосування плазмового напилення для формування композиційних покриттів. Найбільш поширеним технологічним рішенням є застосування порошкових сумішей, що дає можливість отримати композиційні покриття з різноманітною мікроструктурою та властивостями, яких важко досягти за допомогою однотипних матеріалів. Завдяки змішуванню порошків різного складу, таких як метал-кераміка [6, с. 2385] або метал-карбід [7, с. 116], можна адаптувати властивості покриття до конкретних вимог. Однак використання сумішей порошків мікронного розміру призводить до нерівномірного розподілу компонентів у плазмовому струмені та покритті, що негативно впливає на механічні та експлуатаційні властивості. Також виникають труднощі з повним проплавленням всіх частинок, особливо якщо вони мають різні температури плавлення. Це призводить до утворення пор у структурі покриття, що знижує його зносостійкість, щільність та адгезію. Тому для ефективного напилення таких покриттів потрібне ретельне налаштування технологічних параметрів процесу, що вимагає значної кваліфікації персоналу та точного обладнання, що підвищує складність і витрати. Для вирішення проблем з рівномірним розподілом частинок зміцнювальної фази застосовують у якості напилюваного матеріалу агломеровані та гранульовані порошки різноманітних складів, які використовують, наприклад, при плазмовому напиленні у роботі [8, с. 10548].

Однак, такі напилювані матеріали часто мають слабкі внутрішні зв'язки між частинками, що може призвести до їх розшарування при високих температурах плазмового струменя. Також вони можуть розпадатися в потоці плазми, у результаті чого частина матеріалу не закріплюється на підкладці, що знижує ефективність процесу і спричиняє втрати матеріалу.

Нанесення композиційних плазмових покриттів із нанопорошків є інноваційним підходом, який дозволяє створювати покриття з унікальними характеристиками. Використання нанорозмірних частинок сприяє зменшенню пористості, підвищенню твердості, зносостійкості та адгезійної міцності, що особливо актуально для умов інтенсивного зношування, високих температур та корозійного середовища. Щодо методів нанесення наноструктурованих покриттів, то більшість з них полягає у використанні агломерованих порошків з нанорозмірними частинками [9, с. 3]. Однак слід відзначити ряд проблем з підготовкою таких напилюваних матеріалів та їх подачею до високотемпературного струменя. Останнім часом перспективним вважається використання суспензій з нанорозмірними як керамічними так і металевими частинками [10, с. 2]. Через високий рівень міжчастинкових сил наночастинки можуть утворювати конгломерати, що ускладнює рівномірну подачу до високотемпературного струменя. Для подолання цієї проблеми часто використовуються спеціальні добавки або технології суспензійного напилення, що значно ускладнює і підвищує вартість процесу та вимагає використання передових систем подачі порошку і тонкого налаштування параметрів.

Для покращення властивостей у складних умовах експлуатації протягом останніх кількох десятиліть було розроблено та досліджено композитні покриття на основі алюмінію, що поєднують переваги алюмінієвої матриці та керамічної зміцнювальної фази. Щодо композиційних покриттів на основі алюмінію, апробовано кілька видів кераміки для зміцнення м'якої алюмінієвої матриці, таких як Al_2O_3 [11, с. 248], SiC [12, с. 1], B_4C [13, с. 3] і TiC [14, с. 1188], головним чином через високу твердість та хімічну стабільність цих частинок. Вказані керамічні частинки можуть суттєво підвищити зносостійкість покриттів на основі алюмінію. Однак їх вміст має бути регульованим для досягнення оптимального балансу між корозійною стійкістю, зносостійкістю та механічними властивостями. Завдяки гарній сумісності та низькій вартості, частинки саме Al_2O_3 різко виділяються серед інших кандидатів для поєднання з алюмінієвою матрицею для формування простих композитних покриттів системи Al/Al_2O_3 .

ВИДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

У даній роботі, на відміну від попередньо розглянутих, пропонується використання поєднання дрітного та порошкового плазмового напилення для формування композиційних покриттів системи Al/Al_2O_3 .

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою даної роботи є нанесення плазмових алюмоматричних композиційних покриттів з використанням дешевих наповнювачів (α - та γ - Al_2O_3) та дослідження їх мікроструктури та властивостей.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Поверхню зразків перед напиленням підготовляли за допомогою струменево-абразивної установки марки 026-7 «Ремдеталь». Для абразивної обробки застосовували електрокорунд марки 7Б та шліфзерно номер 125. Режим обробки наведений у таблиці 1. Процес обробки здійснювався в кілька проходів.

Таблиця 1. Технологічний режим струменево-абразивної обробки поверхні перед напиленням

Параметр обробки	Значення параметру
Тиск стисненого повітря, МПа	0,4–0,6
Відстань від зрізу сопла до оброблюваної поверхні, мм	100–150
Діаметр сопла, мм	12
Кут падіння струменя на оброблювану поверхню, град	60–90
Лінійна швидкість переміщення пістолета, мм/хв	50–400

Контроль якості обробленої поверхні здійснювався за допомогою візуального огляду. Після струменево-абразивної обробки поверхня сталевих пластин і зразків, які призначались для дослідження мікроструктури, набувала сірувато-матового відтінку. Рівень шорсткості обробленої поверхні становив $Rz = 38...75$ мкм. Для нанесення композиційних покриттів використовували плазмотрон марки ПУН-1. Технологічний режим напилення складав: напруга на дузі 150 В, сила струму 130 А, дистанція напилювання 180 мм, витрати плазмотвірного газу $6,5$ м³/год; тиск транспортувального газу 0,01 МПа. В якості плазмотвірного і транспортувального газу використовували стиснене повітря. Для формування металеві матриці використовували алюмінієвий дріт марки ER5356 діаметром 1,2 мм. Для введення наповнювача у вигляді α та γ - Al_2O_3 використовували подачу порошкового матеріалу одночасно з розпиленням дроту плазмовим струменем. Рентгенофазовий аналіз здійснювали за допомогою дифрактометра AXRD Benchtop (виробник PROTO США/Канада).

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Результати дослідження мікроструктури отриманих композиційних покриттів системи Al - γ - Al_2O_3 наведено на рис. 1.

Аналіз наведених мікроструктур показує, що межа розділу характеризується наявністю включень і несущільностей. Це пояснюється частковим окисленням напилюваного матеріалу та підкладки під час

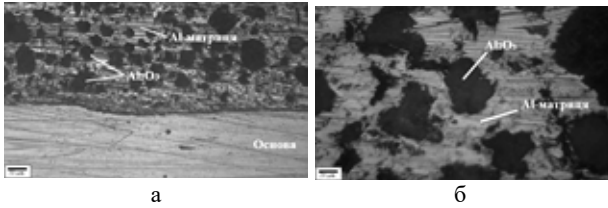


Рис. 1. Мікроструктура композиційного плазмового покриття системи Al- γ -Al₂O₃ на різних збільшеннях: а – $\times 120$; б – $\times 500$

формування покриття. У покритті чітко ідентифікуються 3 фази: чорна – ймовірно, пори; сіра – частинки порошку оксиду алюмінію; світла – алюмінієва матриця (рис. 1 а). При великому збільшенні (рис. 1 б) спостерігаються місця відокремлення порошкових частинок оксиду алюмінію через недостатнє їх проплавлення в плазмовому потоці (низька потужність процесу). Можливо, порошок оксиду має губчасту структуру, що також призводить до часткового відокремлення від металевої матриці. Мікротвердість частинок оксиду алюмінію, виміряна на твердомірі ПМТ-3 при навантаженні на індентор 100 г, склала 1,3 ГПа.

Відомо, що набагато вищі фізико-механічні властивості має саме α -Al₂O₃ (корунд). Формування α -Al₂O₃ в залежності від сукупності факторів лежить в інтервалі температур 900–1350 °С. З огляду на це проводили термічну обробку сформованих покриттів при температурі 900 °С, мікроструктура яких наведена на рис. 2.

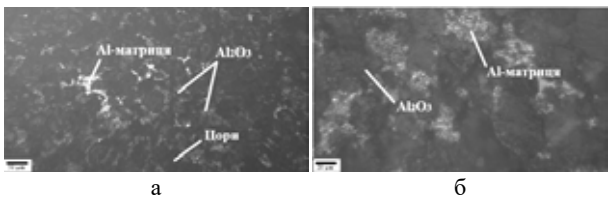


Рис. 2. Мікроструктура композиційного плазмового покриття системи Al- γ -Al₂O₃ після термічної обробки (900 °С, витримка 2 год): а – $\times 120$; б – $\times 500$

Аналіз наведених мікроструктур показує, що у покритті добре ідентифікуються 3 фази: чорна – ймовірно пори; сіра – частинки оксиду алюмінію (α , γ -фаз); світла – алюмінієва матриця (рис. 2 б). Слід зазначити значне зменшення кількості металевої світлої фази порівняно із станом після напilenня. Це пояснюється окисненням алюмінію у процесі термічної обробки. При цьому збільшується кількість сірої фази – оксиду алюмінію (α , γ -фаз). Мікротвердість частинок оксиду алюмінію, виміряна на твердомірі ПМТ-3 при навантаженні на індентор 100 г, склала 4,2 ГПа.

Дифрактограму отриманих зразків наведено на рис. 3.

Результати фазового аналізу представлено у табл. 2.

Слід відмітити, що рентгенофазовий аналіз показує появу 65,5 % α -Al₂O₃ та 13,5 % γ -Al₂O₃, що пояснюється фазовим $\gamma \rightarrow \alpha$ перетворенням при підвищених температурах.

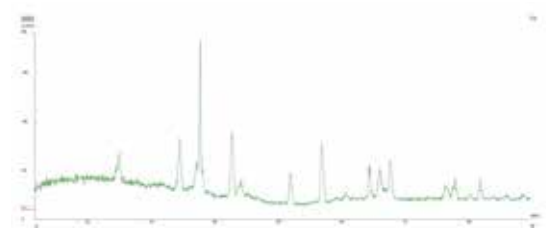


Рис. 3. Дифрактограма композиційного плазмового покриття системи Al- γ -Al₂O₃ після термічної обробки (900 °С, витримка 2 год)

Таблиця 2. Результати рентгенофазового аналізу покриттів

Фаза	Кількість, %
α -Al ₂ O ₃	65,5
Алюміній (Al)	20,9
γ -Al ₂ O ₃	13,5

Перспективним вважається використання природних мінералів у якості наповнювачів при виробництві композиційних матеріалів. Так, наприклад, каолін має високу стійкість до підвищених температур. Це дозволяє збільшити міцність та зносостійкість алюмінієвих матриць. У результаті, композити з алюмінієвою матрицею та частинками каоліну можуть використовуватися в умовах, де матеріали піддаються механічним навантаженням та стиранню. Також використання таких наповнювачів дозволяє знизити собівартість виробів порівняно з використанням дорогих армуючих матеріалів, таких як вуглецеві волокна або керамічні домішки. Щодо алюмоматричних композитів то додавання каоліну забезпечує підвищення твердості, теплопровідності та теплоємності. Так у роботі [15, с. 1] запропоновано додавання каоліну при виробництві композитів з алюмінієвою матрицею за допомогою литва з перемішуванням. Встановлено, що включення 7,5 та 15 % мас. Каоліну збільшило питому теплоємність матриці з 474,3 до 564 Дж·кг⁻¹·°С⁻¹ та з 474,3 до 679,03 Дж·кг⁻¹·°С⁻¹ відповідно. Одночасно спостерігалось підвищення твердості матриці з 72,11 до 81,38 НВ і з 72,11 до 82 НВ відповідно. Твердість композитів, зміцнених каоліном, вища, ніж у композитів, зміцнених кремнеземним піском. Що автори пояснюють вищою молекулярною масою каоліну.

У даній роботі використовували порошок каоліну після термічної обробки для видалення вологи (600 °С, витримка 2 год). Розмір частинок порошку характеризується дрібним розміром від 5 до 40 мкм, що створює труднощі при його подачі до плазмового високотемпературного струменя. Мікроструктура отриманих покриттів показана на рис. 4.

Аналіз наведених мікроструктур показує, що межа розділу характеризується наявністю включень та несучільностей. Це пояснюється частковим

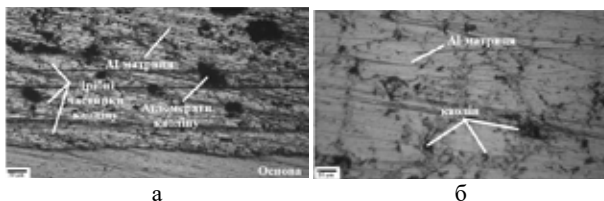


Рис. 4. Мікроструктура композиційного плазмового покриття системи Al-каолін на різних збільшеннях: а – $\times 120$; б – $\times 500$

її окисленням у процесі формування покриття. У покритті добре ідентифікуються 3 фази: чорна пористість; сіра – порошок частки каоліну; світла – алюмінієва матриця (рис. 4 а). Наявність великих за розмірами пір пояснюється формуванням агломератів частинок каоліну через їх дрібний розмір і, як наслідок, їх низьку температуру при підльоті до підкладки. Погано проплавлені агломерати викиришуються у процесі підготовки поперечного шліфу і утворюють пори більшого розміру з сіткою розгалужених подряпин. При великому збільшенні рис. 4 б добре проглядається осколкова форма дрібних порошкових частинок каоліну, закріплених в алюмінієвій матриці. Мікротвердість традиційного ненаповненого алюмінієвого покриття складає 639 МПа, додавання порошку каоліну забезпечує підвищення мікротвердості до 820 МПа.

Результати дослідження мікроструктури отриманих композиційних покриттів системи Al- α -Al₂O₃ наведено на рис. 5.

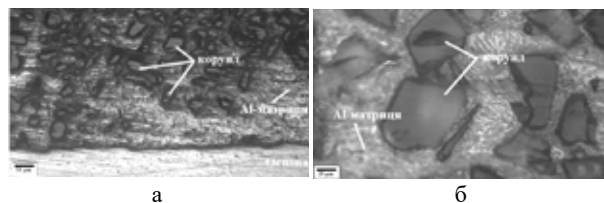


Рис. 5. Мікроструктура композиційного плазмового покриття системи Al- α -Al₂O₃ на різних збільшеннях: а – $\times 80$; б – $\times 500$

Аналіз наведених мікроструктур показує, що межа розділу покриття-підкладка характеризується наявністю включень і несучільностей. У покритті чітко ідентифікуються 3 фази: чорна – пористість; сіра – частинки порошку корунду; світла – алюмінієва матриця (рис. 5 а). При великому збільшенні (рис. 5 б) добре видно осколкову форму частинок корунду, при цьому практично відсутні зони їх відокремлення від металевої матриці. Мікротвердість частинок корунду, виміряна на твердомірі ПМТ-3 при навантаженні на індентор 200 г, склала 18,9 ГПа. Покриття також характеризується досить низькою пористістю (6–8 %) порівняно з іншими раніше отриманими композиціями. Також на межі розділу концентрація частинок корунду низька (через низьку потужність напilenня та недостатню температуру), а ближче до поверхні вона починає зростати (через закріплення в пластичному нагрітому

алюмінії) і складає близько 60–70 % (по площі). Дифрактограму зразків показано на рис. 6.

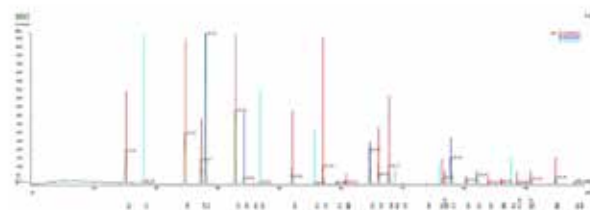


Рис. 6. Дифрактограма композиційного плазмового покриття системи Al- α -Al₂O₃

Результати фазового аналізу представлено у табл. 3.

Таблиця 3. Результати рентгенофазового аналізу покриттів

Фаза	Кількість, %
α -Al ₂ O ₃	71,3
Алюміній (Al)	27,6
Кремній (Si)	1,1

Слід зазначити, що рентгенофазовий аналіз показує наявність фази корунду на рівні 71,3 % і 27,6 % металевого алюмінію, що добре корелює з результатами металографічного аналізу поперечних шліфів.

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Отримані результати дослідження свідчать про ефективність комбінованого підходу до плазмового напilenня композиційних алюмоматричних покриттів із використанням дроту та порошкових наповнювачів. Основна увага зосереджувалася на впливі різних типів армувальних частинок – γ -Al₂O₃, α -Al₂O₃ та каоліну – на мікроструктуру, фазовий склад, твердість і рівень пористості покриттів.

γ -Al₂O₃ у якості наповнювача продемонстрував помірні зміцнювальні властивості, проте аналіз мікроструктури показав наявність дефектів зчеплення частинок з металевою матрицею. Недостатнє проплавлення оксидних частинок, ймовірно через низьку температуру в плазмовому струмені, призвело до викиришування γ -фази з поверхні. Це обмежує можливість використання таких покриттів у вузлах з підвищеним тертям або динамічними навантаженнями. Водночас проведення термічної обробки при 900 °C забезпечило фазове перетворення $\gamma \rightarrow \alpha$, що підтверджується збільшенням мікротвердості до 4,2 ГПа та появою 65,5 % α -фази за даними рентгенофазового аналізу. Таким чином, обробка після напilenня є доцільною для підвищення експлуатаційних властивостей γ -оксидних покриттів.

Найбільш оптимальним з точки зору мікроструктурної цілісності та експлуатаційних характеристик виявилось використання α -Al₂O₃ (корунду). Частинки корунду рівномірно розподілені в алюмінієвій матриці, характеризуються хорошим зчепленням із металом, що підтверджено відсутністю зон розшарування

або відокремлення. Висока мікротвердість (18,9 ГПа) та низький рівень пористості (6–8 %) свідчать про ефективне зміцнення та щільну структуру покриття. Варто зазначити, що концентрація армувальних частинок є неоднорідною (градієнтною): у примежовій зоні вона менша, тоді як у поверхневій частині зростає до 60–70 % за площею. Такий ефект пояснюється закріпленням частинок у пластичному нагрітому алюмінії при зниженій швидкості кристалізації. За результатами фазового аналізу виявлено, що покриття містить 71,3 % корунду – це підтверджує домінування твердої фази в структурі матеріалу, що забезпечує високі робочі показники у жорстких умовах.

Використання природного мінералу, каоліну як наповнювача, є перспективним з погляду зниження вартості та підвищення ресурсної ефективності. Однак його застосування супроводжується технічними труднощами. Через дрібнозернисту фракцію (5...40 мкм) каолінові частинки мають схильність до агломерації, що призводить до формування макропор у структурі покриття. Аналіз поперечних шліфів показав наявність великих дефектів у зоні основопокриття, пов'язаних із розшаруванням агломератів. Попри це, механічні властивості покриття значно покращуються: мікротвердість зростає з 639 до 820 МПа. Таким чином, при оптимізації технологічних параметрів та покращенні дисперсності порошку каоліну можливо досягти збалансованого поєднання вартості та якості.

На основі проведеного аналізу можна зробити висновок, що характер зміцнювальної фази, її морфологія, термічна стабільність, ступінь проплавлення у плазмовому струмені та розмір частинок є ключовими параметрами, що визначають якість сформованих композиційних покриттів. Найкращі результати

досягнуто при використанні α - Al_2O_3 , тоді як γ - Al_2O_3 потребує додаткової термічної обробки, а каолін – покращення методів подачі.

У довгостроковій перспективі доцільним є використання адаптивного технологічного підходу, що дозволяє змінювати тип зміцнювальної фази залежно від експлуатаційних умов (наприклад, зниженого навантаження чи агресивного середовища), при цьому зберігаючи доступність та економічність виробництва.

ВИСНОВКИ

1. Запропоновано та реалізовано технологію нанесення композиційних алюмоматричних покриттів методом комбінованого дротяного та порошкового плазмового напилення, що забезпечує більш рівномірний розподіл зміцнювальної фази та зменшення пористості покриттів. Використання доступних зміцнювальних матеріалів, таких як α - та γ - Al_2O_3 і каолін, дозволяє досягти покращення фізико-механічних характеристик при збереженні економічної ефективності процесу.
2. Встановлено, що γ - Al_2O_3 забезпечує покриття з початковим зміцненням, але має обмежену міцність зв'язку з матрицею; термообробка за 900 °C сприяє фазовому перетворенню $\gamma \rightarrow \alpha$, що покращує твердість покриття; α - Al_2O_3 (корунд) дозволяє формувати покриття з найвищими показниками мікротвердості (18,9 ГПа) та найменшою пористістю (6–8 %); каолін сприяє підвищенню мікротвердості покриття, проте ускладнює рівномірне нанесення через утворення агломератів.
3. Показано, що використання дешевих наповнювачів у поєднанні з доступним обладнанням дозволяє створювати ефективні композиційні покриття з покращеними експлуатаційними властивостями.
4. Перспективними напрямками подальших досліджень є оптимізація параметрів напилення для зменшення пористості покриттів з каоліном та розширення номенклатури природних наповнювачів.

REFERENCES

- [1] Wang, Y., Sun, C., Sun, J., Zhao, W., Dong, L., Li L., Meng, F. (2015). Erosion behaviour of arc sprayed FeTi/CrB MMC coating at elevated temperature, *Surface and Coating Technology*, 262, 141–47. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.12.027>
- [2] Fizi, Y., Mebdoula, Y., Lahmar, H., Djieraf, S., Benbahouche, S. (2015). Adhesion of FeCrNiBSi-(W-Ti)C wire-arc deposited coatings onto carbon steel substrates determined by indentation measurements and modelling, *Surface and Coating Technology*, 268, 310–16. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.11.004>
- [3] Jamshidi, R., Bayat O., Heidarpour, A. (2019). Tribological and corrosion behaviour of flame sprayed Al-10wt% Ti_3SiC_2 composite coating on carbon steel, *Surface and Coating Technology*, 358, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.10.087>
- [4] Huang, Y., Liu, M., Peng, Q. (2024). Study on Properties of Pure Al Coatings and Al/SiC Composite Coatings by Plasma Transferred Wire Spraying, *Journal of Thermal Spray Technology*, 33, 1709–1724. <https://doi.org/10.1007/s11666-024-01775-7>
- [5] Liu, M., Peng, Q., Huang, Y. (2024). Influencing Factors and Process Optimization of Al/SiC Powder-cored Wires by Plasma Transferred Wire Arc Spraying, *Journal of Thermal Spray Technology*, 33, 2167–2183. <https://doi.org/10.1007/s11666-024-01823-2>
- [6] Prashar, G., Vasudev, H. (2022). Structure–Property Correlation of Plasma-Sprayed Inconel625- Al_2O_3 Bimodal Composite Coatings for High-Temperature Oxidation Protection, *Journal of Thermal Spray Technology*, 31, 2385–2408. <https://doi.org/10.1007/s11666-022-01466-1>
- [7] Tumbusova, I., Dautov, S., Dzhurinskiy, D. (2025). A Comparative Analysis of Microstructure and Mechanical Properties of Cr3C2-NiCr Composite Coatings Deposited by APS and HVOF Techniques, *Journal of Thermal Spray Technology*, 36, 116–128. <https://doi.org/10.1007/s11666-024-01915-z>
- [8] Yan, J., Xu, J., Rafi, U., Wang, Y., Fei-Liu, L. (2015). Preparation of agglomerated powders for air plasma spraying MoSi_2 coating, *Ceramics International*, 41, 10547–10556. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.04.149>

- [9] Xue, Z., Zhu, Y., Yu, H., Shi, M., Liu, X., Zhang, S. (2022). Nano-agglomerated powder and thermal shock cycling property of 8YSZ nano-structured thermal barrier coating, *Surface and Coating Technology*, 433, 128173. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128173>
- [10] Rahman, M., Profili, J., Stafford, L., Moreau, C. (2024). Surface preparation of aluminium by atmospheric-pressure plasma jet for suspension plasma sprayed ceramic coatings, *Surface and Coating Technology*, 476, 130–175. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.130175>
- [11] Cong, D., Li, Z., He, Q., Chen, H., Zhao, Z., Zhang, L., Wu, H. (2017). Wear behaviour of corroded Al-Al₂O₃ composite coatings prepared by cold spray, *Surface and Coating Technology*, 326, 247–254. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.07.063>
- [12] Eyvazi, Z., Abdollah-zadesh, A., Seraj, R., Azarniya, A. (2024). Effect of SiC content on the microstructure and wear behaviour of cold-spray Al-SiC coatings deposited on AZ31 alloy substrate, *Surface and Coating Technology*, 489, 131–170. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2024.131170>
- [13] Zhao, L., Zhou, D., Xie, G., Peng, Y., Ciu, X., Wang, J., Xiong, T. (2023). Unraveling the influence of Al particle size on microstructure and tribological properties of cold sprayed Al/B₄C composite coatings, *Materialstoday Communications*, 34, 105–257. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.105257>
- [14] Yang, L., Li, Z., Zhang, Y., Wei, S., Liu, F. (2018). Al-TiC in situ composite coating fabricated by low power pulsed laser gladding on AZ91D magnesium alloy, *Applied Surface Science*, 435, 1187–1198. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.11.240>
- [15] Ogunrinola, I., Akinyemi, M., Aizebeokhai, A., Sule, R., Sanni, A. (2023). Silica and kaolin reinforced aluminium matrix composite for heat storage. *Reviews on Advanced Materials Science*, 62, 20220305. <https://doi.org/10.1515/rams-2022-0305>

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Wang, Y., Sun, C., Sun, J., Zhao, W., Dong, L., Li L., Meng, F. (2015). Erosion behaviour of arc sprayed FeTi/CrB MMC coating at elevated temperature, *Surface and Coating Technology*, 262, 141–147. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.12.027>
- [2] Fizi, Y., Mebdoula, Y., Lahmar, H., Djieraf, S., Benbahouche, S. (2015). Adhesion of FeCrNiBSi-(W-Ti)C wire-arc deposited coatings onto carbon steel substrates determined by indentation measurements and modelling, *Surface and Coating Technology*, 268, 310–316. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.11.004>
- [3] Jamshidi, R., Bayat O., Heidarpour, A. (2019). Tribological and corrosion behaviour of flame sprayed Al-10wt% Ti₃SiC₂ composite coating on carbon steel, *Surface and Coating Technology*, 358, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.10.087>
- [4] Huang, Y., Liu, M., Peng, Q. (2024). Study on Properties of Pure Al Coatings and Al/SiC Composite Coatings by Plasma Transferred Wire Spraying, *Journal of Thermal Spray Technology*, 33, 1709–1724. <https://doi.org/10.1007/s11666-024-01775-7>
- [5] Liu, M., Peng, Q., Huang, Y. (2024). Influencing Factors and Process Optimization of Al/SiC Powder-cored Wires by Plasma Transferred Wire Arc Spraying, *Journal of Thermal Spray Technology*, 33, 2167–2183. <https://doi.org/10.1007/s11666-024-01823-2>
- [6] Prashar, G., Vasudev, H. (2022). Structure–Property Correlation of Plasma-Sprayed Inconel625-Al₂O₃ Bimodal Composite Coatings for High-Temperature Oxidation Protection, *Journal of Thermal Spray Technology*, 31, 2385–2408. <https://doi.org/10.1007/s11666-022-01466-1>
- [7] Tumbusova, I., Dautov, S., Dzhurinskiy, D. (2025). A Comparative Analysis of Microstructure and Mechanical Properties of Cr₃C₂-NiCr Composite Coatings Deposited by APS and HVOF Techniques, *Journal of Thermal Spray Technology*, 36, 116–128. <https://doi.org/10.1007/s11666-024-01915-z>
- [8] Yan, J., Xu, J., Rafi, U., Wang, Y., Fei-Liu, L. (2015). Preparation of agglomerated powders for air plasma spraying MoSi₂ coating, *Ceramics International*, 41, 10547–10556. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.04.149>
- [9] Xue, Z., Zhu, Y., Yu, H., Shi, M., Liu, X., Zhang, S. (2022). Nano-agglomerated powder and thermal shock cycling property of 8YSZ nano-structured thermal barrier coating, *Surface and Coating Technology*, 433, 128–173. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128173>
- [10] Rahman, M., Profili, J., Stafford, L., Moreau, C. (2024). Surface preparation of aluminium by atmospheric-pressure plasma jet for suspension plasma sprayed ceramic coatings, *Surface and Coating Technology*, 476, 130–175. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.130175>
- [11] Cong, D., Li, Z., He, Q., Chen, H., Zhao, Z., Zhang, L., Wu, H. (2017). Wear behaviour of corroded Al-Al₂O₃ composite coatings prepared by cold spray, *Surface and Coating Technology*, 326, 247–254. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.07.063>
- [12] Eyvazi, Z., Abdollah-zadesh, A., Seraj, R., Azarniya, A. (2024). Effect of SiC content on the microstructure and wear behaviour of cold-spray Al-SiC coatings deposited on AZ31 alloy substrate, *Surface and Coating Technology*, 489, 131–170. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2024.131170>
- [13] Zhao, L., Zhou, D., Xie, G., Peng, Y., Ciu, X., Wang, J., Xiong, T. (2023). Unraveling the influence of Al particle size on microstructure and tribological properties of cold sprayed Al/B₄C composite coatings, *Materialstoday Communications*, 34, 105–257. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.105257>
- [14] Yang, L., Li, Z., Zhang, Y., Wei, S., Liu, F. (2018). Al-TiC in situ composite coating fabricated by low power pulsed laser gladding on AZ91D magnesium alloy, *Applied Surface Science*, 435, 1187–1198. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.11.240>
- [15] Ogunrinola, I., Akinyemi, M., Aizebeokhai, A., Sule, R., Sanni, A. (2023). Silica and kaolin reinforced aluminium matrix composite for heat storage. *Reviews on Advanced Materials Science*, 62, 20220305. <https://doi.org/10.1515/rams-2022-0305>

© Ярос Ю. О., Карпеченко А. А., Бобров М. М., Кондратьева А. А., Лабарткава О. В., Савочкина В. В.

Дата надходження статті до редакції: 02.05.2025

Дата затвердження статті до друку: 16.05.2025