

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-363-38>

УДК 621.762

СЕЛІВЕРСТОВ ІГОР

Херсонський національний технічний університет м Хмельницький, Україна

<http://orcid.org/0009-0009-6135-8165>

e-mail: sia04041972@gmail.com

ЛАЗОРИК ВЛАДИСЛАВ

Херсонський національний технічний університет м Хмельницький, Україна

<http://orcid.org/0000-0003-2244-6815>

e-mail: lazorkinv@gmail.com

ЛЯШКО ОЛЕКСАНДР

Херсонський національний технічний університет м Хмельницький, Україна

<http://orcid.org/0009-0007-5918-3832>

e-mail: aleksandr.00000000@gmail.com

СЕЛІВЕРСТОВА СВІТЛАНА

Херсонська державна морська академія м. Одеса, Україна

<http://orcid.org/0000-0003-1015-1593>

e-mail: ussr28031972@gmail.com

ВПЛИВ НАНОСТРУКТУРНОГО ПЛАКУВАННЯ ПОРОШКІВ Al_2O_3 ТА ZrO_2 ТИТАНОМ І АЛЮМІНІЄМ НА КОРОЗИЙНУ ТА ЗНОСОСТІЙКІСТЬ ПЛАЗМОВИХ ПОКРИТТІВ

У роботі розглянуто актуальну проблему підвищення експлуатаційної надійності плазмово напилених керамічних покриттів, що широко застосовуються для захисту деталей машин та механізмів від інтенсивного зношування й корозійного руйнування. Особливу увагу приділено перспективному напрямку наномодифікації вихідних порошкових матеріалів, який полягає у створенні на поверхні частинок порошку тонких наноструктурних металевих оболонок. Даний підхід дозволяє керувати процесом формування структури покриття, підвищувати когезійну міцність та покращувати комплекс фізико-механічних характеристик.

Ключові слова: плазмове покриття, зносостійкість, плакований порошок, наноструктурна плівка, оксидна кераміка.

SELIVERSTOV IHOR, LAZORYK VLADYSLAV, LIASHKO OLEKSANDR

Kherson National Technical University, Khmelnytskyi, Ukraine

SELIVERSTOVA SVITLANA

Kherson State Maritime Academy, Odessa, Ukraine

INFLUENCE OF NANOSTRUCTURED CLADDING OF Al_2O_3 AND ZrO_2 POWDERS WITH TITANIUM AND ALUMINUM ON THE CORROSION AND WEAR RESISTANCE OF PLASMA SPRAY COATINGS

The paper investigates the relevant issue of improving the operational reliability of plasma-sprayed ceramic coatings widely used to protect machine parts and mechanical components from severe wear and corrosion degradation. Special emphasis is placed on a promising approach involving nanomodification of feedstock powders by forming thin nanostructured metallic shells on the surface of powder particles. This technique makes it possible to control the coating structure formation, enhance cohesive strength, and improve the overall set of physical and mechanical properties.

The study focused on oxide ceramic powders Al_2O_3 and ZrO_2 with a particle size range of 10–63 μm . Metallic shells were deposited using by arc vacuum method. The clad layer exhibited a bilayer structure consisting of an adhesive titanium sublayer and an outer aluminum layer. Coatings were deposited by plasma spraying under a laminar plasma jet regime, which ensured process stability and reduced particle oxidation during flight.

The morphology of the powders and the deposited coatings was examined by scanning electron microscopy combined with energy-dispersive X-ray analysis. It was established that the clad particles were characterized by a uniform distribution of the metallic shell and contributed to the formation of coatings with increased density. The thickness of the nanostructured layers ranged from 41 to 633 nm depending on the deposition conditions.

Corrosion resistance was evaluated using the polarization resistance method in a 10% H_2SO_4 solution. The results confirmed a significant improvement in the corrosion resistance of coatings produced from clad powders compared to coatings deposited from unmodified Al_2O_3 and ZrO_2 powders. Wear performance was assessed using a pin-on-disk test configuration. The coatings based on clad powders demonstrated consistently low wear after the running-in stage, whereas coatings produced from non-metallized powders showed catastrophic spalling and a wear rate 4–6 times higher. Thus, ion-plasma cladding of ceramic powders is an effective method for improving the durability of plasma-sprayed ceramic coatings under mechanical friction and aggressive environmental conditions.

Keywords: plasma coating, wear resistance, clad powder, nanostructured film, oxide ceramics.

Стаття надійшла до редакції / Received 25.01.2026

Прийнята до друку / Accepted 16.02.2026

Опубліковано / Published 26.03.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© лівєрстєв Ігор, Лазорик Владислав, Ляшко Олександр, Сєлївєрстєва Світлана

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Сучасний розвиток технологій інженерії поверхні зумовлює активне впровадження високоєфективних методів формування функціональних покриттів, серед яких провідне місце посідає плазмове напилення. Даний метод вирізняється високою продуктивністю, відносно низькими енергетичними витратами та широкими технологічними можливостями щодо сумісності матеріалів основи і покриття. Одним із найбільш перспективних напрямів удосконалення плазмових покриттів є наномодифікація, яка реалізується шляхом введення наноструктурних компонентів до складу вихідних порошкових матеріалів.

Аналіз досліджень та публікацій

На сьогодні наноструктуровані матеріали активно застосовуються у створенні покриттів, отриманні об'ємних виробів металургійного призначення, а також знайшли підтверджену ефективність у біомедичних технологіях. Результати сучасних досліджень підтверджують, що застосування нанодисперсних добавок у порошковій металургії дозволяє суттєво зменшити пористість виробів і забезпечити підвищення комплексу механічних характеристик матеріалів [1]. Відомо, що матеріали, зміцнені нанорозмірними включеннями, характеризуються підвищеною твердістю, покращеною міцністю при статичних і циклічних навантаженнях, а також загальною стабільністю властивостей порівняно з традиційними крупнозернистими структурами. У ряді випадків межа текучості таких матеріалів може збільшуватися у 2,5–3 рази при незначній втраті пластичності або навіть її зростанні (наприклад, у сплавах типу Ni_3Al — до 4 разів) [1].

Значний внесок у розвиток наномодифікованих покриттів зроблено у роботах [2–5], де досліджувалося введення нанокомпонентів різного складу та морфології до полімерепоксидних систем. Зокрема, в роботі [2] встановлено істотне зростання зносостійкості епоксидних покриттів та підвищення їх опору гідроабразивному зношуванню. У дослідженні [4] доведено можливість підвищення термостабільності епоксидного шару шляхом введення нанодисперсного конденсованого вуглецю з розміром частинок 10–16 нм.

Перспективність застосування нанодобавок підтверджено також під час модифікування поверхонь нержавіючих сталей. Зокрема, введення наночастинок срібла сприяє зростанню корозійної стійкості та формуванню антибактеріальних властивостей, що є важливим у контексті біомедичних застосувань [6].

Застосовують наноструктурні композиційні порошки у технології HVOF [7]. У цьому випадку середній розмір карбідних частинок становив близько 24 нм, що дозволяє розглядати наноструктуровані карбіди хрому як перспективну альтернативу традиційним покриттям на основі карбідів вольфраму.

Окремий інтерес викликають газотермічні покриття на основі оксидної кераміки, які відрізняються комплексом високих фізико-механічних властивостей, а саме великою міцністю, твердістю, корозійно- та зносостійкістю. Вони успішно застосовуються як триботехнічний матеріал для виготовлення пар тертя, зносостійких елементів футерування, для виготовлення зносостійких елементів запірної арматури, підшипників ковзання, профілюючого та ріжучого інструменту, рухомих елементів хірургічних імплантатів та інших виробів [8–10].

Автором роботи [11] було отримано покриття з оксиду алюмінію методом плазмового напилення гранульованих нанопорошків Al_2O_3 в умовах атмосферного тиску. Результати показали, що зі збільшенням потужності плазмотрона відбувається зменшення розміру зерен та зниження шорсткості поверхні. Рентгенофазовий аналіз виявив зміну фазового складу: при підвищенні потужності пальника з 3,2 до 4,52 кВт вміст $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ зростав з 56,52% до 100%.

У роботі [12] проаналізовано вплив нанопорошку TiO_2 на мікроструктуру плазмових покриттів. Встановлено, що додавання TiO_2 зменшує кількість мікро- та макротріщин і знижує пористість у порівнянні з покриттями з чистого Al_2O_3 . Рациональний вміст TiO_2 визначено на рівні 1,5 мас. %, що забезпечує підвищення адгезійної міцності на 15–20%, мікротвердості на 25–30%, а також збільшення корозійної стійкості приблизно у 2,8 рази.

Окремим перспективним напрямком отримання плазмових покриттів з наноструктурними складовими є використання плакованих порошків. Результати робіт [13–15] довели перспективність використання іонно-плазмового методу для отримання тонких наноструктурних плівок на поверхні порошку оксидної кераміки. За результатами роботи [14], встановлено, що на поверхні порошку Al_2O_3 утворюються тонкі плівки з Ti та Cu , які є стійкими до впливу плазмового струменю і повністю переносяться в склад покриття.

Таким чином, модифікування плазмово напилених покриттів нанодисперсними компонентами є ефективним інструментом керування їх структурою, фазовим складом та комплексом фізико-механічних і експлуатаційних властивостей.

В цьому сенсі важливий метод підготовки матеріалу для напилення, а головне спосіб введення наноструктурних компонентів до складу плазмового покриття. На нашу думку, використання плакованих порошків є найбільш перспективним напрямом підвищення фізико-механічних властивостей плазмових покриттів

Формулювання цілей статті

Метою роботи є: встановлення впливу наноструктурних (нанодисперсних) плівок на порошках оксидної кераміки на процес формування структури, фазового складу на корозійно- та зносостійкість плазмово напиленого покриття.

Виклад основного матеріалу

Об'єктами дослідження були керамічні порошки Al_2O_3 , ZrO_2 з фракцією частинок 10–63 мкм, як найбільш поширена і хімічно стійка. Для плакування порошків застосовувалася установка АНГА-1, технологічний процес і особливості режимів нанесення покриттів на порошки описаний в роботах [13,15]. Плаковані порошки мають двошарову структуру. Перший підшар складався з титану, як адгезійно зв'язуючий [14], другий з алюмінію.

Напилення порошку здійснювалося плазмовим методом в режимі генерації ламінарного плазмового струменя, що сприяло зменшенню окислення частинок порошку під час польоту. Ламінарна течія плазмового струменя забезпечувалася спеціально розробленою конструкцією електродугового плазмотрона [16].

Підкладки для напилення були виготовлені з низьковуглецевої сталі, режим термообробки – відпуск, температура $(840 \pm 10)^\circ\text{C}$, охолодження на повітрі.

Дослідження морфології порошку і покриттів проводилось методом локального мікрорентгеноспектрального аналізу на растрових електронних мікроскопах Camscan-4DV та ZEISS EVO 50XVP, з застосуванням енергодисперсійного рентгівського мікроаналізатора в розширеному діапазоні детектованих елементів з використанням каліброваних зразків, який оснащений системою мікроаналізу «Link 860/500» ($U = 20$ кВ, $I = 10^{-1} \dots 10^{-7}$ А).

Випробування на зносостійкість проводилися на машині тертя СМЦ-2, за схемою диск-колодка - "палець-диск" відповідно до методики, викладеної в роботі [17], у якості контртіла використовувався шліфований диск діаметром 40мм. зі сталі 40ХН, загартований до твердості 55HRC. Швидкість ковзання керамічного зразка сталі дорівнює 2,5 м/с. Тиск притиску керамічного зразка до контртіла дорівнював 1МПа. Зношування зразків визначали зважуванням через кожні 10 хв тертя.

Випробування покриття на корозійну стійкість в агресивних середовищах (10–20% сірчаної кислоти) проводилося методом поляризаційного опору. Даний метод базується на вимірюванні зміни поляризаційного струму при накладанні поляризації в межах менше 20 мВ.

Метод поляризаційного опору реалізується за допомогою двохелектродного датчика, який складається з двох однакових електродів з одного металу і однаковим покриттям. Цей датчик вміщують в агресивне середовище і проводять вимірювання поляризації.

За результатами досліджень отримані наступні результати:

Дані електронної мікроскопії і енергодисперсійного аналізу дозволив зробити висновок, що покриття на частинках порошку володіє високою щільністю, рівним рельєфом та рівномірністю розподілу металеві оболонки по поверхні з товщиною покриття 41 до 633 нм. (рис. 1.), результати енергодисперсійного аналізу основи і покриття зведені у таблиці 1–2.

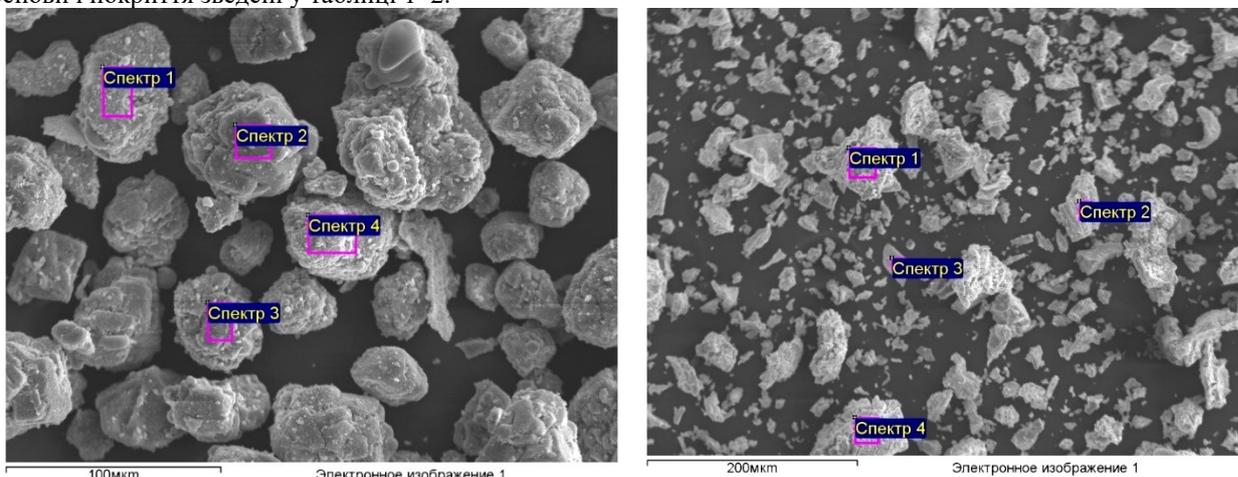


Рис.1. Металізований титаном і алюмінієм: а) порошок Al_2O_3 , б) порошок ZrO_2

Таблиця 1

Хімічний склад і товщина плакованого шару Al_2O_3

Спектр	O	Al	Ti	Всього	Н, nm	
					Ti	Al
Спектр 1	41.72	47.04	11.23	100.00	162	223
Спектр 2	37.52	48.31	14.17	100.00	197	165
Спектр 3	23.85	55.61	20.54	100.00	266	577
Спектр 4	22.23	58.54	19.23	100.00	251	633
Середнє	31.33	52.38	16.29	100.00	220	399
Станд. відхилення	9.75	5.58	4.35			
Макс.	41.72	58.54	20.54			
Мін.	22.23	47.04	11.23			

Таблиця 2

Хімічний склад і товщина плакованого шару ZrO_2

Спектр	O	Al	Ti	Zr	Всього	Н, nm	
						Ti	Al
Спектр 1	37.12	16.77	3.25	42.86	100.00	41	289
Спектр 2	44.10	0.14	4.86	50.90	100.00	47	63
Спектр 3	29.95	2.33	5.99	61.74	100.00	172	151
Спектр 4	34.82	3.21	2.20	59.76	100.00	129	69
Середнє	36.50	5.61	4.08	53.82	100.00	97	143
Станд. відхилення	5.89	7.55	1.68	8.69			
Макс.	44.10	16.77	5.99	61.74			
Мін.	29.95	0.14	2.20	42.86			

Аналізуючи зовнішній вигляд плакованих частинок є важливим встановлення типу наноструктурних оболонок, цим питанням були присвячена робота [18] Залежно від режимів випаровування матеріалу катода і відповідно до температури на поверхні частинок отримували два принципово різних типи оболонок (Рис. 3). Для першого типу (Рис. 3 а) характерна наявність у структурі зони стовпчастих і зони ультрадисперсних кристалів (за аналогією з механізмом конденсації Мовчана-Малашенко). Початкове формування таких оболонок характеризується конденсацією за механізмом пар-рідина-кристал. При формуванні оболонки за другим типом (Рис. 3 б) спостерігається формування структури з повністю ультрадисперсних кристалів, тобто за механізмом пар-кристал. Таким чином можна констатувати, що на поверхні порошків формуються стійкі наноструктурні утворення з високими адгезійними зв'язками.

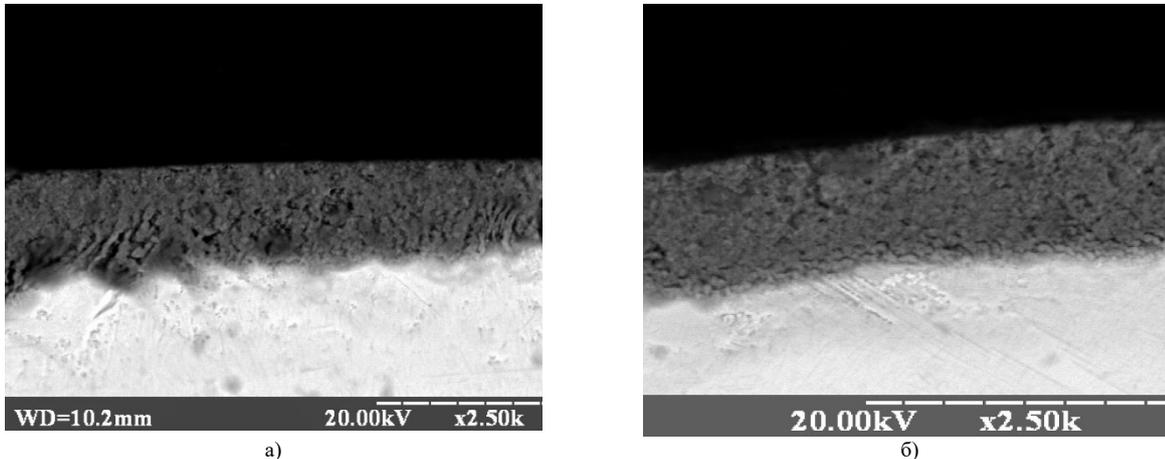


Рис. 2. Мікроструктура мідної оболонки на частках карбиду вольфраму [18]

Результати корозійних випробувань методом поляризаційного опору в 10% розчині сірчаної кислоти покриттів, отриманих з чистого Al_2O_3 , ZrO_2 та , плакованих порошків Al_2O_3 і ZrO_2 титаном та алюмінієм, наведені на рис.2.

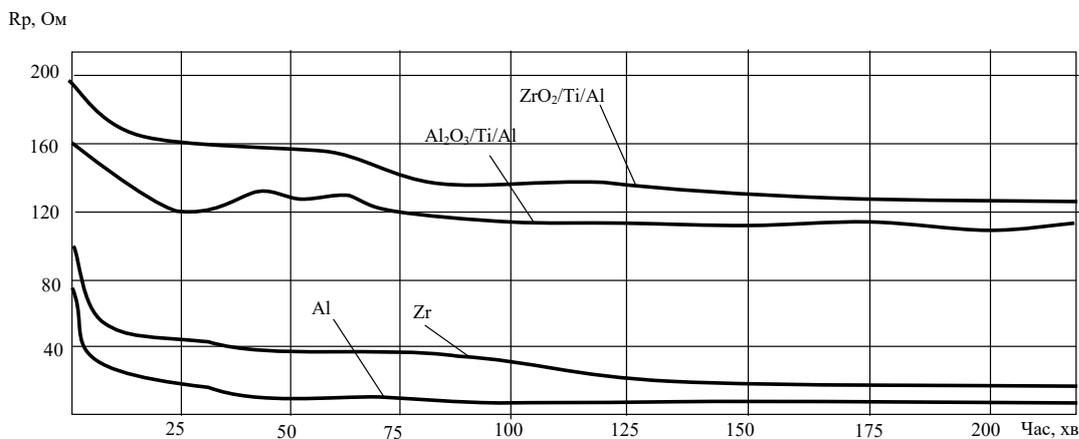


Рис. 3. Залежність поляризаційного опору від часу випробування зразків з плазовими покриттями в 10 % розчині H_2SO_4 .

Аналіз кривих, наведених на рис.3 свідчить про високу корозійну стійкість покриттів на основі системи $Al_2O_3/Ti/Al$, однак в цьому випадку спостерігається нестабільність поляризаційного опору на початковій стадії випробувань. Більш стабільні показники мають покриття на основі системи $ZrO_2/Ti/Al$. Найменші значення поляризаційного опору спостерігаються при застосуванні покриттів на основі чистих порошків.

Згідно зазначеної на рис.4. наведено результати випробувань на зносотривкість плазових покриттів, отриманих плазовим напиленням з порошкових матеріалів різного складу. Встановлено, що після 20 хв, почався прискорений знос покриття з Al_2O_3 , причиною є викришування кераміки в результаті низької когезії, в процесі тертя відбувається шаржування поверхні контртіла продуктами зносу кераміки і, як наслідок, більш інтенсивне зношування зразків при терті про таку шаржовану поверхню. Слід зазначити, що керамічне покриття ZrO_2 теж схильно до катастрофічного зносу, але після 30 хв. Стабільно низьке зношування спостерігається у зразків з покриттям на основі Al_2O_3 , ZrO_2 плакованих титаном та алюмінієм Протягом першої години тертя відбувається притирання матеріалів, що супроводжується вищою втратою маси, після чого знос стабілізується. Знос покриттів на основі неметалізованих порошків у 4-6 разів вищий .

Таким чином, у роботі експериментально показано, що плазовим напиленням з порошкових сумішей на основі Al_2O_3 , ZrO_2 , можна отримати зносо і корозійнотривккі покриття з високою когезійною міцністю.

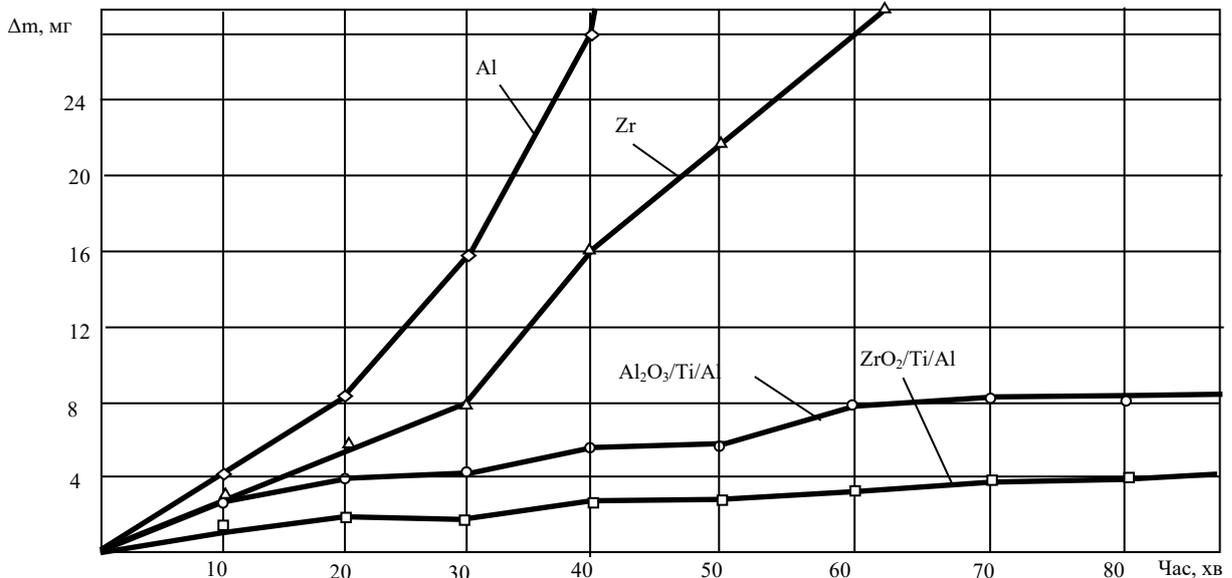


Рис.4. Кінетика зношування газотермічних покриттів на основі порошкових матеріалів

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Показано ефективність іонно-плазмового плакування порошків Al₂O₃ та ZrO₂ шляхом нанесення двошарової оболонки Ti/Al, що забезпечує формування стійких наноструктурних утворень із високою адгезійною здатністю до керамічної основи.

Методами електронної мікроскопії та енергодисперсійного аналізу встановлено, що металеві оболонки рівномірно покривають поверхню частинок, мають високу щільність та товщину в межах 41–633 нм, що підтверджує стабільність технологічного процесу плакування.

Корозійні випробування в 10% розчині H₂SO₄ засвідчили, що плазмові покриття, отримані з плакованих порошків, характеризуються суттєво вищими значеннями поляризаційного опору, тобто мають підвищену корозійну стійкість порівняно з покриттями на основі чистих порошків.

Встановлено, що покриття системи Al₂O₃/Ti/Al демонструє високий рівень корозійної стійкості, однак на початкових етапах випробувань спостерігається нестабільність параметрів, тоді як покриття ZrO₂/Ti/Al характеризується більш стабільною поведінкою в агресивному середовищі.

Трибологічні випробування показали, що покриття з неметалізованих порошків Al₂O₃ та ZrO₂ схильні до катастрофічного зношування внаслідок викришування, що пов'язано з недостатньою когезійною міцністю та процесами шаржування поверхні контртіла.

Покриття, отримані з плакованих порошків, демонструють стабільно низьке зношування після етапу притирання, а інтенсивність зносу таких покриттів є у 4–6 разів меншою, ніж у покриттів із чистих порошків.

Отримані результати підтверджують, що застосування плакованих порошків оксидної кераміки є перспективним технологічним напрямом для формування зносо- та корозійностійких плазмових покриттів із підвищеною когезійною міцністю та експлуатаційною довговічністю, тому потребують подальших досліджень з використанням нових порошкових матеріалів і покриттів.

Література

1. Vinogradov A. Yu., Agnew S. R. Nanocrystalline materials: fatigue // *Encyclopedia of Nanotechnology*. — New York : Marcel Dekker, 2004. — P. 2269–2288. — DOI: <https://doi.org/10.2320/matertrans.42.74>.
2. Buketov A., Saponov O., Klevtsov K., Kim B. Functional polymer nanocomposites with increased anticorrosion properties and wear resistance for water transport // *Polymers*. — 2023. — Vol. 15, № 16. — Art. 3449. — DOI: <https://doi.org/10.3390/polym15163449>.
3. Buketov A. V., Dyadyura K., Shulga Yu. M., Sotsenko V. V., Hrebenyk L., Totosko O. V., Kulish I. M. Promising technologies in water transport: development and implementation of fungus-resistant and ecologically clean epoxy nanocomposites // *Journal of Nano- and Electronic Physics*. — 2025. — Vol. 17, № 1. — Art. 01020. — DOI: [https://doi.org/10.21272/jnep.17\(1\).01020](https://doi.org/10.21272/jnep.17(1).01020).
4. Saponov O., Buketov A., Kim B., Vorobiov P., Saponova L. Increasing the service life of marine transport using heat-resistant polymer nanocomposites // *Materials*. — 2024. — Vol. 17, № 7. — Art. 1503. — DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17071503>.
5. Buketov A. V., Dyadyura K., Shulga Yu. M., Sotsenko V. V., Hrebenyk L., Pastukh O. A., Zhytnyk D. V. The method of increasing the mechanical characteristics of sea transport vehicles due to environmentally friendly nanomodification of epoxy composites // *Journal of Nano- and Electronic Physics*. — 2024. — Vol. 16, № 4. — Art. 04027. — DOI: [https://doi.org/10.21272/jnep.16\(4\).04027](https://doi.org/10.21272/jnep.16(4).04027).

6. Karabulut G., Beköz Üllen N., Akyüz E., Karakuş S. Surface modification of 316L stainless steel with multifunctional locust gum/polyethylene glycol-silver nanoparticles using different coating methods // *Progress in Organic Coatings*. — 2023. — Vol. 174. — Art. 107291. — DOI: 10.1016/j.porgcoat.2022.107291.
7. He J., Ice M., Lavernia E. J. Synthesis of nanostructured Cr₃C₂-25(Ni₂₀Cr) coatings // *Metallurgical and Materials Transactions A*. — 2000. — Vol. 31A. — P. 555–564. — DOI: 10.1007/s11661-000-0290-0.
8. Makarov N. A., Lukin E. S., Popova N. A., Sidorin V. A. Use of corundum ceramics for fine milling of various materials // *Glass and Ceramics*. — 2005. — Vol. 62, № 1–2. — P. 19–20.
9. Акимов Г. Я., Тимченко В. М., Чайка Э. В. и др. Использование керамического инструмента из диоксида циркония в трубном производстве // *Прогрессивные технологии и системы машиностроения* : междунар. сб. науч. тр. — Донецк : ДонГТУ, 2000. — Вып. 11. — С. 289.
10. Бублик Л. А., Митюшин И. И., Чайка Э. В., Чайка В. А. Подвижный протез межпозвоночных дисков для шейного отдела позвоночника // *Сборник тезисов XV съезда ортопедов-травматологов Украины* (16–18 сентября 2010 г.). — Днепропетровск, 2010. — С. 44.
11. Marcinauskas L. Deposition of alumina coatings from nanopowders by plasma spraying // *Materials Science (Medžiagotyra)*. — 2010. — Vol. 16, № 1. — P. 47–51. — ISSN 1392-1320.
12. Смирнов И. В., Чёрный А. В., Фурман В. К., Долгов Н. А. Влияние нанодисперсных модификаторов на структуру и свойства плазменно напыленных покрытий // *Материалознаство та машинобудування*. — 2017. — № 5. — DOI: 10.20535/1810-0546.2017.5.94945.
13. Смирнов І. В., Селіверстов І. А., Копилов В. І. Фізико-хімічні аспекти іонно-плазмового плакування керамічних порошків // *Міжнародний збірник наукових праць ДонНТУ*. — 2005. — Вип. 29. — С. 171–175.
14. Смирнов І. В., Чорний А. В., Калашникова І. А., Селіверстов І. А. Застосування композиційних порошків системи Al₂O₃–Ti–Cu для підвищення корозійної стійкості плазмових покриттів // *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування*. — 2009. — № 1. — С. 74–81.
15. Копилов В. І., Смирнов І. В., Селіверстов І. А. Процеси іонно-плазмового плакування порошків для газо-термічних покриттів // *Наукові вісті Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. — 2009. — № 3 (65). — С. 11–20.
16. Пристрій для плазмового-дугового напылення покриттів : пат. 54496 Україна : МПК В23К 10/00 (2009) / Чорний А. В., Копилов В. І., Зіберов М. Л., Смирнов І. В., Селіверстов І. А. ; заявник і власник Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут». — № 54496 ; заявл. 20.05.2010 ; опубл. 10.11.2010, Бюл. № 21.
17. Чайка Э. В., Акимов Г. Я., Тимченко В. М. Износ керамики на основе диоксида циркония в условиях сухого трения скольжения в паре со сталью: роль пористости // *Огнеупоры и техническая керамика*. — 2005. — № 9. — С. 10–12.
18. Смирнов И. В. Многофункциональные плазменные покрытия на основе порошковых смесей с наноразмерными составляющими и порошков плакированных вакуумно-дуговым методом : дис. ... д-ра техн. наук : 05.03.06 – сварка, родственные процессы и технологии / И. В. Смирнов. – Киев, 2012. – 372 с.

References

1. Vinogradov A. Yu., Agnew S. R. Nanocrystalline materials: fatigue // *Encyclopedia of Nanotechnology*. — New York : Marcel Dekker, 2004. — P. 2269–2288. — DOI: <https://doi.org/10.2320/matertrans.42.74>.
2. Buketov A., Saponov O., Klevtsov K., Kim B. Functional polymer nanocomposites with increased anticorrosion properties and wear resistance for water transport // *Polymers*. — 2023. — Vol. 15, № 16. — Art. 3449. — DOI: <https://doi.org/10.3390/polym15163449>.
3. Buketov A. V., Dyadyura K., Shulga Yu. M., Sotsenko V. V., Hrebenyk L., Totosko O. V., Kulish I. M. Promising technologies in water transport: development and implementation of fungus-resistant and ecologically clean epoxy nanocomposites // *Journal of Nano- and Electronic Physics*. — 2025. — Vol. 17, № 1. — Art. 01020. — DOI: [https://doi.org/10.21272/jnep.17\(1\).01020](https://doi.org/10.21272/jnep.17(1).01020).
4. Saponov O., Buketov A., Kim B., Vorobiov P., Saponova L. Increasing the service life of marine transport using heat-resistant polymer nanocomposites // *Materials*. — 2024. — Vol. 17, № 7. — Art. 1503. — DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17071503>.
5. Buketov A. V., Dyadyura K., Shulga Yu. M., Sotsenko V. V., Hrebenyk L., Pastukh O. A., Zhytnyk D. V. The method of increasing the mechanical characteristics of sea transport vehicles due to environmentally friendly nanomodification of epoxy composites // *Journal of Nano- and Electronic Physics*. — 2024. — Vol. 16, № 4. — Art. 04027. — DOI: [https://doi.org/10.21272/jnep.16\(4\).04027](https://doi.org/10.21272/jnep.16(4).04027).
6. Karabulut G., Beköz Üllen N., Akyüz E., Karakuş S. Surface modification of 316L stainless steel with multifunctional locust gum/polyethylene glycol-silver nanoparticles using different coating methods // *Progress in Organic Coatings*. — 2023. — Vol. 174. — Art. 107291. — DOI: 10.1016/j.porgcoat.2022.107291.
7. He J., Ice M., Lavernia E. J. Synthesis of nanostructured Cr₃C₂-25(Ni₂₀Cr) coatings // *Metallurgical and Materials Transactions A*. — 2000. — Vol. 31A. — P. 555–564. — DOI: 10.1007/s11661-000-0290-0.
8. Makarov N. A., Lukin E. S., Popova N. A., Sidorin V. A. Use of corundum ceramics for fine milling of various materials // *Glass and Ceramics*. — 2005. — Vol. 62, № 1–2. — P. 19–20.
9. Akimov G. Ya., Timchenko V. M., Chajka E. V. i dr. Ispolzovanie keramicheskogo instrumenta iz dioksida cirkonija v trubnom proizvodstve // *Progressivnye tehnologii i sistemy mashinostroeniya* : mezhdunar. sb. науч. tr. — Doneck : DonGTU, 2000. — Vyp. 11. — S. 289.
10. ІБублик Л. А., Митюшин І. І., Чайка Е. В., Чайка В. А. Подвижный протез межпозвоночных дисков для шейного отдела позвоночника // *Сборник тезисов XV съезда ортопедов-травматологов Украины* (16–18 сентыабрыя 2010 г.). — Днепропетровск, 2010. — С. 44.
11. Marcinauskas L. Deposition of alumina coatings from nanopowders by plasma spraying // *Materials Science (Medžiagotyra)*. — 2010. — Vol. 16, № 1. — P. 47–51. — ISSN 1392-1320.
12. Smirnov I. V., Chornyj A. V., Furman V. K., Dolgov N. A. Vliyanie nanodispersnykh modifikatorov na strukturu i svojstva plazmenno napylenykh pokrytij // *Materialoznavstvo ta mashinobuduвання*. — 2017. — № 5. — DOI: 10.20535/1810-0546.2017.5.94945.
13. Smyrnov I. V., Seliwerstov I. A., Kopylov V. I. Fyzyko-khimichni aspekty ionno-plazmovohto plakuvannia keramichnykh poroshkiv // *Mizhnarodnyi zbimyk naukovykh prats DonNTU*. — 2005. — Vyp. 29. — S. 171–175.

14. Smyrnov I. V., Chornyi A. V., Kalashnykova I. A., Sieliverstov I. A. Zastosuvannia kompozytsiinykh poroshkiv systemy Al_2O_3 -Ti-Cu dlia pidvyshchennia koroziinoi stiiikosti plazmovykh pokryttiv // Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoho universytetu korablebuduvannia. — 2009. — № 1. — S. 74–81.
15. Kopylov V. I., Smyrnov I. V., Sieliverstov I. A. Protsesy ionno-plazmovoho plakuvannia poroshkiv dlia hazo-termichnykh pokryttiv // Naukovi visti Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Ukrainy «Kyivskiy politekhnichnyi instytut». — 2009. — № 3 (65). — S. 11–20.
16. Prystrii dlia plazmovoho-duhovoho napylennia pokryttiv : pat. 54496 Ukraina : MPK B23K 10/00 (2009) / Chornyi A. V., Kopylov V. I., Ziberov M. L., Smyrnov I. V., Sieliverstov I. A. ; zaiavnyk i vlasnyk Natsionalnyi tekhnichnyi universytet Ukrainy «Kyivskiy politekhnichnyi instytut». — № 54496 ; zaiavl. 20.05.2010 ; opubl. 10.11.2010, Biul. № 21.
17. Chajka E. V., Akimov G. Ya., Timchenko V. M. Iznos keramiki na osnove dioksida cirkoniya v usloviyah suhogo treniya skolzheniya v pare so stalyu: rol poristosti // Ogneupory i tehnikeskaya keramika. — 2005. — № 9. — S. 10–12.
18. Smirnov I. V. Mnogofunkcionalnye plazmennye pokrytiya na osnove poroshkovykh smesey s nanorazmernymi sostavlyayushimi i poroshkov plakirovanykh vakuumno-dugovym metodom : dis. ... d-ra teh. nauk : 05.03.06 – svarka, rodstvennye processy i tehnologii / I. V. Smirnov. — Kiev, 2012. — 372 s.