

В. М. ЛАЗОРИК

аспірант

Херсонський національний технічний університет

ORCID: 0000-0003-2244-6815

І. А. СЕЛІВЕРСТОВ

кандидат технічних наук, доцент

Херсонський національний технічний університет

ORCID: 0009-0009-6135-816

## ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ПЛАЗМОВИХ ПОКРИТТІВ ЗАСТОСУВАННЯМ НАНОСТРУКТУРНИХ КОМПОНЕНТІВ

У статті розглянуто актуальну проблему підвищення зносостійкості плазмово напилених покриттів шляхом модифікування вихідних порошкових матеріалів наноструктурними компонентами. Разом із тим експлуатаційні властивості плазмових покриттів значною мірою залежать від структури сформованого шару, пористості, фазового складу та рівномірності розподілу зміцнювальних компонентів. Одним із перспективних напрямів удосконалення технології є введення нанодисперсних добавок, здатних суттєво впливати на процеси формування мікроструктури покриттів і підвищувати їх механічні та триботехнічні характеристики.

Метою дослідження було визначення впливу нанодисперсного оксиду алюмінію  $Al_2O_3$  на структуру, мікротвердість та зносостійкість плазмових покриттів, сформованих із самофлюювального порошку ПС-12НВК-01 системи Ni-Cr-B-Si-C. Для модифікування використовували нанопорошок  $Al_2O_3$  із розміром частинок 50–70 нм, отриманий кріохімічним методом. Підготовку композиційних порошків здійснювали методом механохімічного легування в планетарному млині. Плазмове наплення виконували в режимі генерації ламінарного плазмового струменя, що забезпечувало зниження окислення частинок під час переносу в плазмі та сприяло стабільному формуванню покриття.

Експериментально встановлено, що введення нанодисперсного  $Al_2O_3$  у кількості 0,1–5 мас.% суттєво впливає на формування структури покриття та його експлуатаційні характеристики. Термічне оплавлення при температурі 1050 °C забезпечує ущільнення шару та підвищення мікротвердості. Найбільш ефективним виявився вміст нанодобавки 0,2 мас.%  $Al_2O_3$ , при якому спостерігається максимальне зростання мікротвердості та зносостійкості. Підвищення концентрації нанопорошку до 1,5–5 мас.% призводить до збільшення пористості, об'єднання пор по межах зерен та створення умов для утворення мікротріщин, що негативно впливає на цілісність покриття. Отримані результати підтверджують доцільність застосування наноструктурних компонентів як ефективного способу підвищення зносостійкості плазмових покриттів.

**Ключові слова:** плазмове наплення, композитні порошки, наноструктурні компоненти, зносостійкість, механохімічне легування.

V. M. LAZORYK

Postgraduate Student

Kherson National Technical University

ORCID: 0000-0003-2244-6815

I. A. SELIVERSTOV

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Kherson National Technical University

ORCID: 0009-0009-6135-816

## INCREASING THE WEAR RESISTANCE OF PLASMA COATINGS BY USING NANOSTRUCTURED COMPONENTS

The article addresses the relevant problem of improving the wear resistance of plasma-sprayed coatings by modifying the initial powder materials with nanostructured components. At the same time, the service properties of plasma coatings largely depend on the structure of the formed layer, its porosity, phase composition, and the uniform distribution of reinforcing components. One of the most promising approaches to improving the technology is the introduction



of nanosized additives capable of significantly influencing the formation of the coating microstructure and enhancing its mechanical and tribological characteristics.

The aim of the study was to determine the effect of nanosized aluminum oxide  $\text{Al}_2\text{O}_3$  on the structure, microhardness, and wear resistance of plasma coatings produced from the powder Ni–Cr–B–Si–C system. For modification,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanopowder with a particle size of 50–70 nm obtained by a cryochemical method was used. The preparation of composite powders was carried out by mechanochemical alloying in a planetary mill. Plasma spraying was performed under conditions of laminar plasma jet generation, which reduced oxidation of powder particles during plasma transfer and contributed to stable coating formation.

It was experimentally established that the introduction of nanosized  $\text{Al}_2\text{O}_3$  in the amount of 0.1–5 wt.% significantly affects the coating formation processes and its performance characteristics. Thermal remelting at a temperature of 1050 °C ensures densification of the layer and an increase in microhardness. The most effective nanoparticle content was found to be 0.2 wt.%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , at which the maximum increase in microhardness and wear resistance was observed. An increase in the nanopowder concentration to 1.5–5 wt.% leads to higher porosity, pore coalescence along grain boundaries, and the creation of conditions for microcrack formation, which negatively affects the integrity of the coating. The obtained results confirm the feasibility of using nanostructured components as an effective method for improving the wear resistance of plasma coatings.

**Key words:** plasma spraying, composite powders, nanostructured components, wear resistance, mechanochemical alloying.

### Постановка проблеми

Серед сучасних технологій інженерії поверхні плазмове напилення покриттів вирізняється високою продуктивністю, енергетичною ефективністю та універсальністю щодо поєднання матеріалів основи і покриття. Важливою перевагою даного методу є практична відсутність обмежень за температурою плавлення та теплофізичними характеристиками застосовуваних матеріалів. Крім того, сучасні технічні засоби реалізації процесів плазмового напилення дозволяють у широких межах регулювати співвідношення між тепловою та кінетичною енергією частинок, що забезпечує можливість цілеспрямованого формування структури та властивостей покриттів.

Одним із перспективних напрямів підвищення експлуатаційних характеристик матеріалів і, зокрема, плазмових покриттів є введення наноструктурних компонентів до складу напилюваних порошкових композицій або вдосконалення самого процесу напилення шляхом зміни конструкції плазмотронів та режимів обробки.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Використання нанодисперсних добавок у порошковій металургії дозволяє зменшити пористість виробів і покращити комплекс механічних властивостей матеріалів [1].

Дисперсно-зміцнені матеріали, що містять нанорозмірні включення, характеризуються підвищеною міцністю при статичних і циклічних навантаженнях, а також більшою твердістю порівняно з матеріалами із традиційною крупнозернистою структурою. Зокрема, межа текучості таких матеріалів може зростати у 2,5–3 рази, тоді як пластичність зменшується незначно або навіть підвищується (наприклад, для сплавів  $\text{Ni}_3\text{Al}$  – до 4 разів) [1].

На даний час наноструктуровані матеріали використовуються переважно як високоміцні та зносостійкі. Встановлено, що введення нанодисперсних частинок карбиду кремнію до складу чавунів приводить до підвищення їх зносостійкості, збільшення міцності на 20–30 % і твердості приблизно на 10 %. Для зносостійких чавунів також зафіксовано збільшення відносного подовження на 10–20 %, а енергії руйнування – на 20–80 %. Корозійна стійкість модифікованих чавунів і сталей у кислотних середовищах зростає у декілька разів порівняно з немодифікованими зразками.

Перспективність наномодифікації підтверджується також результатами досліджень поверхонь нержавіючих сталей. Так, модифікування нанодисперсними частинками срібла забезпечує підвищення корозійної стійкості та формування антибактеріальних властивостей, що є важливим для біомедичних застосувань [2]. Композиційні матеріали на основі алюмінієвих сплавів, зміцнені нанодисперсними частинками високомодульних тугоплавких сполук, характеризуються високими антифрикційними властивостями та зносостійкістю [3, 4].

У роботі [5] встановлено зниження залишкових напружень у наноструктурних покриттях  $\text{WC}/12\text{Co}$  та  $\text{Al}_2\text{O}_3/13\text{TiO}_2$ , що є критично важливим для їх експлуатації в умовах високих механічних і термічних навантажень. Наноструктурні композиційні порошки також застосовувалися для формування покриттів методом HVOF [6], при цьому середній розмір карбідних частинок становив близько 24 нм, що дозволило розглядати наноструктурні карбіди хрому як перспективну альтернативу традиційним покриттям на основі карбідів вольфраму.

Додавання нанорозмірних компонентів до складу композиційних порошків сприяє інтенсифікації процесів плавлення та формування покриттів завдяки зниженню температури плавлення композитів. Так, у роботі [7] для композиції TiC–Ni з нанодобавками  $\text{ZrO}_2$  та  $\text{Al}_2\text{O}_3$  зафіксовано зменшення температури плавлення в середньому на 300–400 °C.

У дослідженні [8] запропоновано багатокомпонентні покриття на основі порошкових систем типу  $\alpha$ – $\beta$ – $\gamma$ , де  $\alpha$ -компонента включає сплави та оксиди ( $\text{Ni}$ – $\text{Al}$ ,  $\text{Ti}$ – $\text{Al}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$ ),  $\beta$ -компонента містить три і більше елементів

(Mo, Co, Al, Cr, Ti, C, N, Y), а  $\gamma$ -компонента представлена нанорозмірними оксидами діоксиду кремнію (аеросил  $\text{SiO}_2$ ). Введення наночастинок аеросилу розміром 5–20 нм забезпечило суттєве підвищення основних механічних характеристик покриттів.

Автором роботи [9] отримано покриття з оксиду алюмінію шляхом плазмового напилення гранульованих нанопорошків  $\text{Al}_2\text{O}_3$  при атмосферному тиску. Встановлено, що зі збільшенням потужності плазмотрона зменшується розмір зерен і шорсткість поверхні. Рентгенофазовий аналіз показав зміну фазового складу напиленого шару порівняно з вихідним порошком: вміст  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  збільшувався з 56,52 % до 100 % при підвищенні потужності пальника з 3,2 до 4,52 кВт.

У роботі [10] детально досліджено вплив нанопорошку оксиду титану на мікроструктуру плазмово напиленого покриття. Показано, що додавання  $\text{TiO}_2$  приводить до зменшення кількості мікро- і макротріщин, а також пористості порівняно з покриттями з чистого порошку  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Встановлено раціональний вміст нанопорошку  $\text{TiO}_2$  на рівні 1,5 мас. %, що забезпечує підвищення адгезійної міцності на 15–20 %, мікротвердості – на 25–30 % та збільшення корозійної стійкості приблизно у 2,8 рази.

Наноструктурні компоненти здатні підвищувати не лише зносостійкість, але й антифрикційні властивості покриттів. Так, у роботі [11] досліджено мікроструктуру та зносостійкість плазмових покриттів на основі порошку ПГ19М з наночастинами  $\text{SiO}_2$ . Показано, що навіть при малому масовому вмісті наночастинок досягається зростання мікротвердості та зносостійкості, а також покращуються антифрикційні характеристики покриття.

Таким чином, модифікування плазмових покриттів нанодисперсними компонентами є ефективним підходом до керування їх фізико-механічними та експлуатаційними властивостями. Важливо, що ультрадисперсні керамічні добавки є відносно доступними та вводяться у склад покриття у малих концентраціях (частки відсотка), забезпечуючи суттєвий технологічний ефект.

#### Формулювання мети дослідження

Тому метою даної роботи є дослідження за впливу наноструктурних (нанодисперсних) компонентів, введених до складу порошкових матеріалів, на формування структури, фазового складу та експлуатаційних властивостей плазмово напилених покриттів, а також оцінювання ефективності наномодифікації як способу підвищення зносостійкості покриттів.

#### Викладення основного матеріалу дослідження

В якості основи композиційного порошку використовували порошок ПС-12 НВК-01 – являє собою спеціалізований матеріал, що застосовується для зміцнення та відновлення поверхонь з металу. Він складається з суміші легуючих елементів та металів, таких як вуглець, бор, хром, нікель (Ni-Cr-B-Si-C), що забезпечують велику корозійну стійкість, твердість та зносостійкість, розмір фракції порошку складає 50–80 мкм. До основи ПС-12 НВК-01 додавався нанодисперсний порошок  $\text{Al}_2\text{O}_3$  з розміром частинок 50–70 нм, отриманого за криохімічною технологією.

Наночастки оксиду алюмінію мають сферичну форму. У вигляді порошків вони досить стабільні, у водних розчинах схильні до агрегації. Нанодисперсний оксид алюмінію має низку властивостей – термостійкість, висока твердість, хімічна інертність.

Для приготування готової композиційної суміші використовувався метод механохімічного легування у планетарному млині [12], технологічний процес легування та особливості були описані в роботі [13].

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 [14].

Підкладки для напилення були виготовлені з низьковуглецевої сталі, режим термообробки – відпуск, температура  $(840 \pm 10)$  °С, охолодження на повітрі.

Характеристики покриттів вивчали за допомогою металографічного аналізу. Мікротвердість покриттів визначали за Віккерсом, навантаження 0,548Н. Випробування покриттів на зносостійкість проводилося на спеціально розробленій машині тертя на основі пристрою для оцінки ефективності зміцнюючих і тонкоплівкових технологій «Эхо-1» [15]. В основу метода покладена контактна взаємодія двох тіл при якому, досліджуваний зразок (індентор) впроваджують при його обертальному русі в контртіло, твердість якого нижче твердості індентора. Пара тертя: нерухомий плоский зразок – досліджуваний, рухливий (контртіло) циліндр діаметром 8 мм – твердий сплав. По умовам експериментів значення окружної швидкості контртіла 0,1 м/с, навантаження 10,0 Н.

За результатами досліджень отримані наступні результати:

На рисунках 1,2 і таблиця 1 наведено результати експериментальних досліджень мікротвердості, зносостійкості та мікроструктури плазмових покриттів, сформованих із самофлюсівного порошку ПС-12НВК-01 з введенням нанодисперсного оксиду алюмінію  $\text{Al}_2\text{O}_3$  у кількості 0,1 до 5 мас. %.

В таблиці 1, вказані середні значення мікротвердості плазмових покриттів до та після оплавлення. Представлені дані демонструють, що термічне оплавлення при температурі 1050 °С сприяє ущільненню структури покриття та зростання його мікротвердості. Найвищі значення мікротвердості зафіксовані для покриттів, модифікованих нанопорошком  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Таблиця 1

## Значення мікротвердості покриттів, МПа

Об'ємний вміст нанопорошку, %	0	0,2	1	1,5	5
Без оплавлення	304	358	340	336	330
З оплавленням	424	483	458	449	434

На рисунку 1 наведено кінетику зношування досліджуваних покриттів, що підтверджує позитивний вплив нанодобавок на їх триботехнічні характеристики. Отримані результати вказують, що введення 0,2 мас.%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  забезпечує найбільш ефективне підвищення зносостійкості покриття. При цьому, у процесі тертя протягом 2 годин втрата маси зразків без нанодобавок збільшилася у 2 рази, а після оплавлення – у 3,8 рази, що свідчить про суттєво низьку зносостійкість немодифікованих покриттів.

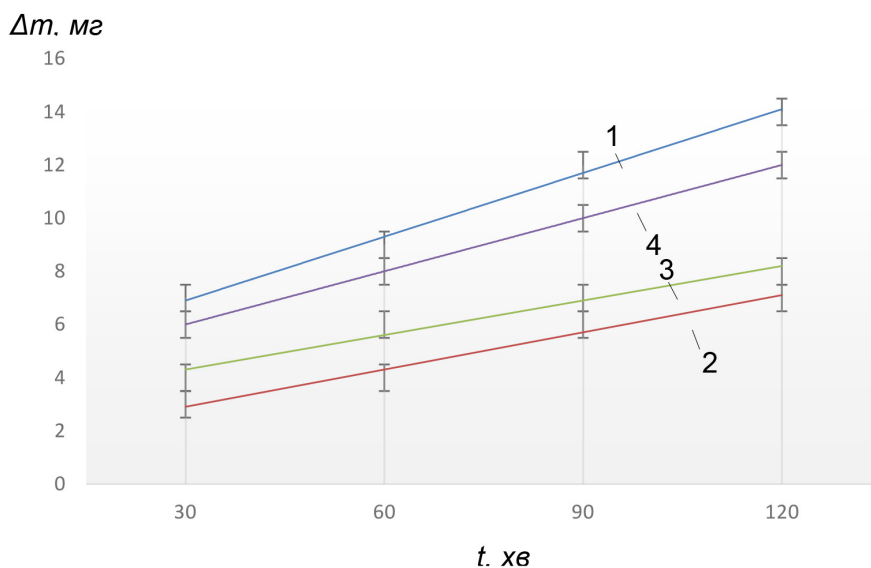


Рис. 1. Кінетика зношування плазмових покриттів з порошку ПС-12НВК-01

1 – ПС-12НВК-01; 2 – ПС-12НВК-01 + 0,2 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; 3 – ПС-12НВК-01 + 1,5 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; 4 – ПС-12НВК-01 + 5 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Металографічні дослідження, представлені на рисунку 2, ілюструють вплив наночастинок  $\text{Al}_2\text{O}_3$  на формування структури плазмового покриття. Для складу з концентрацією 1,5 мас.%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  спостерігається зміна морфології структури та зростання пористості. При підвищенні вмісту нанопорошку до 5 мас.% відбувається об'єднання пор по межах зерен, що створює умови для утворення мікротріщин і погіршує цілісність покриття.

Таким чином, встановлено, що введення нанодисперсного оксиду алюмінію до складу порошку ПС-12НВК-01 суттєво впливає на процеси формування покриття, змінює його мікроструктуру та сприяє підвищенню механічних і триботехнічних властивостей. Максимальне збільшення мікротвердості (приблизно на 50 HV) досягнуто при введенні 0,2 мас.%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , що також забезпечує оптимальне зростання зносостійкості.

## Висновки

Встановлено, що введення нанодисперсного оксиду алюмінію  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (50–70 нм) до складу самофлюсівного порошку ПС-12НВК-01 істотно впливає на процес формування плазмового покриття, його мікроструктуру та комплекс експлуатаційних властивостей.

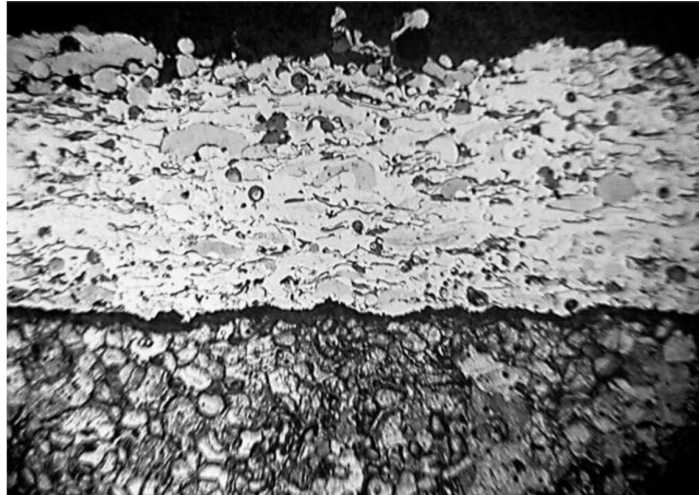
Підтверджено ефективність механохімічного легування в планетарному млині як способу рівномірного введення нанодобавок до порошкової композиції та підготовки матеріалу до плазмового напилення.

Термічне оплавлення покриттів при температурі 1050 °С сприяє ущільненню структури, зменшенню дефектності та підвищенню мікротвердості покриттів порівняно зі станом без оплавлення.

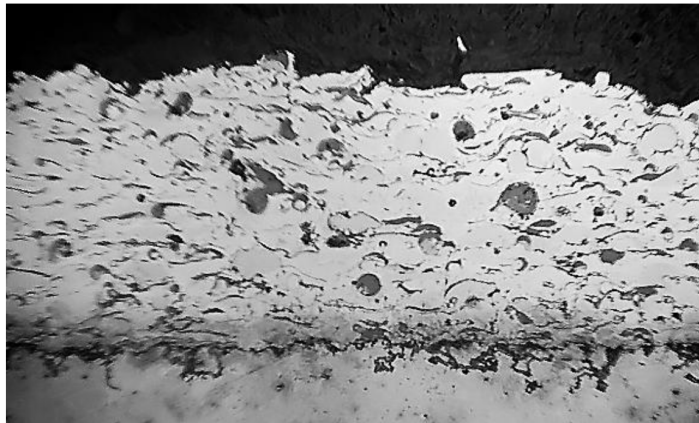
Найкращі показники мікротвердості та зносостійкості отримано при введенні 0,2 мас.% нанодисперсного  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . При цьому зафіксовано максимальне збільшення мікротвердості (приблизно на 50 HV) та суттєве підвищення опору зношуванню.

Збільшення вмісту нанодобавки до 1,5 мас.% і вище супроводжується зміною морфології структури, зростанням пористості та появою умов для утворення мікротріщин, що знижує ефективність зміцнення.

Встановлено, що надлишковий вміст нанопорошку  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (5 мас.%) призводить до об'єднання пор по межах зерен і погіршення цілісності покриття, що негативно впливає на його триботехнічні характеристики.



а



б



в

**Рис. 2. Мікроструктура плазмового покриття з порошку ПС-12НВК-01**

а – ПС-12НВК-01, б – ПС-12НВК-01 + 1,5 %  $Al_2O_3$ , в – ПС-12НВК-01 + 5 %  $Al_2O_3$

Отримані результати підтверджують перспективність наномодифікації як ефективного способу підвищення зносостійкості плазмових покриттів та обґрунтовують оптимальний вміст нанодисперсного оксиду алюмінію на рівні 0,2 мас.% для покриттів на основі ПС-12НВК-01.

#### Список використаної літератури

1. Vinogradov A. Yu., Agnew S. R. Nanocrystalline Materials: Fatigue // *Encyclopedia of Nanotechnology*. New York : Marcel Dekker, 2004. P. 2269–2288. <https://doi.org/10.2320/matertrans.42.74>
2. 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. Article 107291. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2022.107291
3. Shtansky D. V. et al. [Title not specified] // *Surface and Coatings Technology*. 2001. Vol. 148, No. 2–3. P. 204–213.
4. Influence of WC particle behavior on the wear resistance properties of Ni-WC composite coatings / Wu P., Dii H. M., Chen X. L., Li Z. Q., Bai H. L., Jiang E. Y. // *Wear*. 2004. Vol. 257, No. 1–2. P. 142–147. DOI: 10.1016/j.wear.2003.10.019
5. Liu X., Zhang B. Effects of grinding process on residual stresses in nanostructured ceramic coatings // *Journal of Materials Science*. 2002. Vol. 37. P. 3229–3239. [doi.org/10.1023/A:1016174731658](https://doi.org/10.1023/A:1016174731658)
6. He J., Ice M., Lavernia E. J. Synthesis of nanostructured Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-25(Ni<sub>20</sub>Cr) coatings // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2000. Vol. 31A. P. 555–564. DOI:10.1007/s11661-000-0290-0
7. Levashov E. A., Pogozhev Yu. S., Kudryashov A. E., Rupasov S. I., Levina V. V. TiC–Ni-based composite materials dispersion-strengthened by nanoparticles for electrospark deposition // *Journal of Non-Ferrous Metals*. 2008. Vol. 49, No. 5. P. 397–403. DOI:10.3103/S1067821208050167
8. Зенкин Н. А., Копылов В. И. Повышение эксплуатационных характеристик композиционных материалов путем оптимизации упрочняющих технологий. Киев : Головна спеціалізована редакція літератури мовами національних меншин України, 2002. 272 с.
9. Marcinauskas L. Deposition of alumina coatings from nanopowders by plasma spraying // *Materials Science (Medžiagotyra)*. 2010. Vol. 16, No. 1. P. 47–51. ISSN 1392-1320.
10. Смирнов И. В., Чёрный А. В., Фурман В. К., Долгов Н. А. Влияние нанодисперсных модификаторов на структуру и свойства плазменно напыленных покрытий // *Материалознаводство та машинобудування*. 2017. № 5. DOI: 10.20535/1810-0546.2017.5.94945
11. Смирнов И. В. и др. Повышение износостойкости плазменных покрытий на основе композиционного порошка с наночастицами SiO<sub>2</sub> // *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Серия: Новые решения в современных технологиях. 2011. № 2. С. 70–74. <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/b8149814-1a67-4b48-abd9-2f610008b363>
12. Senderowski C., Vigilanska N., Burlachenko O., Grishchenko O., Murashov A., Stepanyuk S. Effect of APS Spraying Parameters on the Microstructure Formation of Fe<sub>3</sub>Al Intermetallics Coatings Using Mechanochemically Synthesized Nanocrystalline Fe–Al Powders // *Materials*. 2023. Vol. 16(4). Article 1669. DOI:10.3390/ma16041669
13. О. В. Ляшко, В. М. Лазорик, І. А. Селіверстов. Механохімічне легування композитних порошків Al-Si-hBN для нанесення ущільнюючих плазмових покриттів. Том 1 № 3(94) (2025): Вісник Херсонського національного технічного університету, с. 177–182, <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.1.21>
14. Пристрій для плазмового-дугового напылення покриттів : пат. 54496 Україна : МПК B23K 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.
15. Пристрій для оцінки процесу тертя і зношування матеріалів: пат. 66940 Україна : МПК G01N13/00 (2012) / Селіверстов І. А., Уваров В. А., Смирнов І. В. заявник і власник Херсонський національний технічний університет № 66940 ; заявл. 29.06.2011; опубл. 25.01.2012, Бюл. № 2/2012.

#### References

1. Vinogradov, A. Yu., & Agnew, S. R. (2004). Nanocrystalline materials: Fatigue. In *Encyclopedia of nanotechnology* (pp. 2269–2288). Marcel Dekker. <https://doi.org/10.2320/matertrans.42.74>
2. Karabulut, G., Beköz Üllen, N., Akyüz, E., & Karakuş, S. (2023). Surface modification of 316L stainless steel with multifunctional locust gum/polyethylene glycol-silver nanoparticles using different coating methods. *Progress in Organic Coatings*, 174, 107291. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2022.107291>
3. Shtansky, D. V., et al. (2001). [Title not specified]. *Surface and Coatings Technology*, 148(2–3), 204–213.
4. Wu, P., Dii, H. M., Chen, X. L., Li, Z. Q., Bai, H. L., & Jiang, E. Y. (2004). Influence of WC particle behavior on the wear resistance properties of Ni-WC composite coatings. *Wear*, 257(1–2), 142–147. DOI: 10.1016/j.wear.2003.10.019

5. Liu, X., & Zhang, B. (2002). Effects of grinding process on residual stresses in nanostructured ceramic coatings. *Journal of Materials Science*, 37, 3229–3239. doi.org/10.1023/A:1016174731658
6. He, J., Ice, M., & Lavernia, E. J. (2000). Synthesis of nanostructured Cr<sub>3</sub>C<sub>2-25</sub>(Ni<sub>20</sub>Cr) coatings. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 31A, 555–564. DOI:10.1007/s11661-000-0290-0
7. Levashov, E. A., Pogozhev, Yu. S., Kudryashov, A. E., Rupasov, S. I., & Levina, V. V. (2008). TiC–Ni-based composite materials dispersion-strengthened by nanoparticles for electrospark deposition. *Journal of Non-Ferrous Metals*, 49(5), 397–403. DOI:10.3103/S1067821208050167
8. Zenkin, N. A., & Kopylov, V. I. (2002). *Povyshenie ekspluatatsionnykh kharakteristik kompozitsionnykh materialov putem optimizatsii uprochniuiushchikh tekhnologii*. Holovna spetsializovana redaktsiia literatury movamy natsionalnykh menshyn Ukrainy.
9. Marcinauskas, L. (2010). Deposition of alumina coatings from nanopowders by plasma spraying. *Materials Science (Medžiagotyra)*, 16(1), 47–51.
10. Smyrnov, I. V., Chornyi, A. V., Furman, V. K., & Dolhov, N. A. (2017). Vplyv nanodispersnykh modifikatoriv na strukturu i vlastyosti plazmenno napylenykh pokryttiv. *Materialoznavstvo ta mashynobuduvannia*, (5). <https://doi.org/10.20535/1810-0546.2017.5.94945>
11. Smyrnov, I. V., et al. (2011). Povyshenie iznosostoikosti plazmennykh pokrytii na osnove kompozitsionnogo poroshka s nanochastitsami SiO<sub>2</sub>. *Vestnik Natsionalnogo tekhnicheskogo universiteta "KhPI". Seriya: Novye resheniia v sovremennykh tekhnologiakh*, (2), 70–74.
12. Senderowski, C., Vigilianska, N., Burlachenko, O., Grishchenko, O., Murashov, A., & Stepanyuk, S. (2023). Effect of APS spraying parameters on the microstructure formation of Fe<sub>3</sub>Al intermetallics coatings using mechanochemically synthesized nanocrystalline Fe-Al powders. *Materials*, 16(4), 1669. DOI:10.3390/ma16041669
13. Liashko, O. V., Lazoryk, V. M., & Sieliverstov, I. A. (2025). Mekhanokhimichne lehuвання kompozytnykh poroshkiv Al–Si–hBN dlia nanesennia ushchilniuiuchykh plazmovykh pokryttiv [Mechanochemical alloying of Al–Si–hBN composite powders for deposition of sealing plasma coatings]. *Visnyk Khersonskoho natsionalnogo tekhnichnogo universytetu*, 1(3(94)), 177–182.
14. Chornyi, A. V., Kopylov, V. I., Ziberov, M. L., Smyrnov, I. V., & Sieliverstov, I. A. (2010). *Device for plasma-arc spraying of coatings* (Ukraine Patent No. 54496; IPC B23K 10/00). National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute". Published November 10, 2010 (Bulletin No. 21).
15. Sieliverstov, I. A., Uvarov, V. A., & Smirnov, I. V. (2012). *Device for evaluating the process of friction and wear of materials* (Ukraine Patent No. 66940; IPC G01N13/00). Kherson National Technical University. Published January 25, 2012 (Bulletin No. 2/2012).

Дата першого надходження статті до видання: 07.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 11.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026