

ТЕХНІЧНІ НАУКИ

УДК 621.793

DOI <https://doi.org/10.37406/2706-9052-2026-1-33>

Голов'ятинська В. В.

вчитель хімії

Дніпровський ліцей № 97 Дніпровської міської ради

Дніпро, Україна

E-mail: vitagolovetinskaa@gmail.com

ORCID: 0009-0008-5719-6987

ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ТА ІННОВАЦІЙНОГО ПОТЕНЦІАЛІВ ДЕТОНАЦІЙНОГО НАПИЛЕННЯ

Анотація

Стаття присвячена проблемам розвитку детонаційного напилення, що являє інтерес як у зв'язку з дискретним і циклічним характерами технологічного процесу нанесення покриття, так і високою якістю детонаційних покриттів. Метою роботи є обґрунтування та виділення перспективних напрямів інноваційного розвитку детонаційного напилення. Розглянуто потенціали керування дискретними циклами детонаційного напилення та використання допоміжних переходів у процесі нанесення детонаційного покриття. Запропоновано підвищити якість детонаційних покриттів за рахунок виконання додаткових технологічних операцій в інтервалах між циклами детонаційного напилення. Розглянуто структурно-організаційний порядок адитивного формування детонаційних покриттів, який доцільно розробляти на основі ієрархічної структури рівнів глибини технології. Використання факторів формування детонаційних покриттів на всіх рівнях технологічної глибини і структурного синтезу технології підвищує якість і забезпечує максимальну адаптацію детонаційних покриттів до планованих умов експлуатації. Виняткові властивості детонаційних покриттів можуть бути поліпшені за рахунок використання варіативності побудови технологічних процесів детонаційного напилення, заснованих на дискретному і циклічному характері процесу формування покриття. Як інноваційні пріоритети розвитку і використання детонаційного напилення виділені такі напрями: поглиблення процесу нанесення детонаційних покриттів з додатковими методами обробки; нанесення покриттів на поверхні глибоких отворів невеликого поперечного перерізу; нанесення покриттів на заготовки, вразливі до теплової деформації; нанесення неоднорідних покриттів.

Ключові слова: детонаційне напилення, рівень глибини технології, цикл детонаційного напилення, допоміжний перехід, детонаційне покриття.

Вступ. Газотермічне напилення являє собою сукупність споріднених методів нагріву і перенесення частинок напилюваного порошку на оброблювану поверхню заготовки, що носять безперервний або дискретний та циклічний характер процесу формування покриття [8, с. 40]. До таких методів належать, наприклад, плазмове напилення, детонаційне напилення, газополум'яне напилення, електродугове напилення, HVOF та HVOF [1, с. 45; 3, с. 11–12; 6, с. 48–80; 9, 36–258].

Газотермічні покриття використовуються у вирішенні різних технічних і економічних завдань, насамперед:

- забезпечення функціональних властивостей робочих поверхонь деталей під час їх виготовлення;
- відновлення геометричних параметрів і функціональних властивостей зношених поверхонь деталей;
- заміна дорогих конструкційних матеріалів на більш дешеві конструкційні матеріали;
- підвищення конкурентоспроможності деталей за рахунок поліпшення їх експлуатаційних характеристик або зниження вартості.

Під час нанесення газотермічних покриттів використовуються багатоманітні технологічні прийоми, які можуть мати місце не залежно від безперервного або дискретного характеру процесу формування покриттів, у тому числі такий як запропонована модифікація методу нанесення детонаційних композиційних покриттів магнітним полем [2]. Детонаційне напилення являє інтерес як у зв'язку з дискретним і циклічним характерами технологічного процесу нанесення покриття, так і високою якістю детонаційних покриттів. На сайті компанії

Praxair Surface Technologies, що пропонує для авіаційних двигунів номенклатуру деталей з понад ста найменувань, велика частина яких мають зносостійкі детонаційні покриття з композитів на основі карбідів вольфраму і хрому, детонаційне напilenня вказано як «провідне рішення для деталей, що вимагають виняткового зносу і виняткових механічних властивостей» [10].

Одним з помітних результатів багаторічної роботи фахівців і вчених ІЕС ім. Є.О. Патона НАН України в галузі нанесення газотермічних покриттів є багатокамерний безклапанний детонаційний пристрій (БКДП) [4, с. 9–10; 5; 7]. Цьому присвячена робота, в якій не тільки зазначена ефективність покриттів, нанесених з використанням БКДП, але і досить детально описані конструкція та принцип його роботи, а саме «у пристрої реалізоване безперервне подання горючої газової суміші й порошку, що дозволяє ініціювати детонаційний процес згорання з великою частотою – 20 Гц і вище» [5, с. 39–40]. Відзначимо, що під час нанесення детонаційного покриття для забезпечення локального нагріву оброблюваної поверхні заготовок у межах 100–120 °С необхідно регулювати циклічність процесу нанесення детонаційного покриття з частотою значно меншою ніж 20 Гц, а це у разі безперервної подачі горючої газової суміші не можна виконати. Але більш істотною обставиною у разі використання БКДП є те, що на ньому не можна реалізувати низку переважних технологічних факторів, можливих до використання завдяки дискретності та циклічності процесу детонаційного напilenня.

Мета дослідження – обґрунтувати та виділити перспективні напрями інноваційного розвитку детонаційного напilenня на основі аналізу використання потенціалу технологічних факторів, властивих його дискретності та циклічності.

Виклад основного матеріалу дослідження. У результаті одиничного технологічного циклу детонаційного напilenня (цикл напilenня) утворюється одинична пляма покриття. Детонаційне покриття формується на оброблюваній поверхні заготовки з одиничних плям покриття, які послідовно наносяться і своєчасно зміщуються стосовно одна одної. Детонаційні покриття можуть мати однорідний склад – одношарове покриття, а також можуть мати неоднорідні склади, наприклад багатошарове, градієнтне або комбіноване покриття. Вибір виду детонаційних покриттів для вирішення конкретної технічної задачі пов'язаний з потенціалом їх фізичних, механічних та інших програмованих властивостей.

Процес напilenня детонаційних покриттів може здійснюватися з одночасним або почерговим використанням одного або декількох складів напилюваних порошоків, що подаються у стовбур установки детонаційного напilenня (стовбур установки) з різних дозаторів порошку. Подача дози напилюваного порошку може здійснюватися в процесі нанесення детонаційного покриття у відповідному циклі напilenня в індивідуально заданий час, що є одним з технологічних прийомів управління властивостями одиничних плям покриття.

Регульована циклічна подача вибухової суміші газів у стовбур установки реалізується за допомогою клапанної системи. Склад вибухової суміші газів, а також обсяг подачі цієї суміші у стовбур установки може бути індивідуальним для кожного циклу напilenня, що доцільно у випадках використання під час напilenня декількох видів порошоків або формування необхідних властивостей одиничних плям покриття. Циклічна зміна складу та співвідношення у складі вибухової суміші газів, наприклад ацетилену з киснем або водню з киснем, забезпечує формування необхідного середовища продуктів детонації, а саме: відновлювальної, окислювальної або нейтральної. Додавання у вибухову суміш інертних та інших газів, наприклад гелію, аргону або азоту, використовується для відповідного модифікування газового середовища продуктів детонації.

До реалізації першого циклу напilenня за допомогою детонаційної установки, використовуваної для напilenня порошку, можуть бути виконані необхідні технологічні операції з підготовки оброблюваної поверхні заготовки для напilenня детонаційного покриття, наприклад:

- нагрів оброблюваної поверхні заготовки з метою зниження внутрішніх напружень у нанесеному покритті за рахунок попереднього розширення оброблюваної поверхні заготовки;
- абразивне очищення оброблюваної поверхні заготовки з метою підвищення ступеня активації напилюваної поверхні.

Циклограма кожного циклу напilenня під час нанесення одиничної плями покриття може бути задана індивідуально. На початковому етапі циклу напilenня в задані моменти часу реалізуються подачі у стовбур установки дози вибухової суміші газів і дози напилюваного порошку. У разі підпалу в заданий момент часу вибухової суміші газів виникає горіння, яке переходить у детонацію. Детонація вибухової суміші газів забезпечує значне і швидке збільшення обсягу продуктів детонації у стовбурі установки, що призводить до витікання з його відкритого кінця високошвидкісного та високотемпературного потоку продуктів детонації з частинками напилюваного порошку. Кінцевий етап циклу напilenня – формування одиничної плями покриття у контакт з високошвидкісних і розігрітих частинок напилюваного порошку з оброблюваною поверхнею заготовки в результаті процесів їх деформації, плавлення і спікання.

Проміжки часу між циклами напilenня в технологічний час нанесення детонаційного покриття – допоміжні переходи, тривалість яких також може бути задана індивідуально. Допоміжні переходи можуть бути використані для реалізації переміщення стосовно вихідної частини ствола установки оброблюваної заготовки у разі нанесення детонаційних покриттів на її окремі ділянки.

У проміжки часу між циклами напilenня можливе виконання технологічних операцій додаткової обробки покриття, наприклад:

- лазерне поверхневе оплавлення одиничних плям покриття;
- нагрівання або охолодження зони нанесення одиничних плям покриття.

У разі використання профільних насадок на виході з відкритої частини стовбура установки з круглим поперечним перерізом можуть бути отримані інші форми одиничних плям покриття (рис. 1), наприклад, для нанесення острівцевих ділянок заданої форми у формуванні армованих покриттів. Автоматична зміна профільних насадок у міру необхідності здійснюється під час допоміжних переходів.

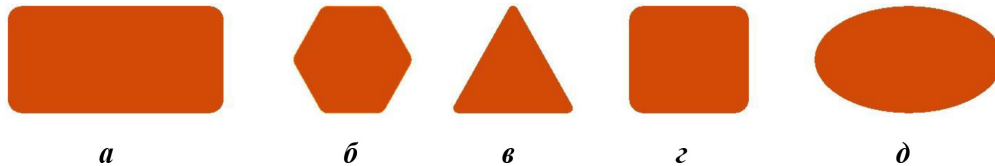


Рис. 1. Можливі форми одиничних плям покриття у разі використання профільних насадок:
а – прямокутна, б – шестигранна, в – трикутна, г – квадратна, д – овальна

Зміна розташування одиничних плям покриття однакової форми на оброблюваній поверхні заготовок може виконуватися, наприклад, з метою забезпечення рівномірності нанесення детонаційних покриттів або зниження внутрішніх напружень у покритті (рис. 2).

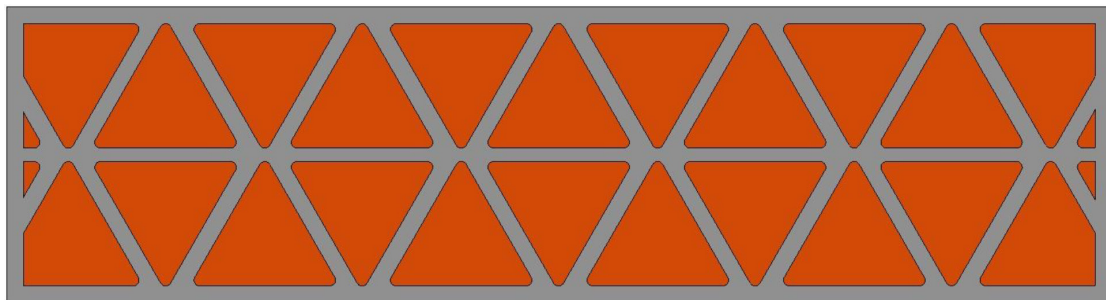


Рис. 2. Зміна розташування одиничних плям покриття однакової форми на оброблюваній поверхні заготовки

Детально розглянемо можливу додаткову технологічну операцію, яка може мати місце між циклами напилення. Під час кожного циклу напилення в кінці потоку продуктів детонації з частинками порошку концентруються частинки порошку з низькою швидкістю. Низькошвидкісні частинки беруть участь у формуванні зовнішньої поверхні одиничних плям покриття, що знижує фізичні та механічні характеристики останніх на макрорівні, включаючи когезію між ними. Низькошвидкісні частинки порошку, що негативно впливають на якість формованих покриттів, мають місце і в методах газотермічного напилення з безперервним характером процесу. Однак у разі безперервного характеру процесу газотермічного напилення низькошвидкісні частинки порошку розподіляються по всьому об'єму формованого покриття, а у разі детонаційного напилення вони сконцентровані на зовнішній поверхні одиничних плям покриття. Завдяки циклічності процесу детонаційного напилення виникає можливість очищення поверхні кожної одиничної плями покриття від низькошвидкісних частинок, які взяли участь у їх формуванні. Така можливість реалізується шляхом поетапної абразивної обробки формованих одиничних плям покриття, наприклад, за допомогою детонаційної установки для абразивної обробки, стовбур якої встановлений під кутом приблизно 30° до оброблюваної поверхні заготовки, в який з дозатора порошку подається абразивний порошок. Циклічний процес роботи детонаційної установки для абразивної обробки може бути організований поза тимчасовим впливом на циклічний процес роботи детонаційної установки для напилення порошку, позаяк цикли абразивної обробки формованого покриття можна реалізовувати між циклами напилення, наприклад, під час подачі вибухової суміші газів і напилюваного порошку у стовбур детонаційної установки для напилення порошку.

Умовні приклади адитивного формування детонаційних покриттів неоднорідного складу показані на рис. 3.

Операційний порядок адитивного формування детонаційних покриттів з неоднорідним складом реалізується відповідно до заданої структурної схеми за рахунок можливості циклічної програмованої зміни режимів нанесення одиничних плям покриття.

Складні технологічні завдання формування детонаційних покриттів прагматично розробляти на основі ієрархічної структури рівнів глибини технології та синтезу структури технології. Умовна схема ієрархічної структури рівнів глибини технології з урахуванням синтезу структури технології під час нанесення детонаційних покриттів наведена на рис. 4.

Під час нанесення газотермічних покриттів з використанням відбивачів на внутрішні поверхні обмежених поперечних розмірів детонаційне напилення потенційно має переважні можливості з підстав ергономічності

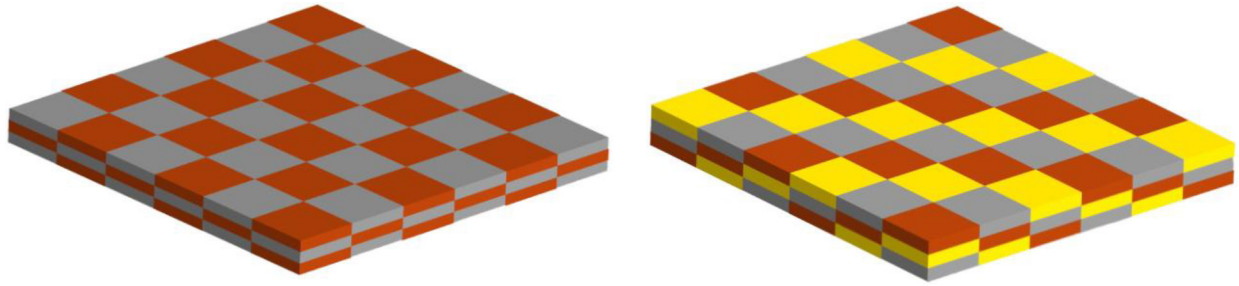


Рис. 3. Умовні приклади адитивного формування детонаційних покриттів неоднорідного складу

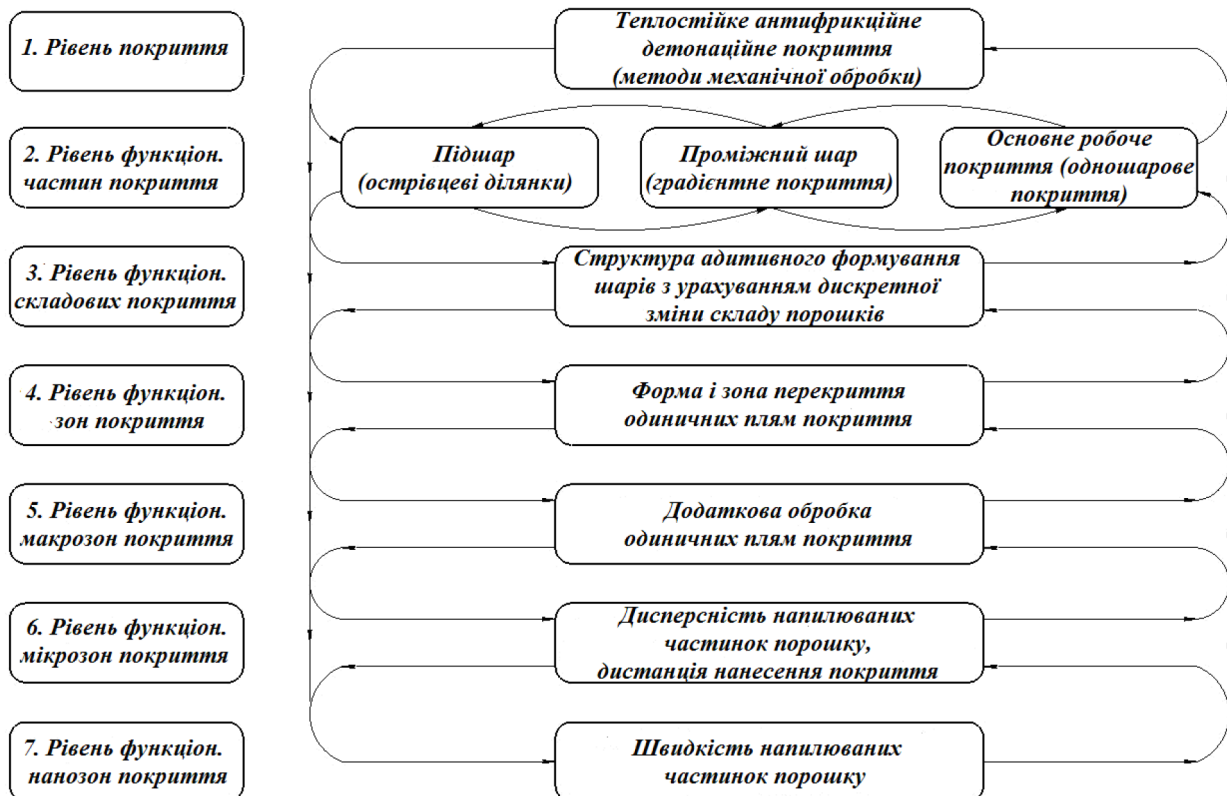


Рис. 4. Ієрархічна структура рівнів глибини технології з урахуванням синтезу структури технології під час нанесення детонаційних покриттів

організації відведення продуктів нагріву з обмеженого простору та можливості обробки отворів діаметром від 20 мм до 100 мм на глибину до 1500 мм.

Висновки. Виняткові властивості детонаційних покриттів можуть бути посилені за рахунок використання варіативності побудови технологічних процесів детонаційного напилення на основі дискретного і циклічного характерів процесу формування покриття, а саме:

- індивідуального управління технологічними параметрами нанесення одиничних плям покриття та допоміжних переходів під час нанесення покриттів одношарових або з неоднорідним складом;
- застосування додаткових технологічних операцій у процесі детонаційного напилення покриття між циклами нанесення одиничних плям покриття.

Раціональне узгодження і використання факторів формування та додаткової обробки детонаційних покриттів на всіх рівнях глибини технології забезпечує можливість підвищення якісних властивостей детонаційних покриттів та максимальної адаптації останніх до планованих умов експлуатації.

Як інноваційні пріоритети розвитку і використання детонаційного напилення на основі дискретного і циклічного характерів процесу формування покриття можна виділити такі напрями розробок:

- поєднання процесу нанесення детонаційних покриттів з додатковими методами обробки;
- нанесення покриттів на поверхні глибоких отворів невеликого поперечного перерізу;
- нанесення покриттів на заготовки, вразливі до теплової деформації;
- нанесення неоднорідних покриттів.

Список використаних джерел

1. Анісімов В., Гулько І., Бурлака С. Шляхи розвитку методів газотермічного напилення для покращення енергоефективності ремонту машин АПК. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2024. № 1. С. 44–47. DOI: 10.31891/2307-5732-2024-331-5
2. Довгаль А. Г., Приймак Л. Б., Трофімов І. Л. Модифікація методу нанесення детонаційних композиційних покриттів магнітним полем. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2016. Т. 6. № 5. С. 33–38. DOI: 10.15587/1729-4061.2016.85628
3. Дубовий О. М., Степанчук А. М. Технологія напилення покриттів : підручник. Миколаїв : НУК, 2007. 236 с.
4. Колісниченко О. В., Коржик В. М., Стухляк П. Д., Кільдій А. І., Товбін Р., Шинлов М. та ін. Розвиток технології детонаційного газового напилення покриттів в ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАНУ (Огляд). *Автоматичне зварювання*. 2024. № 4. С. 3–14. <https://patonpublishinghouse.com/as/pdf/2024/as202404all.pdf>
5. Колісниченко О. В., Тюрін Ю. М. Властивості покриттів, напилених багатокамерним детонаційним пристроєм та їх застосування. *Автоматичне зварювання*. 2023. № 9. С. 39–44. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2023.09.07>
6. Корж В. М., Кузнецов В. Д., Борисов Ю. С., Ющенко К. А. Нанесення покриття : навчальний посібник. Київ : Арістей, 2005. 204 с.
7. Liming Ke, Stukhlyak P., Mudrichenko V. Особливості структури покриттів з карбідів вольфраму та хрому при детонаційно-газовому напиленні з кумуляцією енергії в багатокамерному пристрої. *Автоматичне зварювання*. 2024. № 5. С. 40–47. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2024.05.05>
8. Шиліна О. П., Осадчук А. Ю. Газотермічні методи напилювання покриттів : навчальний посібник. Вінниця : ВНТУ, 2006. 103 с.
9. Ющенко К. А., Борисов Ю. С., Кузнецов В. Д., Корж В. М. Інженерія поверхні : підручник. Київ : Наукова думка, 2007. 558 с.
10. Efficiency and Reliability. Coating Application Methods. *Linde*. URL: <http://www.praxairsurfacetechologies.com/en/coating-services/application-processes/thermal-spray> (дата звернення: 09.12.2025).

Holoviatynska V. V.

Chemistry teacher

Dnipro Lyceum No. 97 of the Dnipro City Council

Dnipro, Ukraine

E-mail: vitagolovetinskaa@gmail.com

ORCID: 0009-0008-5719-6987

FUNDAMENTAL MANUFACTURING AND INNOVATIVE POTENTIALS OF DETONATION SPRAYING

Abstract

The article is devoted to the problems of development of detonation spraying, which is of interest both in connection with the discrete and cyclic nature of the technological process of coating application, and the high quality of detonation coatings. The purpose of the work is to substantiate and identify promising areas of innovative development of detonation spraying. The potentials of controlling discrete cycles of detonation spraying and the use of auxiliary steps in the process of applying a detonation coating are considered. It is proposed to improve the quality of detonation coatings by performing additional technological operations in the intervals between detonations spraying cycles. The structural and organizational order of the additive formation of detonation coatings is considered, which it is advisable to develop based on the hierarchical structure of the technology depth levels. The use of factors in the formation of detonation coatings at all levels of technological depth and structure synthesis of technology improves quality and maximizes the adaptation of detonation coatings to the planned operating conditions. The exceptional properties of detonation coatings can be enhanced by using the variability of the construction of technological processes for detonation spraying based on the discrete and cyclic nature of the coating formation process. The following aspects are highlighted as innovative developments and using priorities for detonation spraying: combining the detonation coating application process with additional treatment methods; applying coatings to surfaces of deep holes with small cross-sections; applying coating of blanks susceptible to thermal deformation; applying heterogeneous coating.

Key words: *detonation spraying, technology depth level, detonation spraying cycle, auxiliary step, detonation coating.*

References

1. Anisimov, V., Gunko, S., & Burlaka, S. (2024). Shiakhy rozvytku metodiv hazotermichnoho napylennia dlia pokrashchennia energoefektyvnosti remontu mashyn APK [Ways of development of gas thermal spraying methods for improving energy]. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu – Herald of Khmelnytskyi National University*, 1, 44–47. DOI: 10.31891/2307-5732-2024-331-5 [in Ukrainian].
2. Dovgal, A. G., Pryimak, L. B., & Trofimov, I. L. (2016). Modyfikatsiia metodu nanesennia detonatsiinykh kompozytsiinykh pokryttiv magnitnym polem [Modification of the method of applying detonation composite coatings by a magnetic field]. *Skhidno-Yevropeyskyi zhurnal peredovykh tekhnologii – Easern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6/5, 33–38. DOI: 10.15587/1729-4061.2016.85628 [in Ukrainian].
3. Dubovyi, O. M., & Stepanchuk, A. M. (2007). *Tekhnologii napylennia pokryttiv [Coating technology]*. Mykolaiv : NUK [in Ukrainian].
4. Kolisnichenko, O. V., Korzhyk V. M., Stukhlyak P. D., Kildii A. I., Tovbin R., Shinlov M. et al. (2024). Rozvytok tekhnologii detonatsiynogo gazovogo napylennia v IEZ im. Ye. O. Patona NANU [Development of detonation gas spraying technology of coatings

in the E. O. Paton Electric Welding Institute of the NASU (Overview)]. *Avtomatichne zvariuvannia – Automatic welding*, 4, 3–14. Retrieved from: <https://patonpublishinghouse.com/as/pdf/2024/as202404all.pdf> [in Ukrainian].

5. Kolisnichenko, O. V., & Tiurin, Yu. M. (2023). Vlastyvoli pokrytiv, napylenykh bahatokamernym detonatsiinym prystroiem ta yikh zastosuvannia [Properties of coatings, deposited by multichamber detonation device and their application]. *Avtomatichne zvariuvannia – Automatic welding*, 9, 39–44. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2023.09.07> [in Ukrainian].

6. Korzh, V. M., Kuznetsov, V. D., Borysov, Yu. S., & Yushchenko, K. A. (2005). *Nanesennia pokryttia [Coating application]*. Kyiv : Aristei [in Ukrainian].

7. Liming, Ke, Stukhiak, P. & Mudrichenko, V. (2024). Osoblyvosti struktury pokryttiv z karbidiv volframu ta khromu pry detonatsiino-gazovomu napylenni z kumukiatsiieiu energii v bahatokamernomu prystroi [Features of the structure of coatings of tungsten and chromium carbides during detonation-gas spraying with energy accumulation in a multi-chamber device]. *Avtomatichne zvariuvannia – Automatic welding*, 5, 40–47. <https://doi.org/10.37434/as2024.05.05> [in Ukrainian].

8. Shylina, O. P., & Osadchuk, A. Yu. (2006). *Gazoterichni metody napyliuvannia pokrut [Gas-thermal coating methods]*. Vinnytsia : VNTU [in Ukrainian].

9. Yushchenko, K. A., Borysov, Yu. S., Kuznetsov, V. D., & Korzh, V. M. (2007). *Inzheneriia poverkhni [Surface engineering]*. Kyiv : Naukova dumka [in Ukrainian].

10. Efficiency and Reliability. Coating Application Methods. *Linde*. Retrieved from: <http://www.praxairsurfacetechologies.com/en/coating-services/application-processes/thermal-spray> (Last accessed: 09.12.2025).



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 07.01.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 23.02.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 27.04.2026