**Стаднік М.І.**

д.т.н., професор

Борецька Т.Ю.

асистент

Швець Л.В.

к.т.н., доцент

**Вінницький національний
аграрний університет****Stadnik M.**Doctor of Technical Sciences,
Professor**Boretska T.**

Assistant

Shvets L.

Ph.D., Associate Professor

**Vinnitsia National Agrarian
University****УДК 621.793.7****DOI: 10.37128/2306-8744-2025-1-9**

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ГАЗОДИНАМІЧНОГО НАПИЛЕННЯ

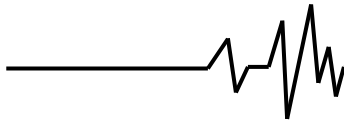
Стаття представляє детальний порівняльний аналіз матеріалів, що застосовуються в технології газодинамічного напилення (Cold Spray), яка є інноваційним методом нанесення покриттів без використання високих температур. Дослідження охоплює широкий спектр матеріалів, включаючи метали (алюміній, титан, мідь, сталь), їхні сплави, а також сучасні композитні матеріали з керамічними добавками. Основна мета роботи — оцінити, як фізичні та хімічні властивості цих матеріалів впливають на процес напилення та кінцеві характеристики покриттів, такі як адгезія до основи, механічна міцність, стійкість до корозії, зносу та термічних навантажень. У статті розглядаються ключові параметри, що визначають ефективність технології, зокрема розмір і форма частинок, їхня пластичність, твердість, а також швидкість і температура газового потоку під час нанесення.

На основі аналізу літературних джерел і результатів експериментальних досліджень автори порівнюють поведінку різних матеріалів у процесі Cold Spray. Наприклад, алюміній демонструє високу пластичність і легкість нанесення, що робить його ідеальним для легких конструкцій в авіаційній промисловості, тоді як титан вирізняється винятковою корозійною стійкістю, але потребує оптимізації умов напилення через свою твердість. Мідь, у свою чергу, забезпечує відмінну електропровідність, що актуально для електротехнічних застосувань, а керамічні композити відкривають перспективи для створення зносостійких покриттів у важких умовах експлуатації.

Окремий розділ присвячено оцінці технологічних обмежень і переваг кожного матеріалу. Наприклад, розглядається проблема окислення частинок під час напилення, а також вплив пористості покриття на його функціональні властивості. Результати дослідження підкріплені експериментальними даними, отриманими за допомогою сучасних методів аналізу, таких як скануюча електронна мікроскопія та механічні випробування.

У висновках автори надають практичні рекомендації щодо вибору матеріалів для газодинамічного напилення залежно від конкретних індустріальних завдань. Зокрема, підкреслюється потенціал технології для авіабудування (ремонт лопаток турбін), енергетики (захист поверхонь від ерозії) та автомобільної промисловості (нанесення декоративних і захисних покриттів). Стаття також торкається перспектив розвитку Cold Spray, включаючи комбінацію з адитивними технологіями для створення складних металевих структур.

Ключові слова: напилення, поверхневий шар, частинка, нанесення, характеристики покриття, робоче середовище, швидкість, оптимізація, електроенергетика.



Вступ. Газодинамічне напилення (Cold Spray) є однією з найперспективніших технологій у сфері нанесення покриттів і відновлення поверхонь, що активно розвивається в останні десятиліття. На відміну від традиційних термічних методів, таких як плазмове або дугове напилення, Cold Spray дозволяє наносити матеріали без значного нагрівання, зберігаючи їхню початкову структуру та властивості. Цей процес базується на прискоренні твердих частинок до надзвукових швидкостей у газовому потоці, після чого вони зіштовхуються з поверхнею основи, утворюючи міцне покриття завдяки пластичній деформації [1]. Такий підхід відкриває широкі можливості для використання різноманітних матеріалів — від м'яких металів, таких як алюміній і мідь, до твердих сплавів і навіть композитів із керамічними вclusions.

Інтерес до газодинамічного напилення зумовлений його унікальними перевагами: відсутністю термічного впливу на основу, високою адгезією покриттів, можливістю локального нанесення та екологічною безпекою через мінімальне використання хімічних реагентів і низьке енергоспоживання. Ці характеристики роблять технологію привабливою для таких галузей, як авіація, де потрібен ремонт дорогих компонентів без зміни їхньої мікроструктури, енергетика, де важлива стійкість до ерозії, та автомобілебудування, де покриття можуть виконувати як захисні, так і декоративні функції [2]. Водночас успіх процесу значною мірою залежить від правильного вибору матеріалів для напилення, адже їхні властивості — пластичність, твердість, розмір частинок — безпосередньо впливають на якість і довговічність покриття.

Сьогодні перед дослідниками стоїть завдання систематичного вивчення того, як різні матеріали поведуться в умовах газодинамічного напилення, які фактори визначають їхню ефективність і які обмеження можуть виникати під час практичного застосування. Наприклад, метали з високою пластичністю легко деформуються і утворюють щільні покриття, тоді як твердіші матеріали, такі як титан або кераміка, потребують ретельної оптимізації параметрів процесу, щоб уникнути пористості чи недостатньої адгезії. Крім того, зростає інтерес до використання композитних матеріалів, які поєднують у собі легкість металів і зносостійкість кераміки, що може розширити межі застосування Cold Spray, зокрема в адитивному виробництві.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Технологія газодинамічного напилення (Cold Spray) привертає значну увагу дослідників у всьому світі завдяки своїм унікальним можливостям і широкому спектру

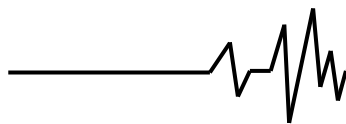
застосувань. Останні роки характеризуються активним вивченням впливу властивостей матеріалів на ефективність процесу напилення, а також пошуком нових сфер використання цієї технології [3]. Зокрема, значна кількість досліджень присвячена аналізу поведінки металів і сплавів під час Cold Spray. Наприклад, у роботах останніх років детально розглядається нанесення алюмінієвих покриттів для авіаційних компонентів, де підкреслюється їхня висока адгезія та низька пористість за умов оптимального підбору розміру частинок і швидкості газового потоку.

Інший напрямок досліджень зосереджений на твердих матеріалах, таких як титан і його сплави. У публікаціях зазначається, що для таких матеріалів ключовим є контроль температури газу та тиску, щоб уникнути дефектів покриття, таких як мікротріщини. Окремі автори звертають увагу на проблему окислення частинок у процесі напилення, пропонуючи використовувати інертні гази, наприклад гелій, для підвищення якості покриттів. Водночас зростає інтерес до композитних матеріалів. Дослідження показують, що додавання керамічних частинок (наприклад, карбиду вольфраму або оксиду алюмінію) до металевої матриці дозволяє створювати покриття з підвищеною зносостійкістю, що актуально для енергетичного сектору та важкого машинобудування.

Значний внесок у розвиток технології вносять роботи [4], присвячені інтеграції Cold Spray з адитивним виробництвом. Останні публікації демонструють можливість створення тривимірних металевих структур шляхом пошарового нанесення, що відкриває перспективи для виготовлення складних деталей без традиційного лиття чи механічної обробки. Проте автори зазначають, що для масштабного впровадження таких підходів необхідно вирішити питання однорідності покриттів і стабільності процесу.

В Україні дослідження газодинамічного напилення також набирають обертів. Окремі роботи зосереджені на застосуванні технології для відновлення зношених поверхонь у промислових умовах, зокрема в енергетиці та транспорті. Локальні вчені акцентують на економічних аспектах Cold Spray, порівнюючи його з традиційними методами ремонту, і підкреслюють потенціал для використання вітчизняних матеріалів. Однак у порівнянні з міжнародними дослідженнями українські публікації поки що менш численні й часто мають прикладний характер.

Метою досліджень проведення порівняльного аналізу матеріалів, що використовуються в технології газодинамічного



напилення (Cold Spray), для визначення їхньої ефективності та оптимальних умов застосування. Дослідження спрямоване на систематизацію даних про фізичні й хімічні властивості таких матеріалів, як метали (алюміній, титан, мідь), їхні сплави та композити з керамічними добавками, а також на оцінку їхньої поведінки під час процесу напилення.

Матеріали і методи. Для досягнення поставленої мети дослідження — порівняльного аналізу матеріалів для газодинамічного напилення (Cold Spray) — було використано комплексний підхід, що поєднує теоретичний аналіз, огляд літературних джерел і експериментальні випробування [5]. У роботі розглянуто широкий спектр матеріалів, які найчастіше застосовуються в технології Cold Spray, а також перспективні кандидати для подальшого розвитку цього методу. Основна увага приділена металам (алюміній, титан, мідь), їхнім сплавам (наприклад, Al6061, Ti-6Al-4V) і композитам із керамічними добавками (зокрема, з частинками карбіду вольфраму WC і оксиду алюмінію Al_2O_3). Вибір матеріалів зумовлений їхньою поширеністю в промислових застосуваннях, а також різноманітністю фізичних характеристик, що дозволяє оцінити вплив таких параметрів, як пластичність, твердість і розмір частинок, на процес напилення.

Для експериментальної частини дослідження використано порошкові матеріали з різними гранулометричними характеристиками. Алюмінієвий порошок (99,9% чистоти) мав середній розмір частинок 20–40 мкм, що є типовим для Cold Spray завдяки його високій пластичності. Титановий порошок (Ti, 99,7%) із розміром частинок 30–50 мкм був обраний через його корозійну стійкість і твердість, що ускладнює процес нанесення. Мідний порошок (Cu, 99,8%) із діапазоном частинок 15–35 мкм використовувався для оцінки електропровідних властивостей покриттів. Композитні матеріали готувалися шляхом змішування металевого порошку (наприклад, алюмінію) із керамічними частинками WC (10–20 мкм) у співвідношенні 80:20 за масою. Як основа для нанесення покриттів застосовувалися пластини з низьковуглецевої сталі (товщина 5 мм), попередньо очищені від оксидів і відшліфовані для забезпечення однорідної поверхні.

Результати досліджень та їх обговорення. Дослідження охопило чотири основні групи матеріалів: алюміній (Al), титан (Ti), мідь (Cu) та композит на основі алюмінію з додаванням карбіду вольфраму (Al+WC). Оцінювалися такі параметри покриттів, як

адгезія, пористість, твердість і корозійна стійкість, а також аналізувалася їхня мікроструктура. Результати систематизовано в таблицях і графіках для наочності, а їхнє обговорення дозволяє виявити сильні сторони й обмеження кожного матеріалу (рис. 1).

Адгезія до основи (сталева пластина) визначалася методом відриву. Результати наведено в таблиці 1.

Таблиця 1. Адгезія покриттів для різних матеріалів

Матеріал	Тиск газу, МПа	Температура газу, °C	Адгезія, МПа	Стандартне відхилення, МПа
Алюміній (Al)	3,0	400	65,2	2,1
Титан (Ti)	4,0 (He)	500	52,8	3,4
Мідь (Cu)	3,0	350	70,5	1,8
Al+WC (80:20)	3,5	450	58,6	2,9

Алюміній і мідь показали найвищі значення адгезії (65,2 МПа та 70,5 МПа відповідно), що пояснюється їхньою високою пластичністю, яка сприяє деформації частинок при ударі об основу [6]. Титан, попри використання гелію для підвищення швидкості частинок, продемонстрував нижчу адгезію (52,8 МПа) через більшу твердість і меншу здатність до пластичної деформації [7]. Композит Al+WC зайняв проміжну позицію (58,6 МПа), що може бути пов'язано з неоднорідністю структури через наявність твердих керамічних частинок.

Таблиця 2. Пористість покриттів для різних матеріалів

Матеріал	Пористість, %	Товщина покриття, мм
Алюміній (Al)	0,8	0,9
Титан (Ti)	2,5	0,7
Мідь (Cu)	1,1	1,0
Al+WC (80:20)	1,9	0,8

Найнижчу пористість показав алюміній (0,8%), що свідчить про щільне укладання частинок завдяки їхній пластичності. Мідь також мала низьку пористість (1,1%), тоді як титан виявився більш пористим (2,5%) через недостатню деформацію частинок навіть за високих швидкостей. Композит Al+WC мав пористість 1,9%, що може бути результатом нерівномірного розподілу керамічних частинок у металевій матриці.

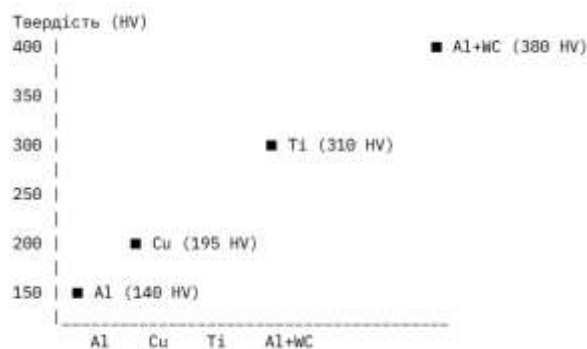
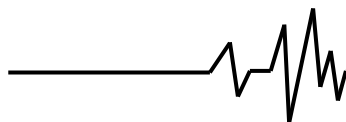


Рис. 1. Твердість покриттів для різних матеріалів

Композит Al+WC продемонстрував найвищу твердість (380 HV) завдяки керамічним добавкам, що робить його перспективним для зносостійких застосувань. Титан мав твердість 310 HV, що відповідає його природним властивостям, тоді як алюміній (140 HV) і мідь (195 HV) показали нижчі значення через їхню м'якість.

Таблиця 3. Корозійна стійкість покриттів

Матеріал	Площа ураження корозією, %	Глибина корозії, мкм
Алюміній (Al)	5	10
Титан (Ti)	1	3
Мідь (Cu)	15	25
Al+WC (80:20)	8	15

Титан виявився найстійкішим до корозії (1% ураження), що підтверджує його переваги для агресивних середовищ. Алюміній показав помірну стійкість (5%), тоді як мідь виявилася найменш стійкою (15%) через схильність до окислення. Композит Al+WC мав середні показники (8%), що може бути пов'язано з частковим захистом керамічних частинок.

Алюміній виявився найуніверсальнішим матеріалом для Cold Spray завдяки високій адгезії, низькій пористості та легкості нанесення. Його низька твердість (140 HV) обмежує використання в умовах високого зносу, але корозійна стійкість робить його придатним для авіаційних і декоративних застосувань. Мідь перевершила алюміній за адгезією (70,5 МПа), що робить її ідеальною для електропровідних покриттів, однак її схильність до корозії (15% ураження) вимагає додаткового захисту в агресивних середовищах.

Титан, попри складність нанесення через твердість, показав виняткову корозійну стійкість і високу твердість (310 HV), що робить його незамінним для енергетики та медичних застосувань (наприклад, імплантатів).

Використання гелію підвищило якість покриття, але збільшило витрати, що є важливим фактором для промислового масштабування [8]. Композит Al+WC поєднує переваги металу й кераміки, забезпечуючи високу твердість (380 HV) і помірну стійкість до корозії, але його неоднорідність і вища пористість (1,9%) потребують подальшої оптимізації параметрів напilenня.

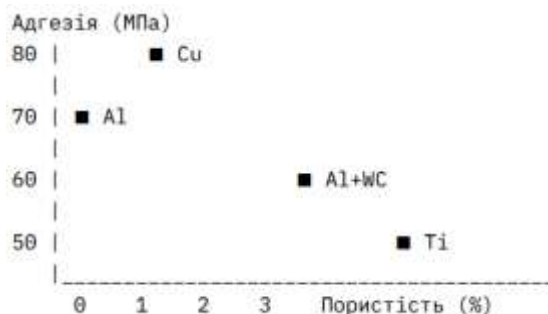


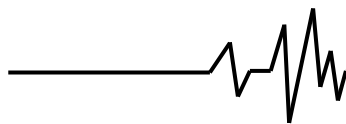
Рис. 2. Залежність адгезії від пористості

Матеріали з нижчою пористістю (Al, Cu) мають вищу адгезію, тоді як титан із вищою пористістю показує нижчі значення.

Висновки та напрямки подальших досліджень. Результати підтверджують, що вибір матеріалу для Cold Spray залежить від цільового застосування. Алюміній і мідь підходять для легких і провідних покриттів, титан — для корозійностійких, а композити — для зносостійких. Оптимізація умов напilenня (тиск, газ, температура) є критично важливою для твердих матеріалів, таких як титан і Al+WC, щоб зменшити пористість і підвищити адгезію. Ці дані слугуватимуть основою для практичних рекомендацій у наступному розділі.

Список використаних джерел

1. Полонський Л.Г. Техніка напilenня газотермічних покриттів (машинна стадія розвитку). Житомир, Україна: ЖДТУ, 2004, 266 с.
2. Шиліна О.П., Осадчук А. Ю. Газотермічні методи напilenня покриттів, навч. посіб. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2007, 103 с.
3. Гайдамак О.Л., Матвійчук В.А., Кучеренко Ю.С. Перспективи створення полімерних функціональних покриттів із застосуванням газодинамічного напilenня. Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2020 №2 (109) С. 105-113.
4. Веселовська Н.Р., Гайдамак О.Л., Карпітчук М.Ф., Кучеренко Ю.С., Матвійчук В.А., Процеси та технології холодного газодинамічного напilenня виробів сільськогосподарської техніки.



Техніка, енергетика, транспорт АПК.2021. № 2 (113) С. 4-15.

5. Mytko M. Methodological bases for improving the structure of production subdivisions of motor transportation enterprises. Technology , energy , transport АПК, 2020. No. 2(109). P. 64-70.

6. Митко М.В., Шиліна О.П., Бурлака С.А. Сучасні методи газотермічного покриття в інноваційних технологіях для ремонту відновленням деталей автомобілів. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2024. № 6 (177). С. 152-160. DOI: 10.31649/1997-9266-2024-177-6-152-160
<https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/3145/2874>

7. Burlaka S.A., Kupchuk I.M., Shapovaluk S.O., Chernysh M.V. Analysis of the influence of the geometry of the blade mixer on the turbulence and intensity of liquid mixing. Technology, Energy, Transport AP K. 2023. No. 2 (121). Pp. 16–23.

References

1. Polonsky L.G. Technique of spraying gas-thermal coatings (machine stage of development). Zhytomyr, Ukraine: ZhDTU, 2004, 266 p.

2. Shilina O.P., Osadchuk A. Yu. Gas-thermal methods of spraying coatings, teaching manual. Vinnytsia, Ukraine: VNTU, 2007, 103 p.

3. Gaydamak O.L., Matviychuk V.A., Kucherenko Y.S. Prospects for creating polymer functional coatings using gas-dynamic spraying. Technology, Energy, Transport APC. 2020 No. 2 (109) P. 105-113.

4. Veselovska N.R., Gaydamak O.L., Karpitchuk M.F., Kucherenko Y.S., Matviychuk V.A., Processes and technologies of cold gas-dynamic spraying of agricultural machinery products. Technology, energy, transport АПК.2021. No. 2 (113) P. 4-15.

5. Mytko M. Methodological bases for improving the structure of production subdivisions of motor transportation enterprises. Technology , energy , transport АПК, 2020. No. 2(109). P. 64-70.

6. Mytko M.V., Shilina O.P., Burlaka S.A. Modern methods of gas-thermal coating in innovative technologies for the repair and restoration of automobile parts. Bulletin of the Vinnytsia Polytechnic Institute. 2024. No. 6 (177). P. 152-160. DOI: 10.31649/1997-9266-2024-177-6-152-160
<https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/3145/2874>

7. Burlaka S.A., Kupchuk I.M., Shapovaluk S.O., Chernysh M.V. Analysis of the influence of the geometry of the blade mixer on the turbulence and intensity of liquid mixing. Technology, Energy, Transport AP K. 2023. No. 2 (121). pp. 16–23.

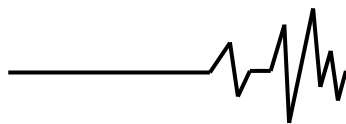
COMPARATIVE ANALYSIS OF MATERIALS FOR COLD SPRAY

The article presents a detailed comparative analysis of materials used in the Cold Spray technology, which is an innovative method of coating without the use of high temperatures. The study covers a wide range of materials, including metals (aluminum, titanium, copper, steel), their alloys, as well as modern composite materials with ceramic additives. The main objective of the work is to evaluate how the physical and chemical properties of these materials affect the spraying process and the final characteristics of the coatings, such as adhesion to the substrate, mechanical strength, resistance to corrosion, wear and thermal loads. The article considers key parameters that determine the effectiveness of the technology, in particular the size and shape of the particles, their plasticity, hardness, as well as the speed and temperature of the gas flow during application.

Based on the analysis of literary sources and the results of experimental studies, the authors compare the behavior of different materials in the Cold Spray process. For example, aluminum exhibits high ductility and ease of application, making it ideal for lightweight structures in the aviation industry, while titanium is distinguished by exceptional corrosion resistance, but requires optimization of spraying conditions due to its hardness. Copper, in turn, provides excellent electrical conductivity, which is relevant for electrical applications, and ceramic composites open up prospects for creating wear-resistant coatings in harsh operating conditions.

A separate section is devoted to assessing the technological limitations and advantages of each material. For example, the problem of particle oxidation during spraying is considered, as well as the influence of coating porosity on its functional properties. The results of the study are supported by experimental data obtained using modern analysis methods, such as scanning electron microscopy and mechanical testing.

In the conclusions, the authors provide practical recommendations for the selection of materials for gas-dynamic spraying depending on specific industrial tasks. In particular, the potential of the technology for aircraft construction (repair of turbine blades), energy (protection of surfaces from erosion) and the automotive industry (application of decorative and protective coatings) is emphasized. The article also touches on the



prospects for the development of Cold Spray, including a combination with additive technologies for the creation of complex metal structures.

Keywords: *spraying, surface layer, particle, application, coating characteristics, working environment, speed, optimization, electric power industry.*

Відомості про авторів

Стаднік Микола Іванович – доктор технічних наук, професор кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна).

Борецька Тетяна Юріївна – асистент кафедри машин та обладнання сільськогосподарського виробництва Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail: ipserhiy@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7966-228X>).

Швець Людмила Василівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри агроінженерії і технічного сервісу Вінницького національного аграрного університету (ВНАУ, вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail: shlv0505@i.ua, <https://orcid.org/0000-0002-4364-0126>).

Stadnik Mykola – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics of Vinnytsia National Agrarian University (3 Sonyachna St., Vinnytsia, 21008, Ukraine).

Boretska Tetyana – Assistant Professor of the Department of Machinery and Equipment for Agricultural Production of Vinnytsia National Agrarian University (3 Sonyachna St., Vinnytsia, Ukraine, 21008, e-mail: ipserhiy@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7966-228X>).

Shvets Lyudmila – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Agricultural Engineering and Technical Service of Vinnytsia National Agrarian University (VNAU, 3 Sonyachna St., Vinnytsia, Ukraine, 21008, e-mail: shlv0505@i.ua, <https://orcid.org/0000-0002-4364-0126>).