

КОНСТРУКЦІЙНІ І ФУНКЦІОНАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ

STRUCTURAL AND FUNCTIONAL MATERIALS

УДК 621.793.71

Шорінов О. В.

канд. техн. наук, доцент кафедри технології виробництва авіаційних двигунів Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», м. Харків, Україна, e-mail: o.shorinov@khai.edu, ORCID: 0000-0002-5057-6679

Поливняний С. О.

заступник директора з виробництва авіаційних двигунів – начальник виробничого управління АТ «Мотор Січ», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: sergeypolyvanij@ukr.net, ORCID: 0000-0003-0558-1353

ЗАЛЕЖНІСТЬ МІКРОТВЕРДОСТІ ПОКРИТТІВ З ПОРОШКУ АСД-1 ВІД РЕЖИМІВ ХОЛОДНОГО ГАЗОДИНАМІЧНОГО НАПИЛЮВАННЯ

Мета роботи. Побудувати залежності мікротвердості алюмінієвого покриття з порошку АСД-1, отриманого холодним газодинамічним напилюванням, від температури та тиску газу на вході в сопло, а також дистанції напилювання.

Методи дослідження. Планування та проведення експериментальних досліджень виконано з використанням методики планування багатofакторних експериментів та регресійного аналізу. Оброблення отриманих результатів експериментів здійснювалося в програмному пакеті для аналізу статистичних даних Stat-Ease 360. Дослідження мікротвердості напилених покриттів проводилося відповідно до ГОСТ 9450–76. «Вимірювання мікротвердості вдавлуванням алмазних наконечників» з використанням твердоміру мікро-Віккерс LECO АМН5 на підготовлених мікрошліфах зразків з покриттями.

Отримані результати. Побудовано тривимірні (поверхні відгуку) та контурні графіки залежності мікротвердості покриттів, напилених холодним газодинамічним методом з порошку АСД-1, від основних параметрів процесу – температури та тиску газу на вході в сопло, а також дистанції напилювання в широкому діапазоні значень. За результатами встановлено, що температура газу та дистанція напилювання мають найбільший вплив на мікротвердість покриттів. Описано зв'язок досліджуваних параметрів напилювання з температурно-швидкісними характеристиками частинок порошку та впливу на значення мікротвердості.

Наукова новизна. Досліджено комплексний вплив основних параметрів процесу холодного газодинамічного напилювання, а саме температури та тиску газу на вході в сопло, а також дистанції напилювання, на мікротвердість алюмінієвих покриттів з порошку АСД-1 в широкому діапазоні значень.

Практична цінність. Отримані залежності мікротвердості покриттів від параметрів процесу можуть бути використані при розробленні науково-обґрунтованих рекомендацій та технологічних процесів напилювання захисних й відновлювальних покриттів холодним газодинамічним методом, зокрема на деталі авіаційних двигунів.

Ключові слова: покриття, планування експерименту, рівняння регресії, режими напилювання, оптимізація.

Вступ

Напилювання покриттів з метою зміцнення, захисту, або відновлення поверхонь забезпечують можливість виготовлення деталей з високою довговічністю та надійністю, підвищують експлуатаційну стійкість, дозволяють відновлювати розміри та властивості пошкоджених поверхонь. За останні десятиліття досягнуто значних успіхів в формуванні покриттів різними методами газотермічного напилювання: детонаційне [1], газополумене [2], плазмове [3], металізація [4] тощо. Всі вони об'єднані єдиним принципом формування покриття – нагріванням та прискоренням матеріалу покриття у вигляді порошку або проволочки, за допомогою

високотемпературного газового струменю. При зіткненні з поверхнею підкладки розплавлені або високопластичні частинки матеріалу пластично деформуються, утворюючи шар покриття. Ці методи дозволяють наносити покриття широкого спектру службового призначення – зносостійких, корозійностійких, тепло- та жаростійких, відновлювальних та інше [5, 6].

Окреме місце серед методів газотермічного нанесення покриттів займає холодне газодинамічне напилювання. На відміну іншим методам напилювання, формування покриттів відбувається за рахунок високошвидкісного зіткнення частинок порошку з підкладкою при їх температурі, значно нижчій за температуру плавлення матеріалу, з якого вони отримані [7].

Холодне газодинамічне напилювання здебільшого знайшло застосування при напилюванні захисних і відновлювальних покриттів на алюмінієві, магнієві, а також титанові сплави, що широко використовуються в авіаційній та ракетно-космічній техніці [8].

Якість покриттів, отриманих газодинамічним напилюванням, залежить від багатьох постійних та змінних факторів, кількість яких може сягати десятків [9]. Тому важливим завданням є проведення досліджень з визначення залежностей фізико-механічних характеристик покриттів від комплексного впливу параметрів процесу напилювання.

Аналіз досліджень та публікацій

Однією з основних характеристик газотермічних покриттів, зокрема і холодного газодинамічного напилювання, що визначає можливість використання виробів з покриттями, є мікротвердість. Автори багатьох досліджень, присвячених вивченню впливу параметрів процесу холодного напилювання на фізико-механічні характеристики покриттів як експериментальним шляхом [10, 11], так і чисельними розрахунками і моделюваннями [12, 13], погоджуються з тим фактом, що швидкість частинок в момент зіткнення відіграє важливу роль на значення адгезійної міцності, пористості, мікротвердості, тощо.

Температурно-швидкісні характеристики частинок залежать від температури і тиску газу на вході в сопло [14], типу газу [15], розміру і форми частинок порошку, їх матеріалу [16], геометрії сопла [17] та інших параметрів.

Наявність великої кількості вхідних параметрів, які впливають на досліджувану функцію, потребує обґрунтованого вибору серед них найбільш впливових. Зазвичай неможливо на основі загальної інформації про об'єкт дослідження визначити в ньому оптимальну область. В цьому випадку побудова композиційних планів, які дозволяють поетапно пройти шлях від початкової точки в дослідженнях до потрапляння в область бажаного оптимуму та описати його одним з рівнянь регресії, є корисним інструментом для дослідження різних технологічних процесів [18].

Використання статистичних методів планування експерименту дозволяє отримати моделі багатофакторних процесів при мінімальному числі окремих дослідів. Такі методи достатньо широко використовуються для оптимізації процесів напилювання покриттів [19].

Побудова математичної моделі стає невід'ємною частиною досліджень. Отримані співвідношення слугують для визначення шуканих характеристик досліджуваного об'єкта, що задовольняють відповідним статистичним вимогам. Для побудови математичної моделі досліджуваного процесу необхідно мати достатньо чітку уяву про його структуру, поведінку окремих елементів, взаємодії між ними, впливу різноманітних факторів, а також про реакцію на зміну умов досліджень.

Результати досліджень залежності мікротвердості покриттів з порошку АСД-1 від режимів холодного газодинамічного напилювання, наведені в цій статті, є

продовженням авторами роботи з оптимізації режимів напилювання за критерієм мікротвердості. Попередня робота була присвячена отриманню моделі, що пов'язує досліджувані фактори – температуру та тиск газу на вході в сопло, а також дистанцію напилювання, з мікротвердістю покриттів з порошку АСД-1 [20]. З аналізу експериментальних даних і дисперсійного аналізу було отримано емпіричну залежність для прогнозування мікротвердості покриттів з порошку АСД-1 в досліджуваних діапазонах значень. Відхилення розрахункових значень від фактичних становила не більше 5 %.

Мета роботи

На основі отриманої раніше емпіричної моделі побудувати залежності мікротвердості алюмінієвого покриття з порошку АСД-1, отриманого холодним газодинамічним напилюванням, від температури та тиску газу на вході в сопло, а також дистанції напилювання.

Матеріал і методика досліджень Обладнання та матеріали

Покриття з порошку алюмінію АСД-1 були напилені на підготовлені зразки з алюмінієвого сплаву Д16-Т з використанням установки для холодного газодинамічного напилювання ДИМЕТ-405. Перед напилюванням зразки підлягали абразивно-струминному оброблюванню корундом фракцією від F60 до F120 для забезпечення шорсткості поверхні (від 120 мкм до 160 мкм) та видалення забруднень.

Дослідження мікротвердості отриманих покриттів виконано за ГОСТ 9450-76 «Вимірювання мікротвердості вдавлюванням алмазних наконечників» з використанням твердоміру мікро-Віккерс LECO АМН5. Вимірювання мікротвердості проводилося на підготовлених за стандартними методиками мікрошліфах зразків з покриттями

Планування та проведення експерименту

Планування експерименту зазвичай складається з наступних кроків: вибір факторів, визначення рівнів та інтервалів варіювання, розроблення матриці експерименту.

Вибір факторів починається з встановлення параметрів процесу холодного газодинамічного напилювання, які значним чином впливають на цільову функцію – мікротвердість покриття. В цьому дослідженні були визначені наступні параметри: температура і тиск газу на вході в сопло, а також дистанція напилювання.

Основні рівні експерименту та інтервали варіювання обраних факторів визначають область проведення експерименту. Використано три рівні: низький (-1), середній (0) та високий (+1).

В табл. 1 наведено фактори та рівні, обрані для проведення експерименту.

Центральний композиційний план (ЦКП) з центрами на гранях було застосовано при плануванні експерименту. Для трьох досліджуваних факторів в ЦКП до повного факторного експерименту (типу 2³)

додають «зіркові» точки (6 шт.) з величиною «зіркового» плеча $\alpha = 1$, а також деяке число n_0 точок в центрі плану ($n = 6$). Загальна кількість дослідів склала 20, що достатньо для оцінки лінійного, квадратичного, а також двофакторного впливу змінних параметрів на цільову функцію (мікротвердість).

Таблиця 1 – Фактори та рівні, прийняті в дослідженні

Фактор	Рівні		
	-1	0	+1
Температура газу T_0 (°C)	450	500	550
Тиск газу P_0 (МПа)	0,6	0,8	1,0
Дистанція напилювання S (мм)	10	15	20

Опис залежностей впливу досліджуваних параметрів на мікротвердість виконано із застосуванням поліному другого порядку, а рівняння регресії з трьома вихідними змінними має вигляд [20]

$$y(x_1; x_2; x_3) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{33} x_3^2, \quad (1)$$

де β_0 – постійна;

$\beta_1, \beta_2, \beta_3$ – коефіцієнти змінних x_1, x_2 і x_3 відповідно;

$\beta_{11}, \beta_{22}, \beta_{33}$ – коефіцієнти квадратів змінних x_1, x_2 і x_3 відповідно;

$\beta_{12}, \beta_{13}, \beta_{23}$ – коефіцієнти взаємодії змінних x_1, x_2 , і x_3 відповідно.

В табл. 2 показано матрицю планування, що складається з 20 експериментів з закодованими та початковими значеннями.

$$\text{Мікротвердість}^{2,66} (HV_{0,15}) = -7,68133 \cdot 10^5 + 2396,87830(T_0) + 2,74734 \cdot 10^5 (P_0) + 8988,59848(S) - \quad (2)$$

Таблиця 2 – Матриця планування експерименту

Точки на плані	№п/п	Дійсні значення			Закодовані значення			Мікротвердість, $HV_{0,15}$
		$T_0, ^\circ\text{C}$	$P_0, \text{МПа}$	$S, \text{мм}$	T_0	P_0	S	
План типу 2^3	1	450	0,6	10	-1	-1	-1	49
	2	550	0,6	10	+1	-1	-1	55
	3	450	1,0	10	-1	+1	-1	58
	4	550	1,0	10	+1	+1	-1	64
	5	450	0,6	20	-1	-1	+1	49
	6	550	0,6	20	+1	-1	+1	57
	7	450	1,0	20	-1	+1	+1	60
	8	550	1,0	20	+1	+1	+1	66
«Зіркові» точки	9	450	0,8	15	-1	0	0	60
	10	550	0,8	15	+1	0	0	66
	11	500	0,6	15	0	-1	0	60
	12	500	1,0	15	0	+1	0	66
	13	500	0,8	10	0	0	-1	62
	14	500	0,8	20	0	0	+1	63
	15	500	0,8	15	0	0	0	66
Нульова точка	16	500	0,8	15	0	0	0	65
	17	500	0,8	15	0	0	0	65
	18	500	0,8	15	0	0	0	64
	19	500	0,8	15	0	0	0	66
	20	500	0,8	15	0	0	0	65

Побудова поверхонь відгуку отриманої моделі

Використовуючи отримане рівняння (2) були побудовані тривимірні графіки залежності мікротвердо-

сті покриття з порошку АСД-1 в залежності від температури та тиску газу на вході в сопло, а також дистанції напилування, в досліджуваних діапазонах значень (див. Таблицю 3), які показано на рисунку 1.

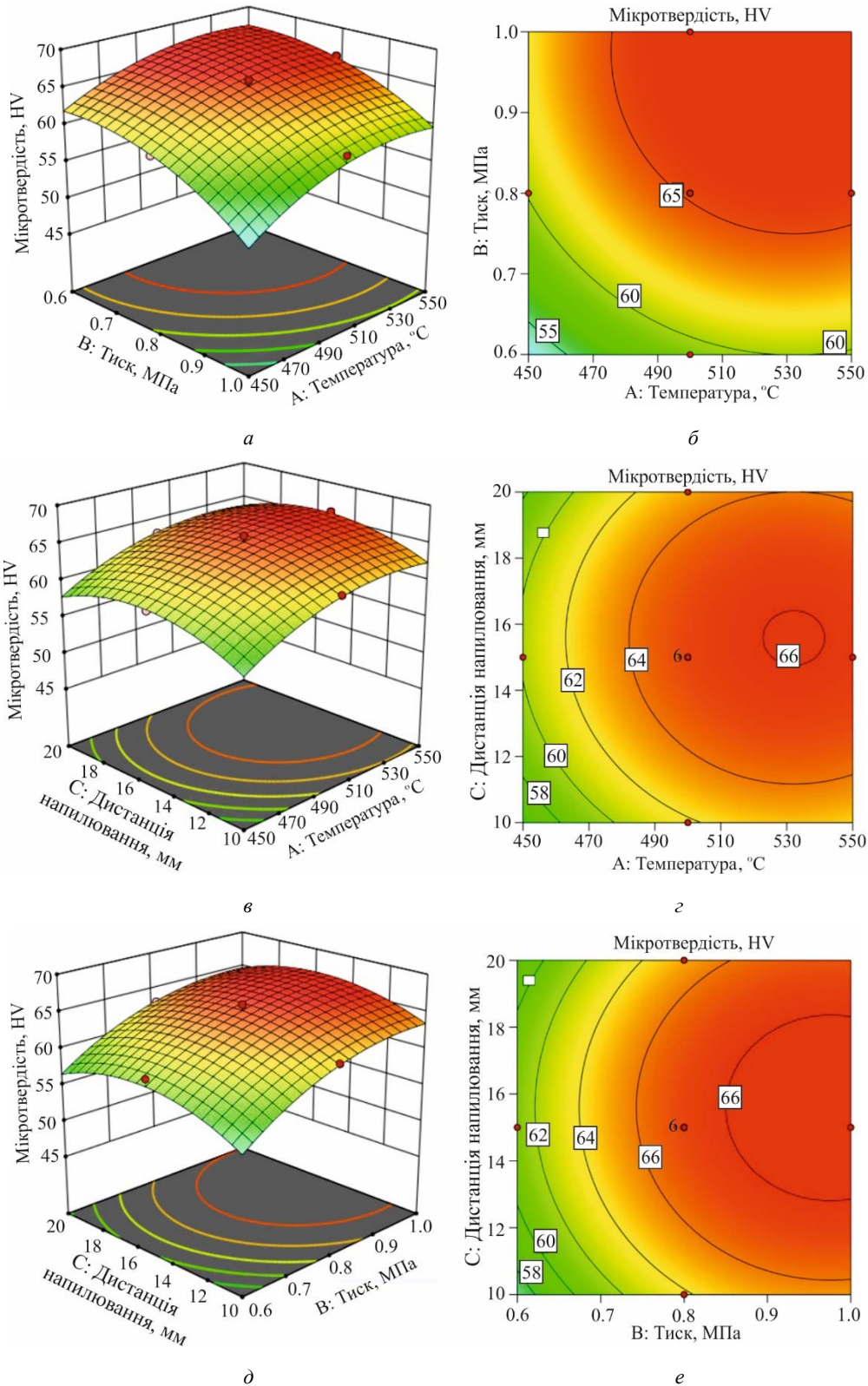


Рисунок 1. Залежності мікротвердості покриттів з порошку АСД-1 від досліджуваних параметрів напилування: *a, в, д* – поверхні відгуку; *б, г, е* – контурні діаграми

Підвищення робочої температури газу впливає на збільшення швидкості та температури частинок. Обидва фактори – збільшення швидкості і температури зіткнення частинки з підкладкою – в значній мірі впливають на зростання мікротвердості покриття. Вплив температури частинок на мікротвердість можна пояснити їх більшою інтенсивністю деформації при зіткненні з підкладкою через температурне розм'якшення, що сприяє зменшенню кількості та розміру пор в структурі покриття.

Залежність критичної швидкості напилювання від температури частинок була показана в роботі [16]. Зменшення необхідної критичної швидкості напилювання приводить до отримання більших значень відношення швидкості частинки до критичної швидкості, що позитивно впливає на ступінь розплющування частинок порошку, покращення властивостей покриття (зменшення пористості, підвищення мікротвердості, адгезійної та когезійної міцності, тощо), підвищення ефективності напилювання тощо.

Максимальна мікротвердість покриття була отримана при дистанції напилювання, яка приблизно дорівнює 15 мм (див. рисунок 1). З рисунку 1 видно, що зі збільшенням дистанції напилювання з 10 мм до 15 мм мікротвердість зростає. Проте подальше збільшення дистанції до 20 мм призводить до її зменшення.

Дистанція напилювання впливає на газовий потік між вихідним перетином сопла та поверхнею підкладки. При натікання потоку на перешкоду на її поверхні утворюється область підвищеного тиску – стрибок ущільнення. Товщина цього шару залежить від дистанції напилювання – чим більша відстань від виходу сопла до підкладки, тим товщина стрибку є меншою. За результатами комп'ютерних моделювань та експериментальних досліджень різними авторами було встановлено, що при проходженні частинок через стрибок ущільнення спостерігається їх гальмування [21]. Для частинок порошку діаметром 5 мкм це взагалі є суттєвим, що навіть може впливати на зміну їх траєкторії [22]. Зі збільшенням дистанції від зрізу сопла до підкладки з 10 мм до 15 мм, збільшується час знаходження частинок в цьому потоці, швидкість і температура яких продовжує зростати. При цьому зменшується вплив стрибка ущільнення на швидкість частинок при зіткненні з підкладкою. Проте при подальшому збільшенні дистанції напилювання і досягненні певного значення спостерігається гальмування частинок в потоці, падіння їх температури, що і впливає на зменшення мікротвердості покриттів.

Вплив тиску газу на мікротвердість покриттів показано на рисунку 1. Збільшення робочого тиску впливає на збільшення мікротвердості. Зростання мікротвердості спостерігається зі збільшенням тиску приблизно до 0,8 МПа. Подальше збільшення тиску газу майже не впливає на мікротвердість покриттів. Підвищення тиску газу впливає на значення густини потоку в розширній частині сопла. Збільшення густини потоку підвищує силу лобового опору частинки, що позитивно впливає на їх прискорення в газовому потоці [23].

Проте існують певні обмеження зростання тиску газу, пов'язані з геометрією надзвукового сопла, яке розробляється під певне його значення.

Висновки

1. Проведено дослідження впливу режимів холодного газодинамічного напилювання, а саме температури та тиску газу на вході в сопло, а також дистанції напилювання, в широкому діапазоні значень на мікротвердість покриттів з алюмінієвого порошку АСД-1.

2. Планування експерименту виконано з використанням методології планування багатофакторного експерименту з реалізацією центрального композиційного плану з центрами на гранях з обробленням отриманих статистичних даних в програмному пакеті Stat-Ease 360.

3. Отриману раніше нами емпіричну залежність для прогнозування мікротвердості покриття з порошку АСД-1 було використано для побудови залежностей мікротвердості покриттів від досліджуваних параметрів напилювання. Встановлено, що температура газу та дистанція напилювання мають найбільший вплив на мікротвердість покриттів.

Список літератури

1. Sharma, V. An investigation on D-gun sprayed Al_2O_3 -SiC coatings [Text] / V. Sharma, S. Kazi // Surface and Coatings Technology. – 2019. – Vol. 375. – P. 303–314. doi: 10.1016/j.surfcoat.2019.07.021

2. Effects of different HVOF thermal sprayed cermet coatings on tensile and fatigue properties of AISI 1045 steel [Text] / G.-S. Ham, R. Kreethi, H.-Jun Kim, S.-Hoon Yoon, K.-Ahn Lee // Journal of Materials Research and Technology. – 2021. – Vol. 15. – P. 6647–6658. doi: 10.1016/j.jmrt.2021.11.102

3. Фізико-механічні характеристики та термічне напруження плазмового покриття [Текст] / В. Л. Грешта, А. В. Єршов, В. Я. Грабовський, В. С. Вінченко, С. В. Сейдаметов // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2023. – № 3. – С. 27–33. doi: 10.15588/1607-6885-2023-3-4

4. Popov, S. M. Increasing the wear resistance of heavy loaded friction units of anti-friction gas thermal coatings [Text] / S. M. Popov, S. O. Shumykin, H. M. Laptieva, M. S. Yuzhakov // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2022. – № 2. – С. 33–39. doi: 10.15588/1607-6885-2022-2-6

5. Лебедев, В. О. Дослідження та оцінка термоциклічної стійкості плазмових ущільнюючих покриттів для вузлів газотурбінних установок [Текст] / В. О. Лебедев, О. М. Дубовий, С. А. Лой // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2019. – №2. – С. 38–46. doi: 10.15588/1607-6885-2019-2-6

6. Review of functionally graded thermal sprayed coatings [Text] / L. Łatka, L. Pawłowski, M. Winnicki, P. Sokołowski, A. Małachowska, S. Kozerski // Applied Sciences. – 2020. – Vol. 10, Iss. 15. – Article ID 5153. doi: 10.3390/app10155153

7. Srikanth, A. A brief review on cold spray coating

- process [Text] / A. Srikanth, G. Mohammed Thalib Basha, B. Venkateswarlu // *Materials Today: Proceedings*. – 2020. – Vol. 22, Iss. 4. – P. 1390–1397. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.482>
8. Hu, W. Surface repair of aircraft titanium alloy parts by cold spraying technology [Text] / W. Hu, S. Markovych, K. Tan, O. Shorinov, T. Cao // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2020. – № 3 (163). – С. 30–42. doi: [10.32620/akt.2020.3.04](https://doi.org/10.32620/akt.2020.3.04)
9. On parameter selection in cold spraying [Text] / H. Assadi, T. Schmidt, H. Richter, J.-O. Kliemann, K. Binder, F. Gärtner, T. Klassen & H. Kreye // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2011. – Vol. 20. – P. 1161–1176. doi: [10.1007/s11666-011-9662-9](https://doi.org/10.1007/s11666-011-9662-9)
10. Kamaraj, M. Cold spray coating diagram: bonding properties and construction methodology [Text] / M. Kamaraj, V. M. Radhakrishnan // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2019. – Vol. 28, Iss. 4. – P. 756–768. doi: [10.1007/s11666-019-00853-5](https://doi.org/10.1007/s11666-019-00853-5)
11. Influence of stand-off distance and pressure in copper coatings deposition efficiency and particle velocity [Text] / B. Moreno-Murguia, A. G. Mora-Garcia, H. Canales-Siller, A. L. Giraldo-Betancur, D. G. Espinosa-Arbelaez, J. Muñoz-Saldaña // *Surface and Coatings Technology*. – 2022. – Vol. 430. – Paper ID 127986. doi: [10.1016/j.surfcoat.2021.127986](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127986)
12. Шорінов, О. В. Визначення енергетичних параметрів частинок порошку $Ni+Al_2O_3$ в надзвуковому соплі при газодинамічному напилюванні аналітичним методом [Текст] / О. В. Шорінов // *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. – 2022. – №2. – С. 64–70. doi: [10.15588/1607-6885-2022-2-11](https://doi.org/10.15588/1607-6885-2022-2-11)
13. Rahmati, S. A numerical approach to study the oxide layer effect on adhesion in cold spray [Text] / S. Rahmati, R. G. A. Veiga, A. Zúñiga, B. Jodoin // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2021. – Vol. 30. – P. 1777–1791. doi: [10.1007/s11666-021-01245-4](https://doi.org/10.1007/s11666-021-01245-4)
14. Дослідження впливу температури газу процесу холодного газодинамічного напилювання на адгезійну міцність нікелевмісних покриттів [Текст] / О. В. Шорінов, А. І. Долматов, С. О. Поливняний, К. Б. Балущок // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2023. – № 4, спецвипуск 2. – С. 82–88. doi: [10.32620/akt.2023.4sup2.11](https://doi.org/10.32620/akt.2023.4sup2.11)
15. Strong effect of carrier gas species on particle velocity during cold spray processes [Text] / X. Suo, S. Yin, M.-P. Planche, T. Liu, H. Liao // *Surface and Coatings Technology*. – 2015. – Vol. 268. – P. 90–93. doi: [10.1016/j.surfcoat.2014.04.039](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.04.039)
16. Assadi, H. Cold spraying – A materials perspective [Text] / H. Assadi, H. Kreye, F. Gärtner, T. Klassen // *Acta Materialia*. – 2016. – Vol. 116. – P. 382–407. doi: [10.1016/j.actamat.2016.06.034](https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.06.034)
17. Research on structure and technological parameters of multi-channel cold spraying nozzle [Text] / W. Hu, K. Tan, S. Markovych, T. Cao // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2021. – Vol. 5, Iss. 1(113). – P. 6–14. doi: [10.15587/1729-4061.2021.242707](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.242707)
18. Дослідження можливості підвищення пластичності вольфрамового дроту при звичайних температурах шляхом оптимізації технології волочіння / В. С. Вініченко, А. В. Ершов, В. Ю. Ольшанецький, Г. П. Волков, Е. Ю. Іванченко // *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. – 2023. – № 4. – С. 32–39. doi: [10.15588/1607-6885-2023-4-5](https://doi.org/10.15588/1607-6885-2023-4-5)
19. Optimization of cold spray process inputs to minimize porosity and maximize hardness of metal matrix composite coatings on AZ31B magnesium alloy [Text] / A. Mohankumar, T. Duraisamy, D. Sampathkumar, S. Ranganathan, G. Balachandran, M. Kaliyamoorthy, M. Mariappan, L. Mulugeta // *Journal of Nanomaterials*. – 2022. – Vol. 2022. – P. 1–17. doi: [10.1155/2022/7900150](https://doi.org/10.1155/2022/7900150)
20. Прогнозування мікротвердості покриттів з порошку АСД-1, отриманих холодним газодинамічним напилюванням [Текст] / О. В. Шорінов, А. І. Долматов, К. Б. Балущок, С. О. Поливняний // *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. – 2023. – №3. – С. 14–21. doi: [10.15588/1607-6885-2023-3-2](https://doi.org/10.15588/1607-6885-2023-3-2)
21. Standoff distance and bow shock phenomena in the cold spray process [Text] / J. Pattison, S. Celotto, A. Khan, W. O'Neill // *Surface and Coatings Technology*. – 2008. – Vol. 202. – P. 1443–1454. doi: [10.1016/j.surfcoat.2007.06.065](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2007.06.065)
22. King, P. C. Relationship between particle size and deformation in the cold spray process [Text] / P. C. King, M. Jahedi // *Applied Surface Science*. – 2010. – Vol. 256. – P. 1735–1738. doi: [10.1016/j.apsusc.2009.09.104](https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2009.09.104)
23. Nastic, A. Evaluation of heat transfer transport coefficient for cold spray through computational fluid dynamics and particle in-flight temperature measurement using a high-speed IR camera [Text] // A. Nastic, B. Jodoin // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2018. – Vol. 27. – P. 1491–1517. doi: [10.1007/s11666-018-0787-y](https://doi.org/10.1007/s11666-018-0787-y)

Одержано 29.03.2024

DEPENDENCE OF MICROHARDNESS OF ASD-1 COATINGS ON COLD SPRAYING PROCESS PARAMETERS

- Shorinov O. Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor of Dept. of aircraft engine manufacturing technologies, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: o.shorinov@khai.edu, ORCID: 0000-0002-5057-6679
- Polyvianiy S. Deputy director for manufacturing of aircraft engines – head of manufacturing department at JSC “Motor Sich”, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: sergeypolyvianij@ukr.net, ORCID: 0000-0003-0558-1353

Purpose. To investigate the effect of the main parameters of the cold spraying process, particularly the temperature and pressure of the gas at the nozzle inlet and stand-off distance, on the microhardness of the ASD-1 aluminum coating.

Research methods. The planning and conducting of experimental research were carried out using the design of experiment methodology and regression analysis. The analysis of the obtained results of the experiments was carried out in the software package for statistical data Stat-Ease 360. The research of the microhardness of the sprayed coatings was carried out following GOST 9450-76 "Measurements microhardness by diamond instruments indentation@ using a LECO AMH5 micro-Vickers hardness tester on the prepared cross-section of samples with coatings.

Results. Three-dimensional (response surfaces) and contour graphs of the dependence of the microhardness of coatings deposited by the cold spraying method from ASD-1 powder on the main process parameters - the temperature and pressure of the gas at the nozzle inlet and stand-off distance in a wide range of values - were constructed. According to the results, it was established that the gas temperature and the spraying distance have the most significant influence on the microhardness of the coatings. The relationship between the investigated parameters of spraying with the temperature and velocity characteristics of the powder particles and their effect on the microhardness is described.

Scientific novelty. The complex effect of the main parameters of the cold spraying process, particularly the temperature and gas pressure at the nozzle inlet and the stand-off distance, on the microhardness of ASD-1 aluminum coatings in a wide range of values, was investigated.

Practical value. The obtained dependences of coating microhardness on process parameters can be used in developing scientifically-based recommendations and technological processes of deposition of protective and restorative coatings by cold spraying, particularly on parts of aircraft engines.

Key words: coatings, design of experiment, regression equation, deposition modes, process optimization.

References

1. Sharma, V., Kazi, S. (2019). An investigation on D-gun sprayed Al_2O_3 -SiC coatings. *Surface and Coatings Technology*, 375, 303–314.
2. Ham, G.-S., Kreethi, R., Kim, H.-Jun, Yoon, S.-Hoon, Lee, K.-Ahn (2021). Effects of different HVOF thermal sprayed cermet coatings on tensile and fatigue properties of AISI 1045 steel. *Journal of Materials Research and Technology*, 15, 6647–6658.
3. Greshta, V., Yershov, A., Hrabovskyi, V., Vinichenko, V., Seidametov, S. (2023). Fyzyko-mekhanichni kharakterystyky ta termichne napruzhennia plazmovoho pokryttia [Physical-mechanical characteristics and thermal stress of plasma covering]. *New Materials and Technologies in Metallurgy and Mechanical Engineering*, 3, 27–33, [in Ukrainian].
4. Popov, S. M., Shumykin, S. O., Laptieva, H. M., Yuzhakov, M. S. (2022). Increasing the wear resistance of heavy loaded friction units of anti-friction gas thermal coatings. *New Materials and Technologies in Metallurgy and Mechanical Engineering*, 2, 33–39.
5. Lebedev, V., Dubovyi, O., Loi, S. (2019). Doslidzhennya ta otsinka termotsyklichnoyi stiykosti plazmovykh ushchil'nyuyuchykh pokryttiv dlya vuzliv hazoturbinykh ustanovok [Research and estimation of thermal-cycle firmness of plasma spraying more compact coverages are for knots of gas-turbine]. *New Materials and Technologies in Metallurgy and Mechanical Engineering*, 2, 38–46, [in Ukrainian].
6. Łatka, L., Pawłowski, L., Winnicki, M., Sokołowski, P., Małachowska, A., Kozerski, S. (2020). Review of functionally graded thermal sprayed coatings. *Applied Sciences*, 10 (15), 5153.
7. Srikanth, A., Mohammed Thalib Basha, G., Venkateshwarlu, B. (2020). A brief review on cold spray coating process. *Materials Today: Proceedings*, 22(4), 1390–1397.
8. Hu, W., Markovych, S., Tan, K., Shorinov, O., Cao, T. (2020). Surface repair of aircraft titanium alloy parts by cold spraying technology. *Aerospace Technic and Technology*, 3(163), 30–42.
9. Assadi, H., Schmidt, T., Richter, H., Kliemann, J.-O., Binder, K., Gärtner, F., Klassen, T., Kreye, H. (2011). On parameter selection in cold spraying. *Journal of Thermal Spray Technology*, 20, 1161–1176.
10. Kamaraj, M., Radhakrishnan Kamaraj, V. M. M. (2019). Cold spray coating diagram: bonding properties and construction methodology. *Journal of Thermal Spray Technology*, 28(4), 756–768.
11. Moreno-Murguia, B., Mora-Garcia, A. G., Canales-Siller, H., Giraldo-Betancur, A. L., Espinosa-Arbelaez, D. G., Muñoz-Saldaña, J. (2022). Influence of stand-off distance and pressure in copper coatings deposition efficiency and particle velocity. *Surface and Coatings Technology*, 430, 127986.
12. Shorinov, O. V. (2022). Vyznachennya enerhetychnykh parametriv chastynok poroshku $\text{Ni}+\text{Al}_2\text{O}_3$ v nadzvukovomu sopli pry hazodynamichnomu napylyuvanni analitychnym metodom [Determination of energy parameters of $\text{Ni}+\text{Al}_2\text{O}_3$ powder particles in a supersonic nozzle during cold gas-dynamic spraying using the analytical method]. *New Materials and Technologies in Metallurgy and Mechanical Engineering*, 2, 64–70, [in Ukrainian].
13. Rahmati, S., Veiga, R. G. A., Zúñiga, A., Jodoin, B. (2021). A numerical approach to study the oxide layer effect on adhesion in cold spray. *Journal of Thermal Spray Technology*, 30, 1777–1791.

14. Shorinov, O., Dolmatov, A., Polyvianyi, S., Balushok, K. (2023). Doslidzhennia vplyvu temperatury hazu protsesu kholodnoho hazodynamichnoho napyliuvannia na adheziinu mitsnist nikelvnisnykh pokryttiv [Study of the effect of the gas temperature of the cold gas dynamic spraying process on the adhesion strength of nickel-containing coatings]. *Aerospace Technic and Technology*, 4, sup2, 82–88, [in Ukrainian].
15. Suo, X., Yin, S., Planche, M.-P., Liu, T., Liao, H. (2015). Strong effect of carrier gas species on particle velocity during cold spray processes. *Surface and Coatings Technology*, 268, 90–93.
16. Assadi, H., Kreye, H., Gärtner, F., Klassen, T. (2016). Cold spraying – A materials perspective. *Acta Materialia*, 116, 382–407.
17. Hu, W., Tan, K., Markovych, S., Cao, T. (2021). Research on structure and technological parameters of multi-channel cold spraying nozzle. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5, 1(113), 6–14.
18. Vinichenko, V., Yershov, A., Ol'shanetskii, V., Volkov, V., Ivanchenko, E. (2023). Doslidzhennia mozhyvosti pidvyshchennia plastychnosti volframovoho drotu pry zvychnykh temperaturakh shliakhom optymizatsii tekhnolohii volochinnia [Study of the possibility of increasing the plasticity of tungsten wire at normal temperatures by optimizing the drawing technology]. *New Materials and Technologies in Metallurgy and Mechanical Engineering*, 4, 32–39, [in Ukrainian].
19. Mohankumar, A., Duraisamy, T., Sampathkumar, D., Ranganathan, S., Balachandran, G., Kaliyamoorthy, M., Mariappan, M., Mulugeta, L. (2022). Optimization of cold spray process inputs to minimize porosity and maximize hardness of metal matrix composite coatings on AZ31B magnesium alloy. *Journal of Nanomaterials*, 2022, 1–17.
20. Shorinov, O., Dolmatov, A., Balushok, K., Polyvianyi, S. (2023). Prohnozuvannia mikrotverdosti pokryttiv z poroshku ASD-1, otrymanykh kholodnym hazodynamichnym napyliuvanniam [Prediction of microhardness of asd-1 powder cold spraying coatings]. *New Materials and Technologies in Metallurgy and Mechanical Engineering*, 3, 14–17, [in Ukrainian].
21. Pattison, J., Celotto, S., Khan, A., O'Neill, W. (2008). Standoff distance and bow shock phenomena in the cold spray process. *Surface and Coatings Technology*, 202, 1443–1454.
22. King, P. C., Jahedi, M. (2010). Relationship between particle size and deformation in the cold spray process. *Applied Surface Science*, 256, 1735–1738.
23. Nastic, A., Jodoin, B. (2018). Evaluation of heat transfer transport coefficient for cold spray through computational fluid dynamics and particle in-flight temperature measurement using a high-speed IR camera. *Journal of Thermal Spray Technology*, 27, 1491–1517.