

О. В. ШОРИНОВ, Д. О. БІЛАН

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна

ЗАКОНОМІРНОСТІ ФОРМУВАННЯ ТА КЕРУВАННЯ ТОВЩИНОЮ АЛЮМІНІЄВИХ ПОКРИТТІВ У ПРОЦЕСІ ХОЛОДНОГО ГАЗОДИНАМІЧНОГО НАПИЛЮВАННЯ

Предметом дослідження є закономірності впливу параметрів холодного газодинамічного напилювання (ХГН) на процес формування покриття. Метою роботи є встановлення закономірностей впливу основних технологічних параметрів процесу холодного газодинамічного напилювання на товщину алюмінієвих покриттів і розроблення предиктивної моделі для керування товщиною. Завдання дослідження: реалізувати повноранговий трифакторний експеримент з варіюванням швидкості сканування, витрати порошку та дистанції напилювання; провести металографічний аналіз отриманих покриттів для визначення їх товщини; розробити математичну модель (поверхню відгуку) для кількісного прогнозування товщини покриття; дослідити комплексний вплив досліджуваних параметрів на товщину покриття та визначити область високої технологічної робастності (стійкості процесу напилювання до випадкових коливань вхідних параметрів). Методи дослідження. Напилювання алюмінієвого порошку ULT 02565 здійснювалося на установці ХГН ДИМЕТ-405. Дослідження мікроструктури та вимірювання товщини покриттів виконувалися за допомогою методів оптичної металографії. Оптимізацію та моделювання процесу здійснено із застосуванням методології поверхні відгуку на базі трифакторного плану експерименту Бокса-Бенкіна, з подальшою статистичною оцінкою результатів і предиктивної здатності моделі за допомогою дисперсійного аналізу. Результати. За результатами експериментальних досліджень доведено, що зміна досліджуваних параметрів процесу напилювання дає змогу керувати товщиною покриття в діапазоні від 0,2 до 0,83 мм. Розроблено емпіричну модель, яка з високою точністю описує 96,7% загальної дисперсії товщини шару (коренева середньоквадратична похибка прогнозування становить 0,0598 мм). Дисперсійний аналіз показав статистичну значущість лінійних ефектів швидкості сканування та витрати порошку, а також квадратичного ефекту дистанції напилювання. Наукова новизна одержаних результатів полягає в розширенні уявлень про кінетику процесів газодинамічного напилювання покриттів: уперше встановлено комплексний вплив швидкості сканування та масової витрати порошку на товщину покриття. Висновки. Отримані результати дали змогу визначити область високої технологічної робастності процесу ХГН, яка лежить в зоні факторного простору поблизу його геометричного центру (швидкість сканування 30 мм/с, витрата порошку 0,5 г/с, дистанція напилювання 15 мм). Розроблені рекомендації забезпечують стабільне формування алюмінієвого покриття із прогнозованою товщиною близько 0,44 мм.

Ключові слова: покриття, мікроструктура, металографія, поверхневий шар, поверхнева обробка, технологія напилювання, моделювання.

1. Вступ

1.1. Мотивація

Усунення поверхневих виробничих і експлуатаційних дефектів деталей, виготовлених з алюмінієвих, магнієвих і титанових сплавів, потребує пошуку та застосування технологій, що виключають надмірний температурний вплив на поверхню та структурно-фазові перетворення в поверхневих шарах. Технологія холодного газодинамічного напилювання (ХГН) є перспективним методом для вирішення цього завдання, оскільки процес осадження частинок відбувається в їх твердому стані, без плавлення, завдяки пластичному деформуванню під час зіткнення з поверхнею напилювання.

Основною проблемою під час відновлення деталей газотермічними методами є забезпечення товщини напиленого шару покриття. Особливої уваги це питання потребує в умовах автоматизації процесу напилювання, оскільки безпосередньо впливає на побудову траєкторії переміщення напилювача. Відсутність точного прогнозування кінетики нарощування матеріалу призводить до необхідності закладати завищені припуски для подальшого механічного оброблення, що збільшує витрату порошку, час виконання технологічного процесу і, зрештою, собівартість отримання покриття.

Тому формалізація кінетики формування покриття у вигляді математичних моделей є важливим етапом переходу від емпіричного підбору режимів



напилювання до керованого й передбачуваного процесу.

1.2. Сучасний стан проблеми

Аналіз сучасних досліджень у галузі нанесення покриттів методом ХГН свідчить, що процес формування шару залежить від комплексу параметрів.

Параметри газу на вході в сопло головним чином визначають температурно-швидкісні характеристики потоку та частинок порошку в соплі та під час натікання на поверхню підкладки [1]. Забезпечення високих значень температури та швидкості частинок є необхідною умовою для їх пластичного деформування та утворення покриттів із високими показниками якості й ефективності використання порошку [2].

Проте для реалізації потенціалу холодного газодинамічного напилювання також мають бути враховані технологічні параметри процесу. Було встановлено, що швидкість сканування (швидкість переміщення сопла відносно поверхні напилювання) є одним із ключових факторів, що визначають можливість утворення покриття [3]. Якщо швидкість сканування є надто високою, то формування покриттів не відбувається. З іншого боку, занадто повільне переміщення сопла призводить до інтенсивного нарощування покриття і надмірної витрати порошкового матеріалу [4].

Аналогічний вплив має збільшення масової витрати порошку, що підвищує концентрацію частинок в газовому потоці та ймовірність їх взаємних зіткнень [5]. Це сприяє додатковій деформації та закріпленню матеріалу на поверхні підкладки. Проте ця тенденція має обмеження: перевищення верхньої межі витрати порошку гальмує газовий потік як в соплі, так і під час натікання на поверхню, що зменшує коефіцієнт використання порошку [6].

Іншим важливим параметром процесу є дистанція напилювання (відстань від вихідного перерізу сопла до поверхні підкладки). Занадто малі значення дистанції напилювання супроводжуються утворенням інтенсивної ударної хвилі поблизу підкладки, що може спричинити запирання потоку на виході з сопла та гальмування частинок порошку, особливо дрібнодисперсного [7]. Збільшення дистанції напилювання призводить до гальмування частинок через аеродинамічний опір [8].

Незважаючи на чималу кількість досліджень, присвячених вивченню індивідуального впливу дистанції напилювання, швидкості сканування та витрати порошку на процес ХГН, наразі недостатньо висвітлено питання комплексної взаємодії цих параметрів на кінетику формування покриття.

1.3. Мета та задачі дослідження

Метою роботи є встановлення закономірностей впливу основних технологічних параметрів процесу холодного газодинамічного напилювання на товщину алюмінієвих покриттів і розроблення предиктивної моделі для керування товщиною.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- реалізувати повноранговий трифакторний експеримент за планом Бокса-Бенкіна з варіюванням основних технологічних параметрів процесу ХГН – швидкості сканування, витрати порошку та дистанції напилювання;
- провести металографічний аналіз отриманих покриттів для визначення їх товщини;
- розробити математичну модель (поверхню відгуку) для кількісного прогнозування товщини покриття;
- на основі аналізу поверхонь відгуку дослідити комплексний вплив досліджуваних параметрів на товщину покриття та визначити область високої технологічної робастності процесу ХГН.

Стаття структурована таким чином: у розділі 2 наведено матеріали та методи дослідження; у розділі 3 подано результати досліджень металографічного аналізу покриттів, статистичної оцінки та математичної валідації моделі, аналізу впливу параметрів процесу напилювання на товщину покриттів; у розділі 4 узагальнено висновки по роботі та запропоновано напрямки подальших досліджень.

2. Матеріали та методи дослідження

Для напилювання покриттів у дослідженні було використано алюмінієвий порошок ULT 02565 (Poundres Hermillon, Франція), морфологія частинок якого показана на рис. 1.

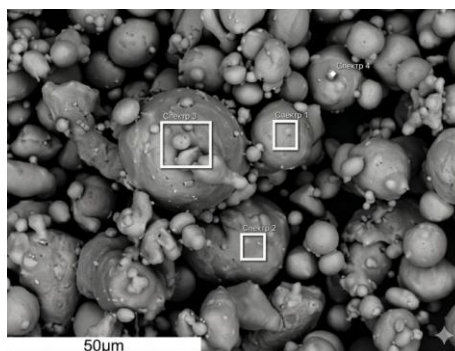


Рис. 1. Алюмінієвий порошок ULТ 02565 (Al > 99%)

Частинки порошку мають форму, близьку до сферичної, з середнім розміром від 25 до 30 мкм.



[Creative Commons Attribution
NonCommercial 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Напилювання покриттів проводили на зразки, виготовлені з алюмінієвого сплаву Д16Т (ДСТУ EN 573-3), розміром $50 \times 25 \times 1,5$ мм. Перед напилюванням поверхня зразка підлягала абразивно-струминному обробленню електрокорундом фракції F40. Середні значення шорсткості поверхні після оброблення становили Ra 9,86 мкм. Після абразивно-струминного оброблення зразки обдувалися сухим стисненим повітрям для видалення пилу, а потім поверхню знежирювали розчинником (Нефрас С3-80/120 за ТУ 38.401-67-108-92). Час після закінчення підготовки зразків та напилювання покриттів не перевищував 60 хвилин, щоб запобігти утворенню окисної плівки на поверхні.

Напилювання покриттів виконували на установці холодного газодинамічного напилювання ДИМЕТ-405.

Схематичне зображення процесу холодного газодинамічного напилювання покриттів наведено на рис. 2.

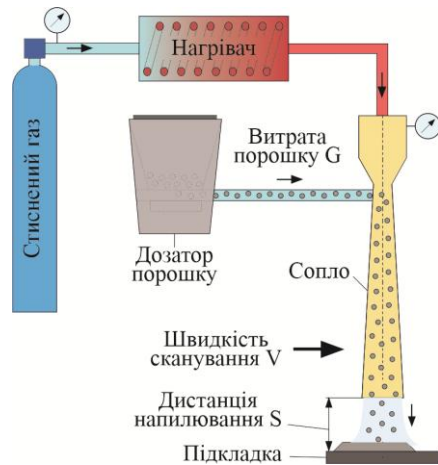


Рис. 2. Схематичне зображення процесу ХГН

Постійні параметри напилювання було обрано за результатами попередніх досліджень, метою яких було забезпечення максимальних значень коефіцієнта використання порошку [9]:

- робочий газ: повітря;
- тиск газу: 0,85 МПа;
- температурний режим: №5;
- кількість шарів покриття: 2.

Змінні параметри процесу напилювання: дистанція напилювання, витрата порошку та швидкість сканування. За результатами попереднього розгляду даних і з урахуванням фізичних уявлень щодо досліджуваних залежностей було обрано квадратичну залежність. Для апроксимації нелінійних залежностей між дистанцією напилювання, витратою порошку і швидкістю сканування та товщиною покриттів було застосовано методологію поверхні відгуку на базі повнорангового трифакторного плану Бокса-Бенкіна, що включав 15 експериментальних матричних точок

(12 дослідів на середині ребер факторного простору та 3 реплікації в його геометричному центрі). Вибір плану Бокса-Бенкіна зумовлений його високою статистичною ефективністю за умови мінімальної кількості дослідів, а також відсутністю експериментальних точок у вершинах факторного куба. Це дозволяє уникнути комбінацій факторів з одночасним встановленням їхніх екстремальних значень, що можуть призвести до порушення стабільності процесу напилювання покриттів або взагалі унеможливити їх формування.

Змінні параметри та рівні їх варіювання подано в таблиці 1.

Таблиця 1

Змінні параметри процесу			
Параметр	Рівні і значення		
	–	0	+
Швидкість сканування V, мм/с	10	30	50
Витрата порошку G, г/с	0,2	0,5	0,8
Дистанція напилювання S, мм	10	15	20

Матриця планування експерименту в натурних значеннях факторів і результати дослідження товщини покриттів наведені в таблиці 2.

Таблиця 2

Матриця планування експерименту та результати вимірювання товщини покриттів

№ експ.	Параметри напилювання			Результати досліджень товщини покриттів, мм
	V, мм/с	G, г/с	S, мм	
1	50	0,8	15	0,33
2	50	0,2	15	0,2
3	10	0,8	15	0,78
4	10	0,2	15	0,39
5	50	0,5	20	0,4
6	50	0,5	10	0,3
7	10	0,5	20	0,73
8	10	0,5	10	0,66
9	30	0,8	20	0,83
10	30	0,8	10	0,76
11	30	0,2	20	0,35
12	30	0,2	10	0,52
13	30	0,5	15	0,39
14	30	0,5	15	0,43
15	30	0,5	15	0,49

Статистична обробка результатів експериментів (на основі масиву власних верифікованих даних про товщину покриття), реалізація дисперсійного аналізу та математична генерація коефіцієнтів квадратичного рівняння регресії виконувалися з використанням інструментів штучного інтелекту (ШІ) (Gemini AI 3.1 Pro).

Товщину покриттів визначали на підготовлених поперечних мікрошліфах зразків із використанням оптичного металографічного мікроскопу ZEISS Axio

Observer D1m зі збільшенням до 1000х. Підготовку мікрошліфів проводили відповідно до стандартної методики, що полягала у вирізанні зразків, їх монтуванні в бакелітовій смолі в оправці, подальшому шліфуванні на наждачному папері зі зменшенням зернистості та поліруванні алмазними пастами.

3. Результати та обговорення

3.1 Металографічний аналіз покриттів

Особливості формування шару покриття ULT 02565 за різної інтенсивності масоперенесення показано на рис. 3.

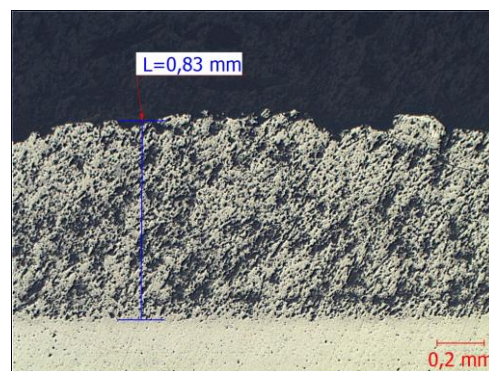
Аналіз морфології отриманих покриттів ULT 02565 (рис. 3) демонструє зміну товщини шару залежно від режимів напилювання. Режим максимальної інтенсивності масоперенесення (рис. 3а, дослід №9: $V = 30$ мм/с, $G = 0,8$ г/с, $S = 20$ мм) дав змогу отримати товщину шару покриття 0,83 мм. Низька швидкість сканування та підвищена витрата порошку забезпечують максимальний локальний контакт потоку з поверхнею підкладки в одиницю часу та інтенсивне зростання товщини покриття.

Кардинально інша картина спостерігається за режимів мінімальної інтенсивності напилювання (рис. 3в, дослід №2: $V = 50$ мм/с, $G = 0,2$ г/с, $S = 15$ мм). Зростання швидкості переміщення сопла майже в п'ять разів з одночасним зменшенням витрати порошку призводить до зменшення товщини покриття до 0,2 мм.

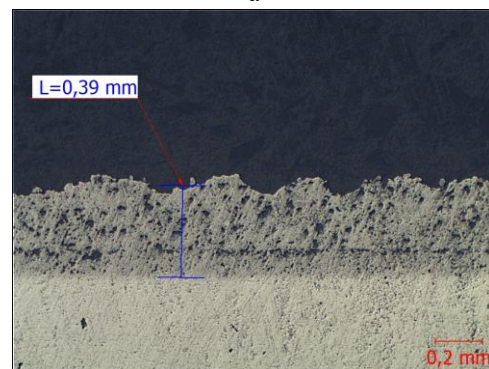
Середні значення товщини покриттів у центральній точці досліджуваного факторного простору (рис. 3б, на прикладі досліду №13: $V = 30$ мм/с, $G = 0,5$ г/с, $S = 15$ мм) склали 0,39 мм, що свідчить про високу стабільність дозування порошку за різних режимів напилювання.

Результати мікроструктурного аналізу показали, що всі покриття, отримані за різних режимів ХГН, характеризуються відсутністю когезійних розшарувань, тріщин, критичної пористості та інших дефектів. Межа поділу між покриттям і підкладкою чітка й суцільна; відшарування та пори відсутні.

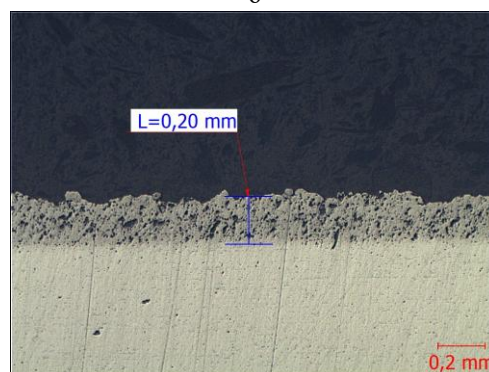
Аналіз мікрофотографій поперечних перерізів системи «алюмінієва підкладка-алюмінієве покриття» підтвердив типову для ХГН високу щільність укладання деформованих частинок [10]. Адгезійна взаємодія забезпечується інтенсивною локальною пластичною деформацією частинок алюмінієвого порошку під час високошвидкісного зіткнення [11]. Попереднє абразивно-струминне оброблення поверхні перед напилюванням підвищує її шорсткість та збільшує площу контакту напиленого шару з підкладкою, що є важливим для механічного характеру зчеплення покриття з основою в процесі ХГН [12].



а



б



в

Рис. 3. Мікроструктура покриттів ULT 02565 на різних технологічних режимах напилювання
а – режим максимальної інтенсивності (дослід №9);
б – центральна точка факторного простору (дослід №13); в – режим мінімальної інтенсивності (дослід №2)

3.2 Статистична оцінка та валідація математичної моделі

Отримані за результатами металографічного аналізу експериментальні дані було використано для побудови емпіричної моделі впливу досліджуваних параметрів процесу на товщину покриттів.

Адекватність розробленої квадратичної моделі та статистична значущість впливу окремих параметрів напилювання оцінювалися за допомогою дисперсійного аналізу (ANOVA).

Результати дисперсійного аналізу подано в таблиці 3.

Таблиця 3

Результати дисперсійного аналізу квадратичної моделі поверхні відгуку

Джерело дисперсії	Сума квадратів (SS)	Ступені свободи (DF)	Середній квадрат (MS)	F-критерій	p-значення	Значущість
Модель	0,5287	9	0,0587	16,42	0,00328	Значуща
Швидкість (V)	0,2211	1	0,2211	61,79	0,00053	Значуща
Витрата (G)	0,1922	1	0,1922	53,71	0,00074	Значуща
Дистанція (S)	0,0006	1	0,0006	0,17	0,69622	Незначуща
Взаємодія V×G	0,0169	1	0,0169	4,72	0,08181	Маргінальна
Взаємодія V×S	0,0002	1	0,0002	0,06	0,81198	Незначуща
Взаємодія G×S	0,0144	1	0,0144	4,02	0,10116	Незначуща
Квадратичний V ²	0,0113	1	0,0113	3,16	0,13517	Незначуща
Квадратичний G ²	0,005	1	0,005	1,41	0,28703	Незначуща
Квадратичний S ²	0,0668	1	0,0668	18,69	0,00754	Значуща
Похибка	0,0178	5	0,0035	-	-	-
Всього	0,5466	14	-	-	-	-

Отримані результати дали змогу оцінити вплив параметрів процесу напилювання на товщину покриття. Статистично значущими є такі фактори, для яких р-значення є меншим за обраний рівень значущості $\alpha = 0,05$. З таблиці 3 видно, що найбільший вплив на товщину покриття мають лінійні ефекти швидкості сканування (V, $p = 0,00053$) та витрати порошку (G, $p = 0,00074$). Ці параметри також характеризуються найвищими значеннями критерію Фішера ($F = 61,79$ і $F = 53,71$ відповідно). При цьому взаємодія між цими двома параметрами ($V \times G$) має маргінальний рівень значущості ($p = 0,081$). Таке р-значення дещо перевищує поріг $\alpha = 0,05$, проте збереження цієї парної взаємодії в моделі є фізично обгрунтованим, оскільки вона описує масову витрату порошку на одиницю довжини треку.

Також за результатами дисперсійного аналізу виявлено статистичну значущість квадратичного ефекту дистанції напилювання (S^2 , $p = 0,00754$, $F = 18,69$) на товщину покриття. При цьому лінійний вплив дистанції виявився незначущим ($p = 0,696$). Поясненням цього є складний нелінійний характер впливу дистанції на товщину з наявністю екстремуму в межах досліджуваного діапазону від 10 до 20 мм, а також на коефіцієнт використання порошку в процесі холодного газодинамічного напилювання [13]. Усі інші квадратичні ефекти та парні взаємодії є статистично незначущими.

У натуральних значеннях факторів залежність товщини покриття h ULT 02565 від швидкості сканування V, витрати порошку G і дистанції напилювання S описується поліномом другого ступеня

$$h = 1,7689 + 0,00429V - 0,17037G - 0,182S - 0,0108VG + 0,000075VS + 0,04GS - 0,000138V^2 + 0,412G^2 + 0,00538S^2. \quad (1)$$

Коефіцієнт детермінації становить $R^2 = 0,967$, а скоригований коефіцієнт детермінації $R^2_{adj} = 0,909$. Коренева середньоквадратична похибка становить 0,0598. Отримана емпірична модель (1) дає змогу кількісно прогнозувати товщину покриття, а наведені статистичні показники свідчать про її високу предиктивну здатність.

3.3 Вплив параметрів процесу на кінетику формування покриття

Отримана модель (1) впливу досліджуваних параметрів процесу ХГН на товщину покриття ULT 02565 була використана для побудови поверхні відгуку, показаної на рис. 4.

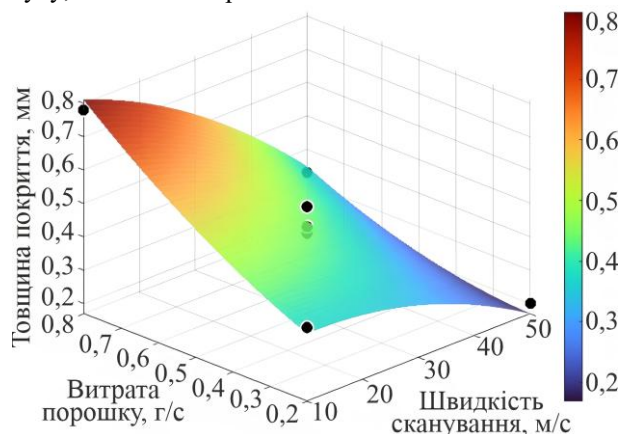


Рис. 4. Залежність товщини покриття від швидкості сканування та витрати порошку за фіксованої дистанції напилювання $S = 15$ мм (візуалізовано за допомогою ШІ)

Вплив швидкості сканування має обернено пропорційний характер. Максимальний градієнт зменшення товщини покриття спостерігається при переході до швидкості понад 40 мм/с. Це пояснюється

критичним скороченням часу локального впливу двофазного потоку на одиницю площі поверхні.

На протипагу швидкості сканування витрата порошку демонструє пряму пропорційність. На рис. 4 видно безперервний підйом поверхні відгуку в напрямку максимальних значень фактора. Збільшення витрати порошку з 0,2 до 0,8 г/с пропорційно підвищує масову концентрацію твердої фази в потоці, що натікає на поверхню підкладки.

Для початку формування покриття витрата порошку має перевищувати певний критичний рівень. При витратах, більших за критичну, збільшення концентрації частинок у струмені підвищує ймовірність удару однієї частинки об іншу, що вже контактує з поверхнею, й допомагає їй закріпитися шляхом додаткового деформування. При цьому існує верхня межа витрати порошку, перевищення якої призводить до суттєвого впливу дисперсної фази на параметри газового потоку в середині сопла та під час натікання на поверхню (його гальмування), що безпосередньо впливає на коефіцієнт використання порошку [8].

Взаємодія швидкості та витрати порошку на товщину покриття наочно проявляється у вигляді «скрученості» поверхні. На високих швидкостях сканування збільшення подачі порошку не дає приросту товщини покриття.

Як свідчать результати дисперсійного аналізу, швидкість сканування є головним чинником, що впливає на товщину шару покриття. Значущість впливу швидкості сканування підтверджується авторами інших досліджень [3].

Фізичний зміст впливу швидкості сканування на товщину покриття можна пояснити низкою чинників.

По-перше, щоб частинки порошку почали закріплюватися на поверхні, вона спочатку повинна пройти стадію активації – очищення від оксидів і формування мікрорельєфу ударами перших частинок. Час, необхідний для цього, називається часом індукції [14]. Якщо швидкість сканування буде занадто високою, кожна точка поверхні перебуватиме в зоні дії струменя менше часу, ніж потрібно для активації, й покриття взагалі не утвориться. Час активації може бути скорочений за рахунок попереднього оброблення поверхні, наприклад, абразивно-струминним методом [15].

По-друге, існує певне критичне значення швидкості сканування, перевищення якого призводить до припинення процесу формування покриття. Критична швидкість сканування пов'язана з часом індукції [14].

По-третє, швидкість сканування впливає на температуру поверхні в плямі напильовання та самої підкладки. Чим більше відносна швидкість руху сопла та поверхні, тим менше прогрівається матеріал для

його розм'якшення, що впливає на інтенсивність пластичної деформації частинок і на коефіцієнт використання порошку. При цьому важливо зазначити, що надто низька швидкість сканування може негативно вплинути на якість покриття через значний термічний вплив.

Раніше встановлено зв'язок між швидкістю сканування та коефіцієнтом використання порошку [16]: високі швидкості сканування призводять до зниження коефіцієнта використання порошку. Це пов'язано з тим, що за таких умов більша частина часу напильовання витрачається на активацію поверхні, а не на нарощування товщини шару.

Аналіз квадратичного ефекту дистанції напильовання (таблиця 3) доводить параболічний характер впливу цього параметра з екстремумом поблизу 15 мм. Зменшення дистанції до 10 мм призводить до гальмування процесу нарощування через утворення інтенсивної ударної хвилі на поверхні підкладки, проходячи через яку частинки порошку гальмуються. При цьому збільшення дистанції напильовання понад 15 мм спричиняє втрату частинок через аеродинамічний опір навколишнього середовища. Окрім того, збільшується ширина смуги напильовання, але водночас зменшується локальна товщина шару за незмінної витрати порошку.

4. Висновки

1) Досліджено вплив швидкості сканування (V), витрати порошку (G) і дистанції напильовання (S) на товщину покриттів, отриманих холодним газодинамічним напильованням, з використанням повнорангового трифакторного експерименту за планом Бокса-Бенкіна.

2) За результатами металографічного аналізу підтверджено, що зміна досліджуваних параметрів дає змогу керувати товщиною покриття в діапазоні від 0,2 до 0,83 мм. Отримані покриття характеризуються відсутністю дефектів (тріщин, розшарувань, наскрізної пористості тощо).

3) Розроблено емпіричну модель (поверхню відгуку) у вигляді полінома другого ступеня, що дозволяє кількісно прогнозувати товщину покриття на основі досліджених параметрів ХГН. Дисперсійний аналіз підтвердив високу предиктивну здатність моделі ($R^2 = 0,967$, коренева середньоквадратична похибка – 0,0598), а також виявив статистично значущий вплив лінійних ефектів швидкості сканування та витрати порошку, а також квадратичного ефекту дистанції напильовання.

4) Аналіз поверхонь відгуку дозволив дослідити комплексний вплив швидкості сканування та витрати порошку на товщину покриття. Встанов-

лено, що перехідна зона поблизу геометричного центру факторного простору ($V \approx 30$ м/с, $G \approx 0,5$ г/с, $S \approx 15$ мм) є зоною високої технологічної робастності. Напилювання покриттів у цих режимах забезпечує стабільне формування покриття з прогнозованою товщиною близько 0,44 мм.

Подальші дослідження будуть спрямовані на вивчення впливу запропонованих параметрів напилювання на фізико-механічні властивості покриттів, а також на оцінку економічної ефективності застосування розробленої моделі.

Внесок авторів: концептуалізація дослідження, розробка загальної методології, залучення фінансування та адміністрування проєкту, критичний аналіз, наукова інтерпретація результатів та узагальнення висновків, наукове редагування та фінальне затвердження рукопису – О. В. Шорінов; проведення експериментальних досліджень, збір первинних даних, статистична обробка та візуалізація отриманих результатів, написання первісного тексту рукопису – Д. О. Білан.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що не мають конфлікту інтересів щодо цього дослідження, фінансового, особистого, авторського чи іншого, який міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в цій роботі.

Фінансування

Наукові дослідження за проєктом «Холодне газодинамічне напилювання захисних і відновлювальних покриттів з підвищеним рівнем зносостійкості для деталей авіаційної техніки» (реєстраційний номер 2025.05/0025) виконані за рахунок коштів гранту Президента України, наданого Національним фондом досліджень України.

Доступність даних

Рукопис не має пов'язаних даних.

Використання засобів штучного інтелекту

Автори повідомляють про використання інструментів штучного інтелекту для статистичної обробки результатів експерименту і виконання дисперсійного аналізу, про що належним чином зазначено в розділі «Матеріали та методи дослідження».

Автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису.

Література

1. Оптимізація сопла для холодного газодинамічного напилювання / О. Шорінов, Н. Савченко, О. Шунуль, Д. Білан // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2025. – № 4 спецвип. 2. – Р. 140–148. DOI: 10.32620/akt.2025.4sup2.16.
2. Particle deformation and coating deposition behavior in cold spray additive manufactured aluminum deposit on copper substrate by simulation and experiment / X. Yang, T. Meng, Y. Su et al. // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2024. – Vol. 30. – P. 2879–2890. DOI: 10.1016/j.jmrt.2024.04.057.
3. Effects of process parameters on cold spray deposition of Al-6061 alloy / A. Nourian, T. Schwartz, S. Bose, S. Müftü // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2022. – Vol. 31, iss. 8. – P. 2517–2536. DOI: 10.1007/s11666-022-01456-3.
4. Study of low-pressure cold spray additive manufacturing: investigation of kinematic spray parameters on deposition and properties / W. Li, H. Wu, C. Verdy et al. // *3D Printing and Additive Manufacturing*. – 2023. – Vol. 10, iss. 6. – P. 1260–1271. DOI: 10.1089/3dp.2021.0260.
5. Predicting the effects of powder feeding rates on particle impact conditions and cold spray deposited coatings / O. C. Ozdemir, C. A. Widener, M. J. Carter, K. W. Johnson // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2017. – Vol. 26. – P. 1598–1615. DOI: 10.1007/s11666-017-0611-0.
6. Optimization of cold spray coating parameters using RSM for reducing the porosity level of AA2024/Al₂O₃ coating on AZ31B magnesium alloy / M. Ashokkumar, D. Thirumalaikumarasamy, T. Sonar et al. // *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*. – 2025. – Vol. 19. – P. 127–141. – DOI: 10.1007/s12008-023-01597-x.
7. Effect of spray distance and powder feed rate on particle velocity in cold spray processes / R. G. Neo, K. Wu, S. C. Tan, W. Zhou // *Metals*. – 2022. – Vol. 12, iss. 1. – 15 p. DOI: 10.3390/met12010075.
8. Lupoi, R. Powder stream characteristics in cold spray nozzles / R. Lupoi, W. O'Neill // *Surface and Coatings Technology*. – 2011. – Vol. 206, iss. 6. – P. 1069–1076. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2011.07.061.
9. Шорінов, О. В. Залежність мікротвердості покриттів з порошку АСД-І від режимів холодного газодинамічного напилювання / О. В. Шорінов, С. О. Поливяний // *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. – 2024. – № 2. – С. 13–20. – DOI: 10.15588/1607-6885-2024-2-2.
10. Weiller, S. A numerical study of pore formation mechanisms in aluminium cold spray coatings / S. Weiller, F. Delloro // *Additive Manufacturing*. – 2022. – Vol. 60, Part A. – 12 p.

DOI: 10.1016/j.addma.2022.103193.

11. Evolution of microstructure and mechanical properties of cold spray additive manufactured aluminum deposit on copper substrate / X. Yang, T. Meng, Y. Su et al. // *Materials Science and Engineering: A*. – 2024. – Vol. 891. – 14 p. DOI: 10.1016/j.msea.2023.146024.

12. Adhesion of cold sprayed soft coatings: Effect of substrate roughness and hardness / A. Bruera, P. Puddu, S. Theimer, M. Villa-Vidaller et al. // *Surface and Coatings Technology*. – 2023. – Vol. 466. – 13 p. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2023.129651.

13. Experimental and numerical study of Al2219 powders deposition on Al2219-T6 substrate by cold spray: Effects of spray angle, traverse speed, and stand-off distance / Z. Zhang, T. L. Meng, C. J. J. Lee et al. // *Materials*. – 2023. – Vol. 16, Iss. 15. – 20 p. DOI: 10.3390/ma16155240.

14. Ghelichi, R. Coating by the cold spray process: a state of the art / R. Ghelichi, M. Guagliano // *Frattura ed Integrità Strutturale*. – 2009. – Vol. 3, iss. 8. – P. 30–44. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.08.03.

15. Influence of surface preparation on the microstructure and mechanical properties of cold-sprayed nickel coatings on Al 7075 alloy / W. Żorawski, A. Góral, M. Makrenek et al. // *Materials*. – 2023. – Vol. 16, iss. 21. – 17 p. DOI: 10.3390/ma16217002.

16. Falco, R. Cold spray additive manufacturing: a review of shape control challenges and solutions / R. Falco, S. Bagherifard // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2025. – Vol. 34, iss. 4. – P. 1023–1041. – DOI: 10.1007/s11666-025-01970-0.

References

1. Shorinov, O. V., Savchenko, N. V., Shypul, O. T., Bilan, D. S. *Optymizatsiia sopla dlia kholodnoho hazodynamichnoho napyliuvannia* [Nozzle optimization for cold gas dynamic spraying]. *Aviatsiino-kosmichna tekhnika i tekhnolohiia - Aerospace Technic and Technology*, 2025, no. 4sup2, pp. 140–148. DOI: 10.32620/aktt.2025.4sup2.16 (In Ukrainian).

2. Yang, X., Meng, T., Su, Y., Chai, X., Guo, Z., Ma, T., Yin, S., Li, W. Particle deformation and coating deposition behavior in cold spray additive manufactured aluminum deposit on copper substrate by simulation and experiment. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, vol. 30, pp. 2879–2890. DOI: 10.1016/j.jmrt.2024.04.057.

3. Nourian, A., Schwartz, T., Boese, S., Müftü, S. Effects of process parameters on cold spray deposition of Al-6061 alloy. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2022, vol. 31, iss. 8, pp. 2517–2536. DOI: 10.1007/s11666-022-01456-3.

4. Li, W., Wu, H., Verdy, C., Costil, S., Liao, H.,

Deng, S. Study of low-pressure cold spray additive manufacturing: Investigation of kinematic spray parameters on deposition and properties. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 2023, vol. 10, iss. 6, pp. 1260–1271. DOI: 10.1089/3dp.2021.0260.

5. Ozdemir, O. C., Widener, C. A., Carter, M. J., Johnson, K. W. Predicting the effects of powder feeding rates on particle impact conditions and cold spray deposited coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2017, vol. 26, pp. 1598–1615. DOI: 10.1007/s11666-017-0611-0.

6. Ashokkumar, M., Thirumalaikumarasamy, D., Sonar, T., Vignesh, P., Deepak, S. Optimization of cold spray coating parameters using RSM for reducing the porosity level of AA2024/Al₂O₃ coating on AZ31B magnesium alloy. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 2025, vol. 19, pp. 127–141. DOI: 10.1007/s12008-023-01597-x.

7. Neo, R. G., Wu, K., Tan, S. C., Zhou, W. Effect of spray distance and powder feed rate on particle velocity in cold spray processes. *Metals*, 2022, vol. 12, iss. 1, 15 p. DOI: 10.3390/met12010075.

8. Lupoi, R., O'Neill, W. Powder stream characteristics in cold spray nozzles. *Surface and Coatings Technology*, 2011, vol. 206, iss. 6, pp. 1069–1076. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2011.07.061.

9. Shorinov, O. V., Polyviyani, S. O. *Zalezhnist mikrotverdosti pokryttiv z poroshku ASD-1 vid rezhymiv kholodnoho hazodynamichnoho napyliuvannia* [Dependence of microhardness of ASD-1 coatings on cold spraying process parameters]. *Novi materialy i tekhnolohii v metalurhii ta mashynobuduvanni – New materials and technologies in metallurgy and mechanical engineering*, 2024, no. 2, pp. 13–20. DOI: 10.15588/1607-6885-2024-2-2. (In Ukrainian).

10. Weiller, S., Delloro, F. A numerical study of pore formation mechanisms in aluminium cold spray coatings. *Additive Manufacturing*, 2022, vol. 60, Part A, 12 p. DOI: 10.1016/j.addma.2022.103193.

11. Yang, X., Meng, T., Su, Y., Chai, X., Guo, Z., Yin, S., Ma, T., Li, W. Evolution of microstructure and mechanical properties of cold spray additive manufactured aluminum deposit on copper substrate. *Materials Science and Engineering: A*, 2024, vol. 891, 14 p. DOI: 10.1016/j.msea.2023.146024.

12. Bruera, A., Puddu, P., Theimer, S., Villa-Vidaller, M., List, A., Bolelli, G., Gärtner, F., Klassen, T., Lusvarghi, L. Adhesion of cold sprayed soft coatings: Effect of substrate roughness and hardness. *Surface and Coatings Technology*, 2023, vol. 466, 13 p. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2023.129651.

13. Zhang, Z., Meng, T. L., Lee, C. J. J., Wei, F., Ba, T., Zhang, Z.-Q., Pan, J. Experimental and numerical study of Al2219 powders deposition on Al2219-T6 substrate by cold spray: Effects of spray angle, traverse

speed, and standoff distance. *Materials*, 2023, vol. 16, iss. 15. 13 p. DOI: 10.3390/ma16155240.

14. Ghelichi, R., Guagliano, M. Coating by the cold spray process: a state of the art. *Frattura ed Integrità Strutturale*, 2009, vol. 3, iss. 8, pp. 30-44. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.08.03.

15. Żórawski, W., Góral, A., Makrenek, M., Lityńska-Dobrzyńska, L., Czaja, P. Influence of surface

preparation on the microstructure and mechanical properties of cold-sprayed nickel coatings on Al 7075 alloy. *Materials*, 2023, vol. 16, iss. 21. 17 p. DOI: 10.3390/ma16217002.

16. Falco, R., Bagherifard, S. Cold spray additive manufacturing: A review of shape control challenges and solutions. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2025, vol. 34, iss. 4, pp. 1023–1041. DOI: 10.1007/s11666-025-01970-0.

Надійшла до редакції 10.06.2026, отримано в доопрацьованому вигляді 15.07.2026,
Дата ухвалення 17.08.2026, дата публікації 26.08.2026

REGULARITIES OF FORMATION AND THICKNESS CONTROL OF ALUMINUM COATINGS DURING COLD GAS-DYNAMIC SPRAYING

Oleksandr Shorinov, Dmytro Bilan

The **subject matter** of this article is the regularities of the influence of cold gas-dynamic spraying (CGDS) parameters on the coating formation process. The **goal** of the study is to establish the relationships governing the effects of the main technological parameters of the CGDS process on aluminum coating thickness and to develop a predictive model for optimizing coating thickness. The **tasks to be solved** are: to implement a full-factorial three-factor experiment with variations in scanning speed, powder feed rate, and spray distance; to conduct metallographic analysis of the obtained coatings to determine deposited layer thickness; to develop a mathematical model (response surface) for the quantitative prediction of the coating thickness; and to investigate the complex effect of the studied parameters on the coating thickness in order to determine the region of high technological robustness (stability of the spraying process to random fluctuations of input variables). **Methods.** The deposition of ULT 02565 aluminum powder was performed using the DIMET-405 CGDS equipment. Microstructure examination and coating thickness measurements were conducted using optical metallography techniques. Process optimization and modeling were carried out using response surface methodology based on a three-factor Box-Behnken experimental design, followed by statistical evaluation of the results and the model's predictive capability using analysis of variance (ANOVA). **Results.** Based on experimental results, it was shown that varying the spraying process parameters enables precise control of the coating thickness to 0.2-0.83 mm per pass. An empirical model was developed that, with high accuracy, explains 96.7% of the total variance in layer thickness (root mean square error of prediction is 0.0598 mm). The analysis of variance demonstrated the statistical significance of the linear effects of scanning speed and powder feed rate, as well as the quadratic effect of spray distance. The **scientific novelty** of the obtained results lies in expanding the understanding of the kinetics of gas-dynamic spraying processes: for the first time, the complex effect of scanning speed and powder mass feed rate on coating thickness has been quantified. **Conclusions.** The results identified a region of high technological robustness in the CGDS process, located in the factor space near its geometric center (scanning speed of 30 mm/s, powder feed rate of 0.5 g/s, and spray distance of 15 mm). The developed recommendations ensure the stable formation of an aluminum coating with a predicted thickness of approximately 0.44 mm.

Keywords: coatings, microstructure, metallography, surface layer, surface treatment, spraying technology, modeling.

Шорінов Олександр Володимирович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технології виробництва авіаційних двигунів, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Білан Дмитро Олексійович – аспірант кафедри технології виробництва авіаційних двигунів, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Oleksandr Shorinov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Aircraft Engines Manufacturing Technology, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine,
e-mail: o.shorinov@khai.edu. ORCID: 0000-0002-5057-6679. Scopus Author ID: 57223082183.

Dmytro Bilan – PhD student of the Department of Aircraft Engines Manufacturing Technology, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine,
e-mail: d.o.bilan@khai.edu. ORCID: 0009-0001-4843-2449