ISSN 1814-4225 (print)
ISSN 2663-2012 (online)

УДК 621.793:532.529:004.942 **doi: 10.32620/aktt.2025.4sup2.16**

О. В. ШОРІНОВ, Н. В. САВЧЕНКО, О. В. ШИПУЛЬ, Д. О. БІЛАН

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

ОПТИМІЗАЦІЯ СОПЛА ДЛЯ ХОЛОДНОГО ГАЗОДИНАМІЧНОГО НАПИЛЮВАННЯ

Предметом *дослідження в статті є вплив геометрії сопла на характеристики процесу холодного газодинамічного напилення (ХГН) за умов низького тиску (до 1,0 МПа).* ***Метою*** *роботи є розроблення методики багатокритеріальної оптимізації геометричних параметрів сопла для досягнення необхідної швидкості частинок із метою формування якісних покриттів при ХГН за умов низького тиску.* ***Завдання****: визначити ключові геометричні параметри сопла (діаметр критичного й вихідного перерізу, довжину розширної частини), що найбільш суттєво впливають на швидкість частинок; розробити аналітичну модель із використанням ізоентропійного газодинамічного моделювання; здійснити статистичний аналіз на основі методу математичного планування експерименту.* ***Методи дослідження.*** *Використано міждисциплінарний підхід, що поєднує ізоентропійне моделювання потоку, метод поверхні відгуку (RSM), регресійний аналіз другого порядку та дисперсійний аналіз (ANOVA), що дозволяє отримати високу точність при моделюванні складних взаємозв'язків. Проведено 47 розрахунково-аналітичних експериментів для побудови математичної моделі залежності швидкості частинок від п'яти факторів, що відповідають за геометрію сопла, температуру та тиск газу на вході.* ***Результати****. Побудовано точну регресійну модель ($R^2 > 0,95$), що дозволяє прогнозувати швидкість частинок алюмінію діаметром 25 мкм на виході з сопла з високою достовірністю. Визначено оптимальне поєднання параметрів, за яких досягається швидкість понад 499 м/с, що забезпечує якісне покриття. Доведено, що навіть при обмеженому тиску (1 МПа) правильний вибір геометрії та параметрів газу дозволяє досягти ефективного переносу енергії до частинок порошку.* ***Висновки****. Запропонована методика оптимізації конструкції сопла забезпечує підвищення ефективності процесу ХГН за рахунок підвищення швидкості частинок без збільшення тиску, що особливо важливо для енергоощадних технологій нанесення захисних і відновлювальних покриттів в умовах сучасних інженерних викликів. Практичне застосування отриманих результатів може сприяти вдосконаленню промислових технологій напилення, зменшенню енергоспоживання та підвищенню ресурсу відновлених виробів.*

Ключові слова*: холодне газодинамічне напилення; геометрія сопла; ізоентропійне моделювання; швидкість частинок; статистичний аналіз; ANOVA; багатокритеріальна оптимізація; низький тиск.*

Вступ

Холодне газодинамічне напилення (ХГН) при тиску близько 1 МПа є ефективною та екологічно чистою технологією формування покриттів із використанням кінетичної енергії частинок. Особливо актуальним є дослідження впливу геометрії сопла на якість і ефективність процесу. У порівнянні з високотисковими системами, низький тиск вимагає тонкої настройки конструкції сопла для досягнення критичної швидкості частинок, що забезпечує адгезію до підкладки.

Наукові дослідження останніх років демонструють, що оптимізація геометричних параметрів сопла є одним із ключових чинників підвищення ефективності ХГН. Одним з перших фундаментальних оглядів застосування технології холодного напилення для ремонту поверхонь представили Champagne та Helfritch [1], які підкреслили значення кінетичної енергії частинок для адгезії, а також конструктивні вимоги до сопла для забезпечення стабільного надзвукового потоку. У подальших роботах Gärtner і співавт. [2] розробили геометрично оптимізовані сопла, які забезпечують покращене фокусування потоку і підвищення ефективності нанесення покриття. Подібні результати отримали Chen et al. [3], які провели параметричну оптимізацію сопла за допомогою чисельного аналізу та методу відгукової поверхні.

Цінний внесок у вивчення розподілу потоку та частинок у соплах зроблено в роботі Gabor et al. [4], де порівнюється ефективність круглих і прямокутних сопел. Їхні дослідження доводять, що геометрія каналу суттєво впливає на динаміку розгону частинок. У дослідженні Mohankumar et al. [5] акцент зроблено на впливі параметрів напилення та форми сопла на якість композитних покриттів, зокрема пористість і

Creative Commons Attribution NonCommercial 4.0 International

мікротвердість. Теоретичне обґрунтування взаємодії частинок із поверхнею покриття надано в роботах Assadi et al. [6] і Papyrin et al. [7], де також висвітлюються питання термодинаміки й характеристик потоку в соплі.

З огляду на зростання інтересу до чисельного моделювання, варто відзначити дослідження Kai et al. [8], у якому за допомогою CFD-аналізу показано вплив геометрії перерізу на ефективність багатоканального сопла. Alkhimov et al. [9] проаналізували специфіку низько- та високотискових режимів, доводячи, що навіть незначні зміни у формі сопла можуть суттєво вплинути на динаміку потоку. Окрему увагу приділено мікромеханізмам зчеплення (Grujicic et al. [10]) та еволюції підходів до ремонту й адитивного виготовлення (Yin et al. [11]).

Серед сучасних українських досліджень особливо варто відзначити роботу Шорінова та співавт. [12], в якій за умов тиску 1 МПа проаналізовано вплив параметрів ХГН на мікротвердість покриттів із порошку АСД-1. Дослідження Tan et al. [13] продемонструвало ефективність застосування багатопараметричної оптимізації, тоді як у роботі [14] було доведено доцільність комбінування аналітичних і експериментальних методів.

Значний внесок у розуміння ролі морфології частинок у процесі холодного газодинамічного напилення зроблено в роботі Sinnwell et al. [15], де розглянуто, як форма, розмір, шорсткість і пористість частинок впливають на їхню траєкторію, швидкість та енергію зіткнення з підкладкою. Автори застосували чисельне моделювання з урахуванням низькотискових умов і показали, що частинки сферичної форми мають більш передбачувану динаміку, тоді як частинки з порушеною геометрією призводять до нестабільного розподілу щільності потоку, що знижує якість покриття. Вони також довели, що морфологічні характеристики істотно впливають на кут зіткнення, ефективність передачі імпульсу та теплової енергії, особливо при використанні газу з обмеженим тиском.

У свою чергу, Klinkov et al. [16] дослідили способи ефективного використання кінетичної енергії потоку за допомогою конструкцій ежекторних сопел, які дають змогу утворювати рівномірний потік частинок навіть за зниженого тиску. Їхні експерименти підтвердили, що використання багатоканальної ежекторної схеми сприяє покращенню зчеплення мідних частинок з основою, завдяки підвищенню локальної швидкості в зоні розпилення. Аналогічно, у дослідженні Sakaki [17], яке входить до відомої серії видань Woodhead Publishing, розглянуто вплив конусності та довжини дифузора сопла на стабільність потоку й якість осадження. Автор пропонує концепцію адаптивного профілю сопла, яка враховує зміну тиску, густини та температури газу вздовж каналу, що особливо актуально для низькотискових систем.

Окрему увагу слід приділити роботі Goyal et al. [18], де запропоновано мультикритеріальний підхід до оптимізації режимів холодного напилення із застосуванням методу Тагучі та концепції зваженої корисності. Авторами проаналізовано вплив шести незалежних параметрів — тиску, температури, швидкості подачі порошку, відстані до підкладки, розміру частинок та їх фракційного складу. Встановлено оптимальні комбінації для мінімізації пористості та одночасного підвищення адгезії, що дозволяє адаптувати процес до реальних виробничих умов із мінімальними енергетичними втратами.

Саме тому, навіть за умов тиску в межах 1 МПа, правильний вибір форми сопла, урахування морфології частинок та адаптація режимів напилення дозволяють досягати високоякісних результатів. Комплексний підхід до проєктування – із залученням аналітичних методів, експериментальних досліджень та оптимізаційних алгоритмів – формує підґрунтя для наступного етапу розвитку технології ХГН.

1. Методологія дослідження

Методологія дослідження міждисциплінарна, поєднує принципи термогазодинаміки, механіки двофазних потоків, прикладної математики, оптимізаційного проєктування. Вона базується на інтеграції аналітичних, статистичних методів для розв’язання задачі науково обґрунтованого проєктування та оптимізації геометрії сопел для холодного газодинамічного напилення. Комплексна структура методології дозволяє враховувати взаємозв’язок між конструкцією сопла, параметрами потоку та динамікою прискорення частинок, забезпечуючи можливість цілеспрямованої багатокритеріальної оптимізації. Структура запропонованого в роботі підходу представлена на рис. 1.

Рис. 1. Структура запропонованого підходу з проєктування надзвукових сопел для ХГН

Під час першого етапу застосовується центральний композиційний план з метою системного дослідження впливу основних геометричних параметрів сопла (діаметра критичного перерізу, вихідного діаметра, довжини розширної частини) на швидкість частинок на виході з сопла.

На другому етапі здійснюється розрахунок основних параметрів потоку з використанням відомої

ISSN 1814-4225 (print)
ISSN 2663-2012 (online)

ізентропійної газодинамічної моделі в критичному перерізі сопла та на виході з нього в залежності від геометричних параметрів та вхідних значень тиску й температури. Також виконується розрахунок швидкості частинки порошку на виході з сопла з використанням відомої моделі, яка враховує сили аеродинамічного опору, розмір частинок і параметри газового середовища.

На третьому етапі проводиться дисперсійний аналіз та отримуються рівняння регресії для швидкості частинок на виході з сопла, що узагальнює її залежність від тиску та температури гальмування потоку, діаметрів критичного та вихідного перерізу, довжини розширної частини сопла, та дозволяє здійснювати кількісний аналіз їх впливу. Після чого будуються поверхні відгуку.

Багатокритеріальна оптимізація, спрямована на задоволенні трьох основних критеріїв:

- досягнення необхідної критичної швидкості частинок для зчеплення з підкладкою;
- забезпечення стабільного розширення газового потоку (відсутність перерозширення);
- забезпечення необхідної витрати газу, що відповідає заданим тиску і температурі на вході в сопло.

2. Аналітичне моделювання

Одним із ключових етапів у проєктуванні сопла для холодного газодинамічного напилення є розрахунок основних параметрів потоку як у критичному перерізі, так і на виході з сопла. Для цього використовується ізоентропійна газодинамічна модель, яка передбачає ідеальну течію стисливого газу без врахування теплових втрат і тертя. Залежно від вхідного тиску та температури, а також геометричних характеристик сопла (довжина, діаметр критичного перерізу, кут розширення), розраховуються такі параметри, як локальна швидкість газу, температура, тиск та щільність у різних зонах каналу. Особливу увагу приділяється зоні критичного перерізу, де швидкість газу досягає значення числа Маха $M = 1$, та зоні виходу, де реалізується надзвукове прискорення, важливе для ефективного перенесення енергії до частинок порошку.

Для оцінювання ефективності передачі імпульсу від газу до частинок розглядається динаміка прискорення порошкових частинок у потоці, що здійснюється з використанням відомої моделі, яка базується на рівнянні руху частинки під дією аеродинамічного опору. Це рівняння враховує: розмір та масу частинки; властивості газового середовища (температура, густина, динамічна в'язкість); локальну швидкість газу у кожній точці траєкторії частинки; коефіцієнт опору, який змінюється залежно від режиму течії навколо частинки (залежно від числа Рейнольдса).

Для розрахунку звужувальної частини сопла було використано ізоентропійну методику, що базується на геометричних співвідношеннях та газодинамічних залежностях [19]. Початковим вхідним параметром є відношення довжини сопла до його вихідного діаметра. Знаючи це співвідношення та кут розширення, можна обчислити довжину сопла та діаметр вхідного перерізу, що дозволяє повністю описати геометрію цієї ділянки.

Далі визначається площа вхідного перерізу та проводиться розрахунок безрозмірного масового потоку. Отримане значення використовується для визначення відповідного газодинамічного параметра, що характеризує дозвукову течію. Важливо, що на цьому етапі приймається умова дозвуковості потоку, тобто відповідні значення мають залишатися нижчими за критичні. З використанням таблиць газодинамічних функцій або аналітичних виразів визначаються основні параметри потоку у вхідному перерізі, зокрема температура, тиск, швидкість потоку.

3. Математичне планування експерименту, статистичний аналіз та багатокритеріальна оптимізація

Для дослідження впливу геометричних параметрів сопла та властивостей газу/порошку на кінцеву швидкість часток було застосовано метод математичного планування експерименту у поєднанні зі статистичним аналізом отриманих даних. Це дозволяє зменшити кількість експериментів та водночас отримати надійні аналітичні залежності між вхідними параметрами та вихідною характеристикою процесу.

В дослідженні для побудови плану експерименту, визначення індивідуального впливу факторів та їх взаємодії на цільову функцію, а також оптимізації для забезпечення заданих критеріїв, застосовано методологію поверхні відгуку. Вона поєднує математичне планування експерименту з побудовою регресійної моделі, що дає змогу оцінити вплив окремих факторів і їх взаємодії, мінімізуючи кількість експериментів. У контексті газодинамічного напилення дана методологія ефективно використовується для оптимізації геометрії сопла та характеристик потоку з метою досягнення максимальної швидкості частинок або інших заданих критеріїв.

Основні вхідні фактори, рівні та інтервали варіювання, обрані в цьому досліджені, наведено в табл. 1.

Як основу було обрано центральний композиційний план (Face Centered Central Composite Design), який дозволяє враховувати не лише лінійні ефекти

факторів, але й їхні квадратичні та взаємодійні впливи. Такий підхід є доцільним при аналізі складних багатофакторних технологічних процесів, зокрема холодного газодинамічного напилення [20].

Таблиця 1

Вхідні змінні фактори, рівні та інтервали варіювання

Назва фактору	Рівні		
	-1	0	+1
Критичний діаметр сопла d_{crit}, мм	1	2	3
Діаметр сопла на виході d_{ex}, мм	5	7,5	10
Довжина розширної частини сопла L_{div}, мм	80	115	150
Температура газу на вході в сопло T_0, °C	300	500	700
Тиск газу на вході в сопло P_0, МПа	0,8	1,65	2,5

Для п'яти змінних факторів з урахуванням «зіркових» і нульових точок, загальна кількість експериментів склала 47.

Для оцінки статистичної значущості впливу кожного фактора та їх взаємодій використано дисперсійний аналіз (ANOVA). Це дозволяє перевірити гіпотезу про нульовий вплив фактора на вихідну характеристику на основі розкладу загальної дисперсії результатів.

На основі отриманих даних побудовано рівняння регресії другого порядку, яке описує залежність кінцевої швидкості часток V від вхідних параметрів. Узагальнена форма рівняння має вигляд:

$$V = \beta_0 + \sum_{i=1}^{n} \beta_i X_i + \sum_{i=1}^{n} \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i<j}^{n} \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon, \quad (1)$$

де X_i – нормалізовані фактори;

β – коефіцієнти регресії;

ε – випадкова похибка.

Модель була перевірена на адекватність за допомогою критерію Фішера, що дозволяє оцінити статистичну значущість регресійної моделі в цілому. Крім того, коефіцієнт детермінації R^2перевищував 0,95. Це свідчить про високу точність моделі та її здатність адекватно відображати досліджуваний процес.

Отримане рівняння регресії дозволяє здійснювати прогнозування швидкості часток для різних комбінацій технологічних параметрів. Це є основою для подальшої оптимізації процесу напилення, що може призвести до підвищення ефективності та якості виробництва.

Графічне представлення емпіричної залежності було реалізовано шляхом побудови 2D контурних графіків (рис. 2). Ці візуалізації дозволяють наочно оцінити вплив взаємодії двох змінних факторів при фіксованих значеннях інших параметрів у досліджуваних інтервалах варіювання. Такий підхід сприяє глибшому розумінню складних взаємозв'язків між параметрами процесу. Ці графіки підтверджують, що найбільший вплив на швидкість частинок мають параметри тиску, температури газу та критичний діаметр сопла, а їхнє поєднання може бути ефективно використане для оптимізації процесу ХГН.

4. Результати дисперсійного аналізу (ANOVA) і отримання рівнянь регресії

Для аналізу впливу геометричних параметрів сопла та властивостей газу на кінцеву швидкість частинок алюмінію діаметром 25 мкм було проведено математичне моделювання із використанням методу відгуку поверхні (RSM) та квадратичної моделі. Як вихідну характеристику було обрано швидкість частинки (V_p), а факторами: критичний діаметр сопла (A – d_{crit}), вихідний діаметр сопла (B – d_{ex}), довжина розширної частини сопла (C – l_{conv}), температура газу на вході (D – T_0), тиск газу на вході (E – P_0).

Результати дисперсійного аналізу представлено у табл. 2.

Значення коефіцієнта достовірності моделі (Model F-value = 1756,80) свідчить про її високу значущість. Значення p-value менше 0,05 для більшості факторів та їхніх взаємодій свідчить про статистично значущий вплив на результат.

Таблиця 2

Результати дисперсійного аналізу ANOVA для квадратичної моделі (відгук: швидкість частинки V_p)

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value
Model	3,076E+05	20	15380,45	1756,80	<0,0001
A-dcrit	11441,23	1	11441,23	1306,85	<0,0001
B-dex	5395,32	1	5395,32	616,27	<0,0001
C-lconv	37489,44	1	37489,44	4282,15	<0,0001
D-T0	1,051E+05	1	1,05E+05	12005,5	<0,0001
E-P0	1,252E+05	1	1,25E+05	14306,2	<0,0001
AB	1479,68	1	1479,68	169,01	<0,0001
AC	197,01	1	197,01	22,50	<0,0001
AD	10,58	1	10,58	1,21	0,2817
AE	658,84	1	658,84	75,26	<0,0001
BC	89,78	1	89,78	10,25	0,0036
BD	5,95	1	5,95	0,6798	0,4172
BE	301,35	1	301,35	34,42	<0,0001
CD	1800,00	1	1800,00	205,60	<0,0001
CE	14,58	1	14,58	1,67	0,2082
DE	6055,50	1	6055,50	691,68	<0,0001
A^2	0,0062	1	0,0062	0,0007	0,9790
B^2	44,59	1	44,59	5,09	0,0327
C^2	77,41	1	77,41	8,84	0,0063
D^2	315,19	1	315,19	36,00	<0.0001
E^2	790,90	1	790,90	90,34	<0.0001
Residual	227,63	26	8,75		
Lack of Fit	227,63	22	10,35		
Pure Error	0,0000	4	0,0000		
Cor Total	3,078E+05	46			

Примітка: Значущими вважаються терміни з p-value < 0,0001.

ISSN 1814-4225 (print)
ISSN 2663-2012 (online)

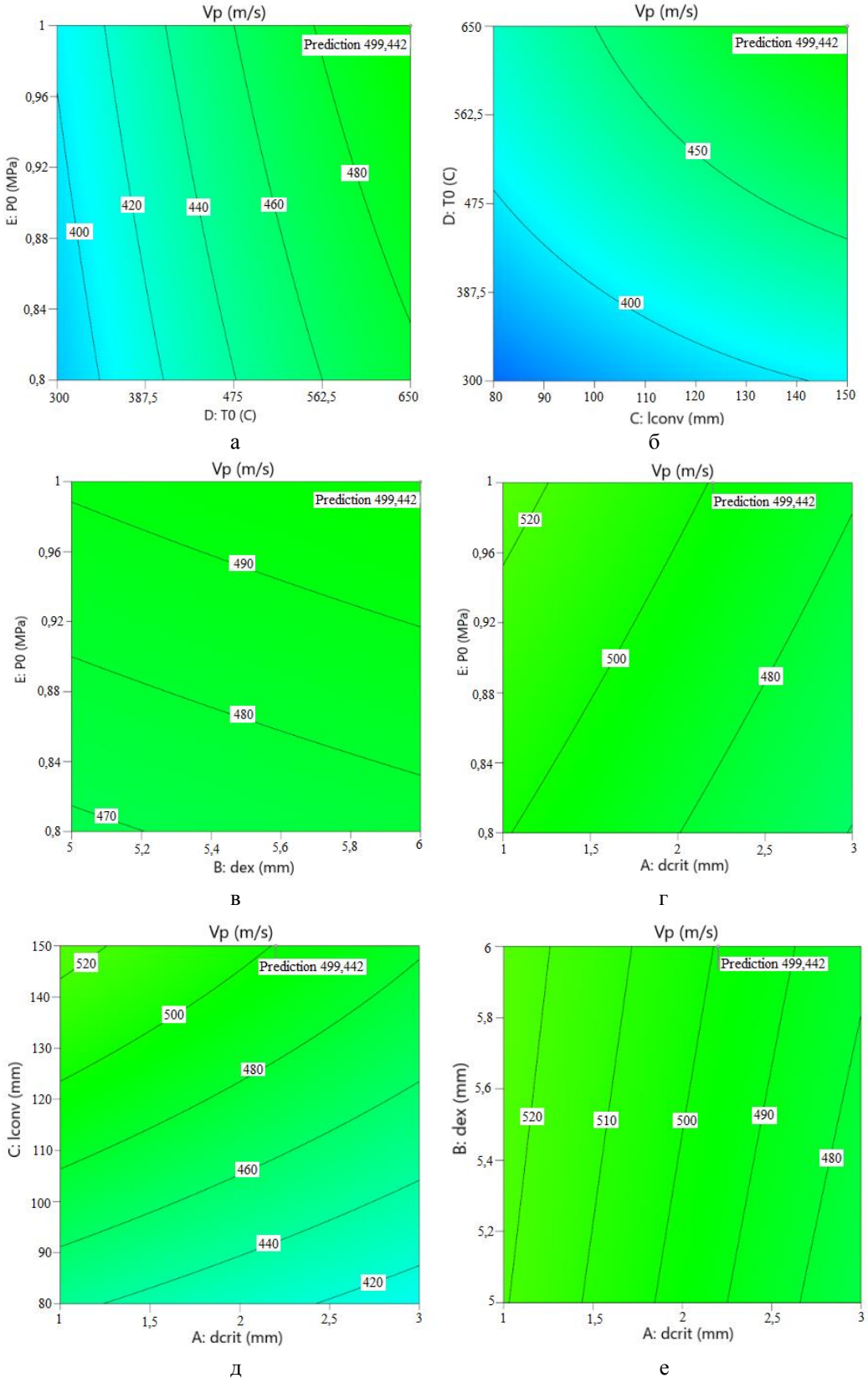

Рис. 2. Залежності швидкості частинки порошку алюмінію діаметром 25 мкм від змінних факторів: а – T_0, P_0; б – l_{conv}, T_0; в – d_{ex}, P_0; г – d_{crit}, P_0; д – d_{crit}, l_{conv}; е – d_{crit}, d_{ex}

Найбільший вплив на швидкість частинок мають тиск на вході (E – P_0), температура (D – T_0), а також геометричні параметри сопла (особливо A, B, C). Водночас деякі взаємодії (AD, BC, BD, CE) не є значущими, і їх можливо виключити під час подальшої оптимізації моделі без втрати точності.

Отримані значення свідчать про високу точність та узгодженість моделі. Зокрема, Predicted R^2 (0,9972) та Adjusted R^2 (0,9987) відрізняються менш ніж на 0,2, що є допустимим і вказує на хорошу прогностичну здатність моделі.

На основі отриманої моделі побудовано регресійне рівняння в термінах реальних (не кодованих) факторів.

Фінальне рівняння регресії має вигляд:

$$\begin{aligned} V_p = {} & 70{,}045 - 20{,}14541 d_{crit} - 4{,}78361 d_{ex} \\ & + 1{,}50013 l_{conv} - 0{,}303053 T_0 \\ & + 115{,}1584 P_0 - 2{,}7200 d_{crit} d_{ex} \\ & - 0{,}070893 d_{crit} l_{conv} - 0{,}002875 d_{crit} T_0 \\ & - 5{,}33824 d_{crit} P_0 + 0{,}019143 d_{ex} l_{conv} \\ & + 0{,}000862 d_{ex} T_0 + 1{,}44412 d_{ex} P_0 \\ & + 0{,}001071 l_{conv} T_0 - 0{,}022689 l_{conv} P_0 \\ & + 0{,}080919 T_0 P_0 - 0{,}050109 d_{crit}^2 \\ & - 0{,}680017 d_{ex}^2 - 0{,}004572 l_{conv}^2 \\ & - 0{,}000283 T_0^2 \\ & - 24{,}77524 P_0^2. \end{aligned} \quad (2)$$

Дане рівняння може бути використане для прогнозування швидкості частинок при різних варіаціях геометрії сопла та параметрів подачі газу, що дозволяє підбирати оптимальні умови напилення.

5. Оптимізація геометрії сопла

Процес оптимізації геометрії сопла здійснювався з урахуванням робочих умов холодного газодинамічного напилення для алюмінієвого порошку діаметром 25 мкм. Основною задачею було забезпечення достатньої швидкості прискорення частинок при оптимальній витраті стисненого повітря. Сопло проєктувалося на такі вхідні параметри: тиск на вході $P_0 = 1$ МПа, температура $T_0 = 650$ °C.

Проведені розрахунки підтвердили, що при критичному діаметрі сопла $d_{crit} = 2{,}2$ мм витрата повітря становить близько 0,5 м³/хв, що відповідає значенню для установок ХГН, що працюють з робочим тиском до 1,0 МПа.

З метою забезпечення достатнього прискорення потоку та частинок порошку було прийнято наступні геометричні параметри розширної частини сопла: довжина розширної частини сопла $L = 150$ мм; діаметр на виході $d_{exit} = 6$ мм.

З урахуванням зазначених обмежень передбачувана швидкість частинки алюмінію діаметром 25 мкм на виході з сопла склала 500 м/с (рис. 3).

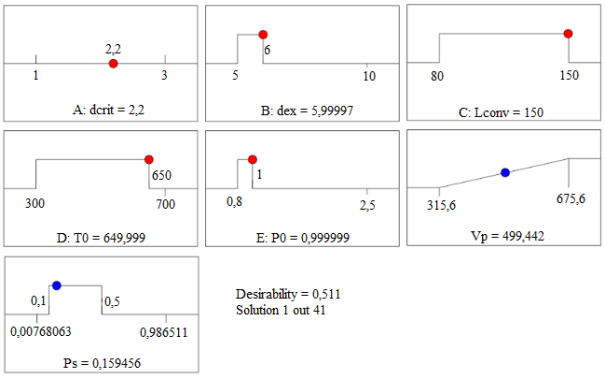

Рис. 3. Визначення параметрів оптимальної конфігурації сопла

Візуально видно, що температура та довжина сопла наближені до максимальних значень, що узгоджується з попереднім аналізом як факторів, які суттєво впливають на прискорення частинок.

Висновки

У дослідженні реалізовано міждисциплінарний підхід до оптимізації геометрії надзвукових сопел для холодного газодинамічного напилення при низькому тиску (~1,0 МПа). Поєднання аналітичного моделювання, методу математичного планування експерименту та багатокритеріальної оптимізації дало змогу: виявити ключові фактори, що впливають на кінцеву швидкість частинок ($P_0, T_0, d_{crit}, l_{conv}$); розробити надійну регресійну модель ($R^2 > 0{,}95$) для прогнозування процесу; отримати набір оптимальних параметрів, який дозволяє досягти високих швидкостей частинок, достатніх для якісної адгезії без надлишкової витрати енергії; візуалізувати складні взаємозв'язки між змінними за допомогою графіків поверхні відгуку.

Таким чином, дана робота формує науково обґрунтовану базу для подальшого вдосконалення систем ХГН із урахуванням конкретного типу порошку, конструкції сопла та умов подачі газу.

Внесок авторів: формулювання проблеми, мети та завдань дослідження – **О. В. Шорінов**; огляд та аналіз інформаційних джерел – **Н. В. Савченко, Д. О. Білан**; розрахунки за аналітичною моделлю – **Н. В. Савченко**; варіаційний аналіз та оптимізація – **О. В. Шорінов**; валідація результатів – **О. В. Шипуль;** написання та редагування – **Н. В. Савченко, О. В. Шорінов.**

ISSN 1814-4225 (print)
ISSN 2663-2012 (online)

Конфлікт інтересів

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

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Наявність даних

Рукопис немає супутніх даних.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що вони не використовували технології штучного інтелекту при створенні даної роботи.

Усі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису

Література

1. *Champagne, V. K. Cold Spray as a Method of Repair [Text] / V. K. Champagne, D. Helfritch // Journal of Thermal Spray Technology. – 2004. – Vol. 13 (1). – P. 114–122. doi: 10.1361/10599630417427.*

2. *Development of optimized cold spray nozzles [Text] / F. Gärtner, H. Assadi, T. Stoltenhoff, & H. Kreye // Applied Surface Science. – 2006. – Vol. 252 (24). – P. 7589–7593. doi: 10.1016/j.apsusc.2006.07.021.*

3. *Optimization of cold spray nozzle parameters [Text] / S. Chen, Y. Wang, J. Liu [et al.] // Materials Today: Proceedings. – 2021. – Vol. 45. – P. 1952–1957. doi: 10.1016/j.matpr.2020.11.867.*

4. *Gabor, T. Numerical studies on cold spray gas dynamics and powder flow in circular and rectangular nozzles [Text] / T. Gabor, S. Akin, & M. Byung-Guk Jun. // Journal of Manufacturing Processes. – 2024. – Vol. 114. – P. 232-246. doi: 10.1016/j.jmapro.2024.02.005.*

5. *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 [et al.] // Journal of Nanomaterials. – 2022. – 17 p. doi: 10.1155/2022/7900150.*

6. *Bonding Mechanism in Cold Gas Spraying [Text] / H. Assadi, F. Gärtner, T. Stoltenhoff, & H. Kreye // Acta Materialia. – 2003. – Vol. 51(15). – P. 4379–4394. doi: 10.1016/S1359-6454(03)00274-X.*

7. *Cold Spray Technology [Text] / A. Papyrin, V. Kosarev, S. Klinkov [et al.]. – Oxford: Elsevier, 2007. – 362 p. doi: 10.1016/B978-0-08-045155-8.X5000-5.*

8. *CFD-Based Study of Nozzle Section Geometry Effects on the Performance of an Annular Multi-Nozzle Jet Pump [Text] / K. Xu, G. Wang, L. Wang, F. Yun, W. Sun, X. Wang, & X. Chen // Processes. – 2020. – Vol. 8 (2). – 18 p. doi: 10.3390/pr8020133.*

9. *Alkhimov, A. P. The Features of Cold Spray Nozzle Design [Text] / A. P. Alkhimov, V. F. Kosarev, & S. V. Klinkov // Journal of Thermal Spray Technology. – 2001. – Vol. 10 (2). – P. 375-381. doi: 10.1361/105996301770349466.*

10. *Adiabatic shear instability based mechanism for bonding in cold-gas dynamic spraying [Text] / M. Grujicic, C. L. Zhao, & W. S. DeRosset, D. Helfritch // Materials and Design. – 2004. – Vol. 25 (8). – P. 681–688. doi: 10.1016/j.matdes.2004.03.008.*

11. *Cold spray additive manufacturing and repair: Fundamentals and applications [Text] / S. Yin, P. Cavaliere, B. Aldwell [et al.] // Additive Manufacturing. – 2018. – Vol. 21. – P. 628–650. doi: 10.1016/j.addma.2018.04.017.*

12. *Прогнозування мікротвердості покриттів з порошку АСД-1, отриманих холодним газодинамічним напилюванням [Текст] / О. В. Шорінов, А. І. Долматов, К. Б. Балушок, &С. О. Поливяний // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2023. – №3. – С. 14–21. doi: 10.15588/1607-6885-2023-3-2.*

13. *Multi-parameter coupled optimization of Al6061 coating porosity based on the response surface method [Text] / K. Tan, W. Hu, O. Shorinov, & Y. Wang. // Mechanics and Advanced Technologies. – 2024. – Vol. 3 (195). – P. 59–67. doi: 10.32620/aktt.2024.3.05.*

14. *Optimization of Cold Spray Process Parameters to Maximize Adhesion and Deposition Efficiency of $Ni+Al_2O_3$ Coatings [Text] / O. Shorinov, A. Dolmatov, S. Polyviany, & K. Balushok // Materials Research Express. – 2023. – Vol. 10. – 18 p. doi: 10.1088/2053-1591/ad11fd.*

15. *Influence of the particle morphology on the spray characteristics in low-pressure cold gas process [Text] / Y. Sinnwell, A. Maksakov, S. Palis, & S. Antonyuk // arXiv preprint. – 2025. – 27 p. doi: 10.48550/arXiv.2504.08064.*

16. *Development of ejector nozzle for high-pressure cold spray application: a case study on copper coatings [Text] / S. Klinkov, V. Kosarev, V. Shikalov, & T. Vidyuk // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2023. – Vol. 125. – P. 4321–4328. doi: 10.1007/s00170-023-11047-3.*

17. *Sakaki, K. The influence of nozzle design in the cold spray process [Text] / K. Sakaki // In Woodhead Publishing Series in Metals and Surface Engineering, The Cold Spray Materials Deposition Process, Woodhead Publishing. – 2007. – P. 117–126. doi: 10.1533/9781845693787.2.117.*

18. *Goyal, T. Multi-response optimization of low-pressure cold-sprayed coatings through Taguchi method and utility concept [Text] / T. Goyal, R. S. Walia, & T. S. Sidhu // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2013. – Vol. 64. – P. 903-914. doi: 10.1007/s00170-012-4049-8.*

19. *Гільчук, А. В. Методичний посібник для практичних занять з курсу «Термодинаміка газового потоку» [Текст] / А. В. Гільчук, Н. А. Панченко, & А. Ж. Мейріс. – К. : Національний технічний*

університет України «КПІ імені Ігоря Сікорського», 2017. – 71 с.

20. Verstee, H. K. An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method. – 2nd ed. [Text] / H. K. Verstee, & W. Malalasekera. – Pearson Education, 2007. – 503 p.

References

1. Champagne, V. K., & Helfritch, D. Cold Spray as a Method of Repair. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2004, vol. 13, iss. 1, pp. 114–122. doi: 10.1361/10599630417427.

2. Gärtner, F, Assadi, H., Stoltenhoff, T., & Kreye, H. Development of optimized cold spray nozzles. *Applied Surface Science*, 2006, vol. 252, iss. 24, pp. 7589–7593. doi: 10.1016/j.apsusc.2006.07.021.

3. Chen, S, Wang, Y., Liu, J., Zhang, H., & Li, X. Optimization of cold spray nozzle parameters. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 45, pp. 1952–1957. doi: 10.1016/j.matpr.2020.11.867.

4. Gabor, T, Akin, S., & Byung-Guk Jun, M. Numerical studies on cold spray gas dynamics and powder flow in circular and rectangular nozzles. *Journal of Manufacturing Processes*, 2024, vol. 114, pp. 232-246. doi: 10.1016/j.jmapro.2024.02.005.

5. Mohankuma, A., Duraisamy, T., Sampathkumar, D., Ranganathan, S., Balachandran, G., Kaliyamoorthy, M., Mariappan, M., & Mulugeta, L. 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, 17 p. doi: 10.1155/2022/7900150.

6. Assadi, H., Gärtner, F., Stoltenhoff, T., & Kreye, H. Bonding Mechanism in Cold Gas Spraying. *Acta Materialia*, 2003, vol. 51, iss. 15, pp. 4379–4394. doi: 10.1016/S1359-6454(03)00274-X.

7. Papyrin, A., Kosarev, V., Klinkov, S., Alkhimov, A., & Fomin, V. *Cold Spray Technology*. Oxford: Elsevier, 2007. 362 p. doi: 10.1016/B978-0-08-045155-8.X5000-5.

8. Xu, K., Wang, G., Wang, L., Yun, F., Sun, W., Wang, X., & Chen, X. CFD-Based Study of Nozzle Section Geometry Effects on the Performance of an Annular Multi-Nozzle Jet Pump. *Processes*, 2020, vol. 8, iss. 2, 18 p. doi: 10.3390/pr8020133.

9. Alkhimov, A. P., Kosarev, V. F., & Klinkov, S.V. The Features of Cold Spray Nozzle Design. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2001, vol. 10, iss. 2, pp. 375-381. doi: 10.1361/105996301770349466.

10. Grujicic, M., Zhao, C. L., DeRosset, W.S., & Helfritch, D. Adiabatic shear instability based mechanism for bonding in cold-gas dynamic spraying. *Materials and Design*, 2004, vol. 25, iss. 8, pp. 681–688. doi: 10.1016/j.matdes.2004.03.008.

11. Yin, S., Cavaliere, P., Aldwell, B., Jenkins, R., Liao, H., & Lupoi, R. Cold spray additive manufacturing and repair: Fundamentals and applications. *Additive Manufacturing*, 2018, vol. 21, pp. 628–650. doi: 10.1016/j.addma.2018.04.017.

12. Shorinov, O. V., Dolmatov, A. I., Balushok, K. B., & Polyvianyi, S. O. Prohnozuvannya mikrotverdosti pokryttiv z poroshku ASD-1, otrymanykh kholodnym hazody-namichnym napylyuvannyam [Prediction of microhardness of coatings from ASD-1 powder obtained by cold gas dynamic spraying]. *New Materials and Technologies in Metallurgy and Mechanical Engineering*, 2023, no. 3, pp. 14–21. doi: 10.15588/1607-6885-2023-3-2. (In Ukrainian).

13. Tan, K., Hu, W., Shorinov, O., & Wang, Y. Multi-parameter coupled optimization of Al6061 coating porosity based on the response surface method. *Mechanics and Advanced Technologies*, 2024, vol. 3, iss. 195, pp. 59–67. doi: 10.32620/aktt.2024.3.05.

14. Shorinov, O., Dolmatov, A., Polyviany, S., & Balushok, K. Optimization of Cold Spray Process Parameters to Maximize Adhesion and Deposition Efficiency of $Ni+Al_2O_3$ Coatings. *Materials Research Express*, 2023, vol. 10. 18 p. doi: 10.1088/2053-1591/ad11fd.

15. Sinnwell, Y., Maksakov, A., Palis, S., & Antonyuk, S. Influence of the particle morphology on the spray characteristics in low-pressure cold gas process. *arXiv preprint*, 2025. 27 p. doi: 10.48550 /arXiv.2504.08064.

16. Klinkov, S., Kosarev, V., Shikalov, V., & Vidyuk, T. Development of ejector nozzle for high-pressure cold spray application: a case study on copper coatings. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, vol. 125, pp. 4321–4328. doi: 10.1007/s00170-023-11047-3.

17. Sakaki, K. The influence of nozzle design in the cold spray process. *In Woodhead Publishing Series in Metals and Surface Engineering, The Cold Spray Materials Deposition Process*, Woodhead Publishing, 2007, pp. 117–126. doi: 10.1533/9781845693787.2.117.

18. Goyal, T., Walia, R. S., & Sidhu, T. S. Multi-response optimization of low-pressure cold-sprayed coatings through Taguchi method and utility concept. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, vol. 64, pp. 903-914. doi: 10.1007/s00170-012-4049-8.

19. Hilchuk, A. V., Panchenko, N. A., & Meiris, A. Zh. *Methodical guide for practical classes in the course "Thermodynamics of Gas Flow"*. Kyiv: National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", 2017. 71 p. (In Ukrainian).

20. Verstee, H. K., & Malalasekera, W. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method. – 2nd ed.* Pearson Education, 2007. 503 p.

Надійшла до редакції 15.06.2025, розглянута на редколегії 18.08.2025

ISSN 1814-4225 (print)
ISSN 2663-2012 (online)

NOZZLE OPTIMIZATION FOR COLD GAS DYNAMIC SPRAYING

Oleksandr Shorinov, Nina Savchenko,
Olha Shypul, Dmytro Bilan

This study investigates the influence of nozzle geometry on the characteristics of the cold gas dynamic spraying (CGDS) process under low-pressure conditions (up to 1.0 MPa). **This study aims** to develop a methodology for the multicriteria optimization of nozzle geometric parameters to achieve the required particle velocity for the formation of high-quality coatings using CGDS at low pressure. **The research objectives** are as follows: to identify the key geometric parameters of the nozzle (critical and exit diameters, and the length of the divergent section) that have the most significant impact on particle velocity; to develop an analytical model based on isentropic gas-dynamic modeling; and to perform statistical analysis using the experimental design method. **Methods**. An interdisciplinary approach was used, combining isentropic flow modeling, response surface methodology (RSM), second-order regression analysis, and analysis of variance (ANOVA) to achieve high-accuracy modeling of complex interactions. A total of 47 computational-analytical experiments were conducted to build a mathematical model describing particle velocity as a function of five factors related to nozzle geometry, gas temperature, and inlet pressure. **Results**. A precise regression model ($R^2 > 0.95$) was developed to predict the velocity of aluminum particles with a diameter of 25 μm at the nozzle exit with high reliability. The optimal parameter combination achieving a velocity exceeding 499 m/s was determined, ensuring high-quality coating. It was proven that the proper selection of nozzle geometry and gas parameters allows effective energy transfer to powder particles even under limited pressure (1 MPa). **Conclusions**. The proposed nozzle design optimization method improves the efficiency of the CGDS process by increasing particle velocity without increasing gas pressure, which is especially important for energy-efficient technologies for applying protective and restorative coatings under modern engineering challenges. The practical application of the obtained results can enhance industrial spraying technologies, reduce energy consumption, and extend the service life of refurbished components.

Keywords: cold gas dynamic spraying; nozzle geometry; isentropic modeling; particle velocity; statistical analysis; ANOVA; multi-objective optimization; low pressure.

Шорінов Олександр Володимирович – канд. техн. наук, доц., доц. каф. технології виробництва авіаційних двигунів, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Савченко Ніна Валеріївна – канд. фіз.-мат. наук, доц., зав. каф. вищої математики та системного аналізу, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Шипуль Ольга Володимирівна – д-р техн. наук, проф., проф. каф. технології виробництва літальних апаратів, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Білан Дмитро Олексійович – асп. каф. 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 at the National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine,
e-mail: o.shorinov@khai.edu, ORCID: 0000-0002-5057-6679, Scopus Author ID: 57223082183.

Nina Savchenko – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Higher Mathematics and System Analysis at the National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine,
e-mail: n.savchenko@khai.edu, ORCID: 0000-0001-8144-9368, Scopus Author ID: 56421771100.

Olha Shypul – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor at the Department of Aircraft Manufacturing Technology at the National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine,
e-mail: o.shipul@khai.edu, ORCID: 0000-0002-1356-5831.

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