

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
- Долматов А. І. д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри технології виробництва авіаційних двигунів Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», м. Харків, Україна, e-mail: a.dolmatov@khai.edu, ORCID: 0000-0001-7943-2890
- Балушок К. Б. канд. техн. наук, головний інженер АТ «Мотор Січ», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: motor@motorsich.com, ORCID: 0000-0002-8212-9275
- Поливяний 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

ПРОГНОЗУВАННЯ МІКРОТВЕРДОСТІ ПОКРИТТІВ З ПОРОШКУ АСД-1, ОТРИМАНИХ ХОЛОДНИМ ГАЗОДИНАМІЧНИМ НАПИЛЮВАННЯМ

Мета роботи. Отримати математичну модель для опису залежності мікротвердості покриттів з порошку алюмінію АСД-1 від трьох основних факторів процесу холодного газодинамічного напилювання з використанням статистичних методів планування експерименту.

Методи дослідження. Для проведення експериментальних досліджень використовувались методи статистичного планування багатофакторних експериментів і регресійного аналізу. Дослідження мікротвердості виконано за стандартною методикою, наведеною в ГОСТ 9450-76. Підготовка поперечних мікрошліфів для досліджень мікротвердості проведено за стандартними методиками з підготовки зразків для металографічних досліджень мікроструктури. Для оброблення статистичних даних використано спеціалізовану комп'ютерну програму Stat-Ease 360.

Отримані результати. Досліджено комплексний вплив параметрів процесу холодного газодинамічного напилювання на мікротвердість покриттів з порошку АСД-1 в широкому діапазоні значень. За результатами експериментальних досліджень встановлено, що в досліджуваних діапазонах робочих режимів напилювання можливо отримати мікротвердість покриттів від 49 до 66 $HV_{0.15}$. Результати дисперсійного аналізу показали, що температура газу і дистанція напилювання найбільшим чином впливають на мікротвердість покриттів, в той час як тиск газу значного впливу на останню не має. Отримане рівняння регресії може бути використане для прогнозування мікротвердості покриттів з досліджуваного порошку, а похибка між розрахунковими та фактичними значеннями не перевищує 5 %.

Наукова новизна. Отримано емпіричні залежності мікротвердості покриттів з порошку АСД-1, нанесені холодним газодинамічним напилюванням, від температури та тиску газу на вході в сопло, а також дистанції напилювання в заданих діапазонах значень.

Практична цінність. Отримані залежності мікротвердості покриттів від параметрів процесу можуть бути використані для вибору режимів холодного газодинамічного напилювання захисних й відновлювальних покриттів, зокрема на деталі авіаційних двигунів.

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

Вступ

Наразі важко назвати галузі промисловості, де б не використовувалися покриття, отримані газополуменим [1], плазмовим [2], детонаційним [3] та іншими методами газотермічного напилювання [4]. Аеро-космічна та авіаційна галузі є одними з таких, де широко використовуються теплозахисні, жаро-, корозійно-, і

зносостійкі покриття, номенклатура яких нараховує сотні найменувань, які наносять практично на більшість основних вузлів серійних авіаційних двигунів [5–7]. Використання легких сплавів на основі алюмінію, магнію та титану для виробництва деталей, потребує спеціальних технологій для можливості напилювання на них покриттів через чутливість цих сплавів до

високих температур, характерних для традиційних методів газотермічного напилювання.

Холодне газодинамічне напилювання (ХГН) є методом нанесення покриттів, яке також знайшло своє місце серед інших технологій газотермічного напилювання і останнім часом набуває все більшого значення в вищезазначених галузях. З одної сторони, це пов'язано з подальшим підвищенням ефективності силових установок і характеристик літальних апаратів, а з іншої – з удосконаленням обладнання, технологій та матеріалів для холодного газодинамічного напилювання покриттів. В основі методу лежить прискорення частинок порошку газовим потоком до надзвукової швидкості в каналі звужувально-розширювального сопла, їх нагріванням до температури нижчою за температуру плавлення матеріалу з якого отримано порошок, та подальшим зіткненням з поверхнею, деформацією та утворенням адгезійно-когезійних зв'язків [9].

Аналіз досліджень та публікацій

Комплексне дослідження процесів ХГН є поєднанням теоретичних [9] та експериментальних [10] методів. Експериментальні дослідження проводять в багатьох областях науки та техніки, метою яких є або встановлення нових фактів про об'єкт дослідження, або порівняння впливу різних умов на досліджуваний процес. Переважну кількість досліджень проводять з метою встановлення за допомогою експерименту функціональних або статистичних зв'язків між декількома величинами або для вирішення екстремальних задач. Класичний метод постановки експерименту передбачає фіксування на прийнятих рівнях усіх змінних факторів, окрім одного, значення якого певним чином змінюють в обраному діапазоні. Цей метод є основою одnofакторного експерименту [11].

Однофакторні експерименти мають місце при дослідженні процесу холодного напилювання, коли дослідника цікавить залежність шуканої величини лише від одного фактору [12]. Використання одnofакторного експерименту для дослідження багатофакторних процесів призводить до необхідності проведення дуже великої кількості дослідів. Їх реалізація потребує матеріальних ресурсів та часу, на протязі якого вплив неконтрольованих факторів на результати дослідів може суттєво змінитися. Тому дані численних дослідів виходять неспівставні. Звідси можна зробити висновок, що результати одnofакторних експериментів, отримані при дослідженні багатофакторних систем, часто малопридатні для практичного застосування. Окрім того, при вирішенні екстремальних задач дані великої кількості дослідів виявляються зайвими, оскільки є отриманими для області, далекої від оптимума.

Для дослідження багатофакторних систем найбільш доцільним є використання статистичних методів планування експерименту [13, 14]. Під плануванням експерименту розуміють процес визначення кількості та умов проведення дослідів, необхідних і достатніх для вирішення поставленої задачі з достатньою точ-

ністю. Статистичні методи планування експерименту дозволяють при мінімальній кількості дослідів отримати моделі багатофакторних процесів [15].

На основі проведеного літературного огляду було визначено основні параметри процесу холодного газодинамічного напилювання низького тиску, а саме температура та тиск газу на вході в сопло, а також дистанція напилювання, які впливають на мікротвердість покриттів [16]. Ці параметри впливають на нагрівання та прискорення частинок, їх розплющування при зіткненні з підкладкою, і, як наслідок, забезпечують їх зчеплення з останньою з формуванням певного комплексу фізико-механічних характеристик.

Мета роботи

Метою роботи є отримання математичної моделі для опису залежності мікротвердості покриттів з порошку алюмінію АСД-1 від трьох основних факторів процесу холодного газодинамічного напилювання, а саме температури та тиску газу на вході в сопло, а також дистанції напилювання, з використанням статистичних методів планування експерименту.

Матеріал і методика досліджень

Обладнання та матеріали

Напилювання покриттів було виконано за допомогою установки холодного газодинамічного напилювання низького тиску ДИМЕТ-405.

Для отримання покриттів було використано порошок алюмінію АСД-1 (рис. 1).

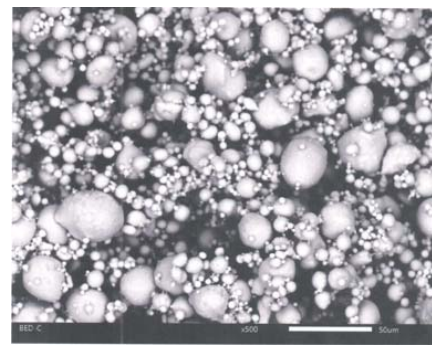


Рисунок 1. Мікроснімок порошкової суміші АСД-1

В якості матеріалу підкладки було використано алюмінієвий сплав Д16-Т. Для напилювання покриттів були підготовлені зразки пластини розміром $25 \times 50 \times 1,5$ мм.

Попередня підготовка поверхні зразків перед напилюванням складалася з піскоструминного оброблення оксидом алюмінію розміром F60...120 для видалення поверхневого оксидного шару та підвищення шорсткості поверхні, а також наступним знежирення розчинником. Шорсткість поверхні зразка після піскоструминного оброблення становила від 120 до 160 мкм.

Визначення факторів, рівнів та інтервалів їх варіювання

Першим етапом при плануванні експерименту є визначення параметрів процесу, тобто незалежних змінних або факторів, які найбільше впливають на характеристики покриттів. Добре відомо, що якість та ефективність напилювання покриттів залежать від великої кількості робочих параметрів та їх комплексного впливу.

За результатами літературного аналізу та попередніх досліджень, проведених в нашій лабораторії, головними параметрами процесу холодного газодинамічного напилювання, від яких в значній мірі залежить мікротвердість покриттів (змінна відгуку), є

- температура газу на вході в сопло;
- тиск газу на вході в сопло;
- дистанція напилювання.

Вирішення будь-якої задачі оптимізації починається з вибору області експерименту. Вибір цієї області проводиться на основі аналізу апріорної інформації. В області експерименту визначають основні рівні та інтервали їх варіювання. Основним або нульовим рівнем фактору є його значення, прийняте за вихідне в плані експерименту. Вибір основних рівнів виконується таким чином, щоб їх поєднання відповідало значенню параметра оптимізації, за можливістю більш близького до оптимального. Кожне поєднання рівнів факторів є багатомірною точкою в факторному просторі. Для визначення верхнього і нижнього рівня для кожного фактору було обрано інтервал варіювання фактору, семіричний відносно основного рівня.

В табл. 1 представлено досліджувані параметри процесу ХГН та їх рівні.

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

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, x_3 відповідно.

Як видно з виразу (2), модель включає в себе вплив основних факторів та їх взаємодії. В дослідженні при плануванні експерименту використано центральний композиційний план. В такому плані для трьох факторів до повного факторного експерименту типу 2^3 додають 6 «зіркових» точок з координатами $(+\alpha; 0; 0)$, $(-\alpha; 0; 0)$, $(0; +\alpha; 0)$, $(0; -\alpha; 0)$, $(0; 0; +\alpha)$, і $(0; 0; -\alpha)$, і деяке число n_0 точок в центрі плану. Величина «зіркового» плеча $\alpha = 1$ (центральний композиційний план з центрами на гранях), а кількість паралельних дослідів в центрі плану $n = 6$. Таким чином, загальна кількість дослідів становить 20, що є достатнім для оцінки лінійного, квадратичного, а також двофакторного впливу змінних параметрів на мікротвердість покриттів.

Таблиця 1 – Досліджувані фактори та рівні їх варіювання

Фактор	Одиниця виміру	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

Розроблення матриці експерименту

Для зменшення часу та коштів на проведення експериментів для отримання необхідної інформації щодо впливу досліджуваних параметрів процесу на мікротвердість покриттів, було застосовано методологію планування експерименту [17].

В цьому дослідженні відгук (мікротвердість покриття) є функцією від початкових температури газу на вході в сопло $T_0(x_1)$, тиску газу на вході в сопло $P_0(x_2)$, і дистанції напилювання $S(x_3)$, та може бути представлений у вигляді

$$\text{Мікротвердість}(HV_{0,15}) = f(T_0; P_0; S). \quad (1)$$

Використано три рівні для досліджуваних параметрів: низький (-1), середній (0), та високий (+1). Для опису залежностей та прогнозування параметру оптимізації від вхідних незалежних змінних було застосовано поліном другого порядку. Для експерименту з трьома вхідними змінними (x_1, x_2, x_3) рівняння регресії має вигляд

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

Проведення експерименту

Після вибору плану експерименту, основних рівнів та інтервалів варіювання факторів, було проведено експеримент. Кожний рядок матриці (див. табл. 2) є режимами напилювання для окремого досліду. Відповідно до плану експерименту було напилено покриття по три зразки для кожної комбінації режимів напилювання з подальшим визначенням середнього значення параметру відгуку. Експерименти проводилися в довільному порядку для запобігання виникнення систематичної похибки експерименту (порядок проведення дослідів обрано за таблицею випадкових чисел). Параметри процесу холодного напилювання, що не змінювалися впродовж проведення всіх дослідів, наступні: швидкість сканування – 20 мм/с, а витрата порошку – 0,5 г/с.

Визначення мікротвердості покриттів

Дослідження мікротвердості отриманих покриттів виконано за ГОСТ 9450-76 «Вимірювання мікротвердості вдавлуванням алмазних наконечників» з використанням твердоміру мікро-Віккерс LECO AMH55 (рис. 2).

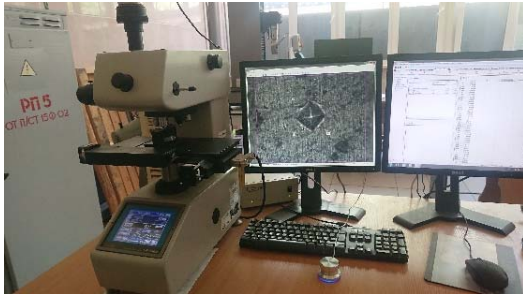


Рисунок 2. Твердомір мікро-Віккерс AMH55

На підготовлені зразки з сплаву Д16-Т згідно плану експерименту було напилено покриття з порошку АСД-1 завтовшки приблизно 2 мм. Після цього за

стандартними методиками з підготовки зразків для металографічних досліджень мікроструктури, було отримано поперечні мікрошліфи покриттів з їх подальшим використанням для визначення мікротвердості.

Середні значення мікротвердості покриттів з порошку АСД-1, отримані за результатами досліджень і розрахунків, наведено в табл. 2.

Результати досліджень та їх обговорення

Отримання емпіричних залежностей

Розрахунок коефіцієнтів регресії виконано в програмному пакеті для оброблення статистичних даних Stat-Ease 360. Значущість кожного з коефіцієнтів оцінено за допомогою параметричного *t*-критерію Стьюдента та *p*-величини, і наведено в табл. 3. Після визначення значущих величин (при рівні достовірності 95 %), була отримана емпірична залежність для прогнозування мікротвердості покриття з порошку АСД-1 (рівняння 3)).

Таблиця 2 – Матриця планування експерименту

Точки на плані	№п/п	Дійсні значення			Закодовані значення			Мікротвердість, HV _{0,15}
		T ₀ , °C	P ₀ , МПа	S, 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

Таблиця 3 – Результати дисперсійного аналізу експериментальних даних

Параметр	Сума квадратів	Ступінь свободи	Середнє квадратичне	F-величина	p-величина	Примітки
Модель	3,481*10 ⁵	6	3,481*10 ⁵	242,39	<0,0001	значуще
A-Температура	1,705*10 ⁵	1	1,705*10 ⁵	712,38	<0,0001	-//-
B-Тиск	4794,86	1	4794,86	20,03	<0,0001	-//-
C-Дистанція	14324,58	1	14324,58	59,85	<0,0001	-//-
A ²	19727,39	1	19727,39	82,43	<0,0001	-//-
B ²	4259,57	1	4259,57	17,80	<0,0001	-//-
C ²	18544,65	1	18544,65	77,49	<0,0001	-//-
Залишок (Residual)	3111,22	13	239,32	-	-	-
Невідповідність (Lack of Fit)	2183,69	8	272,96	1,47	0,3484	не значуще
Чиста похибка (Pure Error)	927,53	5	185,51	-	-	-
Сума	3,512*10 ⁵	19	-	-	-	-

$$\begin{aligned} \text{Мікротвердість}^2,66(HV_{0,15}) = & -7,68133 \cdot 10^5 + 2396,87830(T_0) + 2,74734 \cdot 10^5 (P_0) + 8988,59848(S) - \\ & -2,25197(T_0)^2 - 1,40748 \cdot 10^5 (P_0)^2 - 288,38038(S)^2. \end{aligned} \quad (3)$$

Таблиця 4 – Результати апробації моделі прогнозування мікротвердості покриттів

№ п/п	Режими напилювання			Мікротвердість			
	$T_0, ^\circ\text{C}$	$P_0, \text{МПа}$	$S, \text{мм}$	Експеримент	Модель	95% інтервал вірогідності (нижнє значення)	95 % інтервал вірогідності (верхнє значення)
1	450	1,0	16	63,3	61,9268	59,8888	63,8728
2	450	0,8	20	57,0	57,7803	55,456	59,9588
3	550	0,9	15	67,0	67,0426	65,3316	68,684

Значення коефіцієнту детермінації R^2 для мікротвердості покриття становило 0,9844. Це означає, що 98,44 % експериментальних результатів описуються вищенаведеним емпіричним рівнянням (3). Значення R^2 близьке до 1,0 означає високу точність отриманих моделей. Графік нормальної ймовірності для досліджуваного відгуку показано на рис. 3. З графіку видно, що залишки регресії для мікротвердості покриття припадають на пряму лінію, суттєвих відхилень від нормальності не спостерігається, що означає нормальний розподіл похибки.

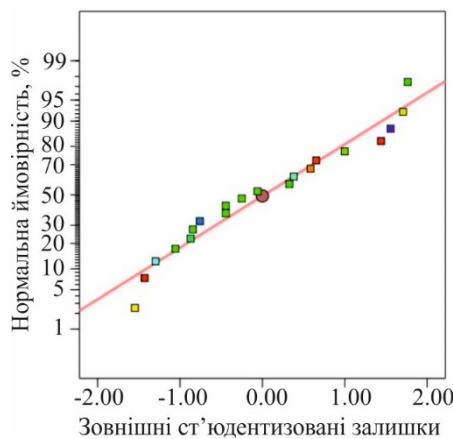


Рисунок 3. Графік нормальної ймовірності

Діаграма розсіювання експериментальних та розрахункових даних показана на рис. 4.

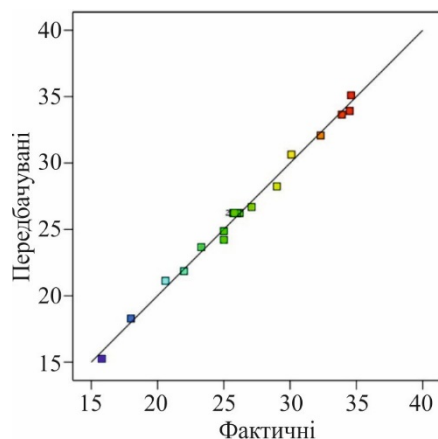


Рисунок 4. Діаграма розсіювання

З графіку видно, що фактичні та розрахункові результати досліджень мікротвердості покриттів мають тісний взаємозв'язок. Виходячи з отриманих результатів можна зробити висновок, що розроблена емпірична залежність може бути використана для прогнозування мікротвердості покриттів АСД-1 від температури та тиску газу на вході в сопло, а також дистанції напилювання в досліджуваних діапазонах значень.

Апробація моделі

Важливим етапом процесу оптимізації є перевірка отриманих емпіричних залежностей на можливість їх використання для прогнозування цільової функції, тобто ступеня відповідності значень прогнозованої характеристики – дійсній. З цією метою додатково було проведено три експерименти, з рандомно обраними режимами напилювання, які наведені в табл. 4.

В табл. 4 подано результати експериментальних досліджень мікротвердості покриттів, а також їх розрахункові значення, отримані за допомогою емпіричної залежності. З аналізу результатів можна зробити висновок, що отримана залежність може бути використана для прогнозування мікротвердості покриття з порошку АСД-1 в досліджуваних діапазонах робочих режимів.

Висновки

1. Виконано дослідження впливу параметрів холодного газодинамічного напилювання низького тиску, а саме температури та тиску газу на вході в сопло, а також дистанції напилювання, на мікротвердість покриттів, отриманих з порошку алюмінію АСД-1 з використанням методології планування експерименту.

2. За результатами дисперсійного аналізу експериментальних даних встановлено, що температура і дистанція напилювання є найбільш важливими параметрами, що впливають на мікротвердість покриттів з досліджуваного порошку.

3. З аналізу експериментальних даних отримано емпіричну залежність для прогнозування мікротвердості покриттів з порошку АСД-1 в досліджуваних діапазонах значень з перевіркою її адекватності. Відхилення розрахункових значень від фактичних становить не більше 5 %.

Список літератури

1. 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
2. Present status and future prospects of plasma sprayed multilayered thermal barrier coating systems [Text] / P. G. Lashmi, P. V. Ananthapadmanabhan, G. Unnikrishnan, S. T. Aruna // *Journal of the European Ceramic Society*. – 2020. – Vol. 40, Iss. 8. – P. 2731–2745. doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2020.03.016
3. 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
4. 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
5. Кравчук, Ю. С. Методи підвищення надійності роботи елементів турбіни [Текст] / Ю. С. Кравчук, Т. В. Татарчук // *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. – 2020. – № 2. – С. 57–65. doi: 10.15588/1607-6885-2020-2-8
6. 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
7. Reclamation of titanium alloy based aerospace parts using laser based metal deposition methodology [Text] / A. Pathania, S. A. Kumar, B. K. Nagesha, S. Barad, T. N. Suresh // *Materials Today: Proceedings*. – 2021. – Vol. 45, Iss. 6. – P. 4886–4892. doi: 10.1016/j.matpr.2021.01.354
8. Response to Comment on “Adiabatic shear instability is not necessary for adhesion in cold spray” [Text] / M. Hassani-Gangaraj, D. Veysset, V. K. Champagne, K. A. Nelson, C. A. Schuh // *Scripta Materialia*. – 2019. – Vol. 162. – P. 515–519. doi: 10.1016/j.scriptamat.2018.12.015
9. Шорінов, О. В. Визначення енергетичних параметрів частинок порошку $Ni+Al_2O_3$ в надзвуковому соплі при газодинамічному напилюванні аналітичним методом [Текст] / *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. – 2022. – №2. – С. 64–70. doi: 10.15588/1607-6885-2022-2-11
10. Експериментальне дослідження впливу параметрів газодинамічного напилювання на коефіцієнт використання порошку [Текст] / О. В. Шорінов, А. І. Долматов, С. О. Поливняний // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2022. – № 4, спецвипуск 2 (182). – С. 123–128. doi: 10.32620/aktt.2022.4sup2.19
11. Frey, D. D. A role for "one-factor-at-a-time" experimentation in parameter design [Text] / D. D. Frey, F. Engelhardt, E. M. Greitzer // *Research in Engineering Design*. – 2003. – Vol. 14. – P. 65–74. doi: 10.1007/s00163-002-0026-9
12. Influence of Al_2O_3 content on microstructure, electrical conductivity and adhesion strength of cold sprayed Al- Al_2O_3 coatings on PEEK substrate [Text] / H. Liu, N. ul Haq Tariq, Y. Ren, L. Zhao, Y. Yang, X. Cui, J. Wang, T. Xiong // *Surface and Coatings Technology*. – 2022. – Vol. 446. – Article ID 128752. doi: 10.1016/j.surfcoat.2022.128752
13. Optimization of plasma spray process variables to attain the minimum porosity and maximum hardness of the LZ/YSZ thermal barrier coatings utilizing the response surface approach [Text] / M. Mathanbabu, D. Thirumalaikumarasamy, M. Tamilselvi, S. Kumar // *Materials Research Express*. – 2022. – Vol. 9(9). – Article ID 096505. doi: 10.1088/2053-1591/ac8857
14. 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. – Article ID 7900150. doi: 10.1155/2022/7900150
15. Pierlot, C. Design of experiments in thermal spraying: A review [Text] / C. Pierlot, L. Pawłowski, M. Bigan, P. Chagnon // *Surface and Coatings Technology*. – 2008. – Vol. 202, Iss. 18. – P. 4483–4490. doi: 10.1016/j.surfcoat.2008.04.031
16. A brief review on cold spray coating process [Text] / A. Srikanth, G. M. Thalib Basha, B. Venkateshwarlu // *Materials Today: Proceedings*. – 2020. – Vol. 22. – P. 1390–1397. doi: 10.1016/j.matpr.2020.01.482
17. Montgomery, D. C. Design and analysis of experiments, 8 edition [Text] / D. C. Montgomery. – Hoboken, NJ: Wiley & Sons, Inc., 2013. – 757 p.

Одержано 14.08.2023

PREDICTION OF MICROHARDNESS OF ASD-1 POWDER COLD SPRAYING COATINGS

- Shorinov O. PhD, Assistant Professor of Dept. of Aircraft engine manufacturing technologies, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: o.shori-nov@khai.edu, ORCID: 0000-0002-5057-6679
- Dolmatov A. Dr Sc, Professor, Head of Dep. of Aircraft engine manufacturing technologies, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: a.dolma-tov@khai.edu, ORCID: 0000-0001-7943-2890
- Balushok K. PhD, Chief engineer at JSC “Motor Sich”, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: motor@motor-sich.com, ORCID: 0000-0002-8212-9275
- Polyviany S. Deputy director for manufacturing of aircraft engines - head of manufacturing department at JSC “Motor Sich”, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: sergeypolyvanij@ukr.net, ORCID: 0000-0003-0558-135

Purpose. To develop a mathematical model for describing the dependence of the microhardness of ASD-1 aluminum powder coatings on the three main factors of the cold gas-dynamic spraying process using statistical methods of experiment planning.

Research methods. Methods of statistical planning of multifactorial experiments and regression analysis were used to conduct experimental research. The analysis of microhardness was performed according to the standard methodology given in GOST 9450-76. Preparation of transverse microsections for microhardness studies was carried out according to standard methods for preparing samples for metallographic analysis of microstructure. The specialized computer program Stat-Ease 360 was used to process statistical data.

Results. The complex effect of cold gas spraying process parameters on the microhardness of ASD-1 powder coatings in a wide range of values was investigated. According to the results of experimental studies, it was established that in the investigated ranges of the deposition modes, it is possible to obtain microhardness of coatings in range from 49 to 66 HV0.15. The dispersion analysis results showed that the gas temperature and the stand-off distance have the greatest effect on the microhardness of the coatings, while the powder feed rate has no significant effect on the microhardness. The obtained regression equation can be used to predict the microhardness of coatings from the ASD-1 powder, and the error between the calculated and actual values does not exceed 5%.

Scientific novelty. Empirical dependences of the microhardness of ASD-1 powder coatings, deposited by cold spraying, on the gas temperature at the nozzle inlet, stand-off distance, and powder feed rate in the specified ranges of values were obtained.

Practical value. The obtained dependences of the coating microhardness on the process parameters can be used to select modes of cold spraying of protective and restorative coatings, in particular on aircraft engine parts.

Key words: experiment planning, dispersion analysis, regression equation, deposition modes, optimization.

References

1. 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.
2. Lashmi, P. G., Ananthapadmanabhan, P. V., Unnikrishnan, G., Aruna, S. T. (2020). Present status and future prospects of plasma sprayed multilayered thermal barrier coating systems. *Journal of the European Ceramic Society*, 40 (8), 2731–2745.
3. Sharma, V., Kazi, S. (2019). An investigation on D-gun sprayed Al₂O₃-SiC coatings. *Surface and Coatings Technology*, 375, 303–314.
4. 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.
5. Kravchuk, Yu., Tatarchuk, T. (2020). Metody pidvyshchennya nadiynosti roboty elementiv turbiny [Methods of increasing the reliability of turbine elements]. *New Materials and Technologies in Metallurgy and Mechanical Engineering*, 2, 57–65, [in Ukrainian].
6. 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].
7. Pathania, A., Kumar, S. A., Nagesha, B. K., Barad, S., Suresh, T. N. (2021). Reclamation of titanium alloy based aerospace parts using laser based metal deposition methodology. *Materials Today: Proceedings*, 45(6), 4886–4892.

8. Hassani-Gangaraj, M., Veysset, D., Champagne, V. K., Nelson, K. A., Schuh, C. A. (2019). Response to Comment on “Adiabatic shear instability is not necessary for adhesion in cold spray”. *Scripta Materialia*, 162, 515–519.
9. Shorinov, O. V. (2022). Vyznachennya enerhetychnykh parametriv chastynok poroshku Ni+Al₂O₃ v nadzvukovomu sopli pry hazodynamichnomu napylyuvanni analitychnym metodom [Determination of energy parameters of Ni+Al₂O₃ 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].
10. Shorinov, O., Dolmatov, A., Polyvianyi, S. (2022). Eksperymental'ne doslidzhennya vplyvu parametriv hazodynamichnoho napylyuvannya na koefitsiyent vykorystannya poroshku [Experimental study of effect of cold spraying parameters on powder usage rate]. *Aerospace Technic and Technology*, 4, 2 (182), 123–128, [in Ukrainian].
11. Frey, D. D., Engelhardt, F., Greitzer, E. M. (2003). A role for "one-factor-at-a-time" experimentation in parameter design. *Research in Engineering Design*, 14, 65–74.
12. Liu, H., Tariq, N. ul Haq, Ren, Y., Zhao, L., Yang, Y., Cui, X., Wang, J., Xiong, T. (2022). Influence of Al₂O₃ content on microstructure, electrical conductivity and adhesion strength of cold sprayed Al- Al₂O₃ coatings on PEEK substrate. *Surface and Coating Technology*, 446, 128752.
13. Mathanbabu, M., Thirumalaikumarasamy, D., Tamilselvi, M., Kumar, S. (2022). Optimization of plasma spray process variables to attain the minimum porosity and maximum hardness of the LZ/YSZ thermal barrier coatings utilizing the response surface approach. *Materials Research Express*, 9 (9), 096505.
14. 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, 7900150.
15. Pierlot, C., Pawlowski, L., Bigan, M., Chagnon, P. (2008). Design of experiments in thermal spraying: A review. *Surface and Coatings Technology*, 202, (18), 4483–4490.
16. Srikanth, A., Thalib Basha, G. M., Venkateshwarlu, B. (2020). A brief review on cold spray coating process, *Materials Today: Proceedings*, 22, 1390–1397.
17. Montgomery, D. C. (2013) *Design and analysis of experiments*, 8 edition. Hoboken, NJ: Wiley & Sons, Inc., 757.