

УДК621.930

DOI 10.47049/2226-1893-2025-2-107-120

**ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ
ПЛАЗМОВО-ПОРОШКОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ
З ВИКОРИСТАННЯМ РЕГРЕСІЙНО-КОРЕЛЯЦІЙНОГО АНАЛІЗУ**

О.І. Стальніченко

к.т.н., професор, завідувач кафедри «Матеріалознавство і технологія матеріалів»
tmkafedra@bigmir.net

Є.О. Науменко

к.т.н., доцент кафедри «Матеріалознавство і технологія матеріалів»
naumenko.e.o@op.edu.ua

К.О. Крейцер

к.т.н., ст. викладач кафедри «Матеріалознавство і технологія матеріалів»
kreycerk@gmail.com

Є.М. Козішкурт

док.філ.(PhD), ст. викладач кафедри «Матеріалознавство і технологія матеріалів»
koziskurtevgen@gmail.com

Е.П. Богомолов

старший викладач кафедри «Матеріалознавство і технологія матеріалів»
boginerged@gmail.com

Одеський національний морський університет, Одеса, Україна

Анотація. У статті представлено методику оптимізації параметрів плазово-порошкового наплавлення із використанням регресійно-кореляційного аналізу.

Плазово-порошкове наплавлення є високоефективним методом нанесення зносостійких покриттів, який широко застосовується у машинобудуванні, металургії, суднобудуванні та судноремонті.

Процес наплавлення залежить від ряду параметрів, таких як струм і напруга дуги, швидкість наплавлення та кут нахилу плазмотрона. Ці фактори суттєво впливають на експлуатаційні характеристики отриманих покриттів.

У роботі було досліджено вплив технологічних параметрів плазово-порошкового наплавлення на міцність і довговічність наплавлених матеріалів, побудована математична модель для оптимізації технологічного процесу.

Використано повний факторний експеримент для чотирьох змінних на двох рівнях, що дозволило оцінити взаємодію між параметрами та їхній вплив на межу витривалості зразків.

Отримані результати показують, що струм наплавлення, напруга дуги та кут нахилу плазмотрона мають найбільший вплив на якість покриттів, тоді як швидкість наплавлення є менш значущим фактором. Побудована регресійна модель забезпечує точність прогнозу з коефіцієнтом детермінації $R^2 = 0,9365$, що свідчить про високу відповідність моделі реальним даним.

Розроблена методика дозволяє зменшити витрати матеріалів та часу, покращити якість покриттів та підвищити ефективність процесу плазово-порошкового наплавлення. Практичне застосування результатів передбачає використання математичної моделі для налаштування параметрів наплавлення залежно від вимог до кінцевого продукту. Це відкриває нові можливості для автоматизації та підвищення продуктивності в промислових умовах.

Ключові слова: *плазово-порошкове наплавлення, регресійно-кореляційний аналіз, математична модель, оптимізація.*

UDC 621.930

DOI 10.47049/2226-1893-2025-2-107-120

OPTIMIZATION OF PLASMA-POWDER SURFACING PARAMETERS USING REGRESSION-CORRELATION ANALYSIS

O. Stalnichenko

Ph.D, Professor,

Head of the Department «Materials Science and Technology»

tmkafedra@bigmir.net

Ye. Naumenko

Ph.D., associate professor of the Department «Materials Science and Technology»

naumenko.e.o@op.edu.ua

K. Kreitser

Ph.D., Senior lecturer of the Department «Materials Science and Technology»

kreycerk@gmail.com

Ye. Kozishkurt

Ph.D, Senior lecturer of the Department «Materials Science and Technology»

igonua@gmail.com

E. Bogomolov

Senior lecturer of the Department «Materials Science and Technology»

boginerged@gmail.com

Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine

Abstract. *The article presents a methodology for optimizing the parameters of plasma-powder surfacing using regression-correlation analysis.*

Plasma-powder surfacing is a highly efficient method of applying wear-resistant coatings, which is widely used in mechanical engineering, metallurgy, shipbuilding, and ship repair.

The surfacing process depends on a number of parameters, such as arc current and voltage, surfacing speed, and plasma torch angle. These factors significantly affect the performance characteristics of the resulting coatings.

In this work, the influence of technological parameters of plasma-powder surfacing on the strength and durability of deposited materials was investigated, and a mathematical model was built to optimize the technological process. A full factorial experiment was used for four variables at two levels, which allowed us to evaluate the interaction between the parameters and their influence on the endurance limit of the samples.

The results show that the deposition current, arc voltage, and plasma torch angle have the greatest influence on the quality of coatings, while the deposition speed is a less significant factor. The built regression model provides accurate forecasting with a determination coefficient of $R^2 = 0.9365$, which indicates a high correspondence of the model to real data.

The developed methodology reduces the consumption of materials and time, improves the quality of coatings and increases the efficiency of the plasma-powder surfacing process. The practical application of the results involves the use of a mathematical model to adjust the deposition parameters depending on the requirements for the final product. This opens up new opportunities for automation and productivity improvement in industrial environments.

Keywords: *plasma-powder surfacing, regression-correlation analysis, mathematical model, optimization.*

Вступ. Плазмово-порошкове наплавлення є одним із провідних методів створення високоякісних покриттів, які забезпечують підвищення зносостійкості, корозійної стійкості та механічних властивостей поверхонь у різних галузях промисловості. Завдяки унікальним характеристикам плазмового джерела тепла, цей метод дозволяє точно керувати процесами нагрівання, плавлення та наплавлення матеріалів[1]. Проте ефективність та якість покриттів значною мірою залежать від оптимального вибору параметрів технологічного процесу.

У сучасній науковій літературі наголошується на необхідності точного налаштування ключових технологічних параметрів, таких як потужність плазмового струменя, витрати порошкового матеріалу, швидкість переміщення робочої головки тощо. Відсутність оптимальних параметрів може призвести до дефектів покриттів, перевитрати матеріалів і енергії, а також зниження експлуатаційних характеристик готових деталей. У зв'язку з цим, використання математичних методів аналізу і моделювання є ключовим інструментом для вирішення цих проблем.

Мета статті – розробка методики оптимізації параметрів плазмово-порошкового наплавлення із застосуванням регресійно-кореляційного аналізу. Цей підхід дозволяє не лише виявити взаємозв'язки між параметрами технологічного процесу та характеристиками отриманих покриттів, але й створити математичну модель для прогнозування та коригування параметрів наплавлення з урахуванням бажаних характеристик кінцевого продукту.

У даній статті обґрунтовано необхідність застосування регресійно-кореляційного аналізу як потужного інструменту для вивчення впливу технологічних параметрів на якість плазово-порошкових покриттів. В основу дослідження покладено системний підхід до збору та аналізу експериментальних даних, які охоплюють ключові аспекти процесу наплавлення.

Виклад основного матеріалу. Плазово-порошкове наплавлення є складним багатофакторним технологічним процесом, успішне виконання якого залежить від точного контролю ключових параметрів. У даній роботі використання регресійно-кореляційного аналізу виправдане з декількох важливих причин, що відображають потребу у вивченні впливу параметрів на якість покриття, створенні математичної моделі для прогнозування результатів, оптимізації процесу та зниженні експериментальних витрат.

Одним із основних завдань у процесі оптимізації процесу плазово-порошкового наплавлення є побудова математичної моделі, яка описує залежності між вхідними параметрами процесу і вихідними характеристиками покриття. Регресійний аналіз дозволяє створити рівняння, яке описує ці залежності [1-7]:

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_1 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon, \quad (1)$$

де y – характеристика якості покриття (твердість чи зносостійкість);

X_1, X_2, X_n – технологічні параметри (температура, швидкість наплавлення);

$\beta_0, \beta_1, \beta_n$ – коефіцієнти регресії, які оцінюють внесок кожного параметра;

ε – залишкова похибка.

Для аналізу було взято 16 експериментів випробування межі витривалості зразків, відновлених плазово-порошковим наплавленням з подальшим охолодженням тавідпуском за температури 773 К з метою зняття залишкових напружень, що виникають після наплавлення.

Зразки виконані з високолегваної сталі 30XH2MA, для випробування межі витривалості були вирізані із зони, яка була наплавлена. Габарити зразків становлять 5,0 мм у діаметрі та 50 мм у довжину.

При плануванні за схемою повного факторного експерименту реалізуються всі можливі комбінації факторів на всіх обраних для дослідження рівнях. Кількість дослідів N визначається за формулою [8-13]

$$N = n^K,$$

де n – кількість рівнів;

K – число факторів.

Таким чином, для дворівневого повнофакторного експерименту необхідно провести 2^K дослідів [14-21]. Рівні факторів являють собою межі досліджуваної області за обраним параметром (мінімальне і максимальне значення фактора). Знаючи максимальне $Z_i^{\max}$ і мінімальне $Z_i^{\min}$ значення технологічного параметра (фактора) можна визначити координати центру плану, так званий основний рівень Z_i^0 , а також інтервал (крок) варіювання ΔZ_i .

У цьому випадку число можливих комбінацій з чотирьох факторів на двох рівнях дорівнює $N = n^k = 2^4 = 16$.

Розглянемо межу витривалості σ_1 , МПа (функція відгуку Y) в залежності від чотирьох факторів: струм наплавлення (Z_1), напруга дуги (Z_2), швидкість наплавлення (Z_3) і кут нахилу плазмотрона (Z_4).

При дослідженні впливів струму наплавлення, напруги дуги, швидкості наплавлення і кута нахилу плазмотрона були обрані межі зміни величин: для Z_1 – 120-150 А, для Z_2 – 25-32 В, для Z_3 – 5,14-7,65 м/год, для Z_4 – 5-15 °.

Складемо матрицю планування 2^4 (таблиця 1).

Таблиця 1

Повний факторний експеримент для чотирьох факторів з фіктивною змінною

Номер досліджу	Фактори в натуральному масштабі				Фактори в безрозмірній системі координат					Вихідний параметр, МПа при числі циклів $2,5 \cdot 10^5$
	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	X_0	X_1	X_2	X_3	X_4	Y
1	м	25	5,14	5	+1	-1	-1	-1	-1	272
2	150	25	5,14	5	+1	+1	-1	-1	-1	268
3	120	32	5,14	5	+1	-1	+1	-1	-1	271
4	150	32	5,14	5	+1	+1	+1	-1	-1	263
5	120	25	7,65	5	+1	-1	-1	+1	-1	257
6	150	25	7,65	5	+1	+1	-1	+1	-1	261
7	120	32	7,65	5	+1	-1	+1	+1	-1	258
8	150	32	7,65	5	+1	+1	+1	+1	-1	275
9	120	25	5,14	15	+1	-1	-1	-1	+1	224
10	150	25	5,14	15	+1	+1	-1	-1	+1	232
11	120	32	5,14	15	+1	-1	+1	-1	+1	236
12	150	32	5,14	15	+1	+1	+1	-1	+1	222
13	120	25	7,65	15	+1	-1	-1	+1	+1	220
14	150	25	7,65	15	+1	+1	-1	+1	+1	240
15	120	32	7,65	15	+1	-1	+1	+1	+1	233
16	150	32	7,65	15	+1	+1	+1	+1	+1	241

Нормальний розподіл – це один із найважливіших типів розподілу в статистиці, який характеризується симетричною «дзвоновидною» кривою. Його визначальними параметрами є середнє значення (μ) та стандартне відхилення (σ).

У багатьох статистичних аналізах, таких як регресійний аналіз, дисперсійний аналіз або тестування гіпотез, нормальність даних є критичною передумовою.

Проведемо перевірку нормального розподілення експериментальних даних.

$$z_1^0 = \frac{120 + 150}{2} = 135 ; \quad (2)$$

$$z_2^0 = \frac{25 + 32}{2} = 28,5 ;$$

$$z_3^0 = \frac{5,14 + 7,65}{2} = 6,395 ;$$

$$z_4^0 = \frac{5 + 15}{2} = 10 ;$$

$$\Delta z_1 = \frac{150 - 120}{2} = 15 ; \quad (3)$$

$$\Delta z_2 = \frac{32 - 25}{2} = 3,5 ;$$

$$\Delta z_3 = \frac{7,65 - 5,14}{2} = 1,255 ;$$

$$\Delta z_4 = \frac{15 - 5}{2} = 5 .$$

Перевірка показала, що експериментальні дані є нормальнорозподіленими і однорідними.

Розрахуємо лінійні коефіцієнти регресії:

$$b_0 = \frac{1}{16} \sum_{i=1}^{16} y_i = \frac{1}{16} (272 + 268 + 271 + 263 + 257 + 261 + 258 + 275 + \\ + 224 + 232 + 236 + 222 + 220 + 240 + 233 + 241) = 248,3125 ; \quad (4)$$

$$b_1 = \frac{1}{16} (-1 \cdot 272 + 1 \cdot 268 - 1 \cdot 271 + 1 \cdot 263 - 1 \cdot 257 + 1 \cdot 261 - 1 \cdot 258 + 1 \cdot 275 - \\ - 1 \cdot 224 + 1 \cdot 232 - 1 \cdot 236 + 1 \cdot 222 - 1 \cdot 220 + 1 \cdot 240 - 1 \cdot 233 + 1 \cdot 241) = 1,9375 ; \quad (5)$$

$$b_2 = \frac{1}{16}(-1 \cdot 272 - 1 \cdot 268 + 1 \cdot 271 + 1 \cdot 263 - 1 \cdot 257 - 1 \cdot 261 + 1 \cdot 258 + 1 \cdot 275 - \\ - 1 \cdot 224 - 1 \cdot 232 + 1 \cdot 236 + 1 \cdot 222 - 1 \cdot 220 - 1 \cdot 240 + 1 \cdot 233 + 1 \cdot 241) = 1,5625 \quad (6)$$

$$b_3 = \frac{1}{16}(-1 \cdot 272 - 1 \cdot 268 - 1 \cdot 271 - 1 \cdot 263 + 1 \cdot 257 + 1 \cdot 261 + 1 \cdot 258 + 1 \cdot 275 - \\ - 1 \cdot 224 + 1 \cdot 232 - 1 \cdot 236 - 1 \cdot 222 + 1 \cdot 220 + 1 \cdot 240 + 1 \cdot 233 + 1 \cdot 231) = -0,1875; \quad (7)$$

$$b_4 = \frac{1}{16}(-1 \cdot 272 - 1 \cdot 268 - 1 \cdot 271 - 1 \cdot 263 - 1 \cdot 257 - 1 \cdot 261 - 1 \cdot 258 - 1 \cdot 275 + \\ + 1 \cdot 224 + 1 \cdot 232 + 1 \cdot 236 + 1 \cdot 222 + 1 \cdot 220 + 1 \cdot 240 + 1 \cdot 233 + 1 \cdot 241) = -17,3125; \quad (8)$$

Розрахуємо коефіцієнти парної взаємодії. Для цього складемо додаткову таблицю (таблиця 2).

Таблиця 2

Розширена матриця планування повного факторного експерименту 2^4

Номер досліджу	X ₀	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₁ X ₂	X ₁ X ₃	X ₂ X ₃	X ₁ X ₄	X ₂ X ₄	X ₃ X ₄	X ₁ X ₂ X ₃	X ₁ X ₂ X ₄	X ₁ X ₃ X ₄	X ₂ X ₃ X ₄	X ₁ X ₂ X ₃ X ₄	Y
1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	272
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	268
3	+1	-1	+1	-1	-1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	+1	+1	-1	+1	-1	271
4	+1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	263
5	+1	-1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	+1	+1	-1	257
6	+1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	261
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	-1	+1	258
8	+1	+1	+1	+1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	-1	-1	-1	-1	275
9	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	224
10	+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	232
11	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	236
12	+1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	-1	222
13	+1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	+1	220
14	+1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	240
15	+1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	-1	233
16	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	241

Експериментальні дані з присвоєнням кодових позначень факторів наведено в таблиці 3.

Таблиця 3

Кодове позначення факторів

Номер досліджу	X ₁ , струм наплавлення	X ₂ , напруга дуги	X ₃ , швидкість наплавлення	X ₄ , кут нахилу плазмотрона	Y, межа витривалості
1	120	25	5,14	5	272
2	150	25	5,14	5	268
3	120	32	5,14	5	271
4	150	32	5,14	5	263
5	120	25	7,65	5	257
6	150	25	7,65	5	261
7	120	32	7,65	5	258
8	150	32	7,65	5	275
9	120	25	5,14	15	224
10	150	25	5,14	15	232
11	120	32	5,14	15	236
12	150	32	5,14	15	222
13	120	25	7,65	15	220
14	150	25	7,65	15	240
15	120	32	7,65	15	233
16	150	32	7,65	15	241

Результати регресійного аналізу наведено в таблиці 4 та рівнянні 9.

$$y = 253,7322 + 0,1292X_1 + 0,4464X_2 - 0,1494X_3 - 3,4625X_4 \quad (9)$$

Рівняння (9) показує, що параметрами, які визначають межу витривалості дослідного зразку є кут нахилу плазмотрона, струм наплавлення і напруга дуги. Швидкість наплавлення має незначний вплив на межу витривалості, на відміну від попередніх трьох факторів.

Коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,9365$ показує, що побудована регресія пояснює більше 94% розкиду значень залежної змінної відносно середнього. Рівень значущості $p \leq 0,00005$, що показує, що побудована регресія високо значуща.

Таблиця 4

Результати регресійного аналізу

Кодове позначення фактору	b , — лінійний коефіцієнт регресії	Стандартна похибка b	ρ – рівень значущості
X ₀	253,7322	26,36368	0,000001
X ₁	0,1292	0,13164	0,347562
X ₂	0,4464	0,56415	0,445482
X ₃	-0,1494	1,57334	0,926055
X ₄	-3,4625	0,39491	0,000003

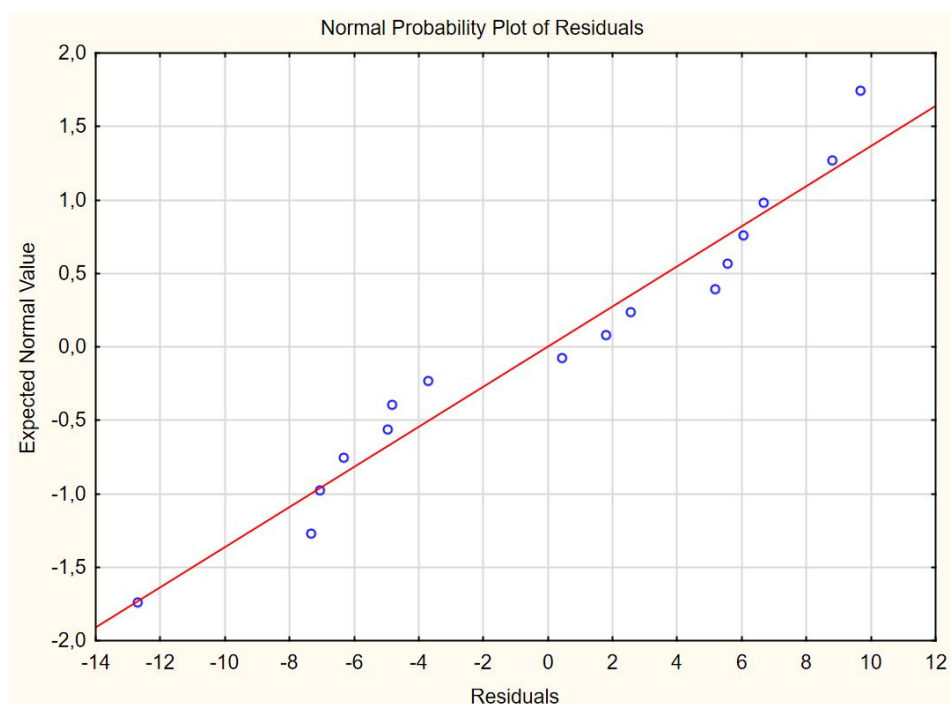


Рис. 1. Нормальний імовірнісний графік залишків

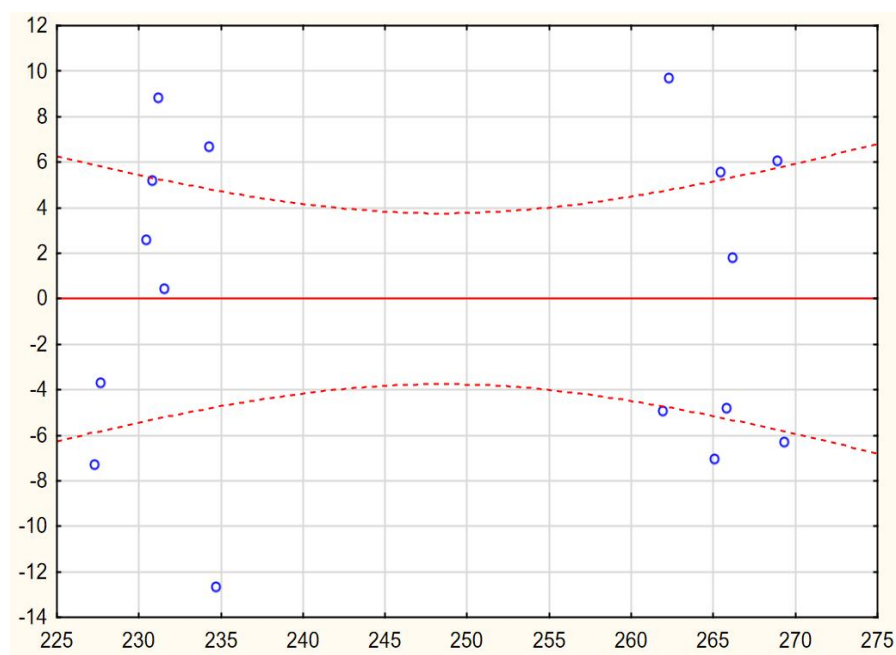


Рис. 2. Прогнозовані результати

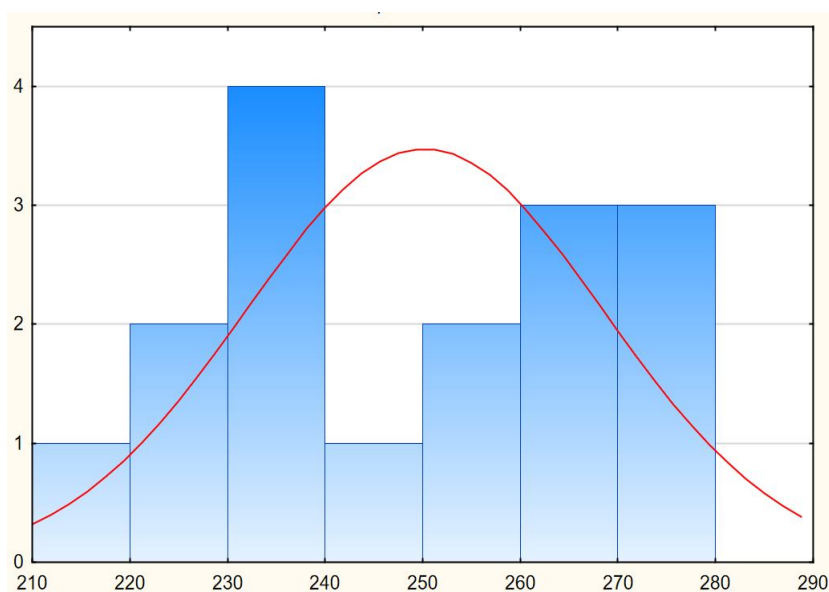


Рис. 3. Розподіл спостережуваних значень

Зіставлення розрахункових даних з фактичними наведені у табл. 5 та показані на рис. 1, 2 та 3.

Таблиця 5

Результати зіставлення фактичних даних межі витривалості
з розрахованими за моделлю (9)

Номер досліджу	Розраховане	Фактичне	Залишок
1	262,3125	272	9,6875
2	266,1875	268	1,8125
3	265,4375	271	5,5625
4	269,3125	263	-6,3125
5	261,9375	257	-4,9375
6	265,8125	261	-4,8125
7	265,0625	258	-7,0625
8	268,9375	275	6,0625
9	227,6875	224	-3,6875
10	231,5625	232	0,4375
11	230,8125	236	5,1875
12	234,6875	222	-12,6875
13	227,3125	220	-7,3125
14	231,1875	240	8,8125
15	230,4375	233	2,5625
16	234,3125	241	6,6875

Висновки

1. Встановлена закономірність впливу основних технологічних параметрів процесу відновлення деталей плазмово-порошковим наплавленням на межу витривалості отриманих зразків.
2. Побудоване рівняння регресії, яке відображає зазначену закономірність. Зіставлені дані, які отримані експериментально та за математичною моделлю. Максимальне відхилення становить 4,42 %. Практичне застосування отримана модель має на етапі моделювання відновлення деталей плазмово-порошковим наплавленням з метою отримання оптимальних параметрів технологічного процесу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Станжицький О.М., Таран Є.Ю., Гординський Л.Д. *Основи математичного моделювання: Навчальний посібник* / Станжицький О.М. К.: Видавничополіграфічний центр «Київський університет», 2006. 96 с.
2. Павленко П.М. *Основи математичного моделювання систем і процесів: Навч. посібник* / П.М. Павленко. К.: НАУ, 2014. 274 с.
3. Пальчевський Б.О. *Дослідження технологічних систем (моделювання, проектування, оптимізація): Навч. посібник*. Львів: Світ, 2001. 232 с.
4. Малярець М.В., Плахотник В.В., Станжицький О.М. та ін. *Вища математика. Х.*: Фоліо, 2014. 670 с.
5. Самойленко А.М., Станжицький О.М., Кенжебаєв К.К., Таран Є.Ю. *Математичне моделювання: Підручник*. К.: Наукова думка, 2015. 327 с.
6. Вовк В.М. *Оптимізаційні методи і моделі: Навч. посібник* / В.М. Вовк, Л.М. Зомчак. Львів: ЛНУ імені Івана Франка, 2014. 360 с.
7. Забуранна Н.В. *Оптимізаційні методи та моделі: Підручник* / Н.В. Забуранна, Н.А. Попрозман, О.І. Клименко та ін. К.: НУБІП, 2014. 372 с.
8. *Моделювання та оптимізація систем: Підручник* / [Дубовой В.М., Кветний Р.Н., Михальов О.І., А.В. Усов А.В.]. Вінниця: ПП ТД «Едельвейс», 2017. 804 с.
9. Дубовой В.М. *Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів і систем керування: Навч. посібник* / В.М. Дубовой. Вінниця: ВНТУ, 2012. 308 с.
10. Schneider A, Hommel G, Blettner M. *Linear regression analysis: Part 14 of a series on evaluation of scientific publications Dtsch Arztebl Int.* 2010;107: 776-82.
11. Freedman DA. *Statistical Models: Theory and Practice* 2009 Cambridge, USA Cambridge University Press.

12. Chan YH. *Biostatistics 201: Linear regression analysis Age (years)*. Singapore Med J. 2004;45:55-61.
13. Ming Liu, Ziang Jin, Guozheng Ma, Lina Zhu, Jiajie Kang, Haidou Wang and Wei Zhang, *Process optimization and coating properties of aluminum coating prepared by supersonic plasma powder feeding based on response surface*. *Journal of Physics: Conference Series*, Volume 1176, Issue 5. 2019.
14. S. Traore, M. Schneider, I. Koutiri, F. Coste, R. Fabbro, C. Charpentier, P. Lefebvre, P. Peyre. *Influence of gas atmosphere (Ar or He) on the laser powder bed fusion of a Ni-based alloy*, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 288, 2021.
15. Itano F.; de Sousa M.A.d.A.; Del-Moral-Hernandez, E. *Extending MLP ANN hyper-parameters Optimization by using Genetic Algorithm*. In *Proceedings of the 2018 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*, Rio de Janeiro, Brazil, 8-13 July 2018; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2018; P. 1-8.
16. D. Cha J.J. Rosenberg, and C.L. Dym, *Fundamentals of Modeling and Analyzing Engineering Systems*, Cambridge University Press, NewYork, 2000.
17. D. Zill and M. Cullen, *Differential Equations*, Eighth Edition, Brooks/Cole, Boston MA, 2013.
18. Clive Dym, *Principles of mathematical modeling*, 2nd edition. Amsterdam, Academic Press, 2004.
19. R. Dobrow, *Introduction to Stochastic Processes with R*, Wiley, Hoboken, New Jersey, 2016.
20. J. Devore, *Probability and Statistics for Engineering and the Sciences*, Cengage Learning, Boston, MA, 2016.
21. B. Dacorogna, *Calculus of Variations*, Imperial College Press, London, 2009.

REFERENCES

1. Stanzhitskyi O.M., Taran E.Yu., Gordynskyi L.D. *Basics of mathematical modeling: Study guide* / O.M. Stanzhitskyi. K.: Kyiv University Publishing Center, 2006. 96 p. [In Ukrainian]
2. Pavlenko P.M. *Fundamentals of mathematical modeling of systems and processes: education manual* / P. M. Pavlenko. K.: NAU, 2014. 274 p. [In Ukrainian]
3. Palchevsky B.O. *Research of technological systems (modeling, design, optimization): Study guide*. Lviv: Svit, 2001. 232 p. [In Ukrainian].
4. Malyarets M.V., Plahotnyk V.V., Stanzhitskyi O.M. etc. *Higher mathematics*. Kh.: Folio, 2014. 670 p. [In Ukrainian].
5. Samoilenko A.M., Stanzhitskyi O.M., Kenzhebaev K.K., Taran E.Yu. *Mathematical modeling, textbook*. K.: Scientific Opinion, 2015. 327 p. [In Ukrainian].

6. Vovk V.M. *Optimization methods and models: training. manual* / V.M. Vovk, L.M. Zomchak. Lviv: LNU named after Ivan Franko, 2014. 360 p. [In Ukrainian].
7. Zaburanna N.V. *Optimization methods and models: [Textbook]* / N.V. Zaburanna, N.A. Poprozman, O.I. Klymenko et al. K.: NUBIP, 2014. 372 p. [In Ukrainian].
8. *Modeling and optimization of systems: a textbook* / [Dubovoy V.M., Kvetny R.N., Mykhalyov O.I., Usov A.V.] Vinnytsia: PP TD «Edelweiss», 2017. 804 p. [In Ukrainian].
9. Dubovoi V.M. *Identification and modeling of technological objects and control systems: study guide* / V.M. Dubovoi. Vinnytsia: VNTU, 2012. 308 p. [In Ukrainian].
10. Schneider A, Hommel G, Blettner M. *Linear regression analysis: Part 14 of a series on evaluation of scientific publications Dtsch Arztebl Int.* 2010;107:776-82.
11. Freedman DA. *Statistical Models: Theory and Practice* 2009 Cambridge, USA Cambridge University Press.
12. Chan YH. *Biostatistics 201: Linear regression analysis Age (years).* Singapore Med J. 2004;45:55-61.
13. Ming Liu, Ziang Jin, Guozheng Ma, Lina Zhu, Jiajie Kang, Haidou Wang and Wei Zhang, *Process optimization and coating properties of aluminum coating prepared by supersonic plasma powder feeding based on response surface. Journal of Physics: Conference Series, Volume 1176, Issue 5. 2019.*
14. S. Traore, M. Schneider, I. Koutiri, F. Coste, R. Fabbro, C. Charpentier, P. Lefebvre, P. Peyre, *Influence of gas atmosphere (Ar or He) on the laser powder bed fusion of a Ni-based alloy, Journal of Materials Processing Technology, Volume 288, 2021.*
15. Itano F.; de Sousa, M.A.d.A.; Del-Moral-Hernandez, E. *Extending MLP ANN hyper-parameters Optimization by using Genetic Algorithm. In Proceedings of the 2018 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN), Rio de Janeiro, Brazil, 8-13 July 2018; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2018; P. 1-8.*
16. D. Cha J.J. Rosenberg, and C.L. Dym, *Fundamentals of Modeling and Analyzing Engineering Systems*, Cambridge University Press, NewYork, 2000.
17. D. Zill and M. Cullen, *Differential Equations, Eighth Edition*, Brooks/Cole, Boston MA, 2013.
18. Clive Dym, *Principles of mathematical modeling, 2nd edition.* Amsterdam, Academic Press, 2004.

19. R. Dobrow, *Introduction to Stochastic Processes with R*, Wiley, Hoboken, New Jersey, 2016.
20. J. Devore, *Probability and Statistics for Engineering and the Sciences*, Cengage Learning, Boston, MA, 2016.
21. B. Dacorogna, *Calculus of Variations*, Imperial College Press, London, 2009.

Стаття надійшла до редакції 03.02.2025

Посилання на статтю: Стальніченко О.І., Науменко Є.О., Крейцер К.О., Козішкурт Є.М., Богомолів Е.П. Оптимізація параметрів плазмово-порошкового наплавлення з використанням регресійно-кореляційного аналізу // *Вісник Одеського національного морського університету*: Зб. наук. праць, 2025. № 2 (76). С. 107-120. DOI 10.47049/2226-1893-2025-2-107-120.

Article received 03.0.2025

Reference a journal artic: Stalnichenko O., Naumenko Ye., Kreitser K., Kozishkurt Ye., Bogomolov E. Optimization of plasma-powder surfacing parameters using regression-correlation analysis // *Herald of the Odesa National Maritime University*: Coll. scient. works, 2025. № 2 (76). P. 107-120. DOI 10.47049/2226-1893-2025-2-107-120.