

Nghiên cứu động năng hạt vật liệu vô định hình phun plasma

Study on kinetic energy of amorphous powder particle for plasma spraying

Vũ Dương^{a,b*}, Lê Hồng Kỳ^c
Vu Duong^{a,b*}, Le Hong Ky^c

^aTrường Công nghệ, Đại học Duy Tân, 550000 Đà Nẵng, Việt Nam

^aSchool of Engineering Technology, Duy Tan University, 550000 Da Nang, Vietnam.

^bViện Nghiên cứu và Phát triển Công nghệ Cao, Đại học Duy Tân, Đà Nẵng, Việt Nam

^bInstitute of Research and Development, Duy Tan University, Danang, 550000, Vietnam

^cVinh Long University of Technology Education Vinh Long, Vietnam

^cTrường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Vinh Long, Việt Nam

(Ngày nhận bài: 20/09/2023, ngày phản biện xong: 04/10/2023, ngày chấp nhận đăng: 28/10/2023)

Tóm tắt

Động năng của các hạt trong phun nhiệt đóng vai trò quan trọng trong việc thiết lập liên kết bám dính mạnh trong quá trình và chậm với chất nền. Nhiều đặc tính của lớp phủ phụ thuộc vào vận tốc hạt. Mục đích của nghiên cứu này là xem xét ảnh hưởng của một số thông số trong phun plasma sử dụng không khí thông thường làm khí tạo plasma đối với giá trị vận tốc. Vật liệu nguyên liệu là hợp kim vô định hình dựa trên Fe, một nhóm vật liệu cạnh tranh mới. Một phân tích ngắn gọn các ảnh hưởng về vận tốc hạt trong phun nhiệt được trình bày trong phần giới thiệu. Phần phương pháp luận bao gồm mô tả về hệ thống phun plasma, camera tốc độ cao để đo vận tốc hạt và xử lý dữ liệu cho độ lệch so với phương trình hồi quy. Loạt phun plasma xảy ra trong đoạn thí nghiệm khi tất cả các thông số chính, chẳng hạn như dòng điện, tiềm năng của năng lượng plasma và tốc độ dòng chảy của không khí, đang thay đổi để điều tra hành vi của hạt bột X-5. Qua phân tích sự thay đổi của các thông số giúp đánh giá trọng lượng của chúng. Các phát hiện và thảo luận trong phần sau giải thích mối quan hệ giữa các tham số chính của quy trình. Tóm lại, một số khuyến nghị cho việc thiết kế dòng plasma được đề cập và các giải pháp trong tương lai để tăng vận tốc hạt đã được đề xuất.

Từ khóa: Độ bám dính; camera tốc độ cao; phương trình hồi quy; hợp kim vô định hình; tính năng lớp phủ.

Abstract

The kinetic energy of the particles in the thermal spraying plays an important role in establishing a strong adhesion bond in the collision process with the substrate. Many characteristics of the coatings depend on the particle velocity. The purpose of this research is to look into the effect of some parameters in plasma spraying using ordinary air as the plasma generation gas on velocity behavior. The feedstock material is a Fe-based amorphous alloy, a new competitive group of materials. A brief analysis of the publications on particle velocity in thermal spraying is presented in the introduction paragraph. The methodology paragraph consists of a description of the plasma spray system, the high-speed camera for measurement of the particle velocity, and the data processing for deviation from the regression equation. The series of plasma spraying occurs in the experiment paragraph when all of the main parameters, such as the current, the potential of plasma power, and the flow rate of the air, are changing to investigate the behavior of the particle of powder X-5. The analysis of the variation of parameters helps to evaluate their weight. The findings and discussions in the following paragraph explain the relationships between the process's main parameters. In conclusion, some recommendations for the design of the plasma torch are mentioned, and future solutions to increase particle velocity are proposed.

Keywords: Adhesion bond; high-speed camera; regression equation; amorphous alloy; performance of coating.

*Tác giả liên hệ: Vũ Dương

Email: duongvuaustralia@gmail.com

1. Đặt vấn đề

So với cấu trúc phổ biến của một đầu phun plasma, các nhà phát minh trong [1] đã phát triển một đầu phun plasma đặc biệt với thiết kế hai buồng trộn, và vận tốc hạt có thể đạt tới 500 m/s. Điểm mới lạ khác biệt là lõi ra buồng xả vuông góc với hướng phun bột. Đổi lại, hướng phun bột được căn chỉnh với hướng tia plasma. Cấu trúc tinh tế đạt được bằng cách giữ dòng hồ quang thấp (100 A) nhưng tăng điện áp hồ quang lên 370 V đã cải thiện khả năng bức xạ của các điện cực. Nhưng khí tạo plasma trong thí nghiệm là nito và tác giả chỉ trình bày ảnh hưởng của khoảng cách phun đến sự phân bố vận tốc. Nó hạn chế khả năng ứng dụng về mặt phân tích các thông số chính khác, chẳng hạn như công suất plasma và tốc độ dòng khí. Nghiên cứu không đề cập đến sơ đồ đo lường chính bằng camera tốc độ cao. Mô hình khác, có tính đến tất cả các thông số chính của phun plasma siêu âm [2], là một cải tiến đáng kể, nhưng họ không áp dụng phân tích biến thể bằng phương trình hồi quy. Trái ngược với công trình [1], các tác giả trong [2] đã đề xuất biên dạng cụ thể của đầu phun, và vận tốc hạt cũng đã đạt được ở mức 500 m/s ở khoảng cách 100 mm từ lõi ra của đầu phun. Sự tiến bộ trong nghiên cứu này là trình bày chi tiết mô hình mô phỏng vận tốc hạt bằng lý thuyết nhiệt động lực học. Dù sao, đối với một số thông số vận hành đầu phun plasma chiếm ưu thế, họ đã trình bày một công thức thực nghiệm như sau:

$$V_{\max} = 24.3 \times 10^{-3} \times I^{0.43} \times d^{-1.96} \times G^{0.21} \quad (1)$$

Trái ngược với công trình [1], các tác giả trong [2] đã đề xuất profile cụ thể của đầu phun, và vận tốc hạt cũng đã đạt được ở mức 500 m/s, ở khoảng cách 100 mm từ lõi ra của đầu phun. Sự tiến bộ trong nghiên cứu này là trình bày chi tiết mô hình mô phỏng vận tốc hạt bằng lý thuyết nhiệt động lực học. Có nhiều công trình nghiên cứu đã xác nhận vai trò của tốc độ hạt ảnh hưởng đến độ bám dính lớp phun và xây dựng mô hình luồng plasma khi va đập với nền [3,4,5,6,7], tuy nhiên không áp dụng

cho dòng vật liệu vô định hình.

Trong [8], Tatyana et al. đã sử dụng gói ANSYS Fluent để mô phỏng dòng chảy trong quá trình phun lạnh vật liệu composite. Họ không tiến hành đo vận tốc, vì vậy việc tính toán phải được xác minh. Bartosz và cộng sự, trong thí nghiệm của họ về việc phun bột FeAl, đã chứng minh kích thước hạt tối ưu nằm trong khoảng 40–63 μm và 38–75 μm [9]. Họ đề xuất hiện tượng mới dựa trên đường kính tới hạn của hạt liên quan đến mức độ nóng chảy của bột. Do không thể đo vận tốc trực tiếp trong quá trình này, tính toán số được ưu tiên. Tầm quan trọng của quy trình đo vận tốc hạt đã được trình bày chi tiết bởi Uroz Hudomalj et al. [10]. Họ đã sử dụng thiết bị Accuraspray-G3C để ghi lại dòng plasma. Độ chính xác của phép đo phụ thuộc vào thời gian ổn định của dòng hạt. Các phương pháp xử lý dữ liệu khác nhau cũng ảnh hưởng đến độ chính xác. Cho nên, mục tiêu của nghiên cứu này là điều tra ảnh hưởng của các thông số chính trong việc phun plasma bột vô định hình dựa trên Fe đến vận tốc hạt để tiết lộ những phát hiện mới về vật liệu mới với các tính chất vật lý và cơ học cụ thể. Một công thức thực nghiệm mới để dự đoán vận tốc hạt đã được trình bày. Kết quả của nghiên cứu có thể được sử dụng để đưa ra các khuyến nghị cho quá trình kỹ thuật.

2. Vật liệu và phương pháp nghiên cứu

Phun plasma trong khí quyển đã được sử dụng trong thí nghiệm của chúng tôi (SG-100 TAFA-Praxair, Hoa Kỳ). Không khí thông thường đóng vai trò là khí chính, trong khi nito đóng vai trò là khí mang. Trong [11], Vũ et, al. trình bày thành phần hóa học của bột X-5. Thành phần hóa học của bột Fe-bazơ (X-5) được phân tích bằng quang phổ phân tán năng lượng với thiết bị SEM, SM-6510LV, Nhật Bản. Lớp phủ từ bột X-5 có độ cứng cạnh tranh, đặc biệt là sau khi xử lý nhiệt đạt tới 54-56 HRC [11] và có thể được dùng để thay thế bột tự thông lượng đất liền

truyền thống để lắng đọng các lớp chống mài mòn trên bề mặt của các bộ phận làm việc trong điều kiện nặng với khả năng bôi trơn hạn chế. Kích thước hạt của bột được xác định bằng dụng cụ Cilas-1090 [11].

Bảng 1 cho thấy thành phần hóa học của bột X-5. Bảng 2 trình bày sự phân bố kích thước của các hạt bột X-5. Máy ảnh tốc độ cao Shimadzu HPV-1 được sử dụng để theo dõi vận tốc phun các hạt [12]. Phương pháp ANOVA được sử dụng để phân tích dữ liệu đo vận tốc hạt

Bảng 1 Thành phần hóa học của bột X-5

Mã	C	Cr	B	Mo	Ni	Mn	Si	Nb	V	W	Fe
X-5	0.73	5.0	0.25	4.20	-	1.25	0.84	0.54	1.20	-	Còn lại

Bảng 2 Phân bố cỡ hạt bột X-5

Mã	Đường kính trung bình μm	Dải phân bố theo cỡ hạt, %										
		0	1	1.5	12	16	24	32	48	64	96	128
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		1	1.5	2	16	24	32	48	64	96	128	192
X-5	72.5	0.9	0.2	0.6	0.5	-	-	14.5	4.5	43.4	5.0	13.8

3. Thử nghiệm và kết quả

3.1. Phương trình hồi quy và phân tích biến thiên.

Bảng 3 cho thấy kết quả của một loạt các thí nghiệm với các cài đặt phun đầu vào khác nhau và các phép đo vận tốc hạt.

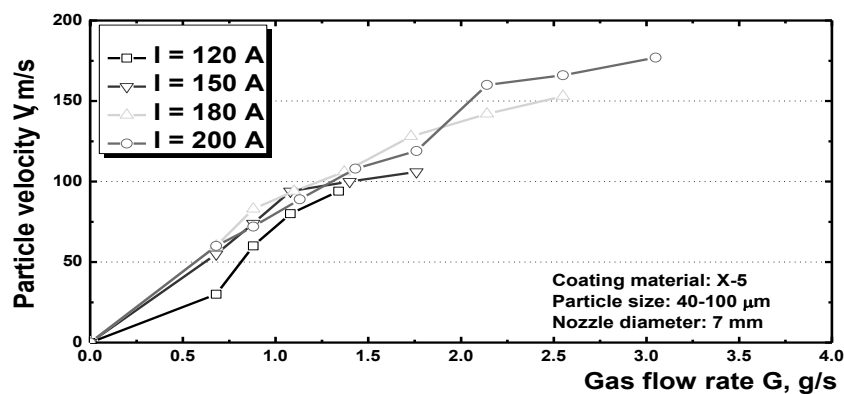
Bảng 3 Kết quả phun plasma bột X-5

No	Dòng plasma, I [A]	Điện áp, U [v]	Lưu lượng, G [g/s]	Vận tốc hạt, V [m/s]
1	120	140	0.46	15
2	120	160	0.55	23
3	120	170	0.75	31
4	120	180	0.94	39
5	120	195	1.42	56
6	120	205	1.76	67
7	120	215	1.85	71
8	120	225	2.6	89
9	150	145	0.55	20
10	150	155	0.76	29
11	150	200	1.13	53
12	150	210	1.76	72
13	150	240	1.95	84
14	150	250	2.92	107
15	180	145	0.55	22
16	180	155	0.75	32
17	180	170	0.94	42
18	180	200	1.13	56
19	180	210	1.42	67
20	180	220	1.76	79
21	180	240	1.95	90

22	180	250	2.92	117
23	200	145	0.55	28
24	200	160	0.75	39
25	200	170	0.94	48
26	200	200	1.13	63
27	200	205	1.42	73
28	200	210	1.76	84
29	200	240	1.95	98
30	200	250	2.92	117
31	220	145	0.55	31
32	220	160	0.75	42
33	220	170	0.94	51
34	220	180	1.13	60
35	220	195	1.42	73
36	220	207	1.76	86
37	220	225	1.85	95
38	220	240	2.6	117
39	220	250	3.17	132

Các kết quả thí nghiệm đã được xử lý (Bảng 4) bằng phần mềm Minitab và được phân tích sơ bộ. Trong [11] sử dụng dữ liệu tương tự, Vũ và

cộng sự đã giới thiệu minh họa đồ thị và công thức thực nghiệm (2) để dự đoán vận tốc hạt của bột X-5.(Hình 1).



Hình 1. Ảnh hưởng của dòng plasma và lưu lượng khí đến tốc độ hạt

$$V = 11 \times I^{0.3} \times G^{0.9} \quad (2)$$

Bảng 4. Phân tích hệ số lần thứ nhất

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant	71.29	1.22	58.66	0.000
I	9.065	0.545	16.65	0.000
U	18.71	4.68	3.99	0.000
G	30.39	4.77	6.37	0.000
I ²	2.848	0.549	5.19	0.000
U ²	-2.45	5.35	-0.46	0.651
G ²	-7.10	6.11	-1.16	0.254
IU	3.20	1.73	1.85	0.075
IG	0.12	1.91	0.06	0.951
UG	5.1	11.8	0.43	0.668

Từ Bảng 4, đối với tương tác hai chiều giữa I và G và U và G, giá trị p lớn hơn độ chính xác của $\alpha = 0,05$, cụ thể là p-Value I*G = 0,951 và p-Value U*G = 0,668. Chúng có thể được loại bỏ trong phương trình hồi quy và vòng phân tích tiếp theo.

Bảng 5. Phân tích hệ số trong vòng phân tích thứ hai

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant	71.573	0.876	81.71	0.000
I	9.048	0.271	33.40	0.000
U	16.85	1.47	11.44	0.000
G	32.31	1.44	22.45	0.000
I ²	2.864	0.529	5.41	0.000
U ²	-0.22	1.03	-0.21	0.835
G ²	-4.42	1.37	-3.22	0.003
IU	3.342	0.507	6.60	0.000

Trong Bảng 5, hệ số tương tác U² có thể được bỏ qua vì giá trị p cho U² là 0,835. Cần phải loại bỏ hệ số này và tiếp tục vòng tiếp theo của phân tích biến thiên trong phương trình hồi quy (xem Bảng 6).

Bảng 6. Phân tích hệ số lần cuối cùng

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant	71.547	0.854	83.78	0.000
I	9.042	0.265	34.08	0.000
U	16.81	1.44	11.70	0.000
G	32.29	1.41	22.83	0.000
I*I	2.895	0.500	5.79	0.000
G*G	-4.627	0.937	-4.94	0.000
I*U	3.341	0.499	6.70	0.000

Cần lưu ý rằng tất cả các hệ số trong phương trình hồi quy đều có giá trị. Kết quả phân tích biến thiên được trình bày trong Bảng 7.

Bảng 7. Phân tích biến thiên (ANOVA)

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	6	36488.7	6081.44	4302.16	0.000
Linear	3	27602.7	9200.89	6508.93	0.000
I	1	1642.1	1642.08	1161.65	0.000
U	1	193.5	193.49	136.88	0.000
G	1	736.6	736.61	521.10	0.000
Square	2	113.3	56.63	40.06	0.000
I ²	1	47.4	47.41	33.54	0.000
G ²	1	34.5	34.45	24.37	0.000
2-Way Interaction	1	63.4	63.37	44.83	0.000
IU	1	63.4	63.37	44.83	0.000
Error	32	45.2	1.41		
Total	38	36533.9			

Phương trình hồi quy trong đơn vị không được mã hóa:

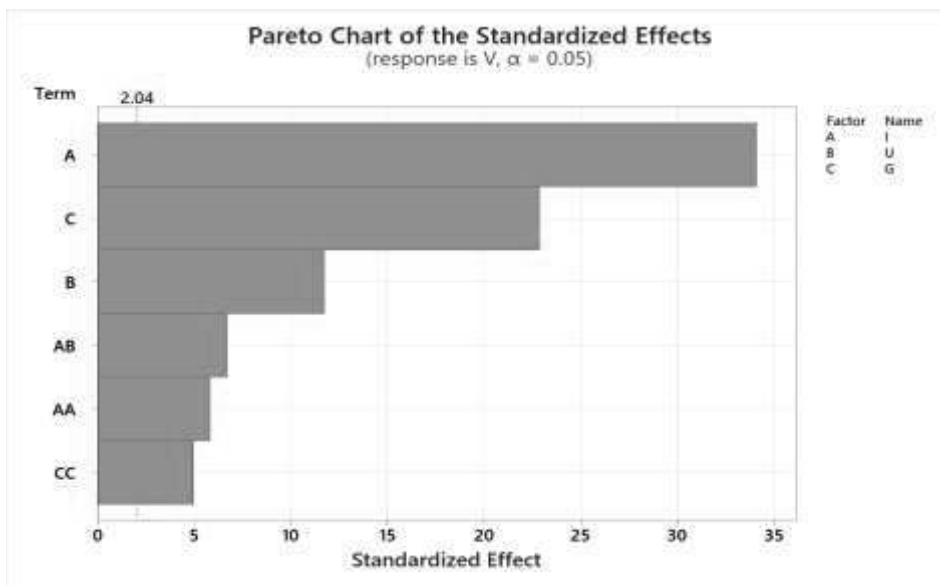
$$V = 3.39 - 0.4498 I + 0.0992 U + 32.98 G + 0.001158 I^2 - 2.520 G^2 + 0.001215 IU \quad (3)$$

Phân tích các hệ số để đánh giá tính nhất quán của phương trình hồi quy (3) được trình bày trong Bảng 8.

Bảng 8. Phân tích phương sai

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1.18894	99.88%	99.85%	99.82%

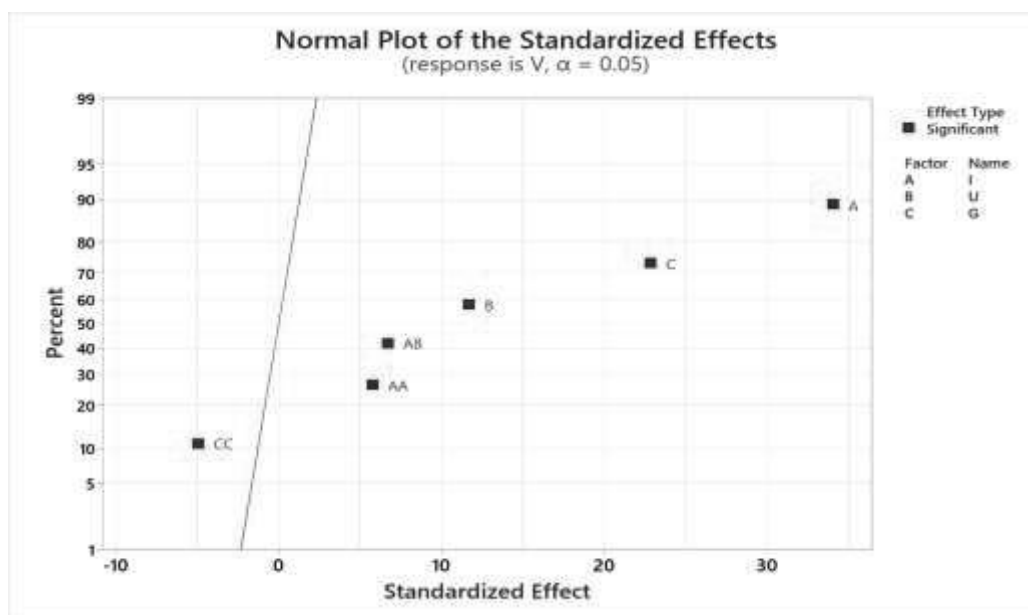
Biểu đồ Pareto (Hình 2) giúp đánh giá trọng số ảnh hưởng cho từng tham số trong phương trình hồi quy dựa trên độ dài của hàng và đường màu đỏ.



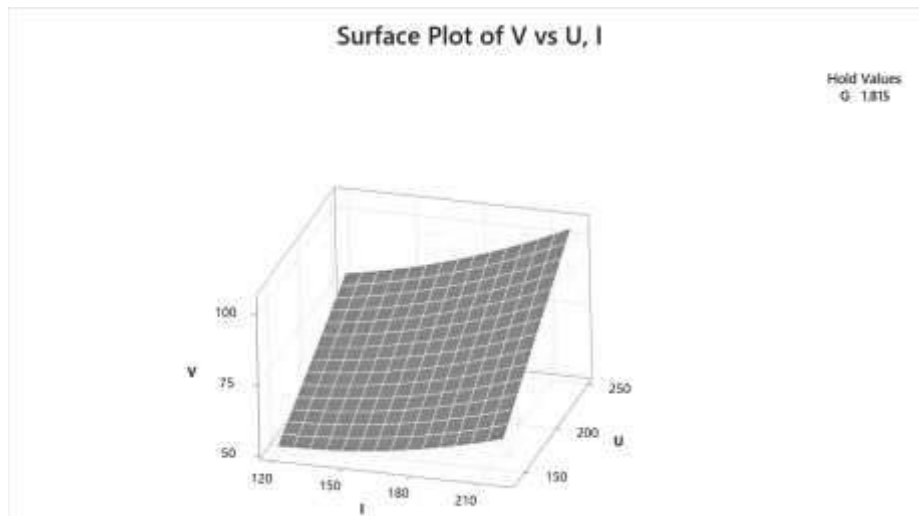
Hình 2. Biểu đồ Pareto [13].

Xu hướng này cũng được thể hiện bằng biểu đồ bình thường (Hình 3). Kết quả là, các thông số kỹ thuật I, U và G có màu đỏ.

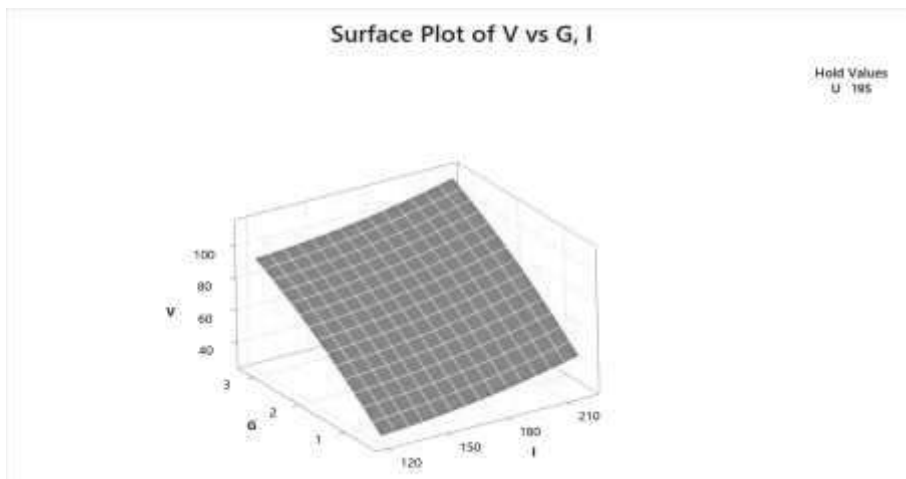
lớn với đường màu đỏ chỉ ra rằng các yếu tố này có ảnh hưởng đáng kể đến phương trình hồi quy.



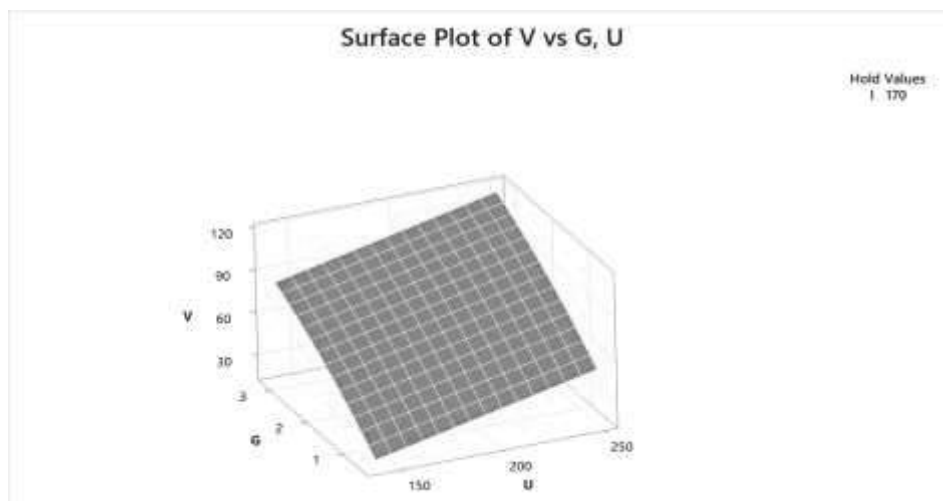
Hình 3. Biểu đồ các hiệu ứng tiêu chuẩn



Hình 4. Ảnh hưởng của U và I lên V



Hình 5. Ảnh hưởng của G và I lên V



Hình 6. Ảnh hưởng của G và U lên V

Biểu đồ ảnh hưởng từng cặp thông số (U,I), (G,I) và (G,U) lên V được mô tả trên các Hình 4, 5 và 6.

Sẽ rất hữu ích khi phân tích các điều kiện để nội địa hóa diện tích tối ưu cho vận tốc hạt vì nó cung cấp chất lượng lớp phủ tốt, chẳng hạn như

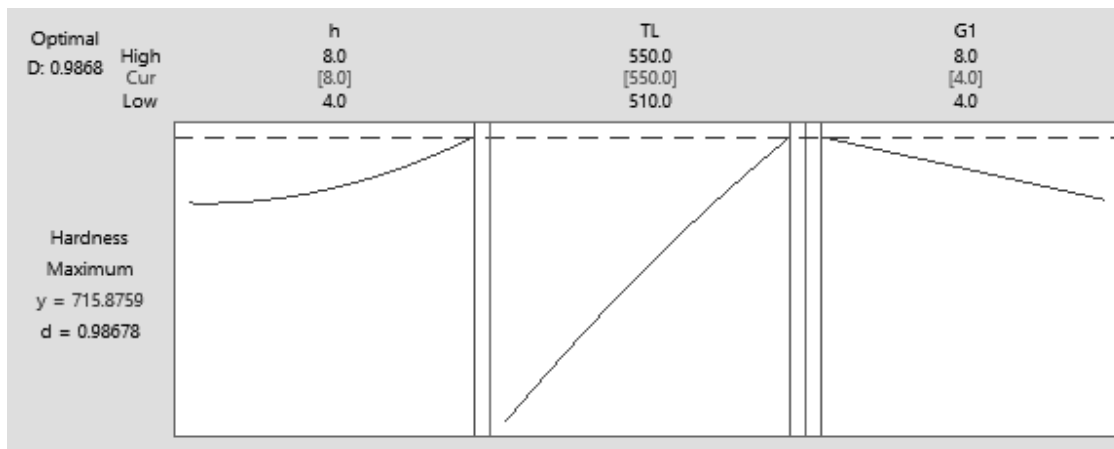
mật độ, độ bám dính, cường độ kết dính, v.v. [13]. Dựa trên dữ liệu thí nghiệm, các điều kiện biên sau đây đã được chọn theo (2):

$$\begin{cases} 120 \leq I \leq 220 \\ 140 \leq U \leq 250 \\ 0.46 \leq G \leq 3.17 \end{cases} \quad (3)$$

Kết quả tối ưu hóa sơ bộ bằng phần mềm Minitab, thể hiện trong Bảng 9 và Hình 7:

Bảng 9. Tối ưu hóa kết quả

Solution	I	U	G	V Fit
1	220	250	3.17	131.297



Hình 7 Kết quả tối ưu hóa sơ bộ vận tốc hạt

Khoanh vùng sơ bộ đầu tiên của tối ưu trong khu vực quy hoạch:

$$\begin{cases} I = 220 \\ U = 250 \\ G = 3.17 \end{cases}$$

4. Phân tích và thảo luận

Theo phương trình hồi quy, tốc độ dòng chảy có ảnh hưởng lớn nhất đến vận tốc hạt (1). Dòng plasma và điện áp chịu trách nhiệm cho mức độ tác động thứ hai. Tốc độ dòng khí cũng có ảnh hưởng phức tạp đến vận tốc hạt. Sự gia tăng dòng điện plasma tạo ra sự gia tăng số lượng electron, làm tăng ion hóa và tạo ra nhiều nhiệt hơn. Nhiệt độ tăng tạo điều kiện cho sự giãn nở khí và tăng vận tốc của dòng plasma, có chứa các hạt. Do vận tốc dòng plasma cao, hạt sẽ chịu lực kéo mạnh, khiến nó tăng tốc. Tuy nhiên, điều quan trọng cần nhớ là vận tốc hạt nhỏ hơn vận tốc tia plasma [14]. Khi tốc độ dòng khí tăng, độ nén cơ học, mật độ năng lượng và độ dẫn nhiệt của dòng plasma đều tăng, khiến vận tốc của dòng plasma tăng tốc

nhơn. Theo thuyết tương tác động lực, sự gia tăng biên độ tốc độ dòng khí dẫn đến sự gia tăng tổng động lượng của dòng plasma, giúp tăng cường vận tốc hạt. Bởi vì mô hình toán học không chứa một số yếu tố, đáng chú ý nhất là phân bố kích thước, kích thước và mật độ của vật liệu hạt, cũng như phân bố kích thước phân đoạn, vẫn còn gây tranh cãi [15]. Tuy nhiên, không có nhà sản xuất bột nào cung cấp một tiêu chuẩn phân phối kích thước kỹ lưỡng. Chi phí sản xuất và phân phối kích thước được kết nối chặt chẽ. Trong tương lai, rất nhiều nghiên cứu liên quan đến việc phun plasma các vật liệu bột khác nhau sẽ có lợi để có được thông tin về các đặc tính cơ học và vật lý của chúng để cải thiện kỹ thuật ước tính vận tốc hạt về mặt tối ưu hóa. Để giữ cho mọi thứ đơn giản, tất cả các mô hình toán học đều giả định rằng các hạt có hình cầu. Tuy nhiên, hình thái đa dạng của các hạt phun có thể được tạo ra. Vấn đề này cũng làm tăng thêm một số sai lầm trong tính toán vận tốc lý thuyết. Công thức thực nghiệm có thể được sử dụng như là câu

trả lời hợp lý trong bối cảnh để thu hẹp khoảng cách giữa dự đoán lý thuyết và thí nghiệm.

5. Kết luận

Tác động của các yếu tố thiết yếu khác nhau, chẳng hạn như năng lượng tia plasma, tốc độ dòng khí và kích thước trung bình của hạt, đến vận tốc hạt trong phun plasma khí quyển sử dụng không khí thông thường như khí sản xuất plasma được nhìn thấy trong trường hợp lắng đọng bột vô định hình X-5. Sự gia tăng năng lượng plasma và tốc độ dòng khí hỗ trợ tăng vận tốc hạt trong chuyển bay. Vận tốc tới hạn là điều kiện thiết yếu để lắng đọng và giá trị của nó quyết định hiệu quả của quá trình. Mô hình toán học sử dụng phương pháp lập kế hoạch và thiết kế thí nghiệm đa tiêu chí thích nghi tốt với dữ liệu thí nghiệm và có thể được khuyến nghị để tìm ra vận tốc hạt tối ưu khi một số tham số liên quan khác sẽ tham gia và một thí nghiệm lập kế hoạch hoàn chỉnh hơn có thể được thiết kế trong một nghiên cứu trong tương lai. Thật hữu ích khi thực hiện một số chỉnh sửa đối với các tính toán lý thuyết về vận tốc hạt, có tính đến hình thái của các hạt và sự phân bố kích thước của chúng trong nghiên cứu trong tương lai. Kết quả là phù hợp với các giả định được công bố trong [9]. Để lấp đầy khoảng cách giữa dự đoán lý thuyết và thí nghiệm, chúng tôi đặc biệt khuyến nghị rằng công thức thực nghiệm là giải pháp chủ yếu vì phun plasma là một quá trình rất phức tạp và rất khó để thiết kế một mô hình toán học thành công để dự đoán vận tốc hạt cho đến nay.

Tài liệu tham khảo

- [1] F.R Cliari, F.S Miranda, D.A.P Reis, G.P Filho, L.I Charakhovski & A.Essiptchouk. Plasma torch for supersonic plasma spray at atmospheric pressure. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotect.2016.06.027>.
- [2] Pei Wei, Zhengying Wei, Guangxi Zhao, Y.Bai, & Chao Tan. Effect of Processing Parameters on Plasma Jet and In-Flight Particles Characters in Supersonic Plasma Spraying. *High Temperature Materials and Processes*, 35(8), 775-786,2016. DOI :10.1515/htmp-2015-0077.
- [3] Joachim Mess, Manuel Anasenzl, Ralf Ossenbrink, & Vesselin Michailov. Influence of Particle Velocities on Adhesion Strength of Cold Spray Inner Diameter Coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*, 31,2025-2038,2022. <https://doi.org/10.1007/s11666-022-01439-4>.
- [4] Paul Profizi. Development of a Numerical Model of Single Particle Impact with Adhesion for Simulation of the Cold Spray Process. These de Doctorate de L'universite de Lyon, N0 d'ordre NNT: 2016LYSE1088. <http://theses.insa-lyon.fr/bublication/2016LYSE1088/these.pdf>.
- [5] Ravi Kolakaluri, Shanka Subramaniam, & Mahesh V.Panchagnula. Trends in multiphase modeling and simulation of sprays. *International journal of spray and combustion dynamics*, 6(4),317-356,2014.
- [6] Victor K. Champagne, Surya P.G. Dinavahi, & Phillip F.Leyman. Prediction of Particle Velocity for the Cold Spray Process. *Army Research Laboratory, ARL-TR-5683*,2011.
- [7] V.I Bogdanovich & M.G Giorbeldze. Mathematical modelling of powder material motion and transportation in high-temperature flow core during plasma coatings applications. *IOP Conference series: Material Science and Engineering* 327,(2018),022036. doi : 10.1088/1757-899X/327/2/022036.
- [8] Tatyana A.Brusetseva, Vladislav S.Shikalov, Sergei A.Lavruk, & Vasily M.Fomin. Simulation of Thermoplastic Powder Cold Spraying. *Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics*, 14(6),726-734,2021. DOI :10.17516/1997-1397-2021-14-6-726-734.
- [9] Bartosz Fikus, Cezary Senderovski, & Andrzej J.Panas. Modeling of Dynamics and Thermal Hystory of Fe40Al Intermetallic Powder Particle Under Gas Detonation Spraying Using Propane- Air Mixture. *Journal of Thermal Spray Technology*,28,346-358,2019. <https://doi.org/10.1007/s11666-019-00836-6>.
- [10] Uros Hudomalj, Ehsan Fallahi Sichani, Lukas Weiss, Majid Nabavi, & Konrad Wegener. Importance of Measurement and Evaluation Procedure of Particle State in Atmospheric Plasma Spraying. *Journal of Thermal Spray Technology*, online Nov 2022. <https://doi.org/10.1007/s11666-022-01495-w>.
- [11] Duong Vu & Quy Le Thu. The Correlation Between Main Parameters in the Air-Plasma Spraying of Fe-based Amorphous Coatings. *The Proceedings of the International Conference on Advanced Mechanical Engineering, Automation and Sustainable Development (AMAS 2021)*, November 04-07,2021, Ha Long city, Vietnam, Lecture Notes in Mechanical Engineering, Springer Publisher, 499-506,2022. DOI: 10.1007/978-3-030-99666-6_72.

- [12] N.A Buchman, C.Cierpka, C.J Kahler. Ultra high speed 3D astigmatic particle tracking velocimetry. Doi 10.1007/s00348-014-1842-1.
- [13] Jiju Antony. Design of Experiments for Engineers and Scientists. Second Edition, Elsevier Publisher, MA 02451, USA, 2014.
- [14] Airingas Suopys., Viktorija Grigaitiene., Liutauras Marcinauskas., Romualdas Kezelis., Rolandas Uscila & Mindaugas Aikas ,” Influence of Plasma Torch Power on the Plasma Jet Properties and Microstructure of Alumina Coatings ,” Coatings,12,934,2022.
<https://doi.org/10.3390/coatings12070934>.
- [15] Yimin Deng., Raf Dewil ., Lise Appel., Huili Zhang ., Shou Li, & Jan Baeyens,” The Need to Accurately Define and Measure the Properties of Particles,” Standard,1,19-38,2021.
<https://doi.org/10.3390/standards1010004>.