

Nghiên cứu vận tốc các hạt phun plasma

Study of the velocity of plasma-sprayed particles

Nguyễn Thái Vân^a, Vũ Dương^{b*}
Nguyen Thai Van^a, Vu Duong^{b*}

^aPhòng Khoa học Công nghệ và Hợp tác quốc tế, Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Vĩnh Long, Thành phố Vĩnh Long, 850000, Việt nam

^aDepartment of Science and Technology, Vinh Long University of Technology and Education, Vinh Long City, 850000, Viet Nam

^bTrường Công nghệ và Kỹ thuật, Đại học Duy Tân, Đà Nẵng, Việt Nam

^bSchool of Engineering and Technology, Duy Tan University, Da Nang, 550000, Viet Nam

(Ngày nhận bài: 25/04/2025, ngày phản biện xong: 26/05/2025, ngày chấp nhận đăng: 05/07/2025)

Tóm tắt

Nghiên cứu tập trung vào ảnh hưởng của các yếu tố phun plasma như dòng điện plasma, điện áp plasma và tốc độ dòng không khí đối với vận tốc hạt, vì hiệu quả của lớp phủ phụ thuộc nhiều vào nó. Việc dùng không khí thông thường làm khí tạo ra plasma và giải thích mô hình toán học biến minh cho sự thay đổi vận tốc hạt là những khía cạnh sáng tạo của công trình này. Hàm hồi quy mới được phát hiện giúp mô hình toán học tối ưu hóa quy trình để đạt được vận tốc hạt lớn nhất. Nghiên cứu tính hợp lệ của tham số đã xác nhận sự thích ứng so sánh tốt giữa mô hình toán học và kết quả thí nghiệm. Thiết kế quy hoạch đa tiêu chí giúp kết luận ý nghĩa của tất cả các thông số và được áp dụng tốt cho thí nghiệm. Kết quả của nghiên cứu giúp tìm ra cách nâng cao động học của các hạt trong quá trình va chạm trên chất nền.

Từ khóa: Phun plasma trong khí quyển; mô hình toán học; không khí thường; vận tốc hạt; khí tạo plasma; phương trình hồi quy.

Abstract

The work focuses on the effects of plasma spraying factors such as plasma current, plasma voltage, and air flow rate on particle velocity because the effectiveness of the coating is heavily dependent on it. The use of ordinary air as the plasma-generating gas and the explanation of the mathematical model justifying the alteration of particle velocity are the innovative aspects of this work. The newly discovered regression function helps the mathematical model optimize the procedure to achieve the greatest particle velocity. The parameter validity study confirms the good comparative adaptation between the mathematical model and the experimental results. The multi-criteria planning design helps to conclude the significance of all parameters and is well adopted for the experiment. The results of the study help to find the way for elevation of the kinetics of particles during the collision on the substrate.

Keywords: Atmospheric plasma spray; mathematical model; ordinary air; particle velocity; plasma generation gas; regression equation.

*Tác giả liên hệ: Vũ Dương
Email: duongvuastralia@gmail.com

1. Đặt vấn đề

Hiệu quả và năng suất của phun plasma trong khí quyển phụ thuộc nhiều vào vận tốc của hạt bột trước khi kết thúc với chất nền. Tình trạng của hạt đang bay là rất quan trọng; do đó, B. Guduri và cộng sự đã có nghiên cứu chuyên sâu để tạo ra thiết bị phun hoạt động ổn định [1]. Trong thí nghiệm, bột để phun có kích thước hạt từ 30–100 μm , nhưng không có thành phần cơ học hoặc phân bố kích thước nào được đưa ra, mặc dù thực tế là kích thước hạt rất quan trọng trong hoạt động phức tạp này. Phân tích ANOVA cho thấy dòng điện và tốc độ dòng chảy của khí tạo plasma có ảnh hưởng đáng kể đến vận tốc hạt. Vận tốc của hạt được ưu tiên hơn nhiệt độ trong quy trình phun lạnh. Tuy nhiên, khoảng cách phun và tốc độ nạp bột có tác động đáng kể đến vận tốc hạt [2]. Các nhà nghiên cứu đã xác định được vận tốc ngưỡng của hạt, vượt quá vận tốc đó nó có thể liên kết với bề mặt nền và tạo thành lớp phủ [3]. Trong mọi trường hợp, chúng không thể hiện mối quan hệ định lượng giữa vận tốc hạt và một số đặc tính kỹ thuật chính. Vì vận tốc tới hạn của hạt khi phun được cho là một yếu tố quan trọng trong liên kết, các nhà nghiên cứu trong [4] đã nghiên cứu hành vi của hạt trong quá trình phun động học dùng vật liệu AlSi bằng phương pháp Kurochkin et al. [5] được nâng cấp để xác lập vận tốc tới hạn đạt tới 400 m/s. Điều đáng chú ý là hạt có vận tốc cực đại lớn hơn vận tốc tới hạn sẽ không bị dính vào lớp nền vì năng lượng bám dính nhỏ hơn năng lượng phục hồi. Trong [6] người ta đã thực hiện nhiều lớp phun plasma siêu thanh dùng bột gốm (YZS) trên siêu hợp kim gốc niken GH 3030. Họ trình bày một tập hợp dữ liệu, bao gồm dòng điện, điện áp, argon, hydro, tốc độ nạp nguyên liệu, khoảng cách phun và vận tốc, nhưng thiếu

mối quan hệ hồi quy giữa chúng. Trong [7], một nỗ lực đã được thực hiện để đưa ra một mô hình toán học mới bao gồm vận tốc hạt và khí, khối lượng hạt, mật độ khí, đường kính hạt và hệ số kéo. Họ so sánh phép đo thực nghiệm sử dụng máy đo vận tốc khe hẹp với tính toán đối xứng trục 2 chiều của dòng chảy. Sự phân bố kích thước hạt đã tạo ra sự khác biệt trong tính toán lý thuyết về vận tốc hạt. Hạn chế chính của [8] là mô hình dựa trên định luật thứ hai của Newton không tính đến các thông số công nghệ trong lắng đọng phun, chẳng hạn như công suất dòng và tốc độ dòng khí, hữu ích hơn trong thiết kế quy trình. Kết quả đáng kể thu được trong [9] bằng cách sử dụng phân tích hồi quy (RA) và phương pháp luận bề mặt đáp ứng (RSM) để đánh giá tầm quan trọng của bốn tham số: tốc độ dòng chảy Ar và H₂; tốc độ cấp liệu hiện tại và bột trong quá trình phun plasma trong khí quyển. Tuy nhiên, công suất của dòng plasma cũng phụ thuộc vào điện áp và không khí thông thường để tạo plasma có thể có một tương tác khác. Trái ngược với các công bố gần đây, công trình này tập trung vào việc phát triển một mô hình toán học để dự đoán lý thuyết về vận tốc hạt trong phun plasma bằng cách sử dụng không khí thông thường làm khí tạo ra plasma, bao gồm các yếu tố chính như dòng điện, điện áp mở hàn plasma.

2. 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 nitơ đóng vai trò là khí mang. [10] có trình bày thành phần hóa học và quy trình sản xuất bột Ni85Al15. Kích thước hạt của bột được xác định bằng thiết bị Cilas-1090 [11].

Bảng 1. Phân bố cỡ hạt vật liệu

Vật liệu	Kích thước trung bình μm	Dải phân bố theo cỡ hạt, %							
		0 -1	1-1.5	1.5-2.0	12-16	32-48	48-64	64- 96	96 -128
Ni85Al15	64	7.5	8.9	4.1	-	-	72	4.2	3.2

Bảng 1 cho thấy sự phân bố cỡ hạt bột. Trong trường hợp này, bột Ni85AL15 là một loại vật liệu tốt cho lớp phủ nhiệt độ cao. Siêu hợp kim này có khả năng chống oxy hóa cao trong phạm vi nhiệt độ lên đến 1250°C trong khí quyển. Đặc biệt γ pha liên kim loại Ni3Al có nhiệt độ nóng chảy khoảng 1400°C , ổn định nhiệt đến nóng chảy, điểm năng suất tăng trong phạm vi nhiệt độ $800-900^{\circ}\text{C}$. Vật liệu này có thể là một khuyến nghị tốt như lớp phủ bảo vệ cho các bộ phận hoạt động trong điều kiện nặng như vòi phun phản lực, buồng đốt trong kỹ thuật hàng không vũ trụ [12]. Lợi ích đáng kể của việc phun lớp phủ bảo vệ trên động cơ hàng không có sẵn thông qua việc giảm sự xuống cấp 25% và 50 %, nếu so sánh với phương án không phun phủ [13]. Điều thú vị là hiệu quả của phun plasma trong khí quyển so với phương pháp bốc bay chân không trong việc sửa chữa động cơ máy bay chiến đấu MIG-29, do sự đơn giản của thiết bị và giảm đáng kể chi phí sản xuất [14]. Kính hiển vi điện tử quét kết hợp với quang phổ phân tán năng lượng (SEM / EDS, SM-6510LV, Nhật Bản) được sử dụng để kiểm tra hình thái bề mặt của lớp phủ và địa hình của các hạt kim loại.

Camera tốc độ cao Shimadzu HPV được sử dụng để theo dõi vận tốc phun các hạt [15]. Máy ảnh có thể được sử dụng kết hợp với phần mềm phân tích hình ảnh có sẵn. Do đó, hình ảnh vận tốc cao có thể được phân tích số bằng cách lưu hình ảnh đã ghi ở định dạng chung với cách tải chúng vào phần mềm xử lý hình ảnh có sẵn trên thị trường. Hình ảnh đã ghi có thể được lưu ở một số định dạng phổ biến như AVI, BMP, JPEG và TIFF. Máy ảnh đang hoạt động ở hai chế độ: chế độ nửa điểm ảnh (HP) và chế độ điểm ảnh đầy đủ (FP).

Khí tạo plasma là không khí thông thường. Khí mang cũng là không khí thông thường. Không khí thông thường là một loại khí phân tử phải được phân ly trước khi nó có thể bị ion hóa. Điều này có nghĩa là không khí thông thường có entanpy và dẫn nhiệt lớn hơn plasma argon. Do đó, các khí phân tử tiêu thụ năng lượng đầu vào cao hơn nhiều để trở nên ion hóa một phần. Bởi vì nó được tạo thành từ các ion kích thích và các electron không liên kết, plasma có thể mang điện. Trong phun plasma, các khí do plasma tạo ra thường bao gồm một hoặc nhiều chất sau: argon, hydro, nitơ và heli. Argon thường được sử dụng làm khí plasma chính vì nó dễ tạo ra plasma nhất và ít ăn mòn hơn đối với điện cực và nguyên liệu. Khí thứ cấp bao gồm nitơ, hydro và heli. Các khí hiếm là argon và heli. Mặc dù tiết kiệm chi phí và lợi thế trong một số ứng dụng chuyên dụng của lớp phủ phun nhiệt, nhưng vẫn chưa có gì được công bố về việc sử dụng không khí thông thường làm khí plasma chính. Tuy nhiên, nhờ cải tiến kết cấu đầu phun và chế độ công nghệ phun phù hợp, không khí thông thường có thể được dùng để phun phủ chống mài mòn từ vật liệu gốm, đặc biệt là hợp kim vô định hình dựa trên Fe [16, 17]. Plasma argon có một số ưu điểm, nhưng nó có độ dẫn nhiệt và entanpy thấp hơn so với khí nhị phân. Bởi vì khí phân tử phải bị phân hủy trước khi ion hóa, entanpy và độ dẫn nhiệt của plasma không khí thông thường lớn hơn đáng kể so với plasma argon. Kết quả là, chúng cần nhiều năng lượng hơn đáng kể để bị ion hóa một phần. Nhưng đầu vào năng lượng càng lớn thì entanpy càng lớn và độ dẫn nhiệt càng lớn. Lý do này gợi mở về việc thay thế khí trơ và khí hiếm cho phun plasma bằng không khí thông thường.

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Phương trình hồi quy và phân tích biến số

Bảng 2 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 2. Kết quả phun plasma bột 85Ni15Al

TT	Dòng plasma, I [A]	Điện áp, U [V]	Lưu lượng khí, G [g/s]	Vận tốc hạt, V [m/s]
1	130	140	0.55	18
2	130	160	0.75	40
3	130	195	0.34	62
4	130	200	1.13	73
5	130	210	1.42	84
6	130	220	1.76	97
7	130	225	1.95	105
8	130	240	2.72	140
9	130	250	2.92	152
10	150	150	0.55	36
11	150	185	0.84	67
12	150	205	1.13	78
13	150	207	1.42	85
14	150	220	1.76	99
15	150	240	2.41	128
16	150	245	2.92	153
17	150	250	3.17	167
18	180	145	0.55	33
19	180	160	0.75	49
20	180	180	0.84	65
21	180	202	1.13	82
22	180	220	1.76	104
23	180	240	2.60	140
24	180	250	3.17	170
25	220	150	0.55	43
26	220	160	0.75	53
27	220	190	0.94	76
28	220	200	1.13	84
29	220	220	1.76	106
30	220	245	2.60	143
31	220	260	3.17	172

Các kết quả thí nghiệm đã được xử lý (Bảng 3) bằng phần mềm Minitab và đã được phân tích sơ bộ.

Bảng 3. Phân tích kết quả thực nghiệm lần 1

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value
Constant	92.87	1.01	91.55	0.000
I	4.785	0.328	14.61	0.000
U	39.02	3.43	11.38	0.000
G	32.46	3.40	9.55	0.000
I ²	-1.547	0.383	-4.04	0.001
U ²	-30.33	4.19	-7.24	0.000
G ²	9.56	3.02	3.17	0.005
IU	-1.09	1.09	-1.00	0.329
IG	-0.75	1.12	-0.67	0.508
UG	27.81	7.81	3.56	0.002

Người ta phát hiện ra rằng một số hệ số có giá trị p lớn hơn độ chính xác của $\alpha = 0,05$, đặc biệt là tương tác hai chiều giữa I và U và I và G, đã bị loại bỏ, và các kết quả thí nghiệm đã được phân tích lại (Bảng 4).

Bảng 4. Phân tích kết quả thực nghiệm lần 2

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	94.51	1.20	78.75	0.000	
I	4.856	0.317	15.31	0.000	1.27
U	35.01	4.32	8.10	0.000	144.33
G	36.59	4.27	8.57	0.000	168.78
I ²	-1.334	0.521	-2.56	0.017	1.10
U ²	-33.03	5.70	-5.79	0.000	73.59
G ²	10.65	4.15	2.57	0.017	40.48
UG	26.6	10.8	2.47	0.021	285.38

Phân tích phương sai bằng phương pháp ANOVA được trình bày trong Bảng 5. Sau đó, phương trình hồi quy theo các đơn vị không được mã hóa được giới thiệu trong phương trình (1).

Bảng 5. Phân tích ANOVA

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	7	58310.8	8330.1	6000.79	0.000
Linear	3	55023.1	18341.0	13212.39	0.000
I	1	325.6	325.6	234.52	0.000
U	1	91.2	91.2	65.69	0.000
G	1	101.9	101.9	73.41	0.000
Square	3	394.0	131.3	94.61	0.000
I ²	1	9.1	9.1	6.57	0.017
U ²	1	46.6	46.6	33.58	0.000
G ²	1	9.1	9.1	6.59	0.017
2-Way Interaction	1	8.5	8.5	6.12	0.021
UG	1	8.5	8.5	6.12	0.021
Error	23	31.9	1.4		
Total	30	58342.8			

Phương trình hồi quy theo đơn vị chưa mã hóa:

$$V = - 347.2 + 0.3385 I + 3.703U- 55.5G- 0.000659I^2 - 0.00918U^2+ 5.32G^2 +0.314UG \text{ (1)}$$

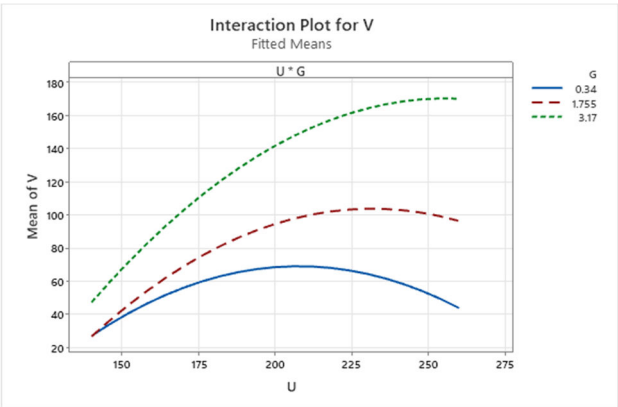
Phân tích các hệ số để đánh giá tính nhất quán của phương trình hồi quy (1) được trình bày trong Bảng 6:

Bảng 6. Phân tích độ đồng quy

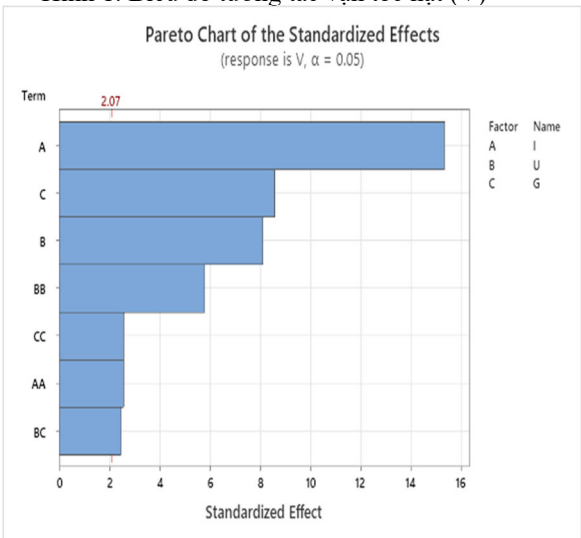
S	R ²	R ² (adj)	R ² (pred)
1.17821	99.95%	99.93%	99.82%

Sự phù hợp của dữ liệu được đánh giá bằng cách sử dụng một tập hợp các thông số R2, R2 được điều chỉnh và R2 dự đoán. Các giá trị này đều lớn hơn 90%, cho thấy phương trình hồi quy hoàn toàn tương thích với dữ liệu thực nghiệm. Biểu đồ tương tác (Hình 1) và biểu đồ Pareto

(Hình 2) cho thấy dòng điện plasma (I), điện áp plasma (U), tốc độ dòng không khí (G), bao gồm G2 và U * G là những yếu tố có ảnh hưởng lớn nhất đến vận tốc (G). Các yếu tố khác, chẳng hạn như I2, U2 có thể được bỏ qua.

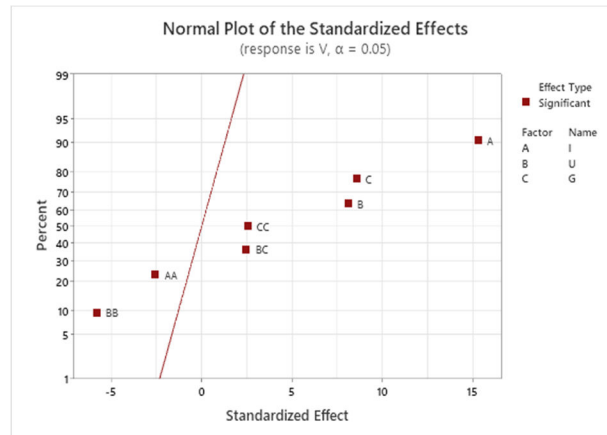


Hình 1. Biểu đồ tương tác vận tốc hạt (V)



Hình 2. Biểu đồ Pareto [18] cho các thông số đầu vào

Xu hướng này cũng được chứng minh bằng biểu đồ bình thường (Hình 3). Kết quả là, các thông số kỹ thuật I, U và G có màu đỏ. Sự khác biệt lớn với đường màu đỏ cho thấy các yếu tố này có ảnh hưởng đáng kể đến phương trình hồi quy.



Hình 3. Biểu đồ phân bố chuẩn của các thông số hiệu ứng chuẩn hóa

3.2. Tối ưu hóa sơ bộ vận tốc hạt

Sẽ rất hữu ích để phân tích các điều kiện để định vị khu vực tối ưu cho vận tốc hạt, vì nó cung cấp chất lượng lớp phủ tốt, chẳng hạn như mật độ, độ bám dính, độ bền kết dính, v.v. Dựa trên dữ liệu thí nghiệm, các điều kiện biên sau đã được lựa chọn theo phương trình (2):

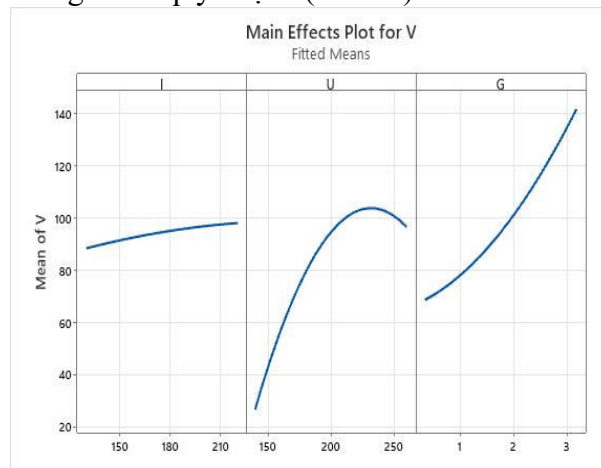
$$\begin{cases} 130 \leq I \leq 220 \\ 140 \leq U \leq 260 \\ 0.34 \leq G \leq 3.17 \end{cases} \quad (2)$$

Kết quả của việc tối ưu hóa sơ bộ bằng phần mềm Minitab, được hiển thị trong Bảng 7 và Hình 4.

Bảng 7. Kết quả tối ưu

Solution	I	U	G	V Fit
1	220	256.364	3.17	174.014

Định vị sơ bộ vùng tối ưu trong miền quy hoạch (Hình 4).



Hình 4. Biểu đồ hiệu ứng chính cho V

Điện áp và dòng điện của plasma có tác động khác nhau đến vận tốc hạt, như được thể hiện bằng phương trình hồi quy (1). Tốc độ dòng không khí cũng có tác động thuận lợi đến vận tốc hạt. Sự gia tăng dòng điện trong plasma làm tăng số lượng electron, làm tăng lượng ion hóa và tạo

ra nhiều nhiệt hơn. Sự giãn nở của khí được thực hiện dễ dàng hơn và vận tốc của tia plasma, bao gồm các hạt, được hỗ trợ bởi nhiệt độ lớn hơn. Hạt sẽ chịu lực cản đáng kể do vận tốc phản lực plasma cao, điều này sẽ khiến nó tăng tốc. Tuy nhiên, điều quan trọng cần lưu ý là vận tốc hạt

thấp hơn vận tốc phản lực plasma. Ví dụ, trong khi phun bột alumina plasma, vận tốc bay của hạt tăng 70 m/s trong khi vận tốc tia plasma tăng 95 m/s [19]. Nén cơ học, mật độ năng lượng và độ dẫn nhiệt của tia plasma đều tăng lên khi tốc độ dòng khí tăng lên, khuyến khích vận tốc của tia plasma tăng tốc nhanh hơn. Theo hiện tượng động, sự gia tăng tốc độ dòng khí góp phần làm tăng động lượng tổng thể của dòng plasma, làm tăng vận tốc hạt.

Vì mô hình toán học không bao gồm nhiều biến, đáng chú ý là phân bố kích thước [20], vấn đề về kích thước và mật độ của vật liệu hạt cũng như phân bố kích thước phân đoạn vẫn còn được tranh luận. Tuy nhiên, trên thực tế, không có nhà sản xuất bột nào đưa ra thông số kỹ thuật chi tiết về phân bố kích thước. Phân phối kích thước và chi phí sản xuất có mối liên hệ chặt chẽ với nhau. Trong tương lai, sẽ có lợi khi tiến hành một số thí nghiệm liên quan đến việc phun plasma các vật liệu bột khác nhau để liên quan đến thông tin về các tính chất cơ học và vật lý của chúng nhằm nâng cao cách tiếp cận dự đoán vận tốc hạt về mặt tối ưu hóa. Để đơn giản, tất cả các mô hình toán học đều giả định rằng các hạt có hình cầu. Nhưng trong quá trình sản xuất các hạt phun, chúng có thể có hình thái khác nhau. Vấn đề này cũng góp phần gây ra một số sai sót trong tính toán lý thuyết về vận tốc. Để bù đắp khoảng cách giữa dự đoán lý thuyết và thí nghiệm, công thức thực nghiệm có thể được sử dụng làm giải pháp chủ yếu trong bối cảnh.

4. Kết luận

Ảnh hưởng của một số thông số chính, như công suất tia plasma, tốc độ dòng khí và kích thước trung bình của hạt, đối với vận tốc hạt được quan sát thấy trong phun plasma trong khí quyển sử dụng không khí thông thường làm khí tạo plasma. Sự gia tăng công suất plasma và tốc độ dòng chảy của khí giúp tăng vận tốc bay của các hạt. Điều kiện cần thiết cho quá trình lắng đọng là vận tốc tới hạn, và giá trị này sẽ quyết

định hiệu quả của quá trình. Mô hình toán học sử dụng phương pháp lập kế hoạch đa tiêu chí và thiết kế thí nghiệm phù hợp với dữ liệu thí nghiệm và có thể được đề xuất để tìm ra vận tốc hạt tối ưu khi một số thông số liên quan khác sẽ được liên quan và một thí nghiệm lập kế hoạch hoàn chỉnh hơn có thể được thiết kế trong một nghiên cứu trong tương lai.

Tài liệu tham khảo

- [1] B. Guduri., M. Cybulsky., G. R. Pikrell. & R.C. Batra. (2021). "Adaptive process control for achieving consistent particle's state in atmospheric plasma spray process". *SN Applied Science, Springer Nature journal*, 3.294, DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04296-y>.
- [2] Rong Gen Neo., Kaiqiang Wu., Sung Chyn Tan & Wei Zhou. (2022). "Effect of Spray Distance and Powder Feed Rate on Particle Velocity in Cold Spray Processes". *Metals*, 12,75. DOI : <https://doi.org/10.3390/met12010075>.
- [3] Francois Raletz., Michel Vardelle, & Guillaume Ezo'o. (2006). "Critical particle velocity under cold spray conditions". *Surface & Coating Technology*, 201(5), 1942-194. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2006.04.061.
- [4] Jingwei Wu., Hongyuan Fang., Sanghoon Yoon., Changhee Lee, & HyungJun Kim. (2006). "Critical Velocities for High-Speed Particle Deposition in Kinetic Spraying". *Materials Transactions*, 47(7), 1723-1727, DOI: 10.2320/matertrans.47.1723.
- [5] Y.V Kurochkin., Y.N Demin & S.I Soldatenkov. (2002). "Demonstration of the Method of Cold Gasdynamic Spraying of Coatings". *Chemical and Petroleum Engineering*, 38(3-4), 245- 248. DOI: <https://link.springer.com/journal/10556/volumes-and-issues/38-3>.
- [6] Pei Wei., Zhengying Wei., Guanxi Zhao., Y Bai & Chao Tan. (2016). "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. DOI: 10.1515/htmp-2015-0077.
- [7] Viktor K. Champagn., Dennis J. Helfrich., Syrya P.G. Dinavahi, & Phillip F. Leyman. (2010). "Theoretical and Experimental Particle Velocity in Cold Spray". *Journal of Thermal Spray Technology*, 1059-9630/\$1900 © ASM International. DOI: 10.1007/s11666-010-9530-z.
- [8] K. Bobzin., M. Oter., M.A. Knoch., I. Alkashli., U. Reisgen., O. Mokrov, & O. Lysnyi. (2017). "Simulation of the Particle Melting Degree in Air Plasma Spraying". *14th High-Tech Plasma*

Processes Conference, IOP Conf.Series: Journal of Physics: Conf Series, 825, 012002.

- [9] R.C. Batra & Unchalisa Taetragool. (2020). "Numerical techniques to find optimal input parameters for achieving mean particles' temperature and axial velocity in atmospheric plasma spray process". *Scientific Reports, Nature Research*, 10(1):21483. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-78424-w>.
- [10] D. Kotoban., S. Grigoriev. & I. Shishkovsky. (2014). "Study of 3D laser cladding for Ni85Al15 superalloy". *8th International Conference on Photonic Technologies LANE 2014, Physics Procedia* 56, 262-268. DOI: 10.1016/j.phpro.2014.08.170.
- [11] Duong Vu & Quy Le Thu. (2022). "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)*, Ha Long city, Vietnam, Lecture Notes in Mechanical Engineering, Springer Publisher, 499-506. DOI: 10.1007/978-3-030-99666-6_72.
- [12] Lezsek Ulanowicz., Andrzej Dudzinski., Pawel Szczepaniak. & Mirosław Nowakowski. (2020). "Applying Protective Coating on the Turbine Engine Turbine Blades by means of Plasma Spraying". *Journal of KONBiN*, 50(1), 193-213. DOI: 10.2478/jok-2020-0012.
- [13] Jasem Alqallaf & Joao A.Teixeira. (2022). "Quantifying the Economic Benefits of Using Erosion Protective Coatings in Low-Pressure Compressor (Aero-Engine): A Case Study Evaluation". *Processes*, 10 (2),385. DOI: <https://10.3390/pr10020385>.
- [14] Andrzej Szczepankowski., Radosław Przysowa., Jerzy Perczynski. & Artur Kulaszka .(2022). "Health and Durability of Protective and Thermal Barrier Coatings Monitored in Service by Visual Inspection". *Coatings*, 12,624.DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings12050624>.
- [15] N.A Buchman, C.Cierpka, C.J Kahler .(2014). "Ultra high speed 3D astigmatic particle tracking velocimetry: application to particle-laden supersonic impinging jets". *Experiments in fluids*, 55:1842, DOI: Doi 10.1007/s00348-014-1842-1.
- [16] Viktor Kuzmin, Igor Gulaev, Dmitriy Sergachev, Sergey Vashchenko, Anatoliy Lusakov & Boris Palagushkin .(2021). "Supersonic air-plasma spraying of carbide ceramic coatings". *Materialstoday: Proceedings*, 38(4), 1974-1979. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.150>
- [17] Viktor Kuzmin, Igor Gulyaev, Dmitriy Sergachev, Sergey Vaschenko, Elena Kornienko & Alexander Tokarev. (2017). "Equipment and technologies of air-plasma spraying of functional coatings", *MATEC Web of conference*, 129, 01052.DOI: 10.1051/mateconf/201712901052.
- [18] Jiju Antony .(2014). *Design of Experiments for Engineers and Scientists*. Second Edition, New York, Elsevier Publisher, MA 02451, USA.
- [19] Airingas Suopys.,Viktorija Grigaitiene., Liutauras Marcinauskas., Romualdas Kezelis., Rolandas Uscila & Mindaugas Aikas. (2022). "Influence of Plasma Torch Power on the Plasma Jet Properties and Microstructure of Alumina Coatings. *Coatings*, 12,934, DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings12070934>.
- [20] Yimin Deng., Raf Dewil ., Lise Appel., Huili Zhang., Shou Li, & Jan Baeyens. (2021). "The Need to Accurately Define and Measure the Properties of Particles". *Standard*, 1,19-38, DOI: <https://doi.org/10.3390/standards1010004>.