

NGHIÊN CỨU TỐI ƯU HÓA ĐỘ BẮM DÍNH LỚP PHỦ WC-12Co TRÊN BỀ MẶT TRỤ TRONG BẰNG CÔNG NGHỆ PHUN PHỦ NHIỆT KHÍ TỐC ĐỘ CAO HVOF

OPTIMIZING THE ADHESION STRENGTH OF THE WC-12Co COATINGS ON THE INTERNAL SURFACE USING THE HIGH-VELOCITY OXYGEN-FUEL (HVOF) THERMAL SPRAY TECHNOLOGY

Nguyễn Tuấn Hải¹, Đinh Văn Chiến^{2,3}

¹Khoa Kỹ thuật, Trường Đại học Công nghệ Đồng Nai

²Trường Đại học Mỏ – Địa chất

³Trường Đại học Kinh tế – Công nghệ Thái Nguyên

TÓM TẮT

Mục đích của nghiên cứu này là tối ưu hóa độ bám dính của lớp phủ được tạo ra ở bề mặt trụ trong bằng công nghệ phun phủ HVOF. Vật liệu phủ là bột WC-12Co trên nền thép ống 20Cr. Các thông số chính của quá trình phun được nghiên cứu bao gồm lưu lượng phun, khoảng cách phun và vận tốc tương đối của súng phun. Các thí nghiệm được bố trí theo thiết kế Taguchi L9. Kết quả nghiên cứu cho thấy các tham số quá trình phun được lựa chọn trong thí nghiệm ảnh hưởng đáng kể đến độ bám dính của lớp phủ với bề mặt nền thép ống 20Cr. Theo phân tích Taguchi và ANOVA trong các thử nghiệm, các giá trị thông số phun tối ưu đạt được ở khoảng cách phun 0,25 m, lưu lượng bột 26 g/phút và vận tốc tương đối của súng phun là 0,15 m/s. Với các thông số này, giá trị độ bám dính tối ưu đạt được là 66,47 MPa. Kết quả nghiên cứu cũng cho thấy ảnh hưởng của các thông số quá trình phun đến độ bám dính, trong đó khoảng cách phun ảnh hưởng 38,4%, lưu lượng bột 34,7% và vận tốc tương đối súng phun 25,7%.

Từ khóa: Phun phủ nhiệt khí tốc độ cao; Độ bám dính; Thông số phun; Các-bít vonfram.

ABSTRACT

The purpose of this study is to determine the adhesion strength characteristics of the coating layer created inside cylindrical surfaces using HVOF technology. The coating material is tungsten carbide powder on a 20Cr steel substrate. The main parameters of the spraying process studied include spray flow rate, spray distance, and relative velocity of the spray gun. The experiments are arranged according to Taguchi L9 design. The research results show that the selected spraying process parameters in the experiment significantly affect the adhesion strength of the coating to the substrate. According to Taguchi and ANOVA analysis in the experiment, the optimal spray parameter values are achieved at a spray distance of 0.25 m, powder flow of 26 g/min, and relative velocity of the spray gun at 0.15 m/s. With these parameters, the optimal adhesion strength value obtained is 66.47 MPa. The analysis results also indicate the influence of the spraying process parameters on adhesion strength, with spray distance contributing at 38.4%, powder flow rate at 34.7%, and spray gun velocity at 25.7%.

Keywords: High-velocity oxygen-fuel; Adhesion; Process parameters; Carbide wolfram. 

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Công nghệ phun nhiệt nhiên liệu oxy tốc độ cao (HVOF) được phát minh vào những năm 1980 và là công nghệ phủ bề mặt có thể thay thế lớp phủ crom cứng do lớp phủ phun nhiệt HVOF có hiệu suất mài mòn và ăn mòn tốt hơn [1]. Tuy nhiên, các quy trình HVOF bị giới hạn bởi tính chất không gian làm việc của chúng, nghĩa là việc phun bề mặt ở những khu vực chật hẹp là một thách thức khi so sánh với các quy trình mạ crom cứng truyền thống. Việc tạo lớp phủ trên các bề mặt bên trong chi tiết có không gian chật hẹp với các hình dạng phức tạp sử dụng các hệ thống HVOF thương mại bị nhiều hạn chế do kích thước của súng phun và khoảng cách phun cần thiết để có nhiệt độ và vận tốc hạt tối ưu. Trong nghiên cứu này, phun phủ nhiệt bề mặt trong HVOF được nghiên cứu và phát triển với mục đích nâng cao chất lượng lớp phủ khi các thông số phun của hệ thống hoạt động ở mức năng lượng tối ưu nhưng đồng thời vẫn giữ được động năng cao cho phép phủ nhiều bề mặt bên trong một cách hiệu quả hơn.

Vật liệu cac-bít WC-12Co là lựa chọn hàng đầu trong các ứng dụng chống ăn mòn và mài mòn do sự kết hợp giữa độ cứng cao của cac-bít vonfram và tính linh hoạt của coban. WC-12Co thể hiện độ bền và độ cứng cao, tăng cường khả năng chống mài mòn, ăn mòn và va đập bề mặt. Điều này giúp cho chi tiết được phủ có khả năng chịu được áp lực và môi trường làm việc khắc nghiệt [2].

Lực liên kết giữa vật liệu nền và lớp phủ đặc trưng cho độ bám dính của lớp phủ. Việc kiểm tra độ bền này rất quan trọng để kiểm soát chất lượng của thiết bị phun và quy trình phun. Ưu điểm của HVOF so với các kỹ thuật phun nhiệt khác là vận tốc hạt cao hơn so với các công nghệ phun phủ khác như phun ngọn lửa và phun nhiệt hồ quang dây. Kết quả là lớp phủ cuối cùng thường có độ xốp thấp hơn. Hơn nữa,

do nhiệt độ nguồn nhiệt thấp hơn nên sự thay đổi pha của các hạt trong quá trình bay ít xảy ra hơn với phun nhiệt HVOF [3-4].

Dựa trên nghiên cứu đã công bố, việc tạo lớp phủ bề mặt trong phát sinh nhiều vấn đề về thiết bị cũng như chế độ vận hành so với quá trình phun tiêu chuẩn bề mặt ngoài và chưa có nhiều nghiên cứu đánh giá. Để tạo lớp phủ bề mặt trong chi tiết làm việc trong điều kiện khắc nghiệt thì vật liệu cacbít thường sử dụng. Trong nghiên cứu này sử dụng vật liệu WC-12Co để tạo lớp phủ bề mặt trong và đánh giá độ bám dính lớp phủ tối ưu thông qua chế độ phun. Nghiên cứu sử dụng kỹ thuật phân tích Taguchi-Anova để quy hoạch tối ưu hóa thực nghiệm.

2. NỘI DUNG NGHIÊN CỨU

2.1. Phương pháp nghiên cứu

Thiết kế thí nghiệm dựa trên phương pháp Taguchi được sử dụng trong nghiên cứu. Phương pháp Taguchi cho phép tạo ra tổ hợp các thí nghiệm theo sắp xếp mảng trực giao (OA) nhằm có được tổ hợp tối ưu mà tiết kiệm thời gian và chi phí thí nghiệm thay vì phải kiểm tra tất cả các tổ hợp có thể có của các tham số đầu vào. Một đặc điểm quan trọng khác của phương pháp Taguchi là tỷ số tín hiệu trên nhiễu (S/N) được sử dụng làm thước đo mức độ ảnh hưởng của các yếu tố nhiễu đến đặc tính chất lượng đầu ra. Trong nghiên cứu này, khoảng cách phun, lưu lượng phun và tốc độ tương đối súng phun được coi là các yếu tố ảnh hưởng. Số mức độ của mỗi yếu tố ảnh hưởng là ba mức độ. Vì vậy, thiết kế thí nghiệm L9 theo Taguchi được sử dụng để bố trí thí nghiệm (Bảng 2, Bảng 4). Độ bám dính của lớp phủ là đáp ứng đầu ra bị thay đổi bởi các yếu tố ảnh hưởng. “Cao hơn là tốt hơn” là đặc tính chất lượng của tỷ số S/N do Taguchi xác định theo phương trình (1):

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (1)$$

Trong phân tích phương sai (ANOVA), các công thức toán học chính được sử dụng cho nghiên cứu này là các phương trình (2), (3), (4), (5), (6). Giá trị trung bình của các tỷ số S/N đối với từng mức của từng yếu tố được xác định theo công thức (2). Công thức (3) biểu thị tổng bình phương độ lệch của các mức (SS). Tổng bình phương độ lệch giữa các mức (SS_i) được biểu thị bằng công thức (4). Để xác định tham số tối ưu, tỷ lệ phần trăm ảnh hưởng của từng yếu tố (%E) đến các tham số đã chọn sẽ được đánh giá và tính toán bằng phương trình (5). Giá trị độ bám dính tối ưu $\tau_{\max}$ do Taguchi dự đoán được xác định theo công thức (6) [5].

$$\overline{S/N} = \frac{1}{9} \sum_{k=1}^9 (S/N)_k \quad (2)$$

$$SS = \sum_{k=1}^9 ((S/N)_{ij} - \overline{(S/N)})^2 \quad (3)$$

$$SS_i = \sum_{j=1}^3 ((S/N)_{ij} - \overline{(S/N)})^2 \quad (4)$$

$$\% E = \frac{SS_i}{SS} \cdot 100\% \quad (5)$$

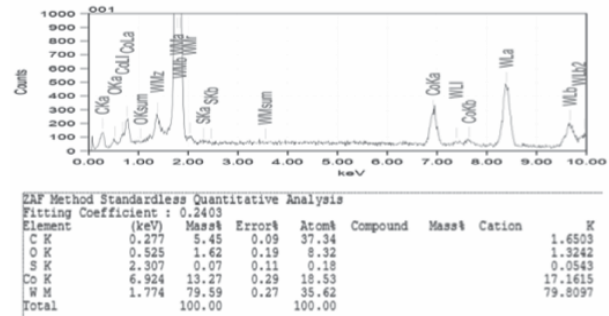
$$\tau_{\max} = T + \sum_{j=1}^n (T_i - T) \quad (6)$$

Ký hiệu j là các yếu tố được chọn; i là mức độ của các yếu tố; E là phần trăm đóng góp của từng yếu tố, T là kết quả trung bình thu được từ các thí nghiệm; T_i đại diện cho giá trị trung bình của các thí nghiệm.

2.2. Vật liệu thử nghiệm

Trong nghiên cứu này, bột phun nhiệt WC-12Co do công ty Eutectic cung cấp được sử dụng làm vật liệu phun. Bột nguyên liệu có hình dạng và kích thước từ 15 đến 45 μm đã được phân tích và quan sát như trong Hình 1.

Lớp phủ được phun bằng cách phun HVOF lên bề mặt bên trong của ống thép DN400 làm bằng vật liệu 20Cr có thành phần được mô tả trong Bảng 1. Bề mặt vật liệu nền được làm nhám đến Ra = 10 μm trước khi phun để tăng cường khả năng bám dính của các hạt với vật liệu nền.



Hình 1. Ảnh SEM và phân tích EDX của bột WC-12Co

Bảng 1. Thành phần của thép 20Cr

Thành phần	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
% Tỉ lệ	0.18 - 0.24	0.17 - 0.37	0.5 - 0.8	0.7 - 1.0	0.3	-

2.3. Chế tạo lớp phủ

Thiết bị phun HVOF với súng phun HP-2700M do công ty MEC – Ấn Độ cung cấp kết hợp với đồ gá phun bề mặt bên trong được sử dụng để tiến hành thí nghiệm. Các thông số phun được thiết kế ở ba mức độ (Bảng 2) và được thiết kế thử nghiệm theo theo mảng trực giao L9 (Bảng 4) của phương pháp Taguchi. Các thông số phun còn lại được lựa chọn theo khuyến cáo của nhà sản xuất (Bảng 3).

Bảng 2. Thông số phun và các mức thử nghiệm

Thông số chế độ phun	Ký hiệu	Mức độ		
		1	2	3
Khoảng cách phun (m)	L	0.2	0.25	0.3
Lưu lượng phun (g/phút)	P	20	26	32
Tốc độ tương đối súng phun (m/s)	V	0.1	0.15	0.2

Bảng 3. Các thông số phun HVOF khác

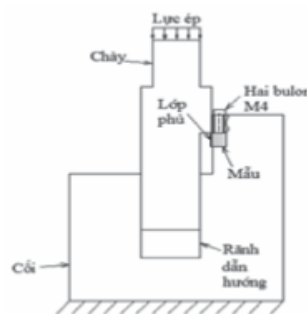
Thông số	Trị số áp suất (MPa)				Giá trị lưu lượng (l/phút)		
	O ₂	C ₃ H ₈	N ₂	Air	C ₃ H ₈	Air	N ₂
Giá trị	0.98	0.69	0.4	0.69	40	550	20

2.4. Đo độ bám dính

Độ bám dính của lớp phủ với bề mặt vật liệu nền được xác định dựa trên tiêu chuẩn JIS-H-8304-2017 [6]. Trong đó, mẫu thử được gia công theo hình vành khăn và bề mặt của lớp phủ được mài để đảm bảo độ dày lớp phủ là 500 μm . Việc kiểm tra độ bám dính của lớp phủ với bề mặt nền được thực hiện trên máy thử kéo nén để xác định lực nén P_t (N) theo nguyên lý thể hiện trên Hình 2.

Độ bám dính lớp phủ τ được tính bằng tỷ số giữa P_t và diện tích bám dính của lớp phủ với bề mặt nền F (mm^2):

$$\tau = \frac{P_t}{F} \quad (7)$$



Hình 2. Nguyên lý kiểm tra độ bám dính của lớp phủ

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Kết quả thử nghiệm

Dựa trên các thông số thí nghiệm và kết quả thực nghiệm được tính toán để xác định độ bám dính của lớp phủ (mẫu thử độ bám dính và đồ thị biến dạng Hình 3, 4) và giá trị độ bám dính thu được trong Bảng 4. Giá trị S/N cũng được tính tương ứng với từng thí nghiệm.

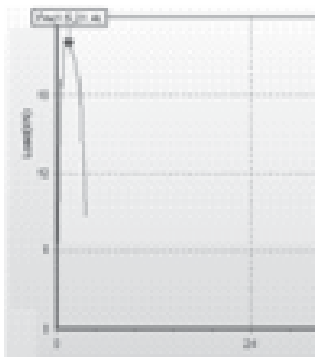
Từ Bảng 4 cho thấy: giá trị độ bám dính của lớp phủ thay đổi trong khoảng 52,1-65,6 MPa, mẫu thử 5 với thông số phun $L_2P_2V_3$ ($L = 0,2$ m, $P = 26$ g/phút, $V = 0,2$ m/s) có mức cao nhất là 65,6 MPa. Từ kết quả thu được, ta thấy độ bám dính của lớp phủ bị ảnh hưởng bởi sự thay đổi các thông số phun, chứng tỏ các thông số phun được lựa chọn cho nghiên cứu là phù hợp.

Bảng 4. Kết quả thử nghiệm độ bám dính

TN	Thông số phun			Độ bám dính (MPa)	S/N
	L	P	V		
1	0.20	20	0.10	52.1	34.5671
2	0.20	26	0.15	65.3	36.0281
3	0.20	32	0.20	61.2	35.7350
4	0.25	20	0.15	59.5	35.4903
5	0.25	26	0.20	65.6	36.3645
6	0.25	32	0.10	58.3	35.2235
7	0.30	20	0.20	53.8	34.3534
8	0.30	26	0.10	55	34.7439
9	0.30	32	0.15	57.5	35.1631



Hình 3. Mẫu thử độ bám dính

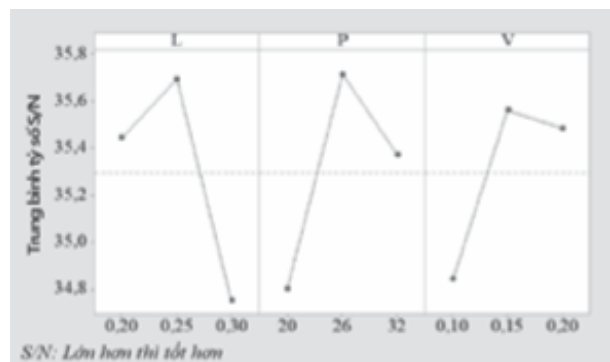


Hình 4. Biểu đồ thử độ bám dính

3.2. Xác định các chế độ phun tối ưu

Việc tăng cường độ bám dính của lớp phủ giúp cải thiện tính chất cơ tính bề mặt bên

trong của hệ thống đường ống trong quá trình vận hành, đặc biệt đối với lớp phủ có khả năng chống mài mòn, ăn mòn, v.v. Do đó, tỷ số S/N theo Taguchi giá trị càng cao biểu thị đặc tính độ bám dính lớp phủ càng tốt (càng cao càng tốt). Dựa vào kết quả thực nghiệm từ Bảng 4, bằng công cụ phần mềm tính toán Minitab tính được giá trị tỉ số S/N cho từng thông số chế độ phun ứng với từng mức độ, đồ thị minh họa Hình 5. Kết quả cho thấy ứng với các mức tỉ số trung bình S/N cao nhất của các thông số phun sẽ cho dự đoán về độ bền bám dính tối ưu của lớp phủ là 66.47 MPa tại thông số phun tối ưu được dự đoán là L_2 , P_2 , V_2 ($L_2 = 0,25$ m, $P_2 = 26$ g/phút và $V_2 = 0,15$ m/s).



Hình 5. Phân mức tác động của các thông số phun dựa trên tỷ số S/N tối độ bám dính lớp phủ

3.3. Phân tích phương sai

Bảng 5 thể hiện phân tích phương sai của thí nghiệm, kết quả cho thấy các thông số phun được chọn trong thí nghiệm là các thông số ảnh hưởng chính đến đặc tính bám dính của lớp phủ với chất nền thể hiện qua độ sai số nhỏ và độ tin cậy thống kê cao ($P < 0.05$). Kết quả

phân tích phương sai thể hiện vận tốc tương đối súng phun là ảnh hưởng ít nhất đến độ bám dính lớp phủ trong 3 thông số khảo sát với mức ảnh hưởng là 25.7%, kế tiếp là lưu lượng phun với giá trị ảnh hưởng là 34.7% và thông số ảnh hưởng lớn nhất đến độ bám dính lớp phủ là khoảng cách phun với giá trị ảnh hưởng là 38.4%.

Bảng 5. Kết quả phân tích phương sai dựa trên độ bám dính lớp phủ.

Tham số	Bậc tự do	Giá trị SS	Giá trị MS	Trị số F	Trị số P	Mức độ ảnh hưởng E (%)
L	2	63.936	319.678	32.58	0.030	38.4
P	2	57.722	288.611	29.42	0.033	34.7
V	2	42.762	213.811	21.79	0.044	25.7
Sai số	2	1.962	0.9811			1.2
Tổng	8	166.382				100

4. KẾT LUẬN

Trong nghiên cứu này, phương pháp Taguchi và phân tích ANOVA được sử dụng để nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số phun đến độ bám dính bề mặt của ống thép với vật liệu phủ WC-12Co bằng phương pháp HVOF. Tối ưu hóa các thông số phun bằng phương pháp Taguchi bao gồm các thông số khoảng cách phun, lưu lượng phun và vận tốc tương đối của súng phun. Các thông số phun tối ưu được xác định là khoảng cách phun $L = 0,25$ m, lưu lượng phun $P = 26$ g/phút và vận tốc tương đối của súng phun ở $V = 0,15$ m/s. Kết quả độ bám dính tối ưu theo dự đoán của lớp phủ đạt được là 66,47 MPa. Phân tích ANOVA chỉ ra rằng khoảng cách có ảnh hưởng đáng kể nhất đến độ bám dính của lớp phủ với mức 38,4%, tiếp theo là lưu lượng phun ở mức 34,7% và cuối cùng là vận tốc tương đối của súng phun ở mức 25,7%. ❖

Ngày nhận bài: 26/9/2024
Ngày phản biện: 15/10/2024

Tài liệu tham khảo:

- [1]. M. Bielewski, “Replacing Cadmium and Chromium”. The Research and Technology Organisation and NATO, AG-AVT-140 (2011), Chp. 23, p 1/22.
- [2]. P.L. Fauchais, J.V.R. Heberlein, M.I. Boulos, “Thermal spray fundamentals: From powder to part”. Springer US, 2014. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-68991-3>.
- [3]. S. Amin, H. Panchal, “A review on thermal spray coating processes”. Int. J. Curr. Trends Eng. Res. 2 (2016) 556-563.
- [4]. A.S.M. Ang, N. Sanpo, M.L. Sesso, S.Y. Kim, C.C. Berndt, “Thermal spray maps: Material genomics of processing technologies”. J. Therm. Spray Technol. 22 (2013) 1170-183. <https://doi.org/10.1007/s11666-013-9970-3>.
- [5]. G. Taguchi, S. Konishi, “Taguchi methods, orthogonal arrays and linear graphs, tools for quality American supplier institute”. American Supplier Institute, 1987, pp. 8-35.
- [6]. JIS-H-8304-2017, “Test methods for build-up thermal spraying”, Japan.