

ẢNH HƯỞNG CỦA CÁC THÔNG SỐ CÔNG NGHỆ ĐẾN ĐỘ XỐP LỚP PHỦ BỘT HỢP KIM WC-12Co BẰNG PHƯƠNG PHÁP PHUN PHỦ HVOF

EFFECT OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF HVOF SPRAYING METHOD ON THE POROSITY OF WC-12Co ALLOY POWDER COATING

Phạm Văn Liệu^{1,*},
Nguyễn Văn Điện¹, Dương Hải Nam¹

DOI: <https://doi.org/10.57001/huic5804.2025.284>

TÓM TẮT

Trong bối cảnh các ngành công nghiệp trên thế giới ngày càng phát triển, công nghệ bề mặt cũng được quan tâm. Trong ngành công nghiệp dầu khí, van cầu là một trong những thiết bị quan trọng, thường xuyên chịu ảnh hưởng của áp suất cao, nhiệt độ biến đổi và dòng chảy, dẫn đến hiện tượng mài mòn và ăn mòn nghiêm trọng. Việc sử dụng lớp phủ bảo vệ bề mặt đã trở thành một giải pháp quan trọng nhằm nâng cao tuổi thọ và độ bền của kim loại nền. Với mục tiêu tìm ra các điều kiện tối ưu cho quá trình phun bột hợp kim WC-12Co trên nền thép 316L bằng phương pháp phun phủ HVOF. Kết quả nghiên cứu đã cho thấy sự thay đổi của các thông số phun ảnh hưởng đáng kể đến các đặc tính của lớp phủ, trong số các thông số phun thực nghiệm đã xác định bộ thông số phun $L = 0,30\text{m}$; $m = 25\text{g/phút}$; $V = 1200\text{m/s}$, cho các giá trị đạt được về độ xốp 1,44%. Kết quả nghiên cứu này cung cấp cơ sở khoa học nghiên cứu để cải tiến công nghệ phục hồi van cầu trong ngành dầu khí, giúp giảm chi phí bảo trì và nâng cao tuổi thọ thiết bị.

Từ khóa: Phun phủ, HVOF, bột phun WC-12Co, thép không gỉ 316L, độ cứng, độ xốp, độ bám dính.

ABSTRACT

While a lot of industries are developing all over the world, surface technology is also heeded. In the oil and gas industry, globe valves are one of the important equipment, they usually affected by high pressure, changes in temperature and flow, leading to serious wear and corrosion. The use of surface protective coatings has become an essential solution to increase the service life and durability of the base metal. In order the find the optimal conditions for the WC-12Co alloy powder spraying process on 316L steel substrate with HVOF spraying method. The research results showed that the change of spraying parameters significantly affects the characteristics of the coating, among the experimental spraying parameters, the spraying parameter set $L = 0.30\text{m}$, $m = 25\text{g/min}$, $V = 1200\text{m/s}$ was determined, giving the achieved values of porosity 1.44%. This research result provides a scientific basis for research to improve the technology of globe valve restoration process in the oil and gas industry, helping to reduce maintenance costs and increase the service life of equipment.

Keywords: Coating, HVOF, WC-12Co spray powder, 316L stainless steel, hardness, porosity, adhesion.

¹Khoa Cơ khí, Trường Đại học Kinh tế - Kỹ thuật Công nghiệp

*Email: pvlieu@uneti.edu.vn

Ngày nhận bài: 01/4/2025

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 27/5/2025

Ngày chấp nhận đăng: 28/7/2025

1. GIỚI THIỆU CHUNG

Hiện nay, trong các ngành công nghiệp dầu khí, các thiết bị và phụ tùng như van cầu đóng vai trò quan trọng trong việc điều khiển dòng chảy và bảo vệ hệ thống khỏi

các yếu tố nguy hại. Tuy nhiên, van cầu và các thành phần kim loại khác trong hệ thống này phải đối mặt với điều kiện khắc nghiệt, bao gồm mài mòn cơ học, ăn mòn hóa học, xâm thực và nhiệt độ cao. Những yếu tố này làm

giảm độ bền và hiệu suất của các thành phần kim loại, dẫn đến chi phí bảo trì và thay thế cao, ảnh hưởng trực tiếp đến năng suất và chi phí vận hành của ngành. Do đó, việc cải thiện độ bền và tuổi thọ của các chi tiết này là một nhiệm vụ quan trọng để đảm bảo hiệu quả lâu dài và tiết kiệm cho ngành công nghiệp dầu khí.

Một trong những giải pháp hiệu quả nhất hiện nay là việc sử dụng công nghệ phun phủ nhiệt để tạo lớp phủ bảo vệ bề mặt các loại chi tiết kim loại [1]. Công nghệ phun phủ nhiệt có thể tăng cường tính chống mài mòn, chống ăn mòn và chịu nhiệt của bề mặt kim loại mà không làm thay đổi tính chất của vật liệu nền [2]. Trong đó, phương pháp phun phủ nhiệt HVOF (High-Velocity Oxy-Fuel). Đây là công nghệ tiên tiến và hiện đại nhất đã được sử dụng rộng rãi trong ngành công nghiệp do tính linh hoạt và khả năng tạo ra lớp phủ có độ cứng cao độ xốp thấp và độ bám dính tốt hơn so với các phương pháp tạo lớp phủ bề mặt khác [3].

Hợp kim WC-12Co (vonfram cacbua - coban) là một trong những vật liệu phổ biến được sử dụng trong phun phủ HVOF, nhờ vào đặc tính vật lý vượt trội của nó, bao gồm độ cứng cao, khả năng chống mài mòn tốt và khả năng chịu được các môi trường khắc nghiệt [3, 5, 6].

Trong nghiên cứu này, lớp phủ hợp kim WC-12Co được phun lên nền thép không gỉ 316L, một loại vật liệu nền phổ biến nhờ vào tính chống ăn mòn cao và khả năng chịu nhiệt tốt. Thép 316L được lựa chọn vì tính năng đảm bảo môi trường hóa học khắc nghiệt và khả năng bảo vệ tốt trong môi trường điều kiện dầu khí. Bằng phương pháp phun phủ HVOF, lớp phủ WC-12Co được tạo ra trên nền thép 316L với các thông số phun khác nhau để đánh giá tác động của chúng đối với đặc tính như độ cứng, độ xốp, độ bám dính của lớp phủ [4, 6, 7]. Các thông tin công nghệ phun phủ bao gồm: Khoảng cách phun (L), Lưu lượng cấp bột (m) và Tốc độ hạt phun (V). Mục tiêu của nghiên cứu này là đánh giá ảnh hưởng của các thông số phun đến độ xốp lớp phủ và mức độ ảnh hưởng đến khả năng chống ăn mòn và độ bền của lớp phủ.

Kết quả của nghiên cứu này cũng sẽ cung cấp cơ sở khoa học quan trọng và kiểm soát quy trình phun phủ, lựa chọn các thông số phun phù hợp để chế tạo lớp phủ có chất lượng cao nhất, phục vụ hiệu quả cho quá trình phục hồi và nâng cao tuổi thọ van cầu trong ngành công nghiệp dầu khí.

2. MÔ TẢ THÍ NGHIỆM VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Vật liệu

Vật liệu nền là thép không gỉ 316L, có cơ tính, thành phần hoá học và tính chất vật lý được trình bày trong bảng 1, 2 và 3.

Bảng 1. Thành phần hoá học của thép 316L

Inox 316L	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni	N
Min	-	-	-	-	-	16	2	10	-
Max	0,03	2	0,75	0,045	0,03	18	3	14	0,1

Mẫu thí nghiệm được chế tạo theo biên dạng của van

Bảng 2. Thuộc tính cơ học của thép 316L

Mac inox 316	Độ bền kéo	Độ bền chảy	Độ giãn dài	Độ cứng	
	(MPa) min	Chứng minh độ biến dạng 0,2%	(%) trong 50 mm min		
		(MPa) min		Rockwell B (HRB) max	Brinell (HB) max
SUS 316L	485	170	40	95~19hrc	217

Bảng 3. Tính chất vật lý của thép 316L

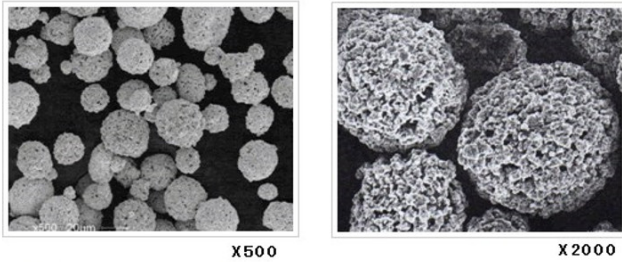
Thép không gỉ 316L	Tỷ trọng (kg/m ³)	Elastic Modulus (GPa)	Mean Co-eff of thermal Expansion (μm/m/°C)			Thermal Conductivity (W/m.K)		Specific Heat 0-100°C (J/kg.K)	Elec R (nΩ2.m)
			0-100°C	0-315°C	0-538°C	At 100°C	At 500°C		
Inox 316L	8000	193	15,9	16,2	17,5	16,3	21,5	500	740

cầu và được cắt thành các tấm có kích thước OR75x100x100x6mm. Số lượng mẫu được thực hiện trong nghiên cứu này là 9 mẫu.

Vật liệu phủ được sử dụng trong quá trình thực nghiệm là bột hợp kim WC-12Co, được cung cấp bởi PAC Powder Alloy (Hoa Kỳ) có dạng hình cầu với kích thước hạt từ 5 đến 45μm. Thành phần bột gồm 88 % Cacbua Vonfram (WC) và 12 % Coban (Co) có khả năng chống mài mòn cao.

Bảng 4. Thành phần hoá học của bột hợp kim WC-12Co

Element	Co	C	S	O	W
Wt%	13,27	5,45	0,07	1,62	Remaining



Hình 1. Bột phun WC-12Co

2.2. Thiết bị thử nghiệm

Thiết bị thí nghiệm được sử dụng trong quá trình phun là hệ thống phun HVOF- Model MP-2100 Manual HVOF Control Panel, được cung cấp bởi Metallizing Equipment Co. Pvt. Ltd. Jodhpur India. Hệ thống phun HVOF MP-2100 bao gồm:

1. Hệ thống khí (oxy, propan, khí nén);
2. Bộ phận cấp bột PF-3350;
3. Bảng điều khiển lưu lượng MP-2100;
4. Súng phun HVOF HP-2700-M;
5. Các thiết bị hỗ trợ.



Hình 2. Ảnh chụp hệ thống thiết bị phun HVOF MP 2100

Thông số kỹ thuật của hệ thống phun HVOF, được trình bày trong bảng 5 và được duy trì trong suốt quá trình phun.

Bảng 5. Thông số kỹ thuật hệ thống phun HVOF

TT	Khí	Lưu lượng (LPM)	Áp suất (kg/cm ²)
1	Ôxy	250 - 350	10,0
2	LPG/Propane	60 - 80	07,0
3	Khí nén	600 - 700	07,0

2.3. Thiết kế thí nghiệm

Phương pháp thiết kế thực nghiệm Taguchi là phương pháp thiết kế dựa trên bảng trực giao do Genichi Taguchi phát triển [8]. Đây là một phương pháp đơn giản và mạnh mẽ để tối ưu hóa các thông số quy trình. Phương pháp Taguchi không chỉ xem xét giá trị trung bình của kết quả thí nghiệm mà còn chú trọng đến sự biến thiên của dữ liệu. Tỷ số S/N (signal/noise) giúp xác định được chế độ tối ưu bằng cách giảm thiểu tác động của nhiễu (noise) lên

hệ thống. Có ba loại tỷ số S/N đặc trưng cho chất lượng của các đối tượng nghiên cứu gồm:

+ Lớn hơn thì tốt hơn:

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

+ Bình thường thì tốt hơn:

$$\frac{S}{N} = 10 \log \left(\frac{\bar{y}^2}{D^2} \right) \quad (2)$$

+ Nhỏ hơn thì tốt hơn:

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum y_i^2 \right) \quad (3)$$

Trong đó: y_i , $\bar{y}$, D , n lần lượt là: giá trị đo của thử nghiệm thứ i , giá trị trung bình của tất cả các lần đo, phương sai và tổng số thử nghiệm cần thực hiện.

Việc lựa chọn chế độ công nghệ phun trên cơ sở phân tích lý thuyết về phun phủ HVOF kết hợp với kết quả nghiên cứu của các tác giả [3, 4, 9, 10] đã được công bố trên tạp chí và các báo cáo khoa học trong các kỳ hội nghị toàn quốc để lựa chọn giới hạn cần thiết cho quá trình thực nghiệm. Qua đó có thể xác định các chế độ công nghệ bao gồm: khoảng cách phun (L), lưu lượng cấp bột phun (m), vận tốc dòng phun (V). Mỗi thông số phun gồm 3 mức và giá trị tương ứng được sắp xếp theo mảng trực giao L_9 như bảng 6.

Bảng 6. Mảng trực giao L_9 theo phương pháp Taguchi

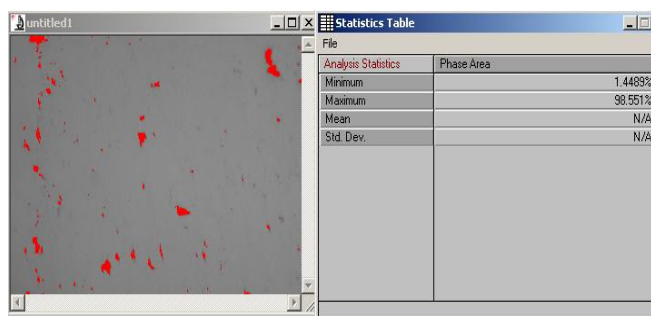
Số thực nghiệm	Thông số phun		
	L (m)	M (g/phút)	V (m/s)
1	0,20	25	800
2	0,20	30	1000
3	0,20	35	1200
4	0,25	25	1000
5	0,25	30	1200
6	0,25	35	800
7	0,30	25	1200
8	0,30	30	800
9	0,30	35	1000

2.4. Phương pháp kiểm tra độ xốp của lớp phủ

Mẫu được cắt để quan sát theo tiết diện bề mặt lớp phủ. Sau khi cắt, mẫu được gia công bề mặt trên các loại giấy giáp có kích cỡ từ hạt thô đến hạt mịn và được đánh bóng trên các máy chuyên dụng đảm bảo không còn vết xước trên bề mặt đạt yêu cầu kỹ thuật. Sử dụng kính hiển vi quang học Axioplan 2-Carl Zeiss (hình 3a) để đo độ xốp lớp phủ. Quá trình đo được thực hiện theo tiêu chuẩn JIS-H-8664 - 1997 (Nhật Bản).



a) Kính hiển vi quang học Axioplan 2



b) Kết quả phép đo độ xốp

Hình 3. Thiết bị và kết quả đo độ xốp

Độ xốp được đo bằng cách xác định diện tích các lỗ xốp trong khu vực quan sát của kính hiển vi quang học và so sánh diện tích này với tổng diện tích hình ảnh quan sát. Kính hiển vi được kết nối với hệ thống máy tính đã được trang bị phần mềm Image-Pro Plus để phân tích, phần mềm này có chức năng đánh giá về các vùng có màu sắc khác nhau, việc xác định giá trị độ xốp của mẫu bằng cách chuyển đổi các vùng rỗ xốp thành màu đỏ, trong khi phần cấu trúc tế vi còn lại của mẫu vẫn còn giữ nguyên màu sắc ban đầu của nó (hình 3b). Phần mềm sẽ tự động tính toán tỷ lệ phần trăm những vùng diện tích có màu đỏ với những vùng diện tích có màu xám trong phạm vi quan sát.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Kết quả thực nghiệm đo độ xốp lớp phủ hợp kim WC-12Co trên nền thép không gỉ 316L bằng phương pháp phun phủ HVOF và giá trị S/N được cho trong bảng 7, các tỷ số S/N được tính theo đặc trưng chất lượng "nhỏ hơn thì tốt hơn" để làm cơ sở xác định thông số tối ưu cho độ xốp lớp phủ.

Bảng 7. Kết quả kiểm tra độ xốp lớp phủ WC-12Co trên nền thép không gỉ 316L bằng phương pháp phun HVOF và tỷ lệ S/N ứng với các thí nghiệm

Số thực nghiệm	Thông số phun			Kết quả	
	L (m)	M (g/phút)	V (m/s)	Độ xốp (P)	Tỷ lệ S/N
1	0,20	25	800	2,76	-8,82
2	0,20	30	1000	2,42	-7,68

3	0,20	35	1200	2,25	-7,04
4	0,25	25	1000	1,92	-5,67
5	0,25	30	1200	2,45	-7,78
6	0,25	35	800	2,62	-8,37
7	0,30	25	1200	1,44	-3,17
8	0,30	30	800	2,14	-6,61
9	0,30	35	1000	1,80	-5,11

Độ xốp là một trong những yếu tố quan trọng ảnh hưởng đến chất lượng lớp phủ trong quá trình phun HVOF. Khi lớp phủ có độ xốp cao có thể sẽ làm giảm độ bền cơ học, khả năng chống ăn mòn và độ bám dính của lớp phủ. Ngược lại, độ xốp thấp giúp cho lớp phủ có độ bền cao hơn, khả năng chống ăn mòn và chống mài mòn tốt hơn. Vì vậy, việc kiểm soát độ xốp là yếu tố quan trọng để tối ưu hóa chất lượng lớp phủ. Từ kết quả đo của 9 mẫu thí nghiệm với ba thông số phun khác nhau (bảng 7) cho thấy độ xốp của lớp phủ dao động trong khoảng $P = 1,44 - 2,76\%$. Trong đó, sự kết hợp giữa các số thông số phun theo thiết kế thí nghiệm của taguchi bao gồm khoảng cách phun ($L = 0,30m$), lưu lượng cấp bột phun $m = 25g/phút$ và vận tốc dòng phun $V = 1200m/s$, cho giá trị độ xốp ở mức thấp nhất ($P = 1,44\%$). Sự tác động của các thông số phun có ảnh hưởng đáng kể đến chất lượng lớp phủ, từ kết quả đo độ xốp trong (bảng 7) có thể được giải thích dựa trên cơ sở khoa học về sự hình thành lớp phủ và mức độ phân bố hạt WC-12Co trên bề mặt nền như sau:

Khi khoảng cách phun tăng $L = 0,20; 0,25$ và $0,30m$, độ xốp có xu hướng giảm đáng kể. Điều này có thể là do khoảng cách phun phù hợp giúp hạt phun có đủ thời gian nóng chảy, kết hợp với áp suất khí cao làm cho các hạt nóng chảy này bám chặt vào bề mặt, làm giảm khoảng trống giữa các splat. Tuy nhiên, nếu khoảng cách phun quá lớn, có thể độ xốp sẽ tăng trở lại. Điều này có thể là do các hạt phun trong quá trình bay bị lực cản của môi trường không khí làm cho nó bị nguội nhanh, lực va đập giảm làm giảm khả năng kết dính giữa các hạt dẫn đến độ xốp tăng.

Khi lưu lượng cấp bột phun tăng $m = 25, 30$ và $35g/phút$ độ xốp có xu hướng tăng. Lý do là khi lượng bột quá nhiều, làm cho mật độ hạt tăng dẫn đến ảnh hưởng việc hấp thụ nhiệt của các hạt, khiến lớp phủ có nhiều khoảng trống hơn, độ xốp tăng, khi lưu lượng cấp bột phun ở mức $m = 25g/phút$ (mức thấp nhất) được kết hợp với các số thông số phun theo thiết kế thí nghiệm của taguchi cho giá trị độ xốp thấp

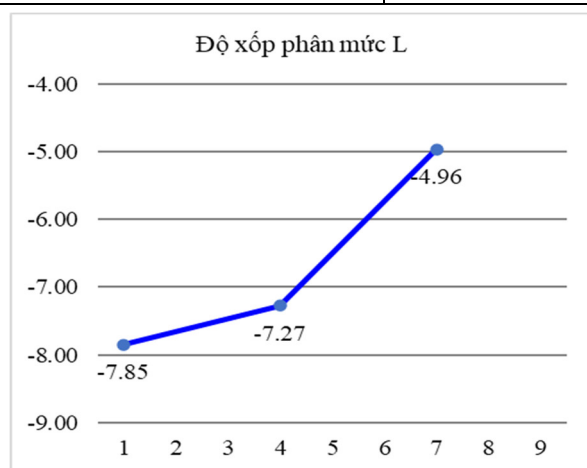
Đối với vận tốc dòng phun $V = 800, 1000, 1200m/s$, cho độ xốp giảm mạnh, điều này cho thấy vận tốc cao giúp

hạt phun có động năng lớn, làm tăng khả năng lấp đầy khoảng trống trong lớp phủ. Tuy nhiên, nếu tốc độ dòng phun quá cao các hạt phun có thể bị bắn ngược khi va chạm với bề mặt nền, làm giảm khả năng kết dính dẫn đến cho độ xốp tăng.

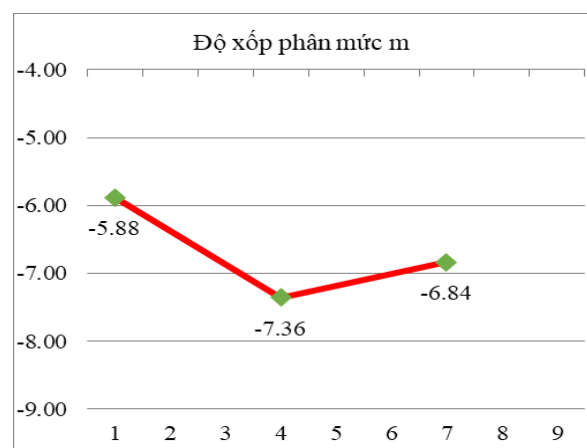
Mục tiêu tiếp theo trong nghiên cứu này là tiến hành phân tích phương sai cho các tỷ số S/N đối với kết quả thí nghiệm nhằm tìm ra mức tối ưu của các thông số phun để đạt được kết quả độ xốp lớp phủ nhỏ nhất. Căn cứ vào kết quả S/N ở bảng 7 tiến hành tính phân mức trung bình cho các tham số L, m, V, kết quả phân tích được cho trong bảng 8 và hình 4.

Bảng 8. Giá trị trung bình các mức của các tham số L, m, V

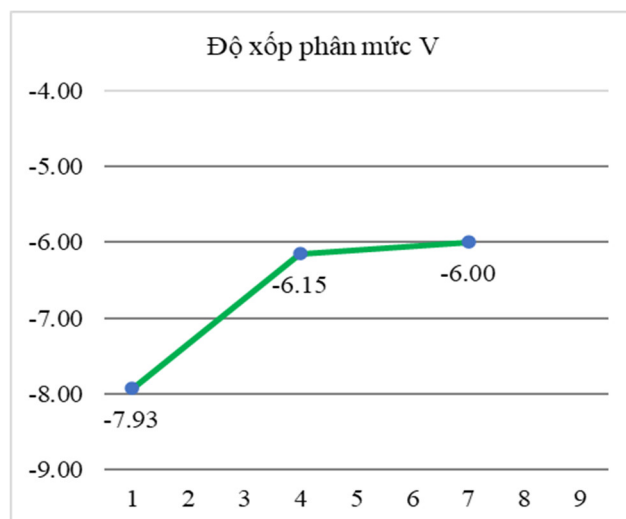
Tham số	Các mức		
	1	2	3
Khoảng cách phun L (m)	-7,85	-7,27	-4,96
Lưu lượng bột phun m (g/phút)	-5,88	-7,36	-6,84
Vận tốc trung bình dòng kim loại phun (m/s)	-7,93	-6,17	-6,00
Trung bình các mức (T)	-6,70		



a)



b)



c)

Hình 4. Biểu đồ phân mức các tham số

Căn cứ trên biểu đồ phân mức ở Hình 4 cho thấy sự kết hợp của các tham số như khoảng cách phun ở mức 3 ($L = 0,3\text{m}$), lưu lượng bột phun ở mức 1 ($m = 25\text{g/phút}$) và vận tốc dòng phun ở mức 3 ($V = 1200\text{m/s}$) là tối ưu nhất để tạo ra độ xốp lớp phủ nhỏ nhất. Giá trị dự đoán cho độ xốp lớp phủ khi phun với các thông số tối ưu trên theo phân tích phương sai [11] là:

$$\begin{aligned} \text{Doxop}_{\text{opt}} &= T + (L_3 - T) + (m_1 - T) + (V_3 - T) \\ &= 1,44\% \end{aligned}$$

4. KẾT LUẬN

Từ quá trình nghiên cứu và thực nghiệm có thể đưa ra một số kết luận chính sau:

- Xây dựng được bộ thông số thực nghiệm trên cơ sở áp dụng phương pháp thiết kế thực nghiệm taguchi, từ đó tối ưu hóa các thông số phun để cải thiện độ xốp lớp phủ nhỏ nhất $P = 1,44\%$ với thông số $L_3 - m_1 - V_3$ ($L = 0,30\text{m}$; $m = 25\text{g/phút}$; $V = 1200\text{m/s}$).

Lớp phủ WC-12Co được tạo thành bằng công nghệ phun HVOF trên nền vật liệu thép 316L với sự kết hợp giữa các thông số phun theo thiết kế thí nghiệm của taguchi bao gồm khoảng cách phun, lưu lượng cấp bột phun và vận tốc dòng phun có ảnh hưởng lớn đến độ xốp của lớp phủ, trong đó vận tốc cao giúp cho độ xốp giảm đáng kể.

Việc nghiên cứu ứng dụng thành công của lớp phủ bột hợp kim WC-12Co trên bề mặt van cầu vật liệu thép không gỉ 316L bằng công nghệ phun HVOF là cơ sở để mở rộng cho nhiều ứng dụng khác trong các ngành công nghiệp phục hồi hoặc tạo mới bề mặt chi tiết chịu mài mòn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Nguyễn Văn Tuấn, *Quy trình xử lý lớp phun phủ nhiệt bằng phương pháp thẩm thấu với PTFE trong điều kiện có rung siêu âm*. Bằng độc quyền sáng chế số 1-0031384, Cục Sở hữu trí tuệ, Bộ Khoa học và Công nghệ, 2022.
- [2]. Phùng Anh Tuấn, Nguyễn Đình Chiến, Lê Viết Bình, “Chế tạo lớp phủ chống ăn mòn và mài mòn trên mặt trong các chi tiết dạng ống bằng công nghệ phun phủ nhiệt,” *Tạp chí Khoa học Công nghệ Hàng hải*, 47, 2016.
- [3]. Nguyễn Thanh Phú và cộng sự, “Tối ưu hóa các thông số quá trình phun HVOF để nâng cao độ bám dính của lớp phủ WC-12Co,” *Kỷ yếu Hội nghị Khoa học và Công nghệ Toàn quốc về Cơ khí lần thứ V (VCME 2018)*, Hà Nội, 2018.
- [4]. Nguyễn Thanh Phú, “Nghiên cứu ảnh hưởng của lưu lượng phun, khoảng cách phun, tỷ lệ oxy/propan đến độ cứng, độ bền bám dính và độ xốp của lớp phủ WC-12Co bằng phun HVOF,” *Tạp chí Khoa học & Công nghệ, Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Hưng Yên*, 26, 2020.
- [5]. S. Matthew, et al., “Thermal spraying of WC-Co coatings on large engineering components,” *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 29, 4, 475-481, 2021.
- [6]. A. McDonald, et al., “Effect of HVOF powder feedstock characteristics on the sliding wear behaviour of WC-12Co coatings,” *Surface and Coatings Technology*, 268, 47-57, 2015.
- [7]. S. Matthew, et al., “Thermal spraying of WC-Co coatings on large engineering components,” *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 29, 4, 475-481, 2021.
- [8]. Taguchi G, Chowdhury S, Wu Y, *Taguchi's Quality Engineering Handbook*. John Wiley & Sons, 2005.
- [9]. Mariana Henriette Stai, et al., “Tribocorrosion Performance of WC-12Co HVOF-Sprayed Coatings Reinforced with Carbon Nanotubes,” *Crystals*, 13, 457, 2023.
- [10]. Md Sarfaraz Alam, Anil Kumar Das, “A Critical Review of Coating on AISI 1045 Steel Substrate by High Velocity Oxygen Fuel (HVOF),” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1228, 012002, 2022.
- [11]. Chihiro Hirotsu, *Advanced Analysis of Variance*. John Wiley & Sons, Inc. 111 River Street, Hoboken, NJ 07030, USA, 2017.

AUTHORS INFORMATION

Pham Van Lieu, Nguyen Van Dien, Duong Hai Nam

Faculty of Mechanical Engineering, University of Economics - Technology for Industries, Vietnam