NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA CÁC THÔNG SỐ ĐẾN ĐỘ CỨNG LỚP PHỦ HỢP KIM WC-12Co TRÊN BỀ MẶT NỀN GANG XÁM GX 15-32 BẰNG PHƯƠNG PHÁP PHUN PHỦ HVOF

THE INFLUENCE OF PARAMETERS ON THE HARDNESS OF WC-12Co ALLOY COATING ON GX 15-32 GREY CAST IRON SUBSTRATE BY HVOF SPRAYING TECHNOLOGY

Dương Hải Nam, Nguyễn Văn Điện, Phạm Văn Liệu

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

Đến Tòa soạn ngày 18/3/2025, chấp nhận đăng ngày 14/4/2025

Tóm tắt: Trong lĩnh vực gia công cơ khí, kỹ thuật phun phủ nhiệt tốc độ cao, High-Velocity Oxy-Fuel (HVOF) được sử dụng phổ biến nhằm sửa chữa và tăng cường tuổi thọ sử dụng của các bộ phận bị mài mòn do tiếp xúc như bàn xe dao máy tiện. Nghiên cứu này nhằm đánh giá, phân tích tác động của các thông số kỹ thuật HVOF lên độ cứng của lớp phủ hợp kim WC-12Co được phủ lên vật liệu gang xám GX 15-32. Ba yếu tố chính được nghiên cứu thực hiện để đánh giá, khảo sát gồm: Khoảng cách phun (L), lượng bột cung cấp (m) và cuối cùng là vận tốc phun (V). Kết quả thử nghiệm độ cứng Vickers (HV) chỉ ra rằng khoảng cách phun và tốc độ hạt có tác động rõ rệt đến đặc tính lớp phủ. Ở điều kiện khoảng cách phun tối ưu và vận tốc phun cao, lớp phủ đạt được độ cứng cao nhất, đồng thời giảm thiểu độ rỗ và cải thiện khả năng bám dính. Ngược lại, nếu các thông số không được thiết lập chính xác, lớp phủ dễ xuất hiện các khuyết tật như rạn nứt hoặc bong bật. Kết quả nghiên cứu là rất quan trọng cho việc tối ưu hóa quy trình phun phủ HVOF, từ đó ứng dụng vào việc phục hồi bàn xe dao máy tiện, cải thiện độ bền và tuổi thọ, giúp giảm chi phí bảo trì, bảo dưỡng và nâng cao hiệu quả quá trình gia công.

Từ khóa: HVOF, WC-12Co, độ cứng, độ xốp, độ bám dính.

Abstract: In the field of mechanical processing, high-velocity Oxy-Fuel (HVOF) thermal spraying technique is commonly used to repair and increase the service life of parts that are worn due to contact such as lathe tool carriages. This study aims to evaluate and analyze the impact of HVOF technical parameters on the hardness of WC-12Co alloy coatings applied to GX 15-32 gray cast iron. Three main factors were studied and investigated: Spray distance (L), powder supply amount (m) and finally spray velocity (V). The Vickers hardness (HV) test results indicate that spray distance and particle velocity have a significant impact on the coating properties. Under the optimal spray distance and high spray velocity conditions, the coating achieves the highest hardness, while minimizing porosity and improving adhesion. On the contrary, if the parameters are not set correctly, the coating is prone to defects such as cracking or peeling. The research results are very important for optimizing the HVOF coating process, thereby applying it to the restoration of lathe tool tables, improving durability and service life, helping to reduce maintenance and repair costs and improve machining efficiency.

Keywords: HVOF, WC-12Co, hardness, porosity, adhesion.

1. GIỚI THIỆU CHUNG

Trong hoạt động gia công cơ khí, nhất là trên các máy tiện, bộ phận bàn dao thường xuyên tiếp xúc với lực ma sát và bị mài mòn sau thời

gian dài vận hành. Tình trạng này làm giảm độ chính xác khi gia công, đồng thời làm tăng chi phí sửa chữa và rút ngắn tuổi thọ của máy [1]. Phương pháp phun phủ nhiệt đã giải quyết vấn đề này rất hiệu quả, trong đó nổi bật là kỹ thuật phun phủ HVOF (High-Velocity Oxy-Fuel). Công nghệ này giúp tạo ra một lớp phủ cứng trên bề mặt chi tiết từ đó tăng khả năng chống mòn mà không làm biến đổi đặc tính quan trọng của vật liệu gốc [2].

Kỹ thuật phun phủ nhiệt HVOF hoạt động theo nguyên lý đốt cháy hỗn hợp oxy và nhiên liệu, tạo ra luồng khí tốc độ siêu âm để đẩy các hạt bột vật liệu bám vào bề mặt cần phủ. Quá trình này tạo ra lớp phủ có tính kết dính chặt chẽ và mật độ vật liệu cao, đồng thời giảm thiểu đáng kể các lỗ rỗng bên trong [4]. Trong bối cảnh công nghệ phun phủ không ngừng phát triển, hợp kim WC-12Co đã khẳng định vị thế hàng đầu nhờ sở hữu các đặc tính cơ học ưu việt, đó là khả năng chống mài mòn tốt và độ cứng đặc biệt cao [5].

Hợp kim WC-12Co hiện nay là vật liệu được sử dụng phổ biến khi phun phủ HVOF do vừa có đặc tính cứng của vonfram cacbua (WC) vừa có độ dẻo của coban (Co). Sự kết hợp này mang lại cho lớp phủ có khả năng làm việc tốt ngay cả trong những điều kiện khắc nghiệt [6]. Khi ứng dụng trên vật liệu nền gang xám GX 15-32, lớp phủ WC-12Co giúp cải thiện rõ rệt độ cứng bề mặt, từ đó kéo dài thời gian sử dụng và tăng cường khả năng chống mài mòn cho chi tiết [7]. Chất lượng lớp phủ chịu ảnh hưởng lớn từ các yếu tố công nghệ như: Nhiệt độ ngọn lửa, vận tốc hạt phun, khoảng cách phun và lưu lượng bột. Việc thiết lập không chính xác các thông số này có thể dẫn đến các khiếm khuyết như tăng độ rỗng, giảm độ bám dính hoặc hiện tượng bong tróc lớp phủ [8]. Vì vậy, nghiên cứu tác động của các thông số này là vô cùng quan trọng.

Máy tiện là thiết bị chính trong gia công cắt gọt kim loại. Sau thời gian dài vận hành, bàn xe dao máy tiện thường bị hao mòn do tần suất sử dụng cao và tiếp xúc thường xuyên với phoi kim loại cùng các tác nhân khác, dẫn đến suy giảm chất lượng bề mặt chi tiết. Thay vì thay thế hoàn toàn bộ phận này, phương pháp phục hồi bằng công nghệ phun phủ HVOF được xem là giải pháp tối ưu, giúp kéo dài thời gian sử dụng thiết bị, giảm được chi phí bảo trì và hạn chế thời gian ngừng máy [9].

Trong khi đã có nhiều công trình nghiên cứu về lớp phủ WC-12Co ứng dụng trên các loại thép, hiện chưa có nhiều nghiên cứu về ảnh hưởng của các thông số phun phủ đến độ cứng lớp phủ khi sử dụng nền gang xám GX 15-32 vẫn còn hạn chế. Nghiên cứu này nhằm bổ sung cơ sở dữ liệu khoa học giúp kiểm soát quá trình phun phủ, từ đó đạt được chất lượng lớp phủ tốt nhất khi áp dụng cho việc phục hồi bàn xe dao máy tiện. Trọng tâm của nghiên cứu là phân tích, đánh giá ảnh hưởng của các thông số kỹ thuật bao gồm: Khoảng cách phun, vận tốc hạt và lưu lượng bột đến độ cứng của lớp phủ WC-12Co khi phủ trên nền vật liệu gang xám GX 15-32. Những phát hiện từ nghiên cứu sẽ là minh chứng thực nghiệm giá trị khi đánh giá phân tích mối quan hệ giữa các thông số công nghệ HVOF và độ cứng lớp phủ từ đó nâng cao được hiệu quả quy trình phun phủ trong thực tiễn sản xuất. Hơn nữa, kết quả nghiên cứu này cũng có tiềm năng áp dụng cho cho các bộ phận máy móc thiết bị khác như: khuôn dập, trục quay và các chi tiết máy chịu mài mòn nghiêm trọng.

2. VẬT LIỆU VÀ THIẾT BỊ THÍ NGHIỆM

2.1. Vật liệu

Gang xám GX 15-32 được sử dụng làm vật liệu nền trong nghiên cứu này có thành phần

hóa học và các đặc tính cơ học được mô tả chi tiết tại bảng 1 và bảng 2.

Bảng 1. Các thành phần hóa học của gang xám GX15-32 [3]

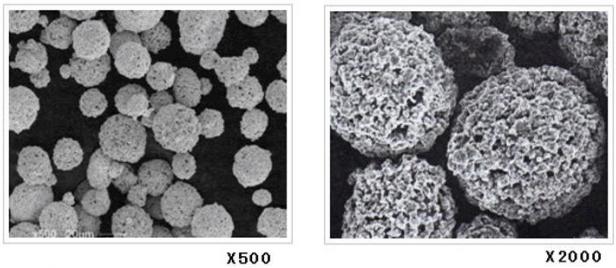
Nguyên tố	Hàm lượng (%)
C (carbon)	2,5 – 4,0
Si (silic)	1,0 - 3,0
Mn (mangan)	0,5 - 1,6
P (phốt pho)	≤ 0,65
S (lưu huỳnh)	≤ 0,15
Fe (sắt)	Còn lại

Bảng 2: Cơ tính của gang xám GX15-32 phụ thuộc vào dạng tổ chức tế vi của nền [3]

Tổ chức	Giới hạn bền kéo, MPa	Độ cứng, HB	Độ dẻo, %
Ferit	< 150	150	0,5
Ferit - Peclit	150 - 200	200	0,5
Peclit	210 - 400	200 - 250	0,2

Mẫu thí nghiệm gồm các tấm có kích thước 100 × 100 × 6 mm. Số lượng mẫu được tiến hành thực hiện trong nghiên cứu này là 9 mẫu.

Sử dụng bột hợp kim WC-12Co làm vật liệu cho quá trình làm thực nghiệm. Vật liệu này do PAC Powder Alloy (Hoa Kỳ) cung cấp có dạng hình cầu với kích thước hạt từ 5 đến 45 μm. Thành phần bột gồm 88% cacbua vonfram (WC) và 12 % coban (Co).



Hình 1. Bột phun WC-12Co

Bảng 3. Các 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

2.2. Thiết bị thử nghiệm

Hệ thống phun HVOF sử dụng cho thử nghiệm là MP-2100 Manual HVOF Control Panel do hãng Metallizing Equipment Co. Pvt. Ltd (Jodhpur, Ấn Độ) sản xuất đã được sử dụng trong nghiên cứu này. Thiết bị MP-2100 gồm các hệ thống thiết bị sau:

- Hệ thống khí (oxy, propan, khí nén);
- Bộ phận cấp bột PF-3350;
- Hệ thống điều khiển lưu lượng MP-2100;
- Đầu phun HVOF HP-2700-M;
- Các thiết bị hỗ trợ khác.

Thông số kỹ thuật của hệ thống phun HVOF được giữ ổn định trong toàn bộ quá trình thực hiện phun phủ như trong bảng 4.

Bảng 4. Thông số kỹ thuật hệ thống phun HVOF

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

Nghiên cứu tập trung khảo sát ba thông số công nghệ chính: (1) khoảng cách phun (L), (2) lưu lượng bột (m), và (3) vận tốc phun (V). Mỗi thông số được thiết lập ở ba mức giá trị khác nhau và bố trí theo phương án thí nghiệm trực giao L9 [10], như trình bày chi tiết trong bảng 5.

Bảng 5. Ma trận trực giao L9 theo phương pháp Taguchi

Số thực nghiệm	Thông số phun		
	L (m)	*M (g/phút)*	*V (m/s)*
1	0.20	25	800

Số thực nghiệm	Thông số phun		
	L (m)	*M (g/phút)*	*V (m/s)*
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

2.3. Phương pháp kiểm tra độ cứng của lớp phủ

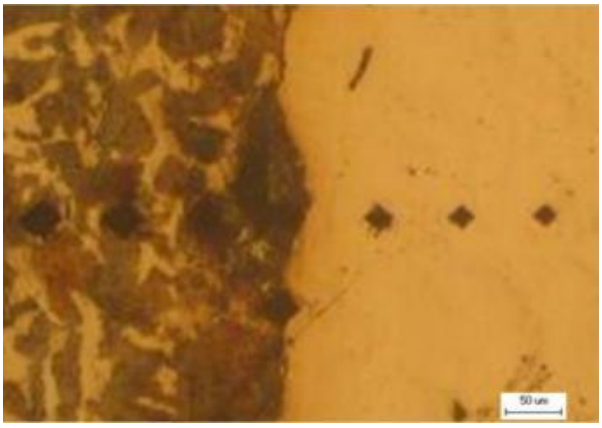
Độ cứng là tính chất cơ lý quan trọng của vật liệu, phản ánh khả năng chống lại sự biến dạng, mài mòn cũng như trầy xước trên bề mặt. Với sự phát triển không ngừng của ngành khoa học vật liệu, ngày nay đã có nhiều kỹ thuật được ứng dụng để đo lường đặc tính này. Trong số đó, ba phương pháp thông dụng nhất hiện nay sử dụng các thang đo chuẩn hóa với đơn vị đo được xác định rõ ràng:

- Phương pháp Brinell – thang đo HB;
- Phương pháp Vicker – thang đo HV;
- Phương pháp Rockwell – thang đo HRC.

Quy trình xác định độ cứng lớp phủ thực hiện như sau: đầu tiên, các mẫu phủ được cắt ngang để lộ mặt cắt lớp phủ. Bề mặt mẫu sau đó được mài bóng kỹ lưỡng đến khi loại bỏ hoàn toàn các vết xước, đạt yêu cầu kỹ thuật. Phép đo độ cứng được thực hiện bằng máy Indentamet 1106 như hình 2a áp dụng phương pháp Vickers, tuân thủ nghiêm ngặt tiêu chuẩn ASTM E384-17:2011 [9] với thông số đo HV 0,1, tức là sử dụng tải trọng 100 gram và duy trì lực tác dụng trong vòng 15 giây. Các điểm đo được phân bố đều dọc theo chiều dày lớp phủ từ bề mặt hợp kim WC-12Co (phía ngoài) đến vùng tiếp giáp với nền gang xám GX 15-32 (phía trong) như minh họa tại hình 2b. Phương pháp này đánh giá được cả độ cứng trung bình của lớp phủ và sự chênh lệch so với vật liệu nền.



a. Máy đo độ cứng Indentamet 1106

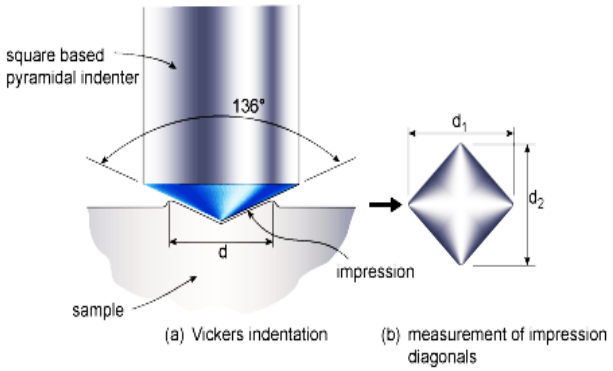


b. Các vị trí đo độ cứng lớp phủ

Hình 2. Thiết bị và mẫu đo độ cứng lớp phủ

Mẫu phủ được cố định chắc chắn trên giá đỡ chuyên dụng, đảm bảo bề mặt hoàn toàn phẳng để nâng cao độ chính xác khi đo. Vị trí đo được xác định thông qua hệ thống kính hiển vi, đồng thời các thông số kỹ thuật được thiết lập trên màn hình điều khiển cảm ứng. Mũi đo kim cương hình chóp tứ diện tiêu chuẩn (góc giữa các mặt đối diện 136°±30°)

sẽ tự động định vị, tiếp cận và tác động lên bề mặt mẫu với lực ấn 100 g. Sau khi dỡ tải, hệ thống tiến hành đo độ dài hai đường chéo (d) của vết lõm tạo thành. Nguyên lý đo độ cứng này được minh họa chi tiết trong hình 3.



Hình 3. Phương pháp đo độ cứng HV

Độ cứng Vickers được tính bằng cách lấy lực tác dụng F chia cho diện tích vết lõm S, trong đó S được xác định dựa trên độ dài trung bình hai đường chéo d_1 và d_2 của vết lõm tạo ra bởi mũi kim cương hình chóp khi tác động lực F. Góc giữa hai mặt đối đỉnh của chóp được minh họa ở hình 3.

Công thức tính độ cứng Vickers:

$$HV = k\frac{F}{S} = 0{,}102\frac{F}{S} = 0.102\frac{2Fsin^{\theta}/_{2}}{d^2} = 0{,}1891\frac{F}{d^2} \quad (1)$$

Trong đó các thông số được xác định như sau:

HV: chỉ số độ cứng Vickers;

k: hằng số chuyển đổi đơn vị ($k = 1/g_n = 1/9{,}806650 = 0{,}102$);

F: lực tác dụng trong quá trình thử;

S: diện tích bề mặt lõm;

d: chiều dài đường kính trung bình, $d = \frac{d_1 - d_2}{2}$;

θ: góc hợp bởi hai mặt phẳng đối diện = 136^o;

g_n: gia tốc trọng trường.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Kết quả đo độ cứng lớp phủ

Thông số đo độ cứng lớp phủ được trình bày trong bảng 6, các tỷ số tín hiệu trên nhiễu (S/N) được tính toán theo đặc tính chất lượng "lớn-hơn-tốt-hơn". Những giá trị này có giá trị quan trọng khi tối ưu bộ thông số công nghệ để đạt được độ cứng lớp phủ cao nhất.

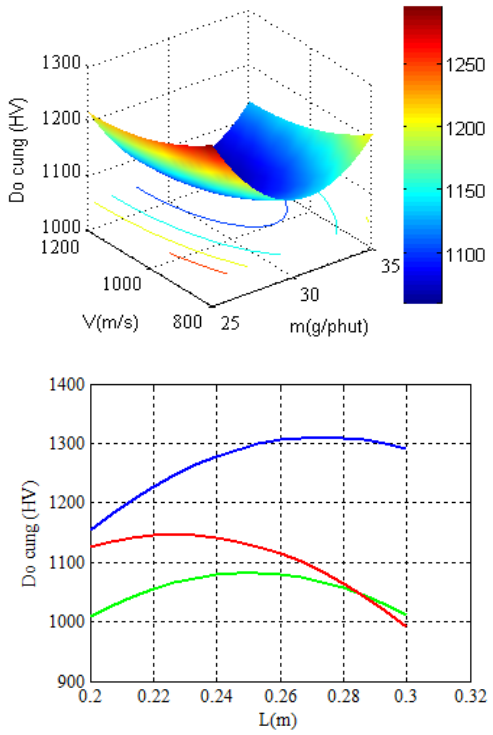
Bảng 6. Kết quả đo độ cứng của lớp phủ WC-12Co trên nền gang xám GX15-32 bằng công nghệ phun HVOF

Số thực nghiệm	Thông số phun			Kết quả	
	L (m)	*M (g/phut)*	*V (m/s)*	*Độ cứng (HV)*	*Tỷ lệ S/N*
1	0.20	25	800	1153,9	61,2434
2	0.20	30	1000	1007,3	60,0632
3	0.20	35	1200	1127,8	61,0446
4	0.25	25	1000	1237,6	61,8516
5	0.25	30	1200	1063,1	60,5315
6	0.25	35	800	1207,2	61,6356
7	0.30	25	1200	1210,7	61,6607
8	0.30	30	800	1071,2	60,5974
9	0.30	35	1000	1010,7	60,0924

Theo số liệu trình bày trong bảng 6, phép đo độ cứng lớp phủ WC-12Co được chế tạo bằng phương pháp HVOF trên nền gang xám GX 15-32 cho thấy độ cứng đo được là 1007,3-1237,6 HV. Trong đó, giá trị cực đại 1237,6 HV đạt được khi áp dụng các thông số kỹ thuật: Khoảng cách phun L=0,25 m, lưu lượng bột m=25g/phút và vận tốc phun V=1000 m/s. Các kết quả này được giải thích do cơ chế hình thành lớp phủ và đặc điểm phân bố của các hạt WC-12Co trên bề mặt vật liệu nền.

Phân tích phương sai (ANOVA) trên các tỷ số S/N được thực hiện nhằm xác định bộ thông số phun tối ưu để đạt độ cứng lớp phủ cao nhất. Kết quả từ bảng 6 cho thấy, tổ hợp thông số tối ưu gồm: Khoảng cách phun L mức 2 (0,25 m), lưu lượng bột m mức 1 (25g/phút) và vận tốc phun V mức 2 (1000 m/s). Bộ thông số này được xác nhận mang lại độ cứng lớp phủ cao nhất trong nghiên cứu.

3.2. Phân tích kết quả và thảo luận



Hình 4. Đồ thị thể hiện tác động của các tham số kỹ thuật đến tính chất cơ học của lớp phủ

Phân tích từ Hình 4 cho phép đánh giá, phân tích tác động của các thông số công nghệ lên độ cứng lớp phủ theo các khía cạnh sau:

Ảnh hưởng của khoảng cách phun (L)

Khi L = 0.20 (m), lớp phủ có độ cứng tương đối thấp, có thể là do khoảng cách phun quá gần dẫn đến hạt chưa nóng chảy hết hoặc bị phản xạ ra khỏi bề mặt nền, làm giảm độ bám dính và đồng nhất trong lớp phủ. Khi L = 0.25 (m), độ cứng đạt giá trị cao nhất (1237,6 HV). Đây là khoảng cách tối ưu giúp hạt phủ có đủ động năng, nhiệt độ và thời gian để bám dính tốt lên nền gang xám. Còn khi L = 0.30 m, độ cứng có xu hướng giảm nhẹ có thể là do khoảng cách xa làm cho nhiệt độ hạt phun giảm khi đến bề mặt nền, dẫn đến giảm tính liên kết giữa các hạt phủ, làm giảm độ cứng.

Ảnh hưởng của lưu lượng cấp bột (m)

Khi m = 25 (g/phút), lớp phủ đạt độ cứng cao nhất, có thể là do lưu lượng bột thấp giúp hạt nóng chảy đồng đều hơn và phân bố tốt trên bề mặt, tạo lớp phủ ít khuyết tật. Khi m = 30 (g/phút), độ cứng có xu hướng giảm (1007,3 (HV) ở L = 0.20 (m)), có thể do lượng bột nhiều hơn mức cần thiết, dẫn đến hiện tượng hạt chưa nóng chảy hoàn toàn hoặc tích tụ hạt gây xốp. Khi m = 35 (g/phút), độ cứng tiếp tục giảm ở một số trường hợp, cho thấy rằng lưu lượng bột quá lớn có thể gây tổn thất vật liệu và mất ổn định quá trình phun.

Ảnh hưởng của thông số Vận tốc hạt phun (V)

Khi V = 800 (m/s), lớp phủ đạt độ cứng trung bình nhưng không phải tối ưu nhất. Vận tốc thấp có thể dẫn đến việc hạt phủ chưa đạt đủ động năng để bám dính tốt lên bề mặt. Khi V = 1000 (m/s), độ cứng đạt giá trị cao nhất (1237,6 HV). Điều này cho thấy với tốc độ này giúp hạt phủ có động năng đủ lớn để bám chặt vào nền mà không bị nứt gãy. Nhưng khi

V = 1200 (m/s), độ cứng lớp phủ có xu hướng giảm, có thể do tốc độ quá cao làm hạt bị phân xạ khi chạm vào bề mặt hoặc tạo ra ứng suất dư lớn, làm lớp phủ dễ bị nứt.

Độ cứng lớp phủ không chỉ phụ thuộc vào từng thông số công nghệ riêng lẻ mà còn chịu ảnh hưởng bởi sự tương tác tổng thể giữa chúng. Bộ thông số tối ưu bao gồm L=0,25 m, m=25 g/phút và V=1000 m/s đã giúp đạt được độ cứng lớp phủ cao nhất nhờ tạo điều kiện tốt nhất cho quá trình phun: Các hạt phủ đạt trạng thái nóng chảy tối ưu, sở hữu đủ động năng cần thiết và phân bố đều trên mặt vật liệu nền. Nếu khoảng cách phun quá gần hoặc quá xa, tốc độ quá cao hoặc quá thấp hoặc lưu lượng bột quá nhiều, chất lượng lớp phủ sẽ bị suy giảm.

Khi đối chiếu với các nghiên cứu đã công bố [6], có thể nhận thấy sự tương đồng về ảnh hưởng đáng kể của khoảng cách phun và tốc độ hạt tới độ cứng lớp phủ WC-12Co. Điều này hoàn toàn phù hợp với kết quả thu được trong nghiên cứu hiện tại, đồng thời kết quả nghiên cứu của [9] cũng cảnh báo rằng việc sử dụng vận tốc phun vượt quá 1200 m/s có thể dẫn đến suy giảm độ bám dính và xuất hiện các vết nứt vi mô - hiện tượng này trùng khớp với xu hướng giảm độ cứng quan sát được khi V = 1200 m/s trong các thí nghiệm của chúng tôi.

4. KẾT LUẬN

- Kết quả nghiên cứu khẳng định độ cứng lớp phủ chịu ảnh hưởng đồng thời bởi cả ba thông số công nghệ chính bao gồm L (khoảng cách phun), m (lưu lượng bột cấp) và V (vận tốc dòng phun), Trong đó, từng thông số đều có vai trò nhất định và ảnh hưởng ở mức độ khác nhau đến tính chất cơ học của lớp phủ sau khi hoàn thiện.
- Khi thực hiện việc phun phủ với các thông số như: L = 0,25 m, m = 25 g/phút, V = 1000 m/s, sẽ cho độ cứng lớp phủ cao nhất 1237,6 (HV).
- Kiểm soát hiệu quả các thông số kỹ thuật trong quy trình phun phủ là yếu tố then chốt để nâng cao cả độ bền lẫn khả năng chịu mài mòn của sản phẩm.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Nguyễn Trọng Hiệp, Cơ sở thiết kế máy, trang 215, Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội, 2004.

[2] 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, Hội nghị Khoa học và Công nghệ Toàn quốc về Cơ khí lần thứ V (VCME 2018), 2018.

[3] Đỗ Ngọc Tú, Giáo trình vật liệu học, trang 213, NXB Thống kê, 2020.

[4] Kim, Y. & Park, Effects of HVOF Parameters on Coating Performance, Materials Science and Engineering, 22(5), 512-523, 2018.

[5] Li et al., Enhancing tribological performance of cemented carbide (WC-12Co) by pulsed magnetic field treatment and magnetofluid, Tribology International, Volume 161, 107086, 2021.

[6] Goyal et al., Surface coatings: Latest developments in the protection of steels from corrosion and erosion, J. Electrochem. Sci. Eng. Volume 12(5), P 815-817, 2022.

[7] Smith, J. et al., High-Velocity Oxy-Fuel Coating: A Review. Journal of Thermal Spray Technology, 29(3), 256-270, 2020.

[8] Rajendran, PR, et al. Optimization of HVOF spraying process parameters to achieve minimum porosity and maximum hardness in WC-10Ni-5Cr coating. 12(3), 339. 2022.

[9] Zhang et al., Experimental study on water droplet erosion resistance of coatings (Ni60 and WC-17Co) sprayed by APS and HVOF, Wear, Volumes 432–433, 202950, 2019.

[10] Taguchi G, Chowdhury S, Wu Y, Taguchi's Quality Engineering Handbook, John Wiley & Sons, ISBN: 978-0-471-41334-9, doi: 10.1002/9780 470258354, 2005.

Thông tin liên hệ: **Dương Hải Nam**

Điện thoại: 0985941969 - Email: dhnam@uneti.edu.vn

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