



NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA LƯU LƯỢNG PHUN, KHOẢNG CÁCH PHUN, TỶ LỆ OXY/ PROPAN ĐẾN ĐỘ CỨNG, ĐỘ BỀN BÁM DÍNH VÀ ĐỘ XÓP CỦA LỚP PHỦ WC-12Co BẰNG PHUN HVOF

Nguyễn Thanh Phú

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Hưng Yên

Ngày tòa soạn nhận được bài báo: 10/02/2020

Ngày phản biện đánh giá và sửa chữa: 20/04/2020

Ngày bài báo được duyệt đăng: 28/05/2020

Tóm tắt:

Trong nghiên cứu này, lớp phủ phun nhiệt HVOF với bột phun WC-12Co trên nền thép 16Mn được thực hiện nhằm nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số phun bao gồm: lưu lượng phun (A), khoảng cách phun (B), tỷ lệ hỗn hợp khí cháy oxy/propan (C). Độ cứng, độ bền bám dính và độ xốp là những tính chất chính của lớp phủ được đánh giá. Thiết kế thực nghiệm Taguchi với mảng L9 cùng với phân tích phương sai được sử dụng để tối ưu hóa các thông số phun và đánh giá mức độ ảnh hưởng của chúng đến từng tính chất lớp phủ. Kết quả của nghiên cứu xác các bộ thông số phun tối ưu: A = 32 gam/phút, B = 0,35m, C = 5 cho độ cứng lớp phủ lớn nhất với 1336,2 HV; A = 32 gam/phút, B = 0,275m, C = 5 cho độ bền bám dính lớn nhất với 67,6 MPa; A = 26 gam/phút, B = 0,35m, C = 6 cho độ xốp lớp phủ nhỏ nhất với 1,36%. Phần trăm ảnh hưởng của các thông số A, B, C tới độ cứng, độ xốp và độ bền bám dính lần lượt là: C (39,4 %) > A (33,5 %) > B (26,2 %); B (38,9 %) > C (31,9 %) > A (28,7 %); B (55,74 %) > C (31,94 %) > A (11,74 %). Kết quả tối ưu giúp cải thiện được tính chất lớp phủ và mức độ ảnh hưởng cho phép điều chỉnh các giá trị thông số phun theo yêu cầu của người sử dụng. Các thí nghiệm kiểm chứng đã xác minh các kết quả tối ưu là đáng tin cậy.

Từ khóa: HVOF, WC-12Co, Tối ưu hóa, Độ cứng, Độ bền bám dính, Độ xốp.

1. Đặt vấn đề

Lớp phủ từ bột WC-12Co là một giải pháp hoàn hảo cho việc chế tạo hoặc phục hồi bề mặt chi tiết làm việc cần độ cứng cao và khả năng chịu mài mòn khô [1]. Độ cứng, độ bền bám dính, độ xốp là những tính chất chính ảnh hưởng đến khả năng chịu mài mòn của lớp phủ WC-12Co. Tuy nhiên, quá trình hình thành lớp phủ WC-12Co cũng như các lớp phủ phun nhiệt khác hầu hết phụ thuộc vào quá trình va đập và ảnh hưởng của nhiệt độ hạt [2]. Phương pháp phun HVOF với ưu điểm cung cấp cho hạt phun với tốc độ cao, thời gian tiếp xúc nhiệt của hạt ngắn sẽ hạn chế việc chuyển biến pha, tăng hiệu suất va đập hình thành lớp phủ. Do vậy lớp phủ HVOF thường có tính chất được cải thiện rõ rệt hơn so với việc thực hiện bằng các phương pháp phun khác như phun Plasma trong không khí, phun hồ quang điện, phun nổ, phun khí cháy, phun nguội [3, 4].

Tuy nhiên, tính chất của lớp phủ bằng phun HVOF phụ thuộc nhiều vào các thông số quá trình,

bởi hầu hết chúng làm thay đổi vận tốc và nhiệt độ hạt phun làm ảnh hưởng đến chất lượng lớp phủ. Do vậy nghiên cứu xác định thông số phun phù hợp và đánh giá ảnh hưởng của các thông số là rất cần thiết. Trên cơ sở đó, quá trình tối ưu hóa được thực hiện cùng với phân tích phương sai để nhằm xác định các bộ thông số phun tối ưu và đánh giá mức độ ảnh hưởng của chúng đến từng tính chất lớp phủ nghiên cứu. Các thông số và số lượng thí nghiệm được sắp xếp theo mảng L9 của Taguchi. Bên cạnh đó, thứ tự ảnh hưởng của các thông số phun cũng là cơ sở để xác định thứ tự ưu tiên điều chỉnh thông số phun đó để đạt được tính chất của lớp phủ mong muốn. Các thực nghiệm kiểm chứng với các thông số phun tối ưu được tiến hành để xem xét độ tin cậy của phương pháp trong trường hợp này.

2. Vật liệu và quá trình thực nghiệm

2.1 Vật liệu nền và lớp phủ

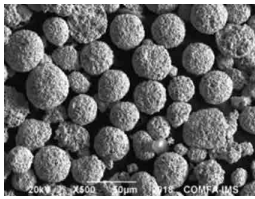
Các mẫu phun từ thép 16Mn dạng tấm phẳng có kích thước 50 x 50 x 6 mm với thành phần hóa

học được thể hiện trong Bảng 1. Bề mặt mẫu phun được làm sạch, phun tạo nhám với giá trị khoảng $8 \div 10 \mu\text{m}$. Quá trình đo được thực hiện trên máy đo độ nhám SurTest của hãng sản xuất Elektrophysik (Đức).

Bột phun WC-12Co là bột thương mại được sử dụng làm nguyên liệu phun được cung cấp bởi tập đoàn Eutectic (Mỹ), với cỡ hạt từ $15 \div 45 \mu\text{m}$ và thành phần các nguyên tố được xác minh như trong Hình 1 để tiến hành thí nghiệm.

Bảng 1. Thành phần hoá học thép 16Mn [5]

Nguyên tố	C	Si	Mn	P
Tỷ lệ %	0,18÷0,2	~0,55	1÷1,6	≤ 0,04
Nguyên tố	S	V	Nb	Ti
Tỷ lệ %	≤ 0,04	0,02÷0,15	0,015÷0,06	0,02÷0,2



Element	(keV)	Mass%	Error%	Atom%	Compound	Mass% Cation	K
C K	0.277	5.45	0.09	37.34			1.6503
O K	0.525	1.62	0.19	8.32			1.3242
S K	2.307	0.07	0.11	0.18			0.0543
Co K	6.924	13.27	0.29	18.53			17.1615
W M	1.774	79.59	0.27	35.62			79.8097
Total		100.00		100.00			

Hình 1. Hình ảnh SEM và phân tích EDX thành phần bột WC-12Co

2.2. Quá trình thực nghiệm

Quá trình phun mẫu được thực hiện trên hệ thống thiết bị phun HVOF với súng phun HP-2700M cùng với bảng điều khiển MP-2100; bộ phận cấp bột phun PF-3350. Chiều dày lớp phủ được thực hiện là 500 μm với sai số $10 \div 50 \mu\text{m}$. Các thông số phun được xác định theo ba mức (Bảng 2) và được sắp xếp theo mảng trực giao L9 theo Taguchi (Bảng 3). Một số thông số phun khác được xác định và trình bày trong Bảng 4.

Bảng 2. Các thông số phun và mức giá trị được sử dụng trong nghiên cứu

Thông số	Ký hiệu	Mức		
		1	2	3
Lưu lượng phun (gam/phút)	A	26	32	38
Khoảng cách phun (m)	B	0,2	0,275	0,35
Tỷ lệ khí cháy	C	4	5	6

Bảng 3. Mảng trực giao L9 với các thông số phun

Thí nghiệm	Thông số phun		
	A	B	C
1	26	0,2	4
2	26	0,275	5
3	26	0,35	6
4	32	0,2	5
5	32	0,275	6
6	32	0,35	4
7	38	0,2	6
8	38	0,275	4
9	38	0,35	5

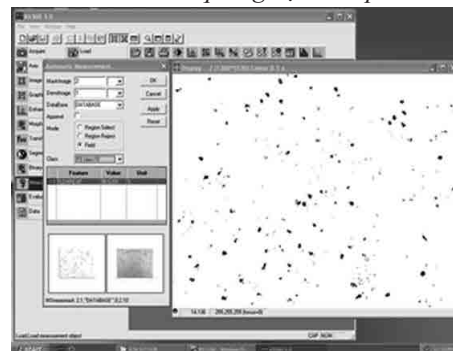
Bảng 4. Các thông số phun khác sử dụng trong nghiên cứu

Thông số	Giá trị
Áp suất propan	0,686 (MPa)
Lưu lượng propan	60 (l/p)
Áp suất khí nén	0,686 (MPa)
Lưu lượng khí nén	550 (l/p)
Áp suất nitơ	0,4 (MPa)
Lưu lượng nitơ	20 (l/p)

2.3. Phương pháp đánh giá kết quả thực nghiệm



a. Kính hiển vi quang học Axioplan 2

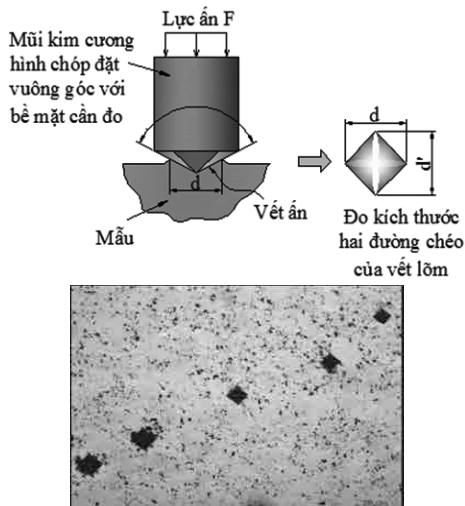


b. Kết quả phép đo độ xấp

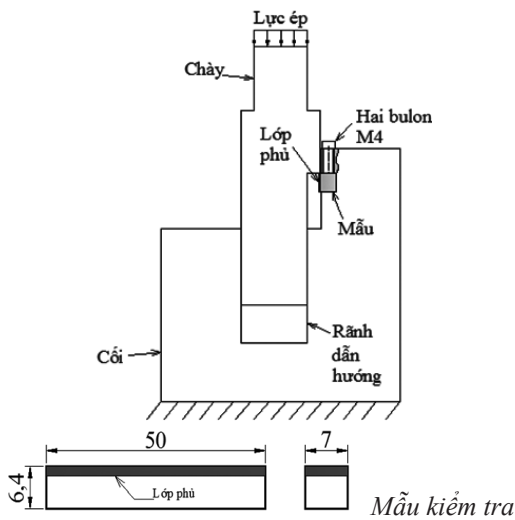
Hình 2. Thiết bị và kết quả đo độ xấp

Độ xấp của lớp phủ được đánh giá dựa trên tiêu chuẩn ASTM B276-05:2015 [6] dùng cho lớp

phủ gốm và các bit. Giá trị độ xốp của mẫu phun được tính là giá trị trung bình của bốn giá trị đo trên bốn ảnh chụp tế vi với độ phóng đại x200 ở bốn vị trí khác nhau. Ảnh chụp tế vi được chụp trên kính hiển vi quang học Axioplan 2-Carl Zeiss (Hình 2. a, b). Phép đo độ cứng tế vi ($HV_{0,1}$) với tải trọng là 100 gam, thời gian nhấn tải là 15 giây trên thiết bị IndentaMet 1106 theo tiêu chuẩn ASTM E384 - 17: 2011 [7]. Giá trị đo độ cứng phủ dựa trên độ sâu, rộng của vết lõm của mũi đâm và là trung bình của 5 kết quả đo tương ứng với 5 vị trí khác nhau trên một mẫu (Hình 3). Độ bền bám dính giữa lớp phủ WC-12Co với kim loại nền được thực hiện theo tiêu chuẩn JIS-H-8666-1980 [8] (Nhật Bản) với nguyên lý thiết kế như Hình 4.



Hình 3. Ảnh nguyên lý đo độ cứng và các vết đo trên một mẫu đo độ cứng

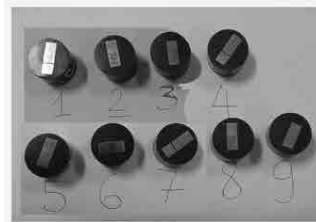


Hình 4. Nguyên lý đo độ bền bám dính lớp phủ và kích thước mẫu đo

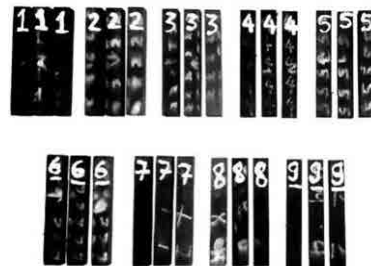
3. Kết quả và bàn luận

3.1 Kết quả thực nghiệm

Mẫu thực nghiệm sau khi được phun tạo lớp phủ sẽ được cắt nhỏ bằng đĩa cắt kim cương với kích thước 15 x 15 x 6,5 mm và tiến hành đúc mẫu bằng nhựa epoxy có đường kính mẫu đúc là 20 mm (Hình 5). Khi nhựa khô, các mẫu được mài, đánh bóng qua các loại giấy giáp SiC qua các cỡ hạt từ 1/100 đến 1/2000 mm và được làm sạch bằng cồn tinh khiết. Mẫu được sấy khô trong tủ gia nhiệt có hút chân không ở nhiệt độ 50°C trong khoảng thời gian 30 phút trước khi tiến hành chụp ảnh tế vi để đo độ xốp lớp phủ và độ cứng tế vi. Các mẫu kiểm tra độ bền bám dính lớp phủ với nền, mẫu phun được mài phẳng để chiều dày lớp phủ đạt 0,4mm rồi được cắt thành các mẫu với kích thước như Hình 6. Thành phần pha của lớp phủ được thực hiện trên phần còn lại của các mẫu sau khi cắt.

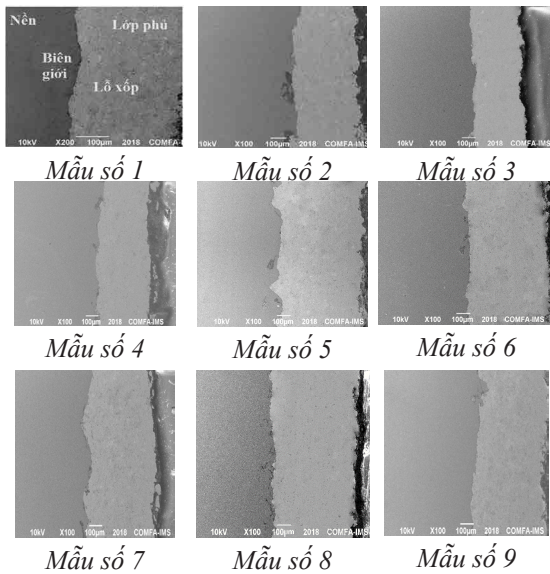


Hình 5. Ảnh chụp chín mẫu đo độ cứng, độ xốp



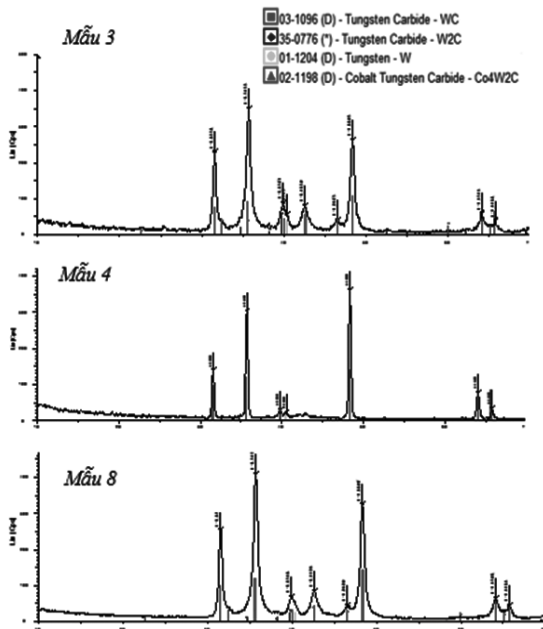
Hình 6. Kích thước mẫu kiểm tra độ bền bám dính lớp phủ

Kết quả đánh giá cấu trúc lớp phủ thông qua ảnh chụp SEM cho thấy lớp phủ WC-12Co có chất lượng tốt khi độ xốp trên các mẫu quan sát là thấp. Độ bền liên kết của lớp phủ với nền cũng như trong lớp phủ là cao bởi độ xốp thấp và rất ít vết nứt (Hình 7). Kết quả phân tích XRD trên Hình 8 cho thấy thành phần WC bị biến đổi một phần thành pha W_2C và Co_4W_2C . Sự biến đổi pha cũng như sự thay đổi các thông số phun làm thay đổi vận tốc, nhiệt độ hạt, trạng thái va đập và hình thành lớp phủ dẫn đến tính chất của các lớp phủ thay đổi.



Hình 7. Ảnh SEM cấu trúc lớp phủ của các mẫu

Từ các kết quả phân tích cấu trúc và thành phần trên cho thấy khoảng thông số nghiên cứu là phù hợp và tác động đáng kể của các thông số phun đến tính chất lớp phủ. Do vậy, các phép đo xác định các tính chất cơ bản của lớp phủ WC-12Co gồm độ cứng, độ xốp, độ bền bám dính được thực hiện làm cơ sở để tối ưu hóa và đánh giá ảnh hưởng của các thông số phun. Kết quả đo trung bình trên các mẫu ứng với mỗi tính chất được xác định và trình bày trong Bảng 5.



Hình 8. Ảnh phân tích (XRD) thành phần pha lớp phủ (các mẫu 3, 4, 8)

Bảng 5. Kết quả đo và giá trị S/N tương ứng

Thí nghiệm	Độ cứng		Độ bền bám dính		Độ xốp	
	Giá trị đo (HV _{0.1})	S/N	Giá trị đo (MPa)	S/N	Giá trị đo (%)	S/N
1	1058,2	60,491	52,1	34,34	3,18	-10,05
2	1166,8	61,340	65,3	36,30	2,16	-6,69
3	1167,3	61,344	61,2	35,74	1,42	-3,05
4	1296,0	61,976	59,5	35,49	2,79	-8,91
5	1180,5	61,441	65,6	36,34	2,14	-6,61
6	1229,8	61,797	58,3	35,31	2,30	-7,24
7	1095,6	60,793	53,8	34,62	2,96	-9,43
8	1018,9	60,162	55,0	34,81	3,37	-10,55
9	1245,4	61,790	57,5	35,19	1,92	-5,67

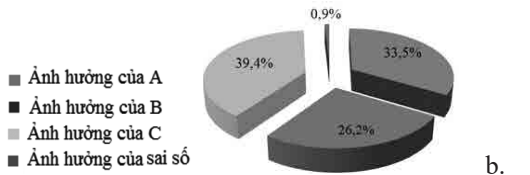
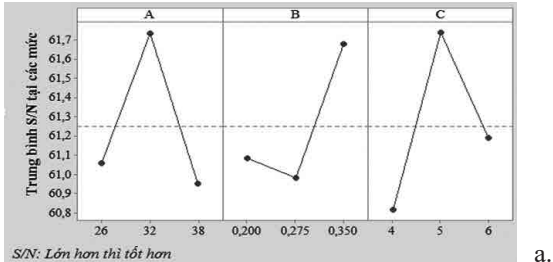
Các kết quả đo nhận được cho thấy sự thay đổi các thông số phun làm ảnh hưởng rõ rệt đến các tính chất lớp phủ, điều này chứng tỏ ảnh hưởng đáng kể của các thông số nghiên cứu đến tính chất lớp phủ. Từ đó, các giá trị S/N tương ứng cho mỗi kết quả thực nghiệm với từng tính chất với đặc trưng chất lượng theo Taguchi: lớn hơn thì tốt hơn cho độ cứng và độ bền bám dính; nhỏ hơn thì tốt hơn cho độ xốp [9]. Các giá trị S/N được xác định và trình bày trong Bảng 5 để làm cơ sở tính toán phân mức ảnh hưởng và xác định bộ thông số tối ưu.

3.2 Tối ưu hóa thông số phun tới độ cứng của lớp phủ

Từ kết quả thực nghiệm và các giá trị S/N trong Bảng 5, tiến hành tính toán phân mức tác động của các thông số phun tới độ cứng lớp phủ và được trình bày trong Bảng 6, biểu đồ Hình 9. a. Kết quả tối ưu xác định mức thông số phun A₂B₃C₂ với A = 32 g/phút, B = 0,35m, C = 5 cho độ cứng lớp phủ lớn nhất và có giá trị dự đoán 1329,6 HV. Phép phân tích phương sai xác định phần trăm ảnh hưởng của các thông số phun dựa trên tổng độ lệch bình phương của các thông số (Bảng 7 và Hình 9. b) với giá trị: C (39,4 %) > A (33,5 %) > B (26,2 %). Giá trị độ tin cậy dựa trên chỉ số P-value đều nhỏ hơn 0,05 chứng tỏ các thông số phun nghiên cứu là các thông số ảnh hưởng chính. Mức độ ảnh hưởng cho phép thứ tự ưu tiên điều chỉnh để các thông số để đạt độ cứng lớp phủ với C > A > B.

Bảng 6. Phân mức tác động của các thông số phun tới độ cứng lớp phủ dựa trên các giá trị S/N.

Mức	Thông số phun		
	A	B	C
1	61,06	61,09	60,82
2	61,74	60,98	61,74
3	60,95	61,68	61,19
Thứ tự ảnh hưởng	2	3	1



Hình 9. Mức tối ưu và % ảnh hưởng của các thông số phun đến độ cứng lớp phủ

Bảng 7. Kết quả phân tích ANOVA cho kết quả độ cứng

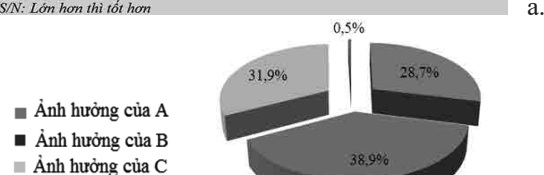
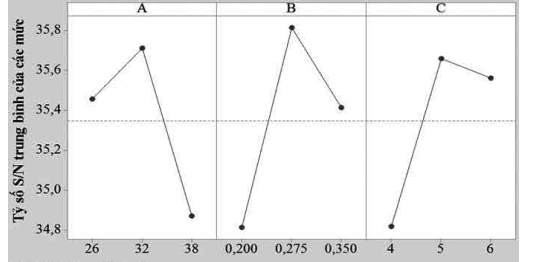
Yếu tố	Bậc tự do	Tổng bình phương các yếu tố	Trung bình bình phương	Trị số P	% ảnh hưởng (%)
A	2	18825,2	9412,6	0,025	33,5
B	2	14731,3	7365,6	0,032	26,2
C	2	22124,4	11062,2	0,022	39,4
Sai số	2	490,4	245,2	--	0,9
Tổng	8	56171,3	--	--	100

3.3 Tối ưu hóa thông số phun tới độ bền bám dính của lớp phủ

Kết quả tối ưu cho độ bền bám dính lớp phủ xác định thông số phun A₂B₂C₂ với A = 32 g/phút, B = 0,275m, C = 5 (Bảng 8 và Hình 10. a) cho độ bền bám dính của lớp phủ với nền lớn nhất và có giá trị dự đoán là 67,6 MPa Phần trăm ảnh hưởng của các thông số phun tới độ bền bám dính được xác định với thứ tự: B (38,9 %) > C (31,9 %) > A (28,7 %) (Bảng 9 và Hình 10. b). Ảnh hưởng của sai số với 0,5% và các trị số P-value của mỗi thông số đều nhỏ hơn 0,05 chứng tỏ độ tin cậy của các thông số và kết quả của nghiên cứu.

Bảng 8. Phân mức tác động của các thông số phun tới độ bền bám dính dựa trên các giá trị S/N

Mức	Thông số phun		
	A	B	C
1	35,46	34,81	34,82
2	35,71	35,81	35,66
3	34,87	35,41	35,56
Thứ tự ảnh hưởng	2	1	3



Hình 10. Mức tối ưu và phần trăm ảnh hưởng của các thông số phun đến độ bền bám dính lớp phủ

Bảng 9. Kết quả phân tích ANOVA kết quả đo độ cứng các mẫu thực nghiệm

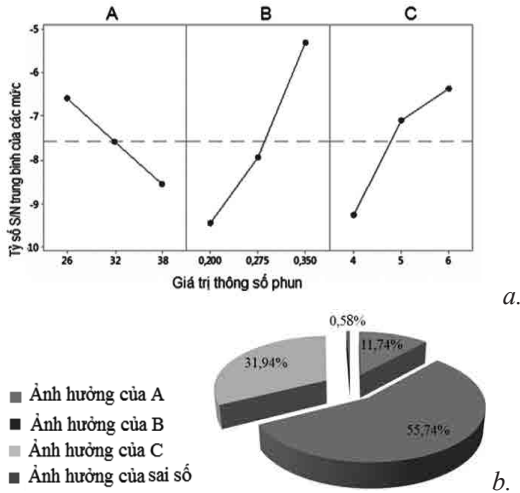
Yếu tố	Bậc tự do	Tổng bình phương	Trung bình bình phương	Trị số P	% ảnh hưởng (%)
A	2	51,860	25,9300	0,017	28,7
B	2	70,447	35,2233	0,012	38,9
C	2	57,727	28,8633	0,015	31,9
Sai số	2	0,887	0,4433	--	0,5
Tổng	8	180,920	--	--	100

3.4. Tối ưu hóa thông số phun tới độ xốp của lớp phủ

Thông số phun tối ưu A₁B₃C₃ với A = 26 gam/phút; B = 0,35 m; C = 6 cho độ xốp nhỏ nhất dự đoán là 1,43% (Hình 11. a và Bảng 10). Kết quả phân tích phương sai xác định phần trăm ảnh hưởng của các thông số phun với thứ tự ảnh hưởng: B (55,74 %) > C (31,94 %) > M (11,74%). Các thông số phun được xác định là các thông số ảnh hưởng chính đến độ xốp lớp phủ, kết quả phân tích là hòa toàn có ý nghĩa dựa trên việc xác giá trị ảnh hưởng của sai số và chỉ số P-value bằng (Bảng 11 và Hình 11. b).

Bảng 10. Giá trị S/N trung bình của các mức thông số phun tới độ xốp lớp phủ

Mức	Thông số phun		
	A	B	C
1	-6,594	-9,462	-9,279
2	-7,585	-7,950	-7,089
3	-8,548	-5,315	-6,360
Thứ tự ảnh hưởng	3	1	2



Hình 11. Mức tối ưu và % ảnh hưởng của các thông số phun đến độ bền bám dính của lớp phủ

Bảng 11. Kết quả phân tích ANOVA kết quả đo độ cứng các mẫu thực nghiệm

Yếu tố	Bậc tự do	Tổng bình phương	Trung bình bình phương	Trị số P	% ảnh hưởng
A	2	0,38682	0,193411	0,047	11,74
B	2	1,83696	0,918478	0,010	55,74
C	2	1,05242	0,526211	0,018	31,94
Sai số	2	0,01929	0,009644	--	0,58
Tổng	8	3,29549	--	--	100

3.5. Thực nghiệm kiểm chứng các kết quả tối ưu

Để xác minh độ tin cậy của những kết quả tối ưu, các thí nghiệm kiểm chứng được thực hiện dựa trên các thông số phun đã xác định. Kết quả tối ưu và các giá trị đo trên các mẫu kiểm chứng được trình bày trong Bảng 12. Trên cơ sở các kết quả nhận được đánh giá sai số giữa kết quả đo và kết quả dự đoán cho thấy: Sai lệch giữa kết quả đo và dự đoán của các tính chất là không đáng kể và đều nhỏ với 0,5% cho độ cứng 1,63% cho độ bền

bám dính, -1,5% cho độ xốp (Bảng 12). Các kết quả kiểm chứng đã xác định phương pháp tối ưu hóa nhiều thông số đến tính chất lớp phủ đã thực hiện cho độ tin cậy và hiệu quả cao, mặc dù các tính chất lớp phủ WC-12Co bằng phun HVOF đều có giá trị tốt, song việc tối ưu hóa đã cải thiện được đáng kể các tính chất lớp phủ nhận được.

Bảng 12. Bảng so sánh các kết quả thực nghiệm kiểm chứng với kết quả dự đoán tối ưu theo Taguchi

Tính chất lớp phủ	Kết quả tối ưu			Giá trị đo	Sai số (%)
	A ₂ B ₃ C ₂	A ₂ B ₂ C ₂	A ₁ B ₃ C ₃		
Độ cứng (HV)	1336,2	--	--	1329,6	-0,5
Độ bền bám dính (MPa)	--	67,6	--	66,5	-1,63
Độ xốp (%)	--	--	1,36	1,42	+4,41

4. Kết luận

Trong nghiên cứu này, các thông số phun nghiên cứu bao gồm lưu lượng phun (A), khoảng cách phun (B), tỷ lệ oxy/propan (C) được tối ưu và đánh giá ảnh hưởng của chúng nhằm cải thiện độ cứng, độ bền bám dính và độ xốp lớp của phủ lớp phủ WC-12Co. Phương pháp Taguchi kết hợp với phân tích phương sai ANOVA là các công cụ được sử dụng để thực hiện quá trình. Kết quả xác định các bộ thông số phun với: A = 32 gam/phút, B = 0,35 m, C = 5 cho lớp phủ có độ cứng lớn nhất với 1336,2 HV; A = 32 gam/phút, B = 0,275 m, C = 5 cho lớp phủ có độ bền bám dính lớn nhất với 67,6 MPa; A = 26 gam/phút, B = 0,35m, C = 6 cho lớp phủ có độ xốp nhỏ nhất với 1,36%. Phần trăm ảnh hưởng của các thông số phun tới lần lượt độ cứng, độ bền bám dính và độ xốp được xác định: C (39,4 %) > A (33,5 %) > B (26,2 %); B (38,9 %) > C (31,9 %) > A (28,7 %); B (55,74 %) > C (31,94 %) > A (11,74 %). Kết quả của các thí nghiệm kiểm chứng tương đồng với kết quả dự đoán với sai lệch dưới 5% chứng tỏ kết quả tối ưu là đáng tin cậy. Phương pháp Taguchi đã được cung cấp một giải pháp đơn giản và hiệu quả để cải thiện tính chất lớp phủ từ các thông số ảnh hưởng.

Tài liệu tham khảo

- [1]. Guilemany J.M, Miguel J.M, Vizcaino S, Climent F, Role of three-body abrasion wear in the sliding wear behaviour of WC-Co coatings obtained by thermal spraying. *Surface and Coatings Technology*, vol 140, pp. 1410-146, 2001.
- [2]. Đinh Văn Chiến, Đinh Bá Trụ, *Kỹ thuật phun nhiệt tốc độ cao*, Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật, 2014.
- [3]. Amin S, Panchal H, A Review on Thermal Spray Coating Processes. *International Journal of Current Trends in Engineering & Research*, vol 2(4), pp. 556-563, 2016.
- [4]. Brendt C.C, Lenling W.J, Thermal Spray Processes - Handbook of Thermal Spray Technology, *ASM International*, 2004.
- [5]. TCVN-3104 (1979), Tiêu chuẩn thép hợp kim thấp cường độ cao, <https://van banphapluat.co/tieu-chuan-viet-nam-tecvn-3104-1979-ve-thep-ket-cau-hop-ki-m-thap-mac-yeu-cau-k>.
- [6]. ASTM B276-05, Standard Test Method for Apparent Porosity in Cement-ed Carbides, *ASTM International*, 2015, West Conshohocken, www.astm.org
- [7]. ASTM-E384-17, Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials, *ASTM International*, 2017.
- [8]. JIS-H-8664, *Test methods for build-up thermal spraying*, Japan, 1980.
- [9]. Taguchi G, Chowdhury S, Wu Y, *Taguchi's Quality Engineering Handbook*, John Wiley & Sons, 2005, ISBN: 978-0-471-41334-9, doi: 10.1002/9780 4702583545.

**STUDY ON EFFECT OF POWDER FEED RATE, SPRAY DISTANCE, OXYGEN/
PROPANE RATIO ON HARDNESS, ADHESION STRENGTH AND POROSITY OF WC-12Co
COATING BY HVOF SPRAY**

Abstract:

In this study, WC-12Co powder was deposited on 16Mn steel to study the effect of spray parameters including oxygen/propane ratios, powder feed rates and spray distance on coating properties such as hardness, adhesion strength and porosity. Taguchi's experimental design with L9 array and analysis of variance were used to optimize spray parameters and evaluate their influence to each coating property. Results show that the optimal spray parameters were determined with: $A = 32 \text{ g.min}^{-1}$, $B = 0,35 \text{ m}$, $C = 5$ for maximum coating hardness at 1336,2 HV; $A = 32 \text{ g.min}^{-1}$, $B = 0,275 \text{ m}$, $C = 5$ for maximum coating adhesion strength at 67,6 MPa; $A = 26 \text{ g.min}^{-1}$, $B = 0,35 \text{ m}$, $C = 6$ for minimum porosity at 1,36%. The effect percentage of parameters m , n , S on hardness, porosity and adhesion is: $C (39,4 \%) > A (33,5 \%) > B (26,2 \%)$; $B (38,9 \%) > C (31,9 \%) > A (28,7 \%)$; $B (55,74 \%) > C (31,94 \%) > A (11,74 \%)$ respectively. One can be said that obtained results help to improve the coating properties and adjust spray parameters values according to user requirements based on percentage of impact that have been determined. Moreover, verified experiments prove that presented results are reliable.

Keywords: HVOF, WC-12Co, Optimization, Hardness, Adhesion strength, Porosity.