

Tối ưu hóa các thông số quá trình phun HVOF để nâng cao độ bám dính của lớp phủ WC-12Co

Optimizing HVOF spray process parameters to improve adhesion of WC-12Co coatings

Nguyễn Thanh Phú^{1,3*}, Đinh Văn Chiến², Đào Duy Trung³,
Đoàn Thanh Hòa¹, Phạm Văn Liệu⁴, Nguyễn Chí Bảo⁴

¹Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Hưng Yên

²Trường Đại học Mỏ - Địa chất

³Viện Nghiên cứu cơ khí - Bộ Công Thương

⁴Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

* Email: thanhphuhk3@gmail.com

Mobile: 0978842268

Tóm tắt

Từ khóa:

HVOF; Tối ưu hóa;
Phương pháp Taguchi;
Phân tích phương sai;
WC-12Co; Độ bám
dính.

Độ bám dính của lớp phủ phun nhiệt có vai trò quyết định đến tuổi thọ làm việc của chi tiết trong điều kiện chịu mài mòn. Ngoài các yếu tố liên quan đến tính chất vật liệu thì thông số quá trình phun ảnh hưởng rất lớn đến khả năng bám dính của lớp phủ với kim loại nền. Bài báo này trình bày kết quả nghiên cứu tối ưu hóa các thông số phun HVOF (High velocity oxy fuel) bao gồm: lưu lượng phun (A), khoảng cách phun (B), tỷ lệ hỗn hợp khí cháy giữa Oxygen và Propane (C) đến độ bám dính của lớp phủ lớp phủ WC-12Co trên nền thép 16Mn bằng phương pháp Taguchi và kỹ thuật ANOVA (Analysis of variance). Kết quả cho thấy, với thông số A = 32 gam/phút, B = 0,275 m, C = 5 cho lớp phủ có độ bám dính lớn nhất và mức độ ảnh hưởng của các yếu tố đến độ bám dính lần lượt là B > C > A. Kết quả thí nghiệm kiểm chứng sau đó được so sánh với giá trị tối ưu và cho kết quả sai số là 0,5%. Như vậy, có thể khẳng định rằng kết quả tối ưu là đáng tin cậy. Ngoài ra, hàm hồi quy toán học thể hiện mối quan hệ giữa độ bám dính và các thông số phun đã được tìm ra, nó cho phép dự đoán giá trị độ bám dính dựa trên thông số phun.

Abstract

Keywords:

High velocity oxy fuel
(HVOF);
Optimization; Taguchi
method; ANOVA;
WC-12Co; Adhesion.

Adhesion of heat-treated coatings has significantly role on the longevity of components that works in wear - resistance conditions. Beside the factors related to material properties, the spraying parameters greatly affect the adhesion of the coating to the base metal. This paper aims to find optimal parameters of HVOF (High velocity oxy fuel) process including spray distance (A), injection distance (B), rate of combustion mixture between Oxygen and Propane (C) to the adhesion of WC-12Co coating on 16Mn steel by Taguchi method. ANOVA (Analysis of variance) is applied to evaluate the effect of the spray parameters on the adhesion. Results indicate that with A = 32 g/min, B = 0.275 m, C = 5, the adhesion can be achieved highest value and the order of influence of the factors on adhesion is B > C > A. The experimental result is then compared to optimal results and the error is only 0.5%. Hence, one can say that the optimal results are reliable. In addition, a mathematical regression which shows the relationship between the adhesion and spray parameters is found; it allows to predict adhesion values based on spray parameters.

Ngày nhận bài: 21/7/2018

Ngày nhận bài sửa: 14/9/2018

Ngày chấp nhận đăng: 15/9/2018

1. GIỚI THIỆU

Độ bám dính thấp là nguyên nhân chủ yếu dẫn đến hiện tượng bong, tróc lớp phủ phun nhiệt ra khỏi chi tiết nền trong quá trình làm việc. Bởi vậy, việc nâng cao khả năng bám dính của lớp phủ phun nhiệt là một nhu cầu rất cần thiết. Mặc dù HVOF là phương pháp phun nhiệt với nhiều ưu điểm như độ xốp thấp, độ bám dính cũng như độ cứng cao hơn với vật liệu tương ứng so với các phương pháp phun thông dụng khác như: Plasma; Hồ quang điện; Phun khí cháy [1]. Tuy nhiên, để có được chất lượng lớp phủ với độ bám dính cao là rất khó khăn, bởi tính chất của lớp phủ HVOF phụ thuộc rất nhiều vào các thông số quá trình phun [2]. Dựa trên nghiên cứu [3] chỉ ra rằng lưu lượng phun (A), khoảng cách phun (B) tỷ lệ hỗn hợp khí Oxygen/ Propane (C) là các thông số ảnh hưởng chính đến chất lượng lớp phủ HVOF.

Trong những năm gần đây, nhiều ứng dụng của phương pháp Taguchi trong việc tối ưu các thông số phun HVOF đã được báo cáo. Ayyappan Susila Praveen và các cộng sự [4] đã sử dụng phương pháp Taguchi để tối ưu hóa các thông số phun và đã xác định được thứ tự, mức độ ảnh hưởng của chúng: khoảng cách phun > lưu lượng phun > lưu lượng Oxy > lưu lượng khí cháy đến khả năng chịu xói mòn của lớp phủ NiCrSiB/WC-Co. W. Lih và cộng sự [5] đã nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số quá trình HVOF lên tốc độ hạt nóng chảy và nhiệt độ bề mặt, và các đặc tính của lớp phủ CrC/20NiCr dựa trên thiết kế thực nghiệm L9 của Taguchi. Kết quả đã thấy rằng khoảng cách và tốc độ dòng Oxy là các yếu tố chính ảnh hưởng đến tốc độ hạt. Thiết kế thực nghiệm L9 đã được W. Fang và cộng sự [6] sử dụng để nghiên cứu ảnh hưởng của tốc độ dòng oxy, tốc độ dòng khí Hydro, tỷ lệ cấp bột, khoảng cách phun tới độ cứng của lớp phủ WC-CrC-Ni HVOF và xác định tốc độ dòng oxy là thông số ảnh hưởng cao nhất. O. Maranhó và cộng sự [7] đã nghiên cứu mối tương quan của các thông số phun HVOF tới độ xốp và độ cứng của lớp phủ trên nền gang trắng và kết luận rằng phạm vi kích thước hạt, khoảng cách phun, tỷ lệ Oxygen và Propane ảnh hưởng đáng kể trong việc xác định các đặc tính của lớp phủ. S. Hong và cộng sự [8] tối ưu hóa các thông số phun HVOF tới lớp phủ WC-10Co-4Cr HVOF để đạt được độ cứng cao hơn và thấy rằng tốc độ dòng nhiên liệu lỏng là thông số quan trọng, tiếp theo là tốc độ dòng Oxygen và khoảng cách phun...

Trên cơ sở các công trình đã được công bố có thể thấy lớp phủ WC-12Co là một trong những vật liệu phủ rất được ưa chuộng, bởi đây là lớp phủ với thành phần WC cao tạo nên khả năng chống mài mòn cao và chịu nhiệt độ (< 500⁰C) tốt cho lớp phủ. Việc tối ưu hóa các thông số phun đến độ bám dính lớp phủ WC-12Co vẫn còn hạn chế và chưa có nghiên cứu nào được công bố. Bởi vậy, nghiên cứu này đã sử dụng phương pháp Taguchi, kỹ thuật ANOVA [9] dựa trên phần mềm MINITAB phiên bản 17 để tiến hành tối ưu hóa các thông số phun (A, B, C) và đánh giá mức độ ảnh hưởng của chúng đến độ bám dính của lớp phủ WC-12Co trên nền vật liệu 16Mn [10].

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT/ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

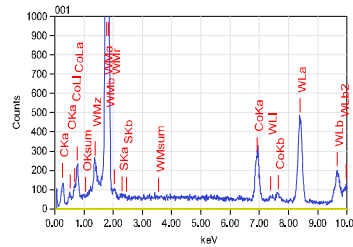
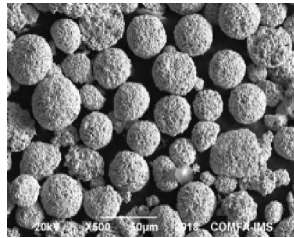
2.1. Vật liệu nền và lớp phủ

Các mẫu phun sử dụng trong thí nghiệm là các mẫu thép tấm với kích thước 50 x 50 x 6 mm được phun tạo nhám bề mặt cần phủ với giá trị từ 8 ÷ 10 μm . Quá trình phun tạo nhám được thực hiện trên máy phun cát TSA của Việt Nam và được đo bằng đầu đo nhám Mitutoyo 178 - 954 - 4E (Nhật Bản). Vật liệu chế tạo mẫu phun được lựa chọn là thép 16Mn với thành phần hóa học được thể hiện trong Bảng 1.

Bảng 1. Thành phần hoá học thép 16Mn.

Thành phần hóa học	C	Si	Mn	P	S	V	Nb	Ti
Tỷ lệ % nguyên tố	0,2	0,55	1÷1,6	≤ 0,04	≤ 0,04	0,02÷0,15	0,015÷0,06	0,02÷0,2

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 15µm đến 45µm được xác minh và thể hiện trong hình 1 để tiến hành thí nghiệm.



a. Hình ảnh SEM của bột

b. Phân tích thành phần hóa học của bột

Hình 1. Hình dạng của hạt và thành phần hóa học bột phun WC - 12Co

2.2. Quá trình phun nhiệt HVOF

Quá trình phun mẫu được thực hiện trên hệ thống phun HVOF General Metal Alloys - Beglum bao gồm: Bảng điều khiển MP - 2100; Súng phun HP - 2700M; Bộ phận cấp bột phun PF - 3350. Chiều dày lớp phủ được thực hiện là 500µm với độ sai lệch từ 10 - 50 µm. Các thông số phun được xác định theo ba mức (Bảng 2) và được sắp xếp theo mảng trực giao L9 của Taguchi (Bảng 4). Một số thông số phun khác được xác định qua các nghiên cứu tương tự và các giá trị được nhà sản xuất khuyến cáo [11] (Bảng 3).

Bảng 2. Các thông số nghiên cứu và các mức sử dụng trong nghiên cứu

Thông số phun	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 số Oxygen/ Propane	C	4	5	6

Bảng 3. Các thông số phun khác sử dụng trong nghiên cứu

Thông số phun	Áp suất Propane (MPa)	Lưu lượng Propane lít/phút (l/p)	Áp suất khí nén (MPa)	Lưu lượng khí nén (l/p)	Áp suất Nitrogen	Lưu lượng nitrogen (l/p)
Giá trị	0,686	60	0,686	550	0,4	20

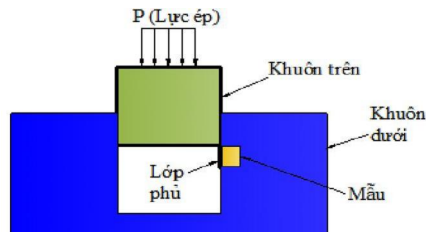
2.3. Phương pháp kiểm tra

Các phép đo xác định độ bền bám dính lớp phủ bằng phương pháp bám trượt được thực hiện theo tiêu chuẩn JIS-H-8666-1980 [12] với sơ đồ nguyên lý như Hình 2.

Trong phương pháp này, lớp phủ (có diện tích tiết diện bề mặt - S) được làm bong tách bởi lực ép (P) tác động lên phần chiều dày lớp phủ theo phương vuông góc (Hình 2). Ứng suất bám dính (σ_{bd}) được tính bằng công thức:

$$\sigma_{bd} = \frac{P}{S} \quad (1)$$

Để đảm bảo được kết quả đo đạt độ chính xác thì mẫu phải được chế tạo chính xác, đảm bảo độ vuông góc và được kẹp chặt. Lực ép không tác dụng lên phần vật liệu nền. Trên cơ sở đó, tiến hành chế tạo mẫu và khuôn để kiểm tra mức độ bám dính của lớp phủ theo nguyên lý trong Hình 2. Máy kéo nén MTS 809 được sử dụng để tạo lực ép P trong quá trình thực nghiệm.



Hình 2. Sơ đồ nguyên lý kiểm tra độ bám dính trên mẫu tấm phẳng

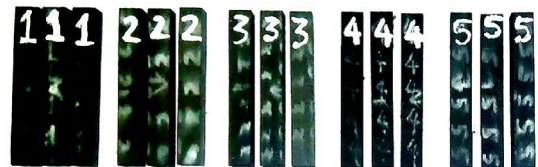
3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Kết quả thực nghiệm

Hình 3 (a, b) là ảnh chụp của chín mẫu thử trước và sau khi phun thực nghiệm theo đúng thứ tự của mảng trực giao L9 (Bảng 3). Các mẫu được chuẩn bị và được phun theo đúng trình tự theo thiết kế thực nghiệm và được cắt mẫu như Hình 3 (c) để kiểm tra bám dính.



a. Hình ảnh mẫu trước khi phun



b. Hình ảnh mẫu sau khi phun



c. Ảnh mẫu kiểm tra bám dính

Hình 3. Ảnh mẫu trước - sau khi phun và mẫu kiểm tra bám dính

Độ bám dính lớp phủ của mẫu là giá trị trung bình của ba lần đo trên ba mẫu thử được cắt ra từ mẫu đó và được trình bày trong (Bảng 4).

Kết quả từ Bảng 4 cho thấy, mức thông số phun $A_1B_2C_2$ tương ứng với $A = 26$ gam/phút, $B = 0,275$ m, $C = 5$ cho lớp phủ có độ bám dính lớn nhất là 66,39 MPa. Sự thay đổi các thông số phun làm ảnh hưởng rõ rệt đến các giá trị đo. Chứng tỏ lưu lượng phun, khoảng cách phun, tỷ lệ Oxygen/ Propane là các thông số có ảnh hưởng lớn đến độ bám dính lớp phủ và việc lựa chọn chúng để nghiên cứu là hoàn toàn phù hợp.

Bảng 4. Thông số thực nghiệm theo mảng L9 và kết quả đo độ bám dính trung bình của các mẫu thí nghiệm

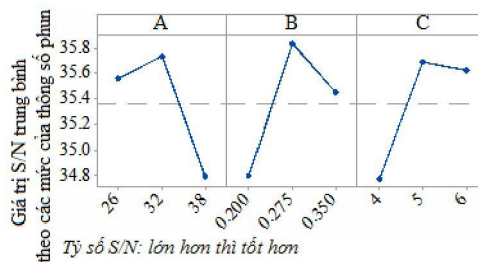
Thí nghiệm	Thông số			Độ bám dính (MPa)
	A	B	C	
1	26	0,2	4	52,11
2	26	0,275	5	66,39
3	26	0,35	6	62,50
4	32	0,2	5	59,53
5	32	0,275	6	66,13
6	32	0,35	4	58,30
7	38	0,2	6	53,45
8	38	0,275	4	54,15
9	38	0,35	5	57,17

3.2. Phân tích tỉ số tín hiệu trên nhiễu (S/N)

Độ bám dính lớp phủ được nâng cao giúp lớp phủ cải thiện độ bền trong quá trình làm việc, đặc biệt với các lớp phủ chịu mài mòn, va đập,... Do đó, tỷ lệ S/N theo Taguchi với đặc tính lớn hơn thì tốt hơn được sử dụng để tính toán dựa trên mỗi kết quả thí nghiệm bằng phần mềm Minitab và được trình bày trong Bảng 5. Mức tác động trung bình của mỗi yếu tố trên các mức giá trị khác nhau cũng được tính toán dựa trên giá trị S/N và được minh họa trên biểu đồ phân mức (Hình 4). Mức tối ưu của từng thông số là mức có giá trị S/N trung bình thông số đó cao nhất. Các đường biểu diễn trong biểu đồ Hình 4 thể hiện sự thay đổi tác động của các yếu tố ảnh hưởng đến độ bám dính lớp phủ và chỉ ra rằng mức thông số phun tối ưu được dự đoán là A₂B₂C₂ (A = 32 gam/phút, B = 0,275 m, C = 5) với giá trị độ bám dính cao được dự đoán là 66,9 MPa. Điều này chứng minh rằng phương pháp tối ưu được đề xuất trong nghiên cứu có hiệu quả cao.

Bảng 5. Giá trị S/N tương ứng với mỗi thí nghiệm

Thí nghiệm	Thông số			Độ bám dính	$S/N = -10 \log\left(\frac{1}{n} \sum \frac{1}{y_i^2}\right)$
	A	B	C		
1	26	0,2	4	52,11	34,34
2	26	0,275	5	66,39	36,44
3	26	0,35	6	62,50	34,40
4	32	0,2	5	59,53	35,50
5	32	0,275	6	66,13	36,41
6	32	0,35	4	58,30	35,31
7	38	0,2	6	53,45	34,56
8	38	0,275	4	54,15	34,67
9	38	0,35	5	57,17	35,14



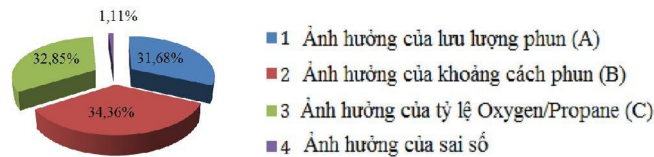
Hình 4. Phân mức tác động của các thông số A, B, C dựa trên tỷ số S/N tới độ bám dính lớp phủ

3.3. Phân tích ANOVA

Để xác định mức độ ảnh hưởng của các thông số (A, B, C) tới độ bám dính lớp phủ, phân tích phương sai dựa trên kết quả thí nghiệm và giá trị S/N trong Bảng 5 dựa trên phần mềm Minitab thu được kết quả thể hiện trong Bảng 6. Kết quả cho thấy, giá trị của sai số nhỏ chứng minh rằng các thông số phun đã nghiên cứu đều là các thông số phun chính ảnh hưởng đến độ bám dính lớp phủ và chúng đều có ý nghĩa thống kê với độ tin cậy cao bởi giá trị $P < 0,05$. Phần trăm ảnh hưởng của các yếu tố dựa trên giá trị SS ở Bảng 6 chỉ ra rằng: Khoảng cách phun là yếu tố ảnh hưởng lớn nhất đến độ bám dính lớp phủ với 34,36%, tỷ lệ Oxygen/ Propane là 32,85%, lưu lượng phun là 31,68% và được minh họa qua biểu đồ Hình 5.

Bảng 6. Kết quả phân tích ANOVA dựa trên tỷ số S/N

Yếu tố	Bậc tự do f	Tổng bình phương độ lệch - SS	Trung bình bình phương -	Giá trị thống kê Fisher - F	Giá trị xác suất P
A	2	66,459	33,229	28,64	0,034
B	2	72,080	36,040	31,06	0,031
C	2	68,923	34,462	29,70	0,033
Sai số	2	2,321	1,160		
Tổng	8	209,783			



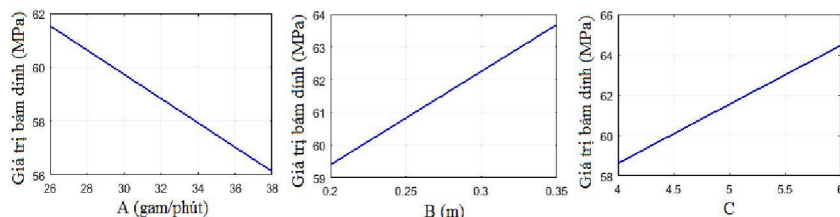
Hình 5. Phần trăm ảnh hưởng của các thông số A, B, C đến độ bám dính lớp phủ.

3.4. Xây dựng hàm toán học thể hiện mối quan hệ giữa độ bám dính với các thông số phun

Để phân tích xu hướng ảnh hưởng của các thông số A, B, C tới độ bám dính lớp phủ (σ_{bd}), hàm hồi quy biểu diễn quan hệ toán học giữa σ_{bd} với các thông số phun A, B, C dưới dạng tuyến tính được xây dựng. Công cụ hỗ trợ xây dựng hàm hồi quy dạng tuyến tính trên phần mềm Minitab được sử dụng giúp cho quá trình tính toán nhanh chóng và chính xác. Kết quả thu được là hàm toán học (2):

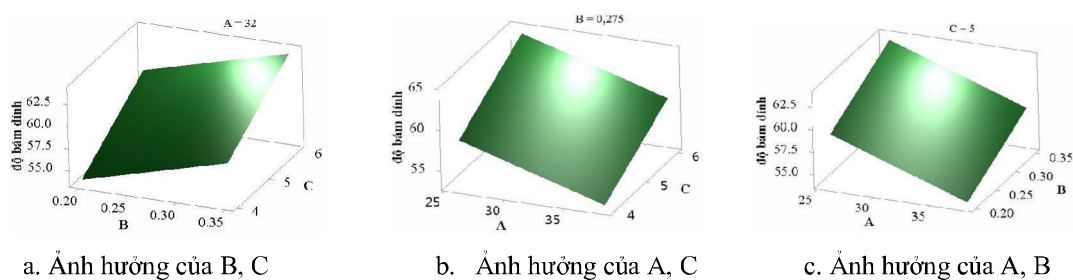
$$\sigma_{bd} = 50,8 - 0,451A + 28,6B + 2,92C \quad (2)$$

Dựa trên mức thông số phun tối ưu được xác định là $A_2B_2C_2$, kết hợp với phương trình hồi quy (2) xác định được ảnh hưởng của từng thông số phun tới độ bám dính lớp phủ qua đồ thị Hình 6 và Hình 7.



a. Ảnh hưởng của A b. Ảnh hưởng của B c. Ảnh hưởng của C

Hình 6. Đồ thị sự phụ thuộc của độ bám dính vào từng thông số phun ở mức tối ưu dạng tuyến tính 2D



Hình 7. Đồ thị sự phụ thuộc của độ bám dính vào từng thông số phun ở mức tối ưu dạng tuyến tính 3D

Dựa vào đồ thị biểu thị sự phụ thuộc của độ bám dính vào các thông số phun và phương trình hồi quy (2) cho thấy độ bám dính tỷ lệ nghịch với A và tỷ lệ thuận với B, C và (Hình 6. a, b, c). Điều đó có nghĩa: khi tăng A thì độ bám dính sẽ giảm, khi tăng B, C thì độ bám dính sẽ tăng và ngược lại. Từ biểu đồ Hình 7 chỉ ra rằng: khi giữ nguyên A ở mức tối ưu thì độ bám dính sẽ tăng nếu tăng B và tăng C (Hình 7. a); Khi giữ B ở mức tối ưu thì độ bám dính sẽ tăng nếu giảm A và tăng C (Hình 7. b); Khi giữ nguyên C ở mức tối ưu thì độ bám dính sẽ tăng nếu giảm A và tăng B (Hình 7. c) và ngược lại.

3.5. Thí nghiệm kiểm chứng

Để xác minh các thông số quá trình phun được tối ưu hóa, thí nghiệm kiểm chứng với mức tối ưu $A_2B_2C_2$ được thực hiện. Kết quả đo trên mẫu kiểm chứng và giá trị dự đoán tối ưu được trình bày trong Bảng 7 cho thấy độ bám dính trên mẫu kiểm chứng lớn hơn các giá trị từ thí nghiệm ban đầu và nhỏ hơn giá trị tối ưu dự đoán với độ sai lệch là 0,5%. Sai số giữa tính toán lý thuyết và thực nghiệm là vấn đề được dự báo trước. Tuy nhiên, mức sai lệch với giá trị nhỏ đã chứng tỏ kết quả của bài toán tối ưu là tin cậy.

Bảng 7. So sánh kết quả của thí nghiệm kiểm chứng với kết quả tối ưu

Thông số	Tốt nhất từ thí nghiệm	Tối ưu	Kiểm chứng	Sai lệch giữa giá trị kiểm chứng - Tối ưu (%)
Mức	$A_1B_2C_2$	$A_2B_2C_2$	$A_2B_2C_2$	-
Giá trị	66,39	66,9	66,58	0,5%

4. KẾT LUẬN

Trong nghiên cứu này, phương pháp Taguchi - Kỹ thuật ANOVA được sử dụng để tối ưu hóa và nghiên cứu sự ảnh hưởng của các thông số phun bao gồm lưu lượng phun (A), khoảng cách phun (B) và tỷ lệ Oxygen/ Propane (C) đến độ bám dính của lớp phủ WC-12Co trên nền thép 16Mn bằng phương pháp phun HVOF. Quá trình tối ưu bởi phương pháp Taguchi đã đề xuất chế độ phun tối ưu ($A = 32$ gam/phút, $B = 0,275$ m, $C = 5$) cho lớp phủ có độ bám dính lớn nhất dự đoán là 66,9 MPa. Kết quả phân tích ANOVA cho thấy thứ tự ảnh hưởng của các thông số đến độ bám dính là: Khoảng cách phun (34,36%) > tỷ lệ Oxygen/ Propane (32,85%) > lưu lượng phun (31,68%). Thí nghiệm kiểm chứng với độ bám dính thu được là 66,58 MPa lớn hơn các giá trị độ bám dính của các mẫu thực nghiệm (Bảng 4) và có độ sai lệch 0,5 % so với kết quả dự đoán. Điều đó khẳng định thông số tối ưu cho lớp phủ có chất lượng tốt với độ bám dính được nâng cao. Sự kết hợp giữa phương pháp Taguchi - ANOVA là một công cụ hiệu quả cho các ứng dụng tối ưu hóa các bài toán có nhiều yếu tố ảnh hưởng.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trung tâm Nghiên cứu Ứng dụng Khoa học và Công nghệ, Trường Đại học Sư phạm kỹ thuật Hưng Yên, đề tài mã số UTEHY.T031.P1819.04

DANH MỤC DANH PHÁP/KÝ HIỆU

S/N	: Tín hiệu trên nhiễu (Signal to noise)
n	: Số thí nghiệm
y_i	: Giá trị đo ở thí nghiệm thứ i
σ_{bd}	: Độ bám dính

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Friedrich-Wilhelm, Andreas Laarmann and, Dipling, Thomas Wenz, Chapter 1. Selecting Surface-treatment Technologies, *Modern Surface Technology*, 2006.
- [2]. J. Stokes, “Theory and Application of the High Velocity Oxygen-Fuel (HVOF) Thermal Spray Process”, *Dublin City University*, 2008, ISBN 1-87232-753-2.
- [3]. Vikash Kumar Pandey, Antariksha Verma, An Experimental Study of Effect of the Parameters of HVOF Coating of WC-10Co-4Cr on Mild Steel Plate, *Imperial Journal of Interdisciplinary Research*, Vol-2, Issue-11, 2016
- [4]. Ayyappan Susila Praveen, J. Sarangan, S. Suresh and B.H. Channabasappa, Optimization and erosion wear response of NiCrSiB/WC-Co HVOF coating using Taguchi method, *Ceramics International*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.09.036>.
- [5]. W. Lih, S.H. Yang, C.Y. Su, S.C. Huang, I.C. Hsu, M.S. Leu, Effects of process parameters on molten particle speed and surface temperature and the properties of HVOF CrCr/NiCr coatings, *Surface and Coatings Technology*. 133-134 (2000) 54-60.
- [6]. W. Fang, T.Y. Cho, J. H. Yoon, K. O. Song, S. K. Hur, S. J. Youn, H. G. Chun, Processing optimization, surface properties and wear behavior of HVOF spraying WC-CrC-Ni coating, *J. Mater. Process. Technol.* 209 (2009) 3561-3567.
- [7]. O. Maranhão, D. Rodrigues, M. Boccacini Jr., A. Sinatora, Influence of parameters of the HVOF thermal spray process on the properties of multicomponent white cast iron coatings, *Surface and Coatings Technology*. 202 (2008) 3494-3500.
- [8]. S. Hong, Y. Wu, B. Wang, Y. Zheng, W. Gao, G. Li, High-velocity oxygen-fuel spray parameter optimization of nanostructured WC-10Co-4Cr coatings and sliding wear behavior of the optimized coating, *Materials and Design*. 55 (2014) 286–291.
- [9]. Taguchi G, Konishi S, Taguchi Methods, orthogonal arrays and linear graphs, tools for quality American supplier institute, *American Supplier Institute*, 1987, pp. 8 - 35.
- [10]. Tiêu chuẩn thép cacbon kết cấu chất lượng tốt, TCVN 1766 - 75, 2009.
- [11]. http://www.mecpl.com/pdf-files/HIPOJET_2700_ONE.pdf
- [12]. Test methods for build - up thermal spraying - JIS-H-8666, 1980.